МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ім. Івана Пулюя

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МІЦНОСТІ
ім. Г.С. Писаренка

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ім. Г.В. Карпенка

ВІЙСЬКОВО-ТЕХНІЧНА АКАДЕМІЯ ІМЕНІ Я. ДОМБРОВСЬКОГО
(Польща)

МАРІБОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ (Словенія)

КОШИЦЬКИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ (Словаччина)

БІЛОСТОЦЬКИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ (Польща)

УНІВЕРСИТЕТ КЛЕРМОН ОВЕРНЬ (Франція)

УКРАЇНСЬКЕ ТОВАРИСТВО З МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ

МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

присвячена 70 - річчю від дня народження
член-кореспондента НАН України,
проф. Яснія Петра Володимировича

«МІЦНІСТЬ І ДОВГОВІЧНІСТЬ СУЧАСНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ»

Праці конференції

10-11 листопада 2022 р.
Тернопіль, Україна

УДК 001+539.4
М70

Головапрограмного комітету
Микола МИТНИК (Україна)
Співголова програмного комітету
Павло МАРУЩАК (Україна)
Голова організаційного комітету
Ігор ОКІПНИЙ (Україна)
Науковий секретар
Іван ПІДГУРСЬКИЙ (Україна)

Члени програмного комітету

Зіновій НАЗАРЧУК (Україна)
Жанетта БРЕЗІНОВА (Словаччина)
Томаш ВУХЕРЕР (Словенія)
Володимир ГУЦАЙЛЮК (Польща)
Анатолій ЗІНЬКОВСЬКИЙ (Україна)
Роман КУШНІР (Україна)
Юрій ЛАПУСТА (Франція)
Григорій НИКИФОРЧИН (Україна)
Олегас ПРЕНТКОВСКІС (Литва)
Ольга ЗВІРКО (Україна)
Георгій СУЛИМ (Польща)
Володимир ЯСНІЙ (Україна)
Олег ЯСНІЙ (Україна)

М70 Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій. Праці Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 10-11 листопада 2022 р.) – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – 265 с.

УДК 001+539.4

ISBN 978-617-7875-43-6

У збірнику висвітлені доповіді Міжнародної науково-технічної конференції "Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій" (Тернопіль, 10-11 листопада 2022 р.). Розглянуто наступні питання: міцність сучасних матеріалів і конструкцій; довговічність сучасних матеріалів і конструкцій; нові та сучасні матеріали та технології; діагностика пошкоджуваності матеріалів і конструкцій.

Відповідальний редактор П.О. Марущак

Всі права захищені. Жодна з доповідей цього видання не може бути повністю чи частково відтворена або розмножена електронним, механічним, фото- чи будь-яким іншим способом без попереднього письмового погодження з програмним комітетом конференції. Всі доповіді відтворено з дозволу їх авторів.

Видавець не несе відповідальності за будь-який збиток, заподіяний особам чи власності внаслідок некоректності наданої в збірнику інформації або при використанні будь-яких методів, виробів чи ідей, які описано в поданих авторами доповідях.

ISBN 978-617-7875-43-6

©Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2022

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

TERNOPIL IVAN PULUJ NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY

G.S. PISARENKO INSTITUTE FOR PROBLEMS OF STRENGTH NAS OF UKRAINE

KARPENKO PHYSICO-MECHANICAL INSTITUTE NAS OF UKRAINE

MILITARY UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (POLAND)

UNIVERSITY OF MARIBOR (SLOVENIA)

TECHNICAL UNIVERSITY OF KOŠICE (SLOVAKIA)

BIALYSTOK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (POLAND)

UNIVERSITY OF CLERMONT AUVERGNE (FRANCE)

UKRAINIAN SOCIETY OF MATERIAL FRACTURE MECHANICS

INTERNATIONAL
SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE
dedicated to the 70th anniversary from the day of birth of
Corresponding member of the National Academy of Sciences of Ukraine,
professor Yasniy Petro

STRENGTH AND DURABILITY OF MODERN MATERIALS AND CONSTRUCTIONS

Proceedings of the Conference

November 10-11, 2022

Ternopil
2022

UDC 001+539.4
M70

Chairman of the Program Committee
Mykola MYTNYK (Ukraine)
Co-Chairmen of the Program Committee
Pavlo MARUSCHAK (Ukraine)
Chairman of the Organizing Committee
Ihor OKIPNYI (Ukraine)
Scientific secretary
Ivan PIDGURSKYI (Ukraine)

Members of the Program Committee

Zinoviy NAZARCHUK (Ukraine)
Janette BREZINOVÁ (Slovakia)
Tomaž VUHERER (Slovenia)
Volodymyr HUTSAYLYUK (Poland)
Anatoliy ZINKOVSKYI (Ukraine)
Roman KUSHNIR (Ukraine)
Yuri LAPUSTA (France)
Hryhorii NYKYFORCHYN (Ukraine)
Olegas PRENTKOVSKIS (Lithuania)
Olha ZVIRKO (Ukraine)
Heorhiy SULYM (Poland)
Volodymyr IASNII (Ukraine)
Oleh Yasniy (Ukraine)

M70 Strength and durability of modern materials and construction. Proceeding of the International Conference "Strength and durability of modern materials and construction" (Ternopil, November 10-11, 2022).– Ternopil: PE Palianytsia V. A., 2022 – 265 p.

UDC 001+539.4

ISBN 978-617-7875-43-6

The book comprises the papers presented at the International Conference "Strength and durability of modern materials and construction" (Ternopil, November 10-11, 2022). Which consider the following problems: strength of modern materials and structures; durability of modern materials and structures; new and modern materials and technologies; diagnosis of damage for materials and structures.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in retrieval system, or transmitted in any means, electronic, mechanical, photo-copying or otherwise, without the prior written permission of the Conference Program Committee. The papers are reproduced by permission of individual authors.

No responsibility is assumed by the publisher for any injury and/or damage to persons or property as a matter of products liability, negligence or otherwise, or from any use or operation of any methods, products, instructions or ideas contained in the material herein.

Edited by P. Maruschak

ISBN 978-617-7875-43-6

©Ternopil Ivan Puluuj National Technical University, 2022

ПЕРЕДМОВА

Міжнародна науково-технічна конференція «Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій», яка відбулась 10-11 листопада 2022 р. у стінах Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, засвідчила значний інтерес до проблеми оцінювання міцності матеріалів і конструкцій. Вона стала неформальною формою співпраці між науковцями, представниками підприємств, з метою впровадження наукових результатів у прикладні розробки та інженерну практику.

Конференцію присвячено 70 - річчю від дня народження член-кореспондента НАН України, професора Яснія Петра Володимировича, який зробив значний внесок у розвиток міцності і довговічності елементів конструкцій, опублікував 286 друкованих праць, з них 8 монографій та 12 патентів.

П.В. Ясній* добре відомий в Україні та за кордоном спеціаліст у галузі механіки руйнування, діагностики міцності та довговічності матеріалів. Він створив теоретичні основи і розробив методи прогнозування впливу історії навантаження, зокрема попереднього пластичного деформування, одноразових і багаторазових перевантажень на міцність і довговічність тіл із тріщинами в умовах квазістатичного навантаження та втоми.

Значний внесок П.В. Яснія у розвиток теорії і методології прогнозування короткотривалої і динамічної повзучості гетерогенних матеріалів з урахуванням деградації їх структури. Запропоновано спосіб розрахунку стрибкоподібної деформації в умовах розтягу та повзучості (динамічної повзучості) алюмінієвого сплаву, який ґрунтується на аналізі розподілу кількості та розміру дисперсних включень первісного матеріалу і досяганні критичного напруження руйнування включень. Це дозволило прогнозувати величину стрибка та накопичену деформацію, що передує стрибкоподібній деформації повзучості (динамічної повзучості).

Наукова діяльність П.В Яснія. відіграла важливу роль у розвитку теорії та практики експериментального визначення впливу температурно-силових факторів на властивості матеріалів. Зокрема, він розробив методологію експертного оцінювання пластичної деформації деталей і елементів конструкцій з матеріалів, що містять крихкі включення іншої фази.

До кола важливих та складних проблем діагностики матеріалів відноситься комп'ютерне моделювання їх фізико-механічної поведінки за наявності крихких включень іншої фази та необхідності урахування їх статистичного розподілу в умовах динамічної повзучості і квазістатичного деформування. Здійснене П.В. Яснієм скінченоелементне моделювання деградації мікроструктури матеріалу в умовах повзучості і динамічної повзучості підтвердило експериментально встановлений ним критерій критичної пошкоджуваності матеріалу в околі вістря тріщини, перевищення якого призводить до її зрушення.

У працях П.В. Яснія розроблено детерміністичні і ймовірнісно-статистичний підходи до моделювання росту втомних тріщин за змінної амплітуди навантаження з урахуванням розкиду розмірів початкового дефекту та характеристик циклічної тріщиностійкості. На цій основі запропоновано методику прогнозування параметрів розподілу залишкової довговічності, критичного розміру дефекту і ймовірності руйнування елементів конструкцій. Із застосуванням таких наукових підходів та

методів, виконано низку важливих прикладних досліджень, присвячених оцінюванню міцності, працездатності та залишкового ресурсу відповідальних елементів обладнання теплової та атомної енергетики, авіаційного і залізничного транспорту, металургії.

П.В. Ясній проводив значну науково-організаційну роботу як ректор і голова Вченої ради Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, голова науково-координаційної ради ЗНЦ НАН України і МОН України у Тернопільській області, член Наукової ради «Фізико-хімічна механіка матеріалів» НАН України, заступник голови Наукової ради з проблеми «Механіка деформівного твердого тіла» НАН України, член Експертної ради при МОН України з експертизи фундаментальних і прикладних науково-дослідних робіт (секція механіки). Був організатором та співорганізатором багатьох міжнародних та національних конференцій з міцності матеріалів і елементів конструкцій.

Авторами статей, що об'єднані у цьому збірнику є як відомі вчені так і інженери-практики, які щиро діляться власним досвідом проведення досліджень міцності матеріалів і конструкцій. Вважаємо, що саме в такий спосіб найактуальніші проблеми фізико-механічної поведінки матеріалів будуть засвоєні та переосмислені читачами щодо впровадження їх у практику експериментального визначення цілісності матеріалів і конструкцій.

Оргкомітет конференції

**Про наукову та науково-організаційну діяльність ректора Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, члена кореспондента НАН України Яснія Петра Володимировича // Бюлетень Західного наукового центру. 2017–2018, Львів: ПАІС, 2018. - С. 153-158 с.*

УДК 620.284
О. Повстяной, д.т.н., проф., Р. Полінкевич, к.т.н., доц., Н. Редько, асп.
Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ПОРИСТИХ ПРОНИКНИХ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

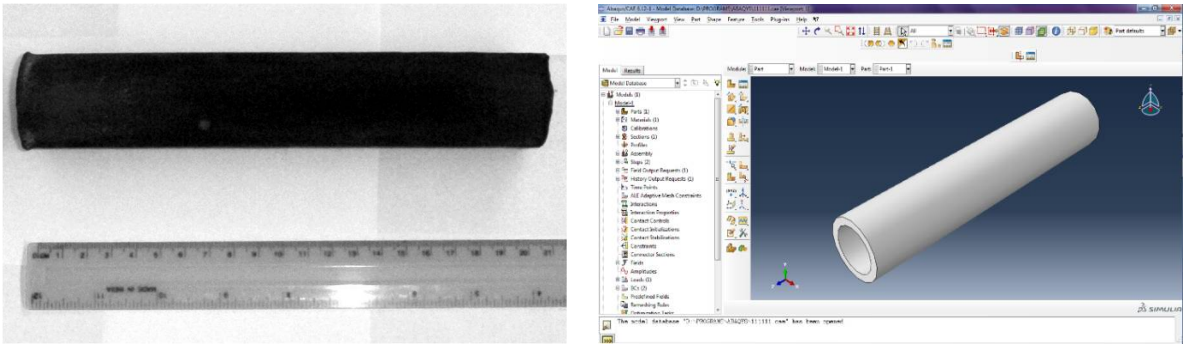
O. Povstianoi, Dr., Prof., R. Polinkevich, Ph.D, Assoc. Prof., N. Redko, graduate student
Lutsk National Technical University

RESEARCH OF THE STRENGTH OF POROUS PERMEABLE MATERIALS USING COMPUTER SIMULATION METHODS

Abstract. The strength of porous permeable materials significantly affects the quality of the final product, and therefore, among the new methods of its determination, the use of computer modeling is important, which is based on the finite element method, and with which it is possible to predict the quality indicators of the final product and analyze the stress-strain state under the influence of mechanical loads.

Аналіз міцності пористих проникних матеріалів (ППМ) за допомогою комп'ютерних технологій проводили науковці у своїх дослідженнях[1-3]. Особливість цих робіт в тому, що за допомогою тих чи інших математичних моделей, програмних комплексів, а також розроблених алгоритмів розглядається структура уже сформованих ППМ під дією механічних навантажень.

Моделювання та дослідження міцності ППМ проводили у програмному комплексі ABAQUS. Досліджувався пористий проникний матеріал зовнішнім діаметром 40 мм, внутрішнім діаметром 30 мм і довжиною 220 мм, виготовлений із матеріалу – порошок сталі ШХ15 (рис.1) і навантажений силою P=10 кПа, яка прикладена до тіла ззовні та зсередини.



а) б)

Рис. 1. Загальний вигляд (а) та модель (б) ППМ виготовленого з порошку ШХ15

Візуальне відображення прикладання тиску ззовні представлено на рис.2.

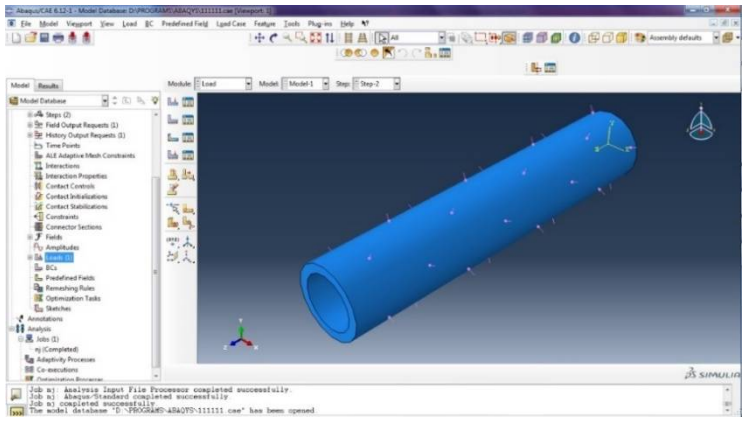


Рис. 2. Модельне відображення прикладених до ППМ навантаження

Як критерій міцності у програмному комплексі ABAQUS цього разу вибираємо кількість питомої потенціальної енергії формозміни, накопиченої здеформованим ППМ. Небезпечний стан (текучість) у загальному випадку напруженого стану виникає тоді, коли питома потенціальна енергія формозміни досягне свого критичного значення. Еквівалентне напруження за четвертою теорією Губера-Мізеса буде рівним:

$$\sqrt{\frac{1}{2}}[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2] \le [\sigma] \qquad (1)$$

Далі проводяться розрахунки та отримуються результати прикладання тиску ззовні (рис.3).

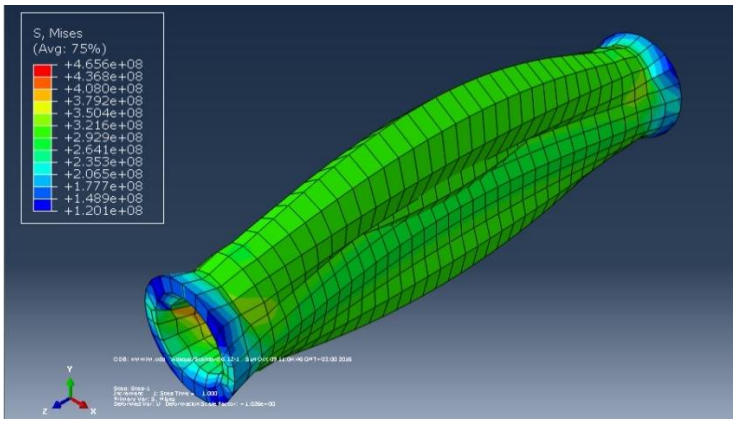


Рис. 3. Розподілення навантаження на ППМ за критерієм максимального напруження за Губером-Мізесом ззовні

У даному випадку ми отримуємо модельне уявлення розподілення навантаження на ППМ за критерієм максимального напруження за Губером-Мізесом. Деталь відображається в деформованому вигляді. Зеленим кольором показано допустимі навантаження на ППМ за критерієм максимального напруження за Мізесом, а червоним відображено перевищення гранично допустимих навантажень.

Змінимо критерій руйнування в ABAQUS) і відображуємо розподілення по тиску (рис.4).

У даному випадку ми отримуємо модельне відображення розподілення навантаження на ППМ за критерієм руйнування. Деталь відображається в деформованому вигляді. Зеленим кольором показано допустимі навантаження на ППМ, а червоним відображено перевищення гранично допустимих навантажень.

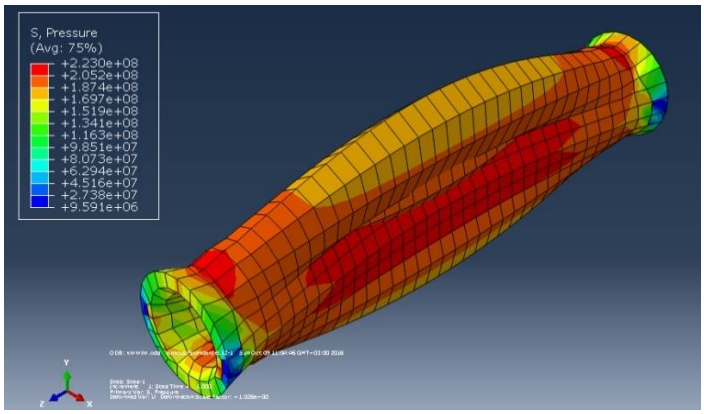


Рис. 4. Розподілення деформацій по ППМ під дією заданого тиску

Результати моделювання та дослідження міцності представлено у вигляді графічної залежності, яка представлена на рис.5.

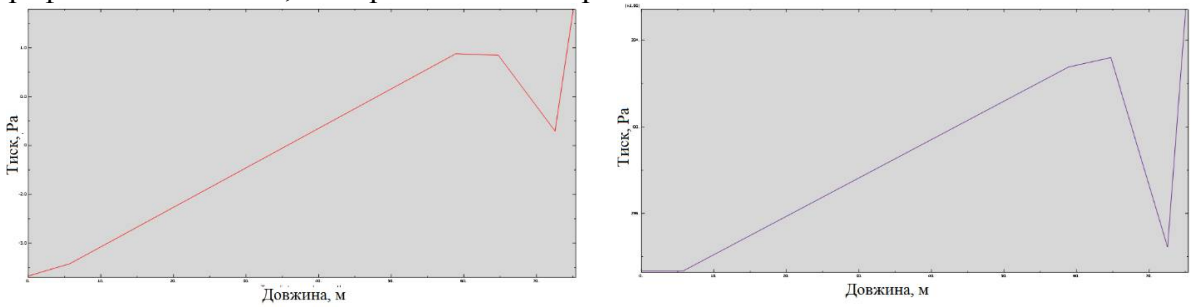


Рис. 5. Графіки залежності тиску, що діє на ППМ від довжини перерізу (а) та зсередини (б)

Як видно з рис.5 чим далі від зони закріплення ППМ діє навантажувальне середовище (вода, повітря, газ), тим більший тиск створюється у ППМ. У нашому випадку тиск зсередини при проходженні води менше діє на ППМ, ніж тиск, прикладений ззовні.

Організація програмного середовища моделювання ABAQUS надає можливість досліджувати та прогнозувати закономірності формування структури та властивості матеріалів з урахуванням розмірів структурних елементів, встановлення кореляційних зв'язків між складовими, будовою; а також використовується для аналізу напружено-деформованого стану під дією механічних та термічних навантажень, базою для яких слугує метод скінчених елементів.

Література

1. Повстяной О. Ю., Рудь В. Д., Імбірович Н. Ю., Гальчук Т. Н., Четвержук Т. І., Смаль М. В., Дзюбинський А. В. «Оптимізація властивостей багатошарових поруватих проникних матеріалів». Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2020. Том 56. №4. С. 88-92

2. Chindaprasirt P., Hatanaka S., Mishima N., Yuasa Y., Chareerat T. Effects of binder strength and aggregate size on the compressive strength and void ratio of porous concrete. Int. J. Miner. Metall. Mater. 2009;16:714–719.

3. Lim E., Tan K.H., Fwa T.F. Effect of Mix Proportion on Strength and Permeability of Pervious Concrete for Use in Pavement. J. East. Asia Soc. Transp. Stud. 2013;10:1565–1575.

УДК 539.4.015: 658.512
Й. Лучко[1], д.т.н., проф., О. Кузін, д.т.н., доц., В. Копилов[2], д.т.н., проф., М. Кузін[3,4], д.т.н., проф.
[1]Львівський національний університет природокористування, Україна,
[2]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна,
[3]Львівський інститут Українського державного університету науки і технологій,
[4]Львівський науково-дослідний інститут судових експертиз

РОЗРОБКА ПІДХОДІВ ДО ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЙ ЗМІЦНЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРУЖЕНЬ МЕТОДАМИ ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ

Y. Luchko, Dr., Prof., O. Kuzin, Dr., Assoc. Prof., V. Kopylov, Dr., Prof., M. Kuzin, Dr., Prof.
[1] Lviv National Agrarian University, Ukraine,
[2] National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
[3] Lviv Institute of Ukrainian State University of Science and Technologies, Ukraine,
[4] Lviv Research Institute for Forensic Expertise, Ukraine.

DEVELOPMENT OF APPROACHES TO OPTIMIZATION TECHNOLOGIES OF HARDENING STRUCTURAL ELEMENTS WITH STRESS CONCENTRATORS BY SURFACE ENGINEERING METHODS

Abstract. The problem of ensuring the required level of operational parameters of structures with the presence of stress concentrators is considered. The ways of controlling the contact strength by the formation of a given distribution of mechanical properties in the body are proposed. These approaches make it possible both to optimize the technologies of hardening parts and determine the causes of their failure.

Вступ. Однією із важливих особливостей функціонування сучасних машин, механізмів та конструкцій транспортних систем є наявність значної кількості концентраторів напружень, які суттєво впливають на параметри працездатності виробів [1, 2].

В цьому зв’язку необхідно передбачити можливість «технологічного компенсування» наявності концентраторів, щоб мінімізувати їх негативний вплив на надійність виробу в експлуатації і забезпечити задані по тілу міцністні властивості в умовах силових навантажень [3].

Просторова постійність міцністних властивостей в тілі має також назву рівноміцності і є однією із найбільш поширених експлуатаційних умов для виробів [4].

Огляд літератури. Питання ролі концентраторів напружень та їх впливу на експлуатаційні властивості виробів почали активно з’являтись в літературі із першої половини 20 століття [2].

При цьому для встановлення зміни параметрів напружено-деформованого стану навколо концентраторів найпростішої форми використовувався аналітичний апарат математичного моделювання. Він дозволяє визначати якісну картину зміни напружень в тілі навколо концентраторів. Разом із тим аналітичний апарат надзвичайно важко використовувати коли властивості матеріалу мають градієнтну зміну або концентратори напружень є неканонічної форми [1].

Із розвитком комп’ютерної техніки для розв’язання задач зміни міцністних параметрів конструкції все частіше використовується числове математичне моделювання.

На даний час розглянута оптимізація технології поверхневого плазмового зміцнення при наявності концентраторів напружень кругового типу, запропоновані підходи щодо впливу кута орієнтації еліптичного дефекту та його розмірних параметрів на формування експлуатаційних характеристик функціонально-градієнтних конструкцій [5, 6].

Відмітимо, що під час функціонування конструкції в ній через різні фактори можуть з'являтись нові концентратори напружень. Проте питання узагальненого формування просторової неоднорідності властивостей у матеріалі деталей при змінних параметрах концентраторів напружень для забезпечення рівноміцності конструкції при заданих режимах експлуатації в літературі не наведені.

Постановка задачі формування оптимальної просторової структурної неоднорідності при зміні параметрів концентраторів напружень.

Узагальнена постановка задачі встановлення експлуатаційних характеристик деталей із нелокальними механічними властивостями та довільною орієнтацією еліптичних концентраторів напружень подана у роботі [5]. Базуючись на результатах роботи, запропонуємо наступну двовимірну задачу встановлення оптимальних параметрів функціонально-градієнтних конструкцій при змінних в часі характеристиках концентраторів напружень.

Нехай досліджуване тіло займає область простору X, елементи поверхні позначимо ∂X. Поверхню ∂X в будь-який момент часу τ подамо у вигляді наступної сукупності множин:

$$\partial X(\tau) = \partial X_1(\tau) \cup \partial X_2(\tau) \cup \partial X_3(\tau), \quad (1)$$

де $\partial X_1(\tau)$ - область, де задані силові навантаження, $\partial X_2(\tau)$ - область, де задані переміщення, $\partial X_3(\tau)$ - ненавантажена область поверхні.

Приймемо, що в області X в будь-який момент часу τ є $N(\tau)$ концентраторів напружень $Z_i(\tau)$, кожен із яких характеризується вектором із M параметрів $\left(y_1^i(\tau),...,y_M^i(\tau)\right)$, де i - номер концентратора.

В якості математичної моделі середовища тіла використаємо модель просторово-нелокального континууму, яка представлена у роботі [7]. В результаті силових навантажень в тілі формується напружений стан, який характеризується тензором $\hat{\sigma} = \hat{\sigma}(x,\tau)$, $x \in X$.

Аналіз контактної міцності (деталі) будемо проводити згідно із залежністю:

$$k(x,\tau) = 1 - \frac{\sigma^*(x,\tau)}{\sigma_m(x,\tau)}, \quad (2)$$

де $k(x,\tau)$ - коефіцієнт запасу міцності, $\sigma^*(x,\tau)$ - скалярний еквівалент представлення тензора напружень, $\sigma_m(x,\tau)$ - скалярний міцністний еквівалент матеріалу.

Як видно із співвідношення (2), при $k(x,\tau) \in (0...1)$ - знеміцнення відсутнє, при $k(x,\tau) \le 0$ - знеміцнення відбувається.

Згідно прийнятого апріорі на початку роботи припущення в якості критерію оптимальності рівноміцності деталі в умові $k(x,\tau) = k_*(\tau) = const$, для $x \in X$, $k_*(\tau)$ - прийнятий рівень контактної міцності тіла в момент часу τ.

При аналізі роботи конструкції в період її експлуатації приймемо, що функціонал L, який визначає мінімальний рівень контактної міцності конструкції, має бути вище її критичного значення:

$$L = \min_{\tau \in [t_1, t_2]} k_*(\tau) \ge k_0, \quad (3)$$

де k_0 - критичне значення величини контактної міцності конструкції.

Зрозуміло, що величина L в загальному випадку залежить від наступної множини:

$$L = L\left(\partial X_1(\tau), \partial X_2(\tau), \partial X_3(\tau), Z_i(\tau)\right). \quad (4)$$

В якості параметрів управління виступають складові – константи моделі [7] властивості матеріалу $K(x)$, $G(x)$, $\alpha_1(x)$, $\alpha_2(x)$, $\alpha_3(x)$, де $K(x)$ - модуль об'ємного стиску, $G(x)$ - модуль зсуву, $\alpha_1(x)$, $\alpha_2(x)$, $\alpha_3(x)$ - нелокальні характеристики розподілу пошкоджуваності.

В результаті узагальнена постановка задачі управління експлуатаційною міцністю деталей в часі зводиться до забезпечення методами інженерії поверхні властивостей матеріалу $K(x)$, $G(x)$, $\alpha_1(x)$, $\alpha_2(x)$, $\alpha_3(x)$, які дозволяють функціонування деталі вище заданого критичного рівня рівноміцності конструкції, тобто умову (3).

Відмітимо, що використання запропонованої у роботі методології можна проводити як для оптимізації поверхневого зміцнення деталей і без наявності концентраторів напружень [8], так і для встановлення причин виходу із ладу конструкцій [9].

Висновки.

1. На основі сучасних підходів прикладної механіки розглянута задача оптимізації конструкцій із концентраторами напружень.
2. Побудований функціонал, який дозволяє оцінювати рівень зміни контактної міцності конструкції в часі.
3. Запропоновані у роботі підходи дозволяють проводити оптимізацію технологій зміцнення деталей за критерієм рівноміцності конструкцій і встановлювати причини виходу їх із ладу.

Література.

1. Murakami Yukitaka Theory of elasticity and stress concentration. – Wiley, 2017. – 446 p.
2. Лучко Й.Й., Распопов О.С. Будова та експлуатація штучних споруд. – Львів: Каменяр, 2011. – 879 с.
3. Ляшенко Б.А. , Новиков М.В., Клименко С.А. Дискретное модифицирование поверхностного слоя деталей машин и инструментов. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля, 2017. – 264 с.
4. Черепанов Г.П., Ершов Л.В. Механика разрушения. – М.: Машиностроение, 1977. – 224 с.
5. Stotsko Z.A., Kuzin O.A., Kuzin M.O., Mechnik V.A. Estimation of strength properties of functionally graded structures with elliptical stress// Archives of Materials Science and Engineering. – 2022. – v. 113, No. 1. – p. 35-41.
6. Lyashenko B.A., Stotsko Z.A., Kuzin O.A., Kuzin M.O., The use of computational contact mechanics approaches to assess the performance of parts bearing stress concentrators// Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. - 103/1. – 2020. – p. 25-32.
7. Kuzin O., Lukiynates B., Kuzin N., Continual description of polycrystalline systems taking into account their structure// Technology audit and production reserve. – 1/1(45) – 2019. – p. 25-30.
8. Kopylov V., Kuzin O., Kuzin N. Application of computational mechanics approaches for increasing of tribosystem operational parameters by using plasma hardening method// Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics. – 20/1. – 2021. – p. 61-70.
9. Kuzin N, Meshcheryakova T., Kuzin O., Kurileva E., Gordinskaya N. The use of mathematical and computer modelling in solving the problems or rail transport expert examination// Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics. – 15/4. – 2016. – p. 93-98.

УДК 625.151.2.001.4, 531.01
В. Ковальчук[1], д.т.н., доц., Й. Лучко[2], д.т.н., проф.
[1]Львівський інститут Українського державного університету науки і технологій
[2]Львівський національний університет природокористування

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ, ЩО ДІЮТЬ НА МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ МОСТІВ

V. Kovalchuk[1], Dr., Assoc. Prof., J. Luchko[2], Dr., Prof.
[1] Lviv Institute of Ukrainian State University of Science and Technologies, Ukraine,
[2] Lviv National Agrarian University, Ukraine,

RESEARCH OF HEAT FLOWS ACTING ON METAL STRUCTURES OF TRANSPORT BRIDGES

Abstract. Experimental measurements of the temperature distribution on the surfaces of metal sheets of transport structures under the influence of positive and negative ambient temperatures were carried out. The method of evaluation of heat flows acting on metal structures of transport facilities in the conditions of their operation is given.

It was established that the amount of heat flows absorbed by the metal corrugated structure of transport facilities depends on the geographical location of the facility, the period of the year and the time of day.

В останні роки в Україні почалося будівництво транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій (мостів, тунелів, труб). Такі споруди складаються з багатолистових гофрованих металевих листів, які з'єднуються між собою за допомогою високоміцних болтів. У результаті можна отримати транспортну споруду запроектованого поперечного перетину і відповідної кривизни [1-3].

Однак в умовах експлуатації металеві конструкції транспортних споруд зазнають дії різноманітних температурних впливів та навантажень. Що призводять до пошкодження поверхневих шарів металевих листів (антикорозійного захисту). На рис. 1 наведено характерні пошкодження металевого гофрованого листа споруди.

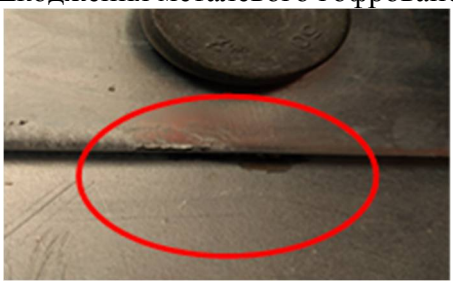


Рис. 1. Пошкодження антикорозійного цинкового покриття металевих конструкцій в умовах експлуатації

Із можливих причин появи пошкоджень верхніх покриттів конструкцій розглядається причина високого рівня температур на границях «сталевий лист-покриття». Це може бути викликано нерівномірною дією температурних навантажень у різні пори року. Скажімо, однобічним нагріванням поверхні споруди влітку. Тому оцінка впливу кліматичних температурних перепадів на рівень теплових потоків, які зазнає споруда в умовах експлуатації є актуальною задачею наукових досліджень, що неодноразово підкреслювалося у наукових працях [4–10].

З метою оцінки рівня теплових потоків, що діють на металеві гофровані конструкції транспортних споруд, були проведені експериментальні вимірювання

температури поверхні металевих конструкцій. Вимірювання проводились на реальній транспортній споруді із металевих гофрованих конструкцій у різні пори року та години доби.

Максимальне додатнє та мінімальне від'ємне значення температур металевого листа споруди, що були зафіксовані у процесі експерименту становили, відповідно +38,7 ºС та -27,5 ºС.

На основі отриманих значень температури поверхні металевого листа споруди, за методикою, що наведена у роботах [6–7], розраховано величини теплових потоків, що поглинаються металевими листами транспортної споруди.

Результати розрахунків теплових потоків наведено на рис. 1.

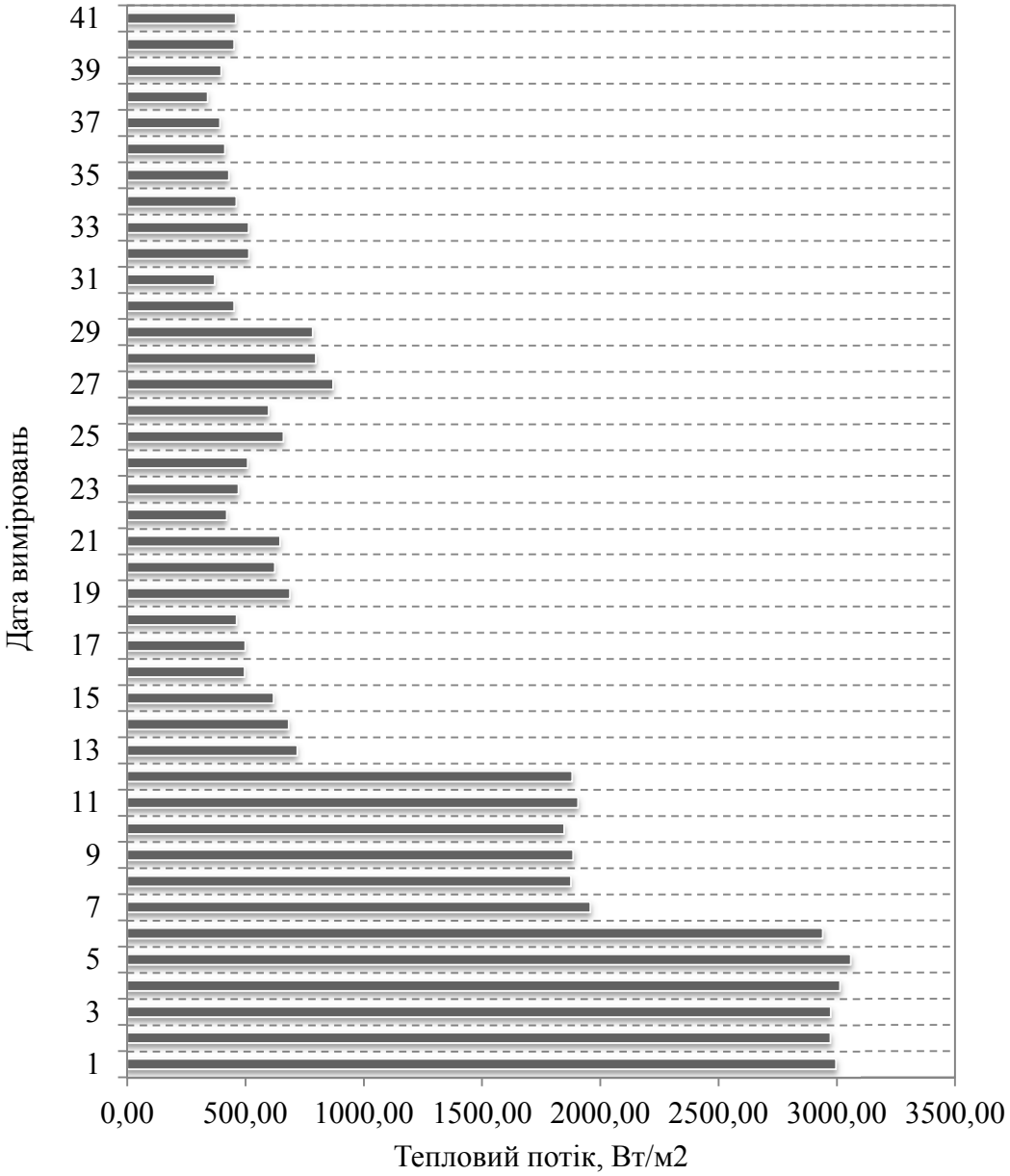


Рис. 1. Значення теплових потоків, що поглинаються металевими конструкціями транспортної споруди

Встановлено, що максимальне значення теплового потоку, який поглинає металева конструкція становило 3059,09 Вт/м^2.

Слід зазначити, що такі дослідження дозволять у майбутньому проводити оцінку рівня температурних напружень та деформацій металевих конструкцій, які зазнають дії кліматичних впливів. Що дасть змогу провести оцінку несучої здатності та надійності транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій на кліматичні температурні впливи та встановити причини пошкоджень тонких покриттів металевих конструкцій в умовах експлуатації.

Література

1. Kovalchuk Vitalii. Study of the temperature field and the thermos-elastic state of the multilayer soil-steel structure / Vitalii Kovalchuk, Yuriy Hnativ, Joseph Luchko, Mykola Sysyn // Roads and Bridges – Drogi i Mosty. – 19(1), 2020. – pp. 65–78. DOI: 10.7409/rabdim.020.004.

2. Kovalchuk V. Research and analysis of the stressed-strained state of metal corrugated structures of railroad tracks / V. Kovalchuk, J. Luchko, I. Bondarenko, R. Markul, B. Parneta // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkov – 6/7 (84), 2016. – P. 4–10. doi: http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2016.84236.

3. Gera B. A study of the effects of climatic temperature changes on the corrugated structure of a culvert of a transportation facility / B. Gera, V. Kovalchuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkov. – 3/7(99), 2019. – P. 26–35. doi: 10.15587/1729-4061.2019.168260.

4. AASHTO Guide specifications: Thermal effects in concrete bridge superstructures. Washington. DC: American Association of State Highway and Transportation Officials. – AASHTO, 1989. – 99 p.

5. Лучко Й. Й. Експериментальні дослідження розподілу температур на поверхнях транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій / Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук, І. Б. Кравець, В. С. Джус // Вісник ОДАБА. – Одеса, 2019. – Вип. № 76. – С. 52–62.

6. Лучко Й. Й. Алгоритм визначення граничних умов, для дослідження температурних напружень та деформацій балкових конструкцій залізничних мостів від кліматичних впливів / Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук // Вісник ОДАБА. – Одеса, 2012. – №46. – С.233-243.

7. Лучко Й. Й. Вимірювання напружено-деформованого стану конструкцій мостів при змінних температурах і навантаженнях. Монографія / Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук – Львів: Каменяр, 2012. – 235 с.

8. Лучко Й. Й. Термонапружений стан конструкційних бетонів, залізобетонних і сталебетонних конструкцій та мостів [текст]: [Монографія] / Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук, І. І. Кархут. – Львів: Світ. – 2020. – 327 с. ISBN 978-966-914-173-6.

9. Лучко Й. Й. Визначення температурних напружень та деформацій у металевих прогонових будовах мостів / Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук // Збірник наук. праць Дніпропетровського нац. ун-ту. залізн.. транспорту ім..академ. В. Лазаряна «Мости і тунелі». – Дніпропетровськ, 2013. – Вип.4. – С. 26–36.

10. Лучко Й. Й. Експериментальні дослідження розподілу температури на поверхнях прогонових будов залізничних мостів / Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук // [Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології: Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції. – Серія «Техніка, технології»]. – К.:ДЕТУТ, 2013. – С. 119-120.

УДК 539.4.015: 658.512
М. Шульженко, д.т.н., проф., А. Ольховський
Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, Україна

ОЦІНКА ЗМІНИ ВІБРОМІЦНОСТІ ЛОПАТОК ПОТУЖНОЇ ПАРОВОЇ ТУРБІНИ ПІСЛЯ ЇХНЬОГО РЕМОНТУ

M. Shulzhenko, Dr., Prof., A. Olkhovsky
A. Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering Problems, Ukraine

EVALUATION OF CHANGES IN THE VIBRATION STRENGTH OF BLADES OF A POWERFUL STEAM TURBINE AFTER THEIR REPAIR

Abstract. The research is related to the need to assess the possibility of prolonging the trouble-free operation of turbine blades of the K-1000-60/3000 type. The change in the maximum stresses of the blades under the load from the steam flow with one damaged blade after repair is determined. Three-dimensional finite-element models of components and the corresponding mathematical support for the calculation of stationary harmonic oscillations are used.

Останні ступені парових турбін К-1000-60/3000 працюють в умовах волого-парового середовища. Після відпрацювання понад 180 тис. годин виявляється помітна ерозія на ряді лопаток. При цьому іноді спостерігаються сліди пластичних деформацій, що може призводити до появи мікротріщин і до розвитку аварійних ситуацій. Ерозійні пошкодження розташовуються щільно у верхній третині вхідних кромок та у нижній третині вихідних кромок лопаток. Для таких лопаток рекомендується проводити згладжування пошкоджень під час профілактичних зупинок турбін.

В даній роботі на основі чисельно-розрахункового дослідження вимушених коливань лопаток на диску від дії розподілених гармонічних навантажень на лопатки, що моделюють вплив паропотоку, оцінюється зміна максимальних еквівалентних напружень для різних варіантів обробки лопаток при видаленні пошкоджених ерозійних зон.

Розглядається декілька варіантів тривимірних скінченно-елементних моделей окремих лопаток та системи диск-лопатки. Тривімірна скінченноелементна модель системи диск-лопатки складається з 60 тис. елементів та має понад 175 тис. вузлів. Використовувались призменні та тетраедальні криволінійні скінченні елементи. Демпфування в системі враховувалось за Фойхтом відповідними коефіцієнтами. Отримано результати чисельного дослідження впливу видалення частини лопаток в зоні ерозійних пошкоджень після відновлювального ремонту на вібраційні характеристики окремих лопаток та в системі облопаченого диска з урахуванням бандажної стрічки. Визначається залежність максимальних еквівалентних напружень від частоти збудження в широкій області частот. Навантаження задається рівномірно розподіленим та лінійно змінним вздовж лопатки. Приймається, що фізико-механічні характеристики матеріалу лопаток зберігаються (як для вихідного варіанта) після ремонту лопаток і обробки їх поверхні. Всі лопатки вважаються однаково обробленими так, що циклічна симетрія системи не порушується.

Показано, що зі зменшенням хорди лопаток у нижній частині після ремонту лопаток можуть з’являтись частотні області підвищеної вібрації. В нижній частині лопаток збільшуються максимальні напруження в порівнянні з вихідним варіантом без пошкоджень. Оцінюється можливість подовження ресурсу лопаток після ремонту і

обробки за багатоциклової втоми. Ресурс безпечної експлуатації лопаток може бути продовжений, якщо їх хорда в нижній частині не менша за 150 мм.

Вказані вище результати отримані для циклічно симетричної системи диск-лопатки. Після тривалої експлуатації на практиці спостерігаються випадки, коли значні ерозійні пошкодження мають місце на одній або декількох поряд розташованих лопатках. Під час їхньої експлуатації та після відновлювального ремонту цих лопаток система стає суттєво циклічно несиметричною. Тому оцінка зміни напруженості лопаток для таких циклічно несиметричних систем має значний інтерес і практичне значення.

Нижче розглядається зміна напруженості лопаток на диску, сполучених бандажною стрічкою при наявності в системі однієї пошкодженої лопатки після її відновлювального ремонту. Зміна геометрії лопаток задавалась в нижній третині на вихідний кромці, хорда лопатки задавалась мінімально допустимою 150 мм, що встановлено для циклічно симетричної системи з усіма однаково обробленими лопатками. Розрахункове визначення реакції системи на гармонічне збудження, що моделює вплив парового навантаження, дозволяє прогнозувати зміну залишкового ресурсу лопаток ступеню, породженою циклічною несиметрією системи. При цьому основна увага приділяється області частот 50 та 2100 Гц, оскільки на робочому режимі діє навантаження, що викликане паропотоком від напрямних лопаток. Його частота є кратною частоті обертання 50 Гц та числу напрямних лопаток 42 і дорівнює 2100 Гц. Основними причинами збудження коливань системи диск-лопатки з частотою 50Гц є залишкова неврівноваженість системи та вібрації ротору на масляному шарі підшипників в сталому режимі експлуатації (без наявності автоколивань).

На основі чисельного дослідження максимальних еквівалентних напружень в лопатках для циклічно несиметричних систем можна відмітити наступне.

Максимальні еквівалентні напруження в лопатках суттєво залежать від частоти збудження. При її зростанні напруження в середньому зменшуються, проте в окремих випадках в областях частот обертання та збудження збільшуються. В області частоти обертання максимальні напруження в системі без пошкоджень, а особливо з усіма пошкодженими і однаково обробленими лопатками, більші за напруження в системі з порушенням циклічної симетрії. В областях частоти збудження 2100 Гц напруження в системі без пошкоджень та з усіма пошкодженими і однаково обробленими лопатками значно менші за напруження в лопатках в системі з порушенням циклічної симетрії. Виключення спостерігаються в деяких лопатках, що розташовані ліворуч від пошкодженої (проти обертання ступеню) та праворуч від пошкодженої (за обертанням ступеню).

В циклічно несиметричній системі максимальні напруження в лопатках, що розташовані зліва та справа від пошкодженої лопатки змінюються по різному. В середньому лопатки зліва від пошкодженої мають більші напруження, ніж лопатки справа. Причому, при віддалені від пошкодженої лопатки, напруження змінюються хвильоподібно від лопатки до лопатки. Значні збільшення (в декілька разів) напружень спостерігаються в першій лопатці зліва від пошкодженої та в 39 лопатці справа від пошкодженої (за обертанням ступеню). В пошкодженій лопатці вони близькі до напруження в першій зліва, але зі збільшенням частоти різко зменшуються. А в першій зліва від пошкодженої – різко зростають і перевищують напруження, які спостерігаються в 39 лопатці, що знаходиться справа від пошкодженої Вказане суттєво впливає на надійність роботи і довговічність ступеню турбіни.

Таким чином, з появою і розвитком нерівномірного ерозійного пошкодження лопаток при експлуатації турбіни система стає циклічно несиметричною. Це суттєво може вплинути як на вібраційний стан ротора, так і на напруженість лопаток, та навіть може бути причиною розвитку аварійної ситуації.

УДК 621.762
В. Ковбашин[1], к.х.н., доц., І. Бочар[2], к.т.н., доц.
[1]Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
[2]Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка

СКЛАД СУМІШІ ДЛЯ СИЛІЦІЮВАННЯ ТА БОРУВАННЯ ВИРОБІВ ІЗ КАРБІДУ КРЕМНІЮ ТА ДИСИЛІЦИДУ МОЛІБДЕНУ

Vasiliy Kovbashyn[1], Ph.D., Assoc. Prof., Igor Bochar[2] , Ph.D., Assoc. Prof.
[1]Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine,
[2]Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine

THE COMPOSITION OF THE MIXTURE FOR SILICATION AND BORATION OF SILICON CARBIDE AND MOLYBIDEN DISILICIDE PRODUCTS

Abstract. The basic composition of a mixture for the treatment of ceramic materials based on reactive sintered silicon carbide and molybdenum disilicide is described. The technological and technological conditions of treatment of non-metallic ceramic materials depending on the composition of the silicidal and boride powder mixture were investigated and analyzed. It has been found that it is possible to increase the performance characteristics of powder mixtures for siliconization and boring by using a complex activator.

Існуючі технології обробки реакційно-спечених керамічних матеріалів на основі карбіду кремнію та дисиліциду молібдену не забезпечують високотемпературного захисту під час експлуатації. . Насичувальна здатність робочих сумішей (силіцидної і боридної), які використовуються для обробки реакційно-спечених керамічних матеріалів на основі карбіду кремнію та дисиліциду молібдену дуже низька та енергетично затратна. Мета запропонованої технології – підвищення насичуючої здатності складу силіцидної та боридної сумішей для обробки виробів на основі реакційно-спеченого карбіду кремнію і дисиліциду молібдену, які працюють в окислювальному середовищі при високій температурі та різкій зміні теплового режиму. Найбільш близьким до описаного технічного результату є склад для силіціювання виробів [1]: кремній (*Si*) 60-80 %; фтористий натрій (*NaF*) 5-10 %; оксид алюмінію (Al_2O_3) – решта, при температурі процесу 1150 ^oC (прототип). До недоліків такого складу суміші відносяться: велика витрата кремнію та фтористого натрію і висока вартість суміші. Тому виникла необхідність пошуку шляхів вдосконалення обробки реакційно-спечених керамічних матеріалів.

Розроблений склад сумішей для обробки реакційно-спечених керамічних матеріалів на основі карбіду кремнію та дисиліциду молібдену відноситься до напряму хіміко-термічна обробка в галузі порошкова металургія і може бути рекомендована до застосування в електронній промисловості та у виробництві електротермічних пристроїв. Поставлена мета досягається тим, що у склад суміші для силіціювання виробів із карбіду кремнію та дисиліциду молібдену, який містить кремній, фтористий натрій і оксид алюмінію, додатково вводиться гідрид титану при наступному співвідношенні компонентів (мас. %): кремній (*Si*) – 40-60 %; фтористий натрій (*NaF*) – 1-5 %; гідрид титану (TiH_2) – 5-10; оксид алюмінію (Al_2O_3) – решта.

Компоненти порошкової суміші виконують такі функції: кремній є силіціюючим агентом, фтористий натрій і гідрид титану – активуючі добавки, які значно прискорюють процес дифузійного силіціювання, оксид алюмінію (інертний

розріджувач) запобігає спіканню основних компонентів суміші та їх припіканню до поверхні керамічних матеріалів.

У запропонованій технологічній обробці кремній (*Si*), фтористий натрій (*NaF*), гідрид титану (TiH_2) використовуються у вигляді порошків зернистістю до 100 *мкм*. Порошок оксиду алюмінію (Al_2O_3) використовується зернистістю 40-80 *мкм*.

Дифузійне силіціювання реакційно-спечених керамічних матеріалів із використанням заявленого складу суміші проводять у термічній камерній печі з повітряним середовищем у спеціальних контейнерах, які виготовленні із жаростійкої сталі.

Для проведення дифузійного силіціювання використовували карбід кремнію (*SiC*) і дисиліцид молібдену ($MoSi_2$) із яких виготовляли зразки розміром: довжина 20 *мм*; діаметр 6-8 *мм*. Верхню частину контейнера упаковували кварцовим піском, склом з температурою розм'якшення 950-1050 ^oC і азбестовим картоном товщиною 1-2 *мм.*

Після проведених технологічних операцій контейнер поміщали в термічну камерну піч і нагрівали до температури 1100 ^oC. Процес дифузійного насичення реакційно-спечених керамічних зразків тривав 8 годин. У результаті використання комплексного активатора (фтористий натрій + гідрид титану) процес дифузійного насичення прискорюються в 2 рази.

При проведенні досліджень використовували такі склади порошкової суміші (мас. %):

а) *Si* – 40; *NaF* – 1; TiH_2 – 5; Al_2O_3 – решта;

б) *Si* – 50; *NaF* – 3; TiH_2 – 7; Al_2O_3 – решта;

в) *Si* – 60; *NaF* – 5; TiH_2 – 10; Al_2O_3 – решта;

г) *Si* – 80; *NaF* – 10; TiH_2 – 5; Al_2O_3 – решта (прототип).

Даний склад порошкової суміші може бути запропонований для дифузійного насичення реакційно-спечених керамічних матеріалів, а також тугоплавких металів, які використовуються для виготовлення різного типу конструкційних елементів високотемпературного обладнання.

Дифузійне насичення металів і сплавів бором застосовується з метою підвищення поверхневої твердості та стійкості до спрацювання. Мета запропонованої технології – підвищення насичуючої здатності складу боридної суміші. Найбільш близьким до описаного технологічного процесу є склад суміші для борування керамічних виробів [1,2], який містить (мас. %): карбід бору (B_4C) 80-90; оксид алюмінію (Al_2O_3) – решта. Процес проводять у вакуумі (p=1300 *Па*), температура нагрівання 1400 ^oC (прототип). До недоліків такого складу відносяться: велика втрата карбіду бору та енергоємність процесу.

Поставлена мета досягається тим, що в склад суміші для борування виробів із реакційно-спеченого карбіду кремнію та дисиліциду молібдену, які містять аморфний бор, фтористий натрій і оксид алюмінію, додатково вводиться гідрид титану при наступному співвідношенні компонентів (масю %): аморфний бор (*B*) – 20-40 %; фтористий натрій (*NaF*) – 1-5 %; гідрид титану (TiH_2) – 5-10; оксид алюмінію (Al_2O_3) – решта.

Зразки карбід кремнію (*SiC*) і дисиліцид молібдену ($MoSi_2$) виготовляли таким розміром: довжина 20 *мм*; діаметр 6-8 *мм*. Технологічний процес передбачає використання також кварцового піску, скла з температурою розм'якшення 950-1050 ^oC і азбестового картону товщиною 1-2 *мм*. Після укладання суміші контейнер герметизують будь-яким відомим способом, віддаючи перевагу наведенню плавкого затвору. Запакований контейнер поміщають в термічну камерну піч, яка нагріта до температури 1100 ^oC і процес дифузійного насичення триває 8 годин.

Під час нагрівання контейнера відбувається окислення аморфного бору із утворенням субоксиду B_2O_3, який переносить бор до поверхні кераміки. Одночасно відбувається взаємодія аморфного бору з фтористим натрієм, внаслідок чого утворюються фториди бору (BF_3, BF_2). Вони взаємодіють на поверхні кераміки з утворенням атомарного бору, який дифундує в основу. Гідрид титану розкладається, в результаті чого в об'ємі контейнера утворюється відновлюючи газове середовище і відновлюються оксидні плівки, що є на поверхні кераміки, а також утворюються гідриди бору, які є транспортерами бору. Таким чином, спільна дія кисневого, галогенного і водневого транспорту бору, а також відновлення оксидних плівок дозволяє значно інтенсифікувати процес борування матеріалів з реакційно-спеченого карбіду кремнію та дисиліциду молібдену.

Використання комплексного активатора (NaF і TiH_2) прискорює в 2 рази процес дифузійного насичення, про що свідчать результати досліджень проведені авторами запропонованої технології.

Використовували такі склади порошкової суміші, (мас. %):

а) аморфний бор – 20; фтористий натрій – 1; гідрид титану – 5; оксид алюмінію решта;

б) аморфний бор – 30; фтористий натрій – 3; гідрид титану – 7; оксид алюмінію решта;

в) аморфний бор – 40; фтористий натрій – 5; гідрид титану – 10; оксид алюмінію решта;

г) карбід бору – 90; оксид алюмінію – решта (прототип).

Аналіз одержаних результатів свідчить про те, що використання комбінованого активатора під час дифузійного борування реакційно-спечених керамічних матеріалів на основі карбіду кремнію та дисиліциду молібдену дає можливість у два рази підвищити насичу вальну здатність боридної суміші.

Запропонований технологічний процес має наступні переваги порівняно з прототипом: зменшення тривалості дифузійного силіціювання в 2 рази, пониження на 50 ^oC температури нагрівання, значна економія електроенергії та витрат порошків кремнію і фтористого натрію.

Розроблена і запропонована технологія має такі переваги порівняно з прототипом: тривалість дифузійного борування скорочується в 1,5 рази і значна економія електроенергії (температура нагрівання зменшується на 300 ^oC порівняно з прототипом).

Порошкові суміші можуть знайти застосування для дифузійного насичення реакційно-спечених керамічних матеріалів, а також тугоплавких металів, які використовуються для виготовлення різного типу конструкційних елементів високотемпературного обладнання.

Література.

1. Ковбашин В.І., Бочар І.Й. Вплив технології силікоборування керамічних матеріалів на властивості захисних покриттів. Вісник Тернопільського національного технічного університету. Тернопіль, 2015. №2 (78). С.130–138.

2. Kovbashyn V., Bochar I. The study of technologies to improve physical-mechanical and chemical properties of reaction sintered ceramic materials on the basis of silicon carbide. *Scientific Journal of the Ternopol National Technical University ISSN 1727-7108. Web: visnyk.tntu.edu.ua*. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. Тернопіль: В-во ТНТУ. №2 (86), 2017. С. 14–20.

УДК 621.891

І. Ярема, к.т.н. доц., Р. Лещук, к.т.н., доц., А. Гупка, к.т.н., доц., В. Буховець, к.т.н. асистент
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

СТРУКТУРНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПІДХІД В КЕРУВАННІ ПОВЕРХНЕВОЮ МІЦНІСТЮ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ТЕРТІ

I. Yarema, Ph.D., Assoc. Prof., R. Leshchuk, Ph.D., Assoc. Prof., A. Gypka, Ph.D., V. Bukhovets, Ph.D.
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

STRUCTURAL AND ENERGETIC APPROACH IN CONTROLLING THE SURFACE STRENGTH OF MATERIALS DURING FRICTION

Abstract. From the standpoint of the structural-energetic theory of friction and wear, general principles of managing the surface strength of materials during friction are proposed. The fundamental principles of tribology and the conditions for the formation of dissipative self-organizing secondary structures are considered. The role of the kinetic phase transition in the energy balance of processes in the zone of frictional contact is determined.

Масштаб та значення проблеми зовнішнього тертя оцінюються великими витратами енергетичних ресурсів на подолання тертя та великими втратами народного господарства зумовленого зносом машин та механізмів. Оптимальне вирішення широких та багатогранних задач триботехніки являється одним із найбільш ефективних і екологічно чистих шляхів економії енергії та матеріалів. На жаль більшість задач триботехніки вирішується малоефективним шляхом, при відсутності виробничого контролю і комплексної системи управління якістю трибосистем (ТС).

Пари тертя відносяться до систем, які обмінюються енергією і речовиною із зовнішнім середовищем. Фундаментальні принципи трибології знаходяться у відповідності до першого та другого законів термодинаміки. У відкритих ТС при певних умовах взаємодії потоків енергії і речовини проходять процеси впорядкування матерії, що відповідає зменшенню виробництва ентропії та утворенню самоорганізуючих дисипативних вторинних структур (ДВС).

Найбільш поширеним в роботі вузлів тертя машин та механізмів являється режим граничного тертя, при якому процес самоорганізації (СО) являється основою структурної пристосовуваності (СП) і проявляється шляхом утворення ДВС, які екранують основний матеріал поверхонь тертя від безпосереднього контакту, схоплювання та інтенсивного руйнування. ДВС являють собою тонкі плівки товщиною 10-100 *нм*, які утворюються в результаті кінетичного фазового переходу (КФП), основою якого являється синергетика процесів деформації, нагріву, дифузії, хімічних реакцій. Головним фактором, який визначає необхідність та механізми КФП, енергію активації, кінетику утворення, трансформації та руйнування ДВС, являється робота сил тертя [1]. На всіх етапах силового навантаження пари тертя відбувається взаємодія активованих поверхневих шарів з активними компонентами зовнішнього середовища (адсорбція, дифузія, хімічні реакції).

Експериментально підтверджено існування двох типів ДВС та їх проміжних станів. ДВС I являють собою перенасичені аморфізовані тверді розчини кисню, сірки, фосфору та інших реагентів в металах пар тертя та зовнішнього середовища і характеризуються бездислокаційною фрагментарною будовою, аномальною пластичністю, у яких при виході із контакту збільшується твердість. Товщина ДВС I –

20-50 *нм*. ДВС II являють собою хімічні з'єднання нестехіометричного складу, як правило з дефіцитом по реагуючому елементу, володіють аномально високою твердістю, при цьому відбувається, як правило, пружна деформація. Товщина ДВС II – 40-100 *нм*. Механізми руйнування ДВС, форма, розміри та склад продуктів зносу відповідають виявленим механізмам вторинного структуроутворення, міцності, пластичності та характеру деформації ДВС.

Суттєво, що КФП для режиму СО та утворенню ДВС не являється самовільним, а керується мінімальними принципами. Всі взаємодії в зоні тертя (в режимі СО) локалізуються в тонких поверхневих плівках. Мінімальний енергетичний принцип даного процесу записується у вигляді:

$$\int_V \frac{\Delta E(\vartheta)}{A_T} \alpha \vartheta \to min\,.$$

Інтеграл енергії, яка поглинається, поверхнею тертя ΔE віднесений до роботи тертя A_T по об'єму, який трансформується V, наближається до мінімуму. Наслідками цього принципу являються наступні умови:

$$V_{еф} \to min; \quad \frac{A_T}{A_p} \to \max; \quad \frac{V_E}{V_{еф}} \to \max\,,$$

де $V_{еф}$ – ефективний об'єм взаємодії; V_p – об'єм руйнування ДВС; V_E – об'єм матеріалу, який поглинув енергію Е, близьку до граничної.

При цьому встановлено, що ДВС являються стабільними утвореннями і володіють властивістю саморегуляції.

Надзвичайна складність та багатогранність процесу тертя та зношення приводить до висновку, що дані процеси не можуть бути описані простим фундаментальним законом. Виходом являється комплексний підхід в якому поєднані теоретичні положення трибології з розвитком сучасних методів вирішення практичних задач. Практичне вирішення даної проблеми здійснюється на основі структурно-енергетичної теорії тертя та зношення, шляхом регулювання умов та параметрів СО ТС за допомогою конструкторських, технологічних та експлуатаційних засобів.

Фундаментальною енергетичною умовою СО ТС являється динамічна рівновага процесів трибоактивації та пасивації, при якій ефективна частина активації $G_{Аеф}$ еквівалентна енергії, яка запасається поверхневими шарами ΔE та знаходиться в границях енергії, яка необхідна для утворення ДВС – $G_{ДВС}$:

$$G_{еф} = G_{ДВС}\,.$$

Співвідношення $G_{Аеф}$ до загальної енергії активації $G_{Азаг}$ (роботи тертя) оцінюється коефіцієнтом енергії, яка запасається $K_з = G_{Аеф} / G_{Азаг}$.

При порушенні умов СО ДВС виникають процеси пошкодження, механізми зовнішнього тертя порушуються, відбувається перехід до внутрішнього тертя. Основою кінетичної умови СО матеріалів ТС являється узгодженість процесів утворення ДВС та їх руйнування: $V_{утв\ ДВС} = V_{руйн\ ДВС}$

Важливою кінетичною характеристикою СО ТС являється періодичність циклів утворення, трансформації та руйнування ДВС, при цьому їхня міцність, в результаті синергетичних процесів при КФП, у порівнянні із міцністю основного матеріалу збільшується в декілька разів.

За результатами проведених досліджень побудована загальна закономірність (фундаментальна діаграма ведучих процесів) тертя та зношення, суть якої полягає в тому, що для всіх матеріалів і робочих середовищ існує діапазон навантажень і швидкостей переміщення в яких показники тертя та зношення стабільні і на декілька

порядків нижчі чим поза даним діапазоном (рис 1). Механізмом загальної закономірності являється універсальне явище СП матеріалів при механохімічних і термохімічних процесах тертя.

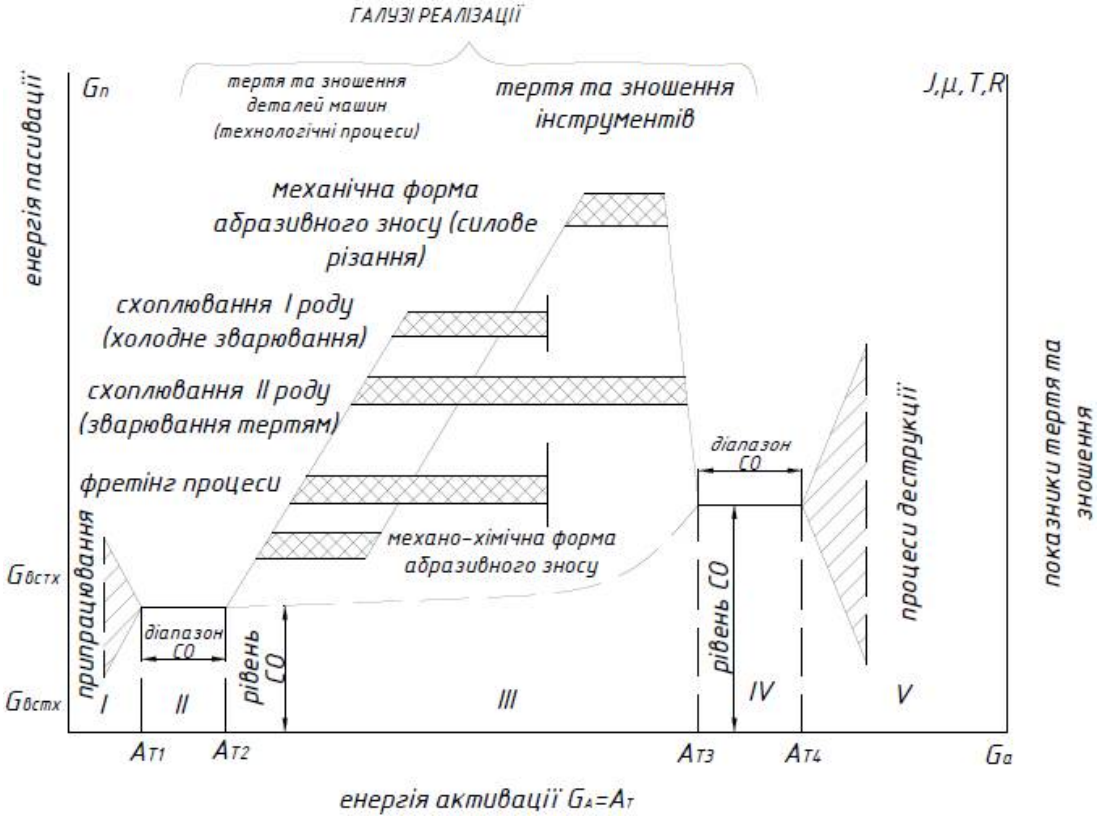


Рис. 1. Загальна закономірність тертя та зношення

I – Нестабільні процеси, II – Механохімічні процеси, III – Пошкоджуваність при терті, IV – Термохімічні та термомеханічні процеси ($ВС_{ТХ}$, $ВС_{ТМ}$), V – Об'ємне руйнування поверхонь тертя, J – величина зношування, μ - коефіцієнт тертя, T – температура в зоні тертя, R – контактний електричний опір пар тертя.

Результати процесів СО, утворення захисних ДВС оцінюються діапазонами СО (ДСО) та рівнями СО (РСО), які нормалізують показники тертя та зношення. Для кількісного опису ДСО і РСО ТС використовують енергетичні критерії енергоємності та питомої роботи руйнування. Питома енергоємність ТС по температурному показнику E_Q характеризується витратами роботи тертя A_T на підвищення температури на 1 ^0C:

$$E_Q = \frac{A_T}{\Delta T}, \quad \left(\frac{Дж}{см^2 \cdot 1^0 C}\right).$$

Величина питомої роботи руйнування A_p характеризує витрати роботи тертя A_T на видалення з поверхні тертя одиниці об'єму матеріалу (1 $мм^3$): $A_p = \frac{A_T}{\Delta J}, \quad \left(\frac{Дж}{мм^3}\right)$.

Запропоновано комплекс фундаментальних умов та критеріїв, які можуть бути використані в якості методологічної основи подальших теоретичних та експериментальних робіт в галузі прикладної трибо техніки.

Література.

1. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов и др. - Киев: Техника, 1976. - 296 с.

УДК 621.869.88:656.211.7
С. Панченко[1], д.т.н., проф., Г. Ватуля[2], д.т.н., проф., А. Ловська[3], д.т.н., доц., Є. Краснокутський[2]
[1]Український державний університет залізничного транспорту, Україна
[2]АТ "Укрзалізниця", Україна

ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ КОНТЕЙНЕРА ТИПУ ХОПЕР ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ МОРЕМ

S. Panchenko[1], Dr., Prof., G. Vatulia[1], Dr., Prof., A. Lovska[1], Dr., Assoc. Prof., Ye. Krasnokutskyi[2]
[1]Ukrainian State University of Railway Transport, Ukraine
[2]Joint-Stock Company Ukrainian railway, Ukraine

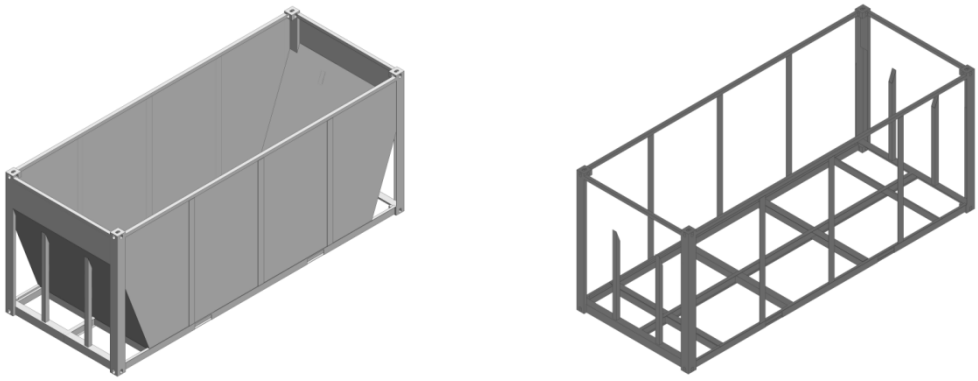
DETERMINATION OF THE LOADING ON A HOPPER CONTAINER TRANSPORTED BY SEA

Abstract. The efficiency of freight transportation can be improved by the use of hopper containers. If required they can be equipped with lift-off roofs, which makes it possible to transport the freight requiring protection from weather. The possibility to transport these containers by sea was studied through. The research conducted will promote the designing of containers with better technical and operational characteristics that will improve the efficiency of container transportation.

Утримання конкурентоспроможності залізничного транспорту зумовлює необхідність впровадження в експлуатацію комбінованих транспортних систем. Відомо, що однією з найбільш перспективних та поширених серед таких є контейнерні перевезення. Разом з цим для підвищення ефективності контейнерних перевезень важливим є створення перспективних конструкцій контейнерів, призначених для перевезень широкої номенклатури вантажів. При проектуванні таких контейнерів необхідним є урахування навантажень, які можуть діяти на них не тільки при перевезеннях залізничним, автомобільним, авіаційним або морським транспортом, а і у складі комбінованих поїздів на залізничних поромах. Такий вид комбінованих перевезень дістав розвиток при введенні в експлуатацію транспортного коридору новий "Шовковий шлях", який сполучив Україну з Китаєм та забезпечив можливість слідування поїздів комбінованого транспорту морем на залізничних поромах. Тому питання створення нових конструкцій контейнерів з покращеними технічними та експлуатаційними показниками, а також визначення їх навантаженості при перевезеннях на залізничних поромах у складі поїздів комбінованого транспорту потребують дослідження.

Для підвищення ефективності контейнерних перевезень вантажів запропоновано конструкцію контейнера типу хопер (рис. 1). Особливістю контейнера є те, що його торцеві стіни розміщені під кутом 30° по відношенню до вертикальної осі. Це дозволяє здійснювати його розвантаження самотечією з використанням гравітаційних властивостей вантажу. Розвантаження контейнера здійснюється через люки. За необхідності перевезень вантажів, які потребують захисту від атмосферного впливу контейнер оснащується зйомним дахом.

Для можливості перевезень контейнера морем проведено дослідження його навантаженості. При цьому до уваги прийнято випадок перевезення контейнера на залізничному поромі у складі комбінованого поїзда.



а) б)

Рис. 1. Контейнер типу хопер
а) загальний вигляд; б) каркас

Для визначення напружень, які діють в несучій конструкції контейнера проведено його розрахунок за методом скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation. У якості розрахункового критерію застосовано критерій Мізеса. Величину динамічного навантаження, яке діє на контейнер та насипний вантаж, розміщений у ньому визначено за методикою, наведеною у роботах [1, 2]. При цьому, для випадку відсутності переміщень контейнера відносно рами вагона-платформи, величина прискорення, яке діє на нього склала 0,25g. При проведенні розрахунків враховано, що кут крену дорівнює 12,2°. Максимальні еквівалентні напруження в контейнері зафіксовані в його нижньому обв'язуванні та склали 294,2 МПа, що нижче за допустимі [3, 4].

Також в рамках дослідження проведено визначення стійкості рівноваги контейнера з урахуванням типової схеми взаємодії з вагоном-платформою при перевезенні морем. Стійкість контейнера з урахуванням типової схеми взаємодії з вагоном-платформою забезпечується при кутах крену до 26°.

Проведені дослідження сприятимуть створенню контейнерів з покращеними технічними та експлуатаційними характеристиками, а також підвищенню ефективності функціонування транспортної галузі.

Література.

1. Lovska A. O. Computer simulation of wagon body bearing structure dynamics during transportation by train ferry. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015. Vol. 3 (7 (75)). P. 9 – 14. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.43749

2. Ловська Альона. Дослідження динамічної навантаженості вагона-платформи з контейнерами при перевезенні на залізничному поромі. Залізничний транспорт України 2017. № 2. С. 16 – 20.

3. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). ДСТУ 7598:2014. [Чинний від 2015-07-01]. Київ, 2015.

4. Вантажні контейнери. Контейнери універсальні (інтермодальні) для повітряних і наземних перевезень. Технічні умови і методи випробувань. ДСТУ ISO 8323:2015 (ISO 8323:1985, IDT). [Чинний від 2016-01-01]. Київ, 2016.

Г. Ватуля, д.т.н., проф., А. Ловська, д.т.н., доц., А. Рибін, к.т.н., М. Павлюченков, к.т.н., доц., Д. Петренко, к.т.н.
Український державний університет залізничного транспорту, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ХРЕБТОВОЇ БАЛКИ НАПІВВАГОНА З НАПОВНЮВАЧЕМ

G. Vatulia, Dr., Prof., A. Lovska, Dr., Assoc. Prof., A. Rybin, PhD., M. Pavliuchenkov, PhD, Assoc. Prof., D. Petrenko, PhD.
Ukrainian State University of Railway Transport, Ukraine

EXPERIMENTAL RESEARCH INTO THE STRESS-STRAIN STATE OF THE CENTER SILL OF A BOX WAGON WITH FILLER

Abstract. The loading on the bearing structures of wagons in operation can be reduced by applying closed profiles filled with energy-absorbing material in wagon frame components. The results of the research demonstrated that with filler in the rod the stresses were reduced by 5% in comparison with stresses in the rod without filler. The difference between the experimental and theoretical strength calculations for the rods was about 3%. The results obtained can be used by those concerned about the development of innovative structures of wagons with better operational characteristics.

Забезпечення рентабельності залізничної галузі на сучасному етапі її розвитку зумовлює необхідність впровадження в експлуатацію принципово нових конструкцій рухомого складу. При створенні такого рухомого складу повинні враховуватися особливі вимоги, пов'язані з забезпеченням його міцності та надійності при експлуатаційних режимах навантаження [1 – 3]. Досягти цього можливо шляхом врахування принципів мультифункціональності при його створенні або модернізаціях. Це сприятиме зменшенню навантаженості складових несучих конструкцій рухомого складу, підвищенню ресурсу експлуатації, а як наслідок, зменшенню витрат на утримання.

Відомо, що одним з найбільш затребуваних типів вагонів в експлуатації є напіввагон. Основним несучим елементом вагону є рама. Під дією експлуатаційних навантажень вона випробовує знакозмінні напруження, які викликають появу тріщин в складових конструкції та необхідність здійснення позапланових видів ремонту або, взагалі, виключення вагона з інвентарного парку. Тому з метою забезпечення міцності несучих конструкцій напіввагонів важливим є проведення досліджень щодо можливості зменшення їх навантаженості в експлуатації шляхом урахування принципів мультифункціональності при проектуванні.

Для зменшення навантаженості несучих конструкцій напіввагонів в експлуатації запропоновано створення складових рами з замкнених профілів, заповнених наповнювачем, який має енергопоглинальні властивості [4]. Дослідження проведені на прикладі хребтової балки, як найбільш навантаженого елемента несучої конструкції. Дане удосконалення можливе і стосовно інших типів вагонів. Розміщення наповнювача передбачається за довжиною хребтової балки між задніми упорами автозчепів.

Результати проведених теоретичних досліджень підтвердили доцільність запропонованих рішень. Максимальні еквівалентні напруження на 9% нижче за напруження, які виникають в конструкції рами без наповнювача.

Для підтвердження результатів теоретичних досліджень проведено експериментальне визначення напружено-деформованого стану хребтової балки напіввагона з наповнювачем. У зв'язку зі складністю проведення експерименту на

повномасштабній конструкції рами, випробуванню підлягала її консольна частина, як найбільш навантажена при дії повздовжніх експлуатаційних сил. Консольна частина рами імітувалася дослідними зразками, які представляють собою сталеві квадратні стрижні з геометричними розмірами a=100 мм (ширина та висота), t = 3 мм (товщина стінки), l = 1000 мм (довжина). Зразки були виготовлені з електрозварної труби із гнутих швелерів, сталь 09Г2С (лист холоднокатаний), з фактичною границею текучості f_y = 345 МПа. Зразки мали масштаб зменшення 1:3. Кількість дослідних зразків-близнюків дорівнювала трьом. Навантаження на дослідні зразки відповідало умовам роботи конструкції при стиску із випадковим ексцентриситетом. Таке навантаження характерне для одного з найбільш поширених та неблагоприємних режимів навантажень хребтової балки вагона в експлуатації.

Дослідження проводилися в дослідній лабораторії “Центру діагностики споруд транспортного призначення” при Українському державному університеті залізничного транспорту. При цьому застосовано метод електричного тензометрування. Стискання стрижнів проводилося в діапазоні 40 – 200 кН. Для навантаження стрижнів використано гідравлічний прес ПММ-125. Для дослідження характеру деформування експериментальних зразків використано тензорезистори з базою 10 мм та опором 100 Ом, які попередньо пройшли тарирування. Монтаж тензорезисторів здійснено за мостовою схемою. Місця наклеювання тензорезисторів визначено за результатами скінченно-елементного моделювання зразків у ПК “Ліра-САПР” і SolidWorks Simulation. На підставі проведених досліджень встановлено, що максимальні напруження в пустотілому стрижні при стисканні становлять близько 206 МПа. Також проведено експериментальне визначення міцності стрижнів замкненого перерізу, заповнених наповнювачем. Проведені дослідження показали, що максимальні напруження в стрижнях складають близько 195 МПа. Результати досліджень встановили, що з урахуванням застосування наповнювача в стрижні зменшуються напруження, які виникають в ньому на 5% у порівнянні з конструкцією без наповнювача. Розбіжність між експериментальними та теоретичними розрахунками стрижнів на міцність склала близько 3%.

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування інноваційних конструкцій вантажних вагонів та підвищенню ефективності їх функціонування.

Література.

1. Marek Płaczek, Andrzej Wróbel, Maciej Olesiejuk. Modelling and arrangement of composite panels in modernized freight cars. MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 112. 06022. https://doi.org/10.1051/matecconf/20171120602

2. Andrzej Wróbel, Marek Płaczek, Andrzej Buchacz. An Endurance Test of Composite Panels.Solid State Phenomena. 2017. Vol. 260. P. 241 – 248. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.260.241

3. Панченко С. В., Фомін О. В., Ватуля Г. Л., Ловська А. О., Павлюченков М. В., Рибін А. В. Обґрунтування впровадження SIN-балок в несучу конструкцію напіввагона. Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки. – 2021. – Вип. 42. – С. 174 – 183.

4. S. Panchenko, O. Fomin, G. Vatulia, A. Lovska, O. Ustenko, A. Rybin, L. Voloshina. Determination of loading of a hopper car with an improved design of the spine beam. Procedia Structural Integrity. – 2022. – Vol. 36. – P. 231 – 238.

УДК 539.4
В. Дегтярев, к.т.н., с.н.с.
Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Україна

ВПЛИВ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЯХ НА ГРАНИЧНІ НАПРУЖЕННЯ ЦИКЛУ

V.O. Degtiarev, Ph. D., Senior Researcher
G.S. Pisarenko Institute for problems of strength of the NAS of Ukraine, Ukraine

THE INFLUENCE OF RESIDUAL STRESSES IN WELDED STRUCTURES ON THE LIMIT STRESSES OF THE CYCLE

Abstract. Author proposes a method of determination of the diagrams of ultimate stresses in a cycle for welded components structural elements with different level of steady-state residual stresses based on test results for small specimens.

В літературі прийнято вважати залишкові напруження розтягування (ЗН) високими, що впливають на міцність зварних конструкцій, коли дотримується умова $\sigma_{зал} > 0{,}5\sigma_т$, де $\sigma_т$,-границя плинності матеріалу. ЗН, які рівні $\sigma_{зал}<0{,}5\sigma_т$, вважаються низькими і на міцність не впливають. Але це поділ суто умовно, тому що, залежно від величини максимального напруження від зовнішнього навантаження, вони змінюються у широкому діапазоні з різним ступенем впливу на опір втоми зварних елементів металоконструкцій.

Мета роботи передбачала розробку методики розрахунку діаграм граничних напружень циклу (ДГНЦ) зварних з'єднань з будь-якою величиною ЗН за результатами випробувань зразків без ЗН. Обробка результатів втомних випробувань стикових з'єднань низьковуглецевої та низьколегованої 09Г2С сталей з різним рівнем вихідних ЗН показала, що якщо спільно врахувати вплив усталеного залишкового ЗН $\sigma^{y}_{зал}$ та границю витривалості σ_R при будь-якому значенні коефіцієнта асиметрії циклу R_σ, то ДГНЦ з ЗН збігається з ДГНЦ зразків без ЗН (пряма 1). Це дозволило запропонувати методику розрахунку ДГНЦ зварних з'єднань з різними $\sigma^{y}_{зал}$ за результатами випробувань зразків без ЗН. Задаючись на прямій 1 будь-якою точкою та розглядаючи її у вигляді суми напружень $\sigma_{R\Sigma} = \sigma^{y}_{ост} + \sigma_R$, можна визначити середнє напруження циклу σ_m і граничну амплітуду циклу σ^{n}_{a}, при дії яких у зразку залишається $\sigma^{y}_{зал}$, що є граничним у вигляді

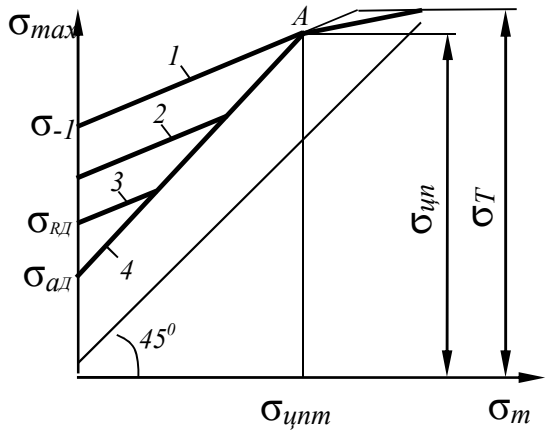


Рис. Діаграми граничних напружень циклу зварних з'єднань

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{R\Sigma} - \sigma_R}{1 - \Psi_\sigma} + \sigma_{mR} - \sigma^{y}_{зал}\ , \qquad (1)$$

$$\sigma_a^n = \frac{\sigma_B - \sigma_{R\Sigma}}{\sigma_B / \sigma_{-1} - 1}. \quad (2)$$

де σ_{-1}-границя витривалості зварного з'єднання без ЗН при симетричному циклі навантаження, Ψ_σ- коефіцієнт впливу асиметрії навантаження, σ_{mR}- середнє напруження циклу в зразку без ЗН, σ_B-границя міцності матеріалу. Після деяких перетворень границю витривалості з'єднання з $\sigma_{зал}^y$ можна визначити за формулою

$$\sigma_{RД} = \frac{\sigma_{-1}(\sigma_B - \sigma_{ост}^y) + \sigma_m(\sigma_B - \sigma_{-1})}{\sigma_B}. \quad (3)$$

При дотриманні умови $\sigma_{зал}^y = \sigma_{цп} - \sigma_{RД}$ неважко переконатися, що чим більша границя витривалості, тим менше $\sigma_{зал}^y$, де $\sigma_{цп}$- мінімальна границя циклічної повзучості (к. А), яка, як показали дослідження низьколегованих сталей, на 10-14 % менша за $\sigma_т$. Запропонована методика повною мірою буде реалізована у разі дотримання умови $\sigma_R + \sigma_{зал}^y < \sigma_{цп}$. У цьому випадку вихідні залишкові напруження при циклічному навантаженні зварного з'єднання не досягають граничної величини і не змінюються. Тому у всіх вищенаведених формулах можна використовувати значення вихідного ЗН, визначене після зварювання виробу. Було також встановлено, що ДГНЦ з'єднань не тільки паралельні між собою (прямі 2,3), а й паралельні ДГНЦ зразків без ЗН. Причому зі збільшенням усталених ЗН кожна діаграма розташовується трохи нижче попередньої. Закінчуються такі діаграми на прямій 4, яка вважається ДГНЦ зварного з'єднання з високим значенням ЗН, у якої гранична амплітуда циклу $\sigma_{аД}$ не залежить від σ_m, а. сама діаграма при $\sigma_{K\Sigma} = \sigma_{цп}$, задаючись любим значенням R_σ, описується рівнянням

$$\bar{\sigma}_{RД} = \frac{2 \cdot \sigma_{аД}}{1 - R_\sigma} = \frac{2}{1 - R_\sigma}\left(\frac{\sigma_R - \Psi_\sigma \cdot \sigma_{цп}}{1 - \Psi_\sigma} - \sigma_{mR}\right). \quad (4)$$

Кожна точка на цій прямій відповідає границі витривалості зварного з'єднання зі своїм значенням $\sigma_{зал}^y$. У виразі 4 замість $\sigma_{цп}$ можна використовувати границю плинності, проте використання $\sigma_{цп}$ підвищує точність розрахунку. Встановлено, що зі збільшенням залишкового напруження відбувається зниження границі витривалості досліджуваних зварних з'єднань на більш значиму величину. Залежно від марки матеріалу вплив залишкових напружень виявляється дещо різним. Якщо до теперішнього часу вважалось, що ЗН рівні $0{,}5\sigma_т$ низькі і не впливають на опір втоми, то така їх величина знижує опір втоми з'єднання з низьковуглецевої сталі на 30 %, а з низьколегованої на 33 %.

Таким чином, на основі аналізу діаграм граничних напружень циклу стикових зварних з'єднань низьковуглецевих і низьколегованих сталей з високими залишковими напруженнями і без них отримано рівняння, що дозволяє визначати границі витривалості зварних з'єднань з усталеними залишковими напруженнями за результатами випробувань невеликих зразків без залишкових напружень.

Враховуючи існування єдиної діаграми граничних напружень циклу та задаючись σ_m від зовнішнього навантаження, можна встановити також значення $\sigma_{зал}^y$ у вигляді

$$\sigma_{зал}^y = \frac{\sigma_{цп} - \sigma_{-1}}{\sigma_B - \sigma_{-1}} - \sigma_m. \quad (5)$$

Регулювання значення $\sigma_{зал}^y$ зовнішнім навантаженням може знайти своє застосування у способах підвищення міцності конструкцій, що розробляються.

УДК 539.3

М. Слободян, к.ф.-м.н., доц., І. Кузь, к.ф.-м.н., доц., І. Звізло, к.ф.-м.н., доц.
Львівський національний університет імені Івана Франка, Україна

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗА ЗГИНУ КРУГЛОЇ ПЛАСТИНИ З ТРІЩИНАМИ З УРАХУВАННЯМ СМУГОВОГО КОНТАКТУ ЇХНІХ БЕРЕГІВ

M.S. Slobodian, Ph.D., Assoc. Prof., I.S. Kuz', Ph.D., Assoc. Prof., I.S. Zvizlo, Ph.D., Assoc. Prof.
Ivan Franko National University of Lviv, Ukraine

STRESS-STRAIN STATE OF A CIRCULAR PLATE WITH CRACKS UNDER BENDING IN THE ASSUMPTION OF CRACK FACES STRIP CONTACT

The solution of the bending problem for a circular isotropic plate with a system of straight through cracks is constructed. Under the external loading the crack faces are in contact along the entire of their length in the area of constant width at the upper base of plate. The obtained system of singular integral equations is solved by the mechanical quadratures method.

Задачі згину пластин з тріщинами, береги яких гладко контактують по лінії на одній з основ пластини (лінійний контакт) розглянуто у праці [1]. Експериментально підтверджено вплив контакту берегів тріщин на перерозподіл напружено-деформованого стану пластини у праці [2]. Згин пластини з прямолінійною наскрізною тріщиною, береги якої гладко контактують по всій довжині тріщин по області сталої ширини на одній з основ пластини (смуговий контакт), розглянуто у працях [3, 4].

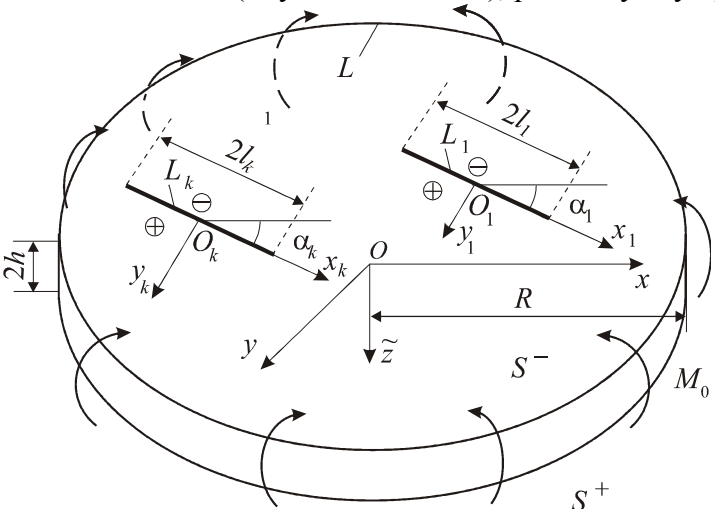


Рис. 1.

Розглянемо круглу ізотропну пластину завтовшки $2h$ із системою M довільно орієнтованих прямолінійних наскрізних тріщин довжиною $2l_k$ $\left(k=\overline{1,M}\right)$. Розмістимо декартову систему координат $Oxy\tilde{z}$ у серединній площині пластини, так що початок координат співпадає з центром пластини, а вісь $O\tilde{z}$ перпендикулярна до неї. Виберемо у площині Oxy полярну систему координат r і θ таким чином, щоб точка O була її полюсом, а Ox – полярною віссю. Нехай $\left(x_{0k}, y_{0k}\right)$ координати центрів тріщин у площині Oxy, а α_k – кут нахилу лінії k-тої тріщини до осі Ox $\left(k=\overline{1,M}\right)$. Введемо декартову систему координат $O_k x_k y_k$ з центром O_k у точці z_{0k} $\left(z_{0k}=x_{0k}+iy_{0k}\right)$, так

щоб вісь $O_k x_k$ співпадала з лінією k-тої тріщини. Пластина згинається рівномірно розподіленими моментами M_0, прикладеними до її межі. Позначимо через S^+ область ззовні пластини, через S^- – всередині, через L_k – лінію, де розміщена k-та тріщина, через L – границю пластини (див. рис. 1).

Вважатимемо, що тріщина у недеформованому стані – це наскрізний математичний розріз [1]. Припустимо, що при заданому навантаженні береги тріщин будуть контактувати по області сталої ширини (смуговий контакт) на верхній основі пластини по всій довжині тріщин. Оскільки береги тріщини контактують, то розв'язок задачі будемо шукати у вигляді розв'язків двох взаємопов'язаних задач: задачі згину пластини, використовуючи теорію Кірхгофа-Лява, та плоскої задачі.

На межі пластини будуть такі крайові умови

$$M_r = M_0,\ P_r = 0,\ \sigma_{\Pi r} = 0,\ \tau_{\Pi r\theta} = 0,\ x \in L,$$

де M_r – згинальний момент, $\sigma_{\Pi r}$ і $\sigma_{\Pi r\theta}$ – компоненти тензора напружень у полярній системі координат, P_r – узагальнена в сенсі Кірхгофа перерізувальна сила.

Крайові умови гладкого контакту берегів тріщин мають вигляд [4]

$$M^{\pm}_{y_k} = h\beta_k N_k,\ P^{\pm} = 0,\ \tau^{\pm}_{\Pi x_k y_k} = 0,\ \sigma^{\pm}_{\Pi y_k y_k} = -\frac{N_k}{2h},\ \frac{\partial[v_\Pi]}{\partial x_k} + \lambda_k h\left[\frac{\partial^2 w}{\partial x_k \partial y_k}\right] = 0,$$

$$\beta_k = 1-\gamma_k/3,\ \lambda_k = 0.5\left(1+(1-\gamma_k)^2\right),\ \gamma_k = h_k/h,\ x_k \in L_k,\ k = \overline{1,M},$$

де N_k – контактне зусилля між берегами k-тої тріщини; h_k – висота контакту k-ої тріщини; $[f] = f^+ - f^-$, значками "+" і "–" позначені граничні значення функцій при прямування точки площини до k-тої тріщини при $y_k \to \pm 0$.

З використанням теорії функцій комплексної змінної та комплексних потенціалів, розв'язки плоскої задачі та задачі згину пластини зведено до задач лінійного спряження, на основі яких отримано систему сингулярних інтегральних рівнянь для невідомих похідних від стрибків переміщень на берегах тріщин у плоскій задачі та кутів повороту у задачі згину пластини. Крайові умови на межі пластини задоволено аналітично. Отриману систему сингулярних інтегральних рівнянь розв'язано числово методом механічних квадратур, на основі якого побудовано графіки контактного зусилля між берегами тріщин, коефіцієнтів інтенсивності моментів і зусиль.

Література.

1. Шацький І.П. Згин пластини, ослабленої розрізом з контактуючими берегами / Шацький І.П. – Доп. АН УРСР. Сер. А. Фіз.-мат. та техн. науки. – 1988. – №7. – С. 49-51.

2. Кальтгоф Дж.Ф. Експериментальне підтвердження контакту берегів тріщини при згині пластини / Кальтгоф Дж.Ф., Шацький І.П., Бюргель А. // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій (вип. 2): В 3-х т.// Під заг. ред. В.В. Панасюка. – Львів: Каменяр, 1999. – Т.1. – с.72-74.

3. Dempsey J.P. Closure of a through crack in a plate under bending / Dempsey J.P., Shektman I.I., Slepyan L.L. // Int. J. of Solids and Struct. – 1998. – 35. – P. 4077–4089.

4. Опанасович В. К. Згин пластини з наскрізною прямолінійною тріщиною з урахуванням ширини області контакту її поверхонь / Опанасович В.К. // Наукові нотатки Луцького технічного університету. – 2007. – Вип. 20 (2). – С. 123–127.

УДК 534.134
С. Прищепко, магістр.
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПРОСТОРОВОГО КАРКАСУ ВИСОТНОЇ БУДІВЛІ

S. Pryshchepko, master.
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

SIMULATION OF THE SPATIAL FRAME' WORK OF A HIGH-RISE BUILDING

Abstract. Modeling of the stress-strain state of the spatial frame of a high-rise building office center was carried out. With the use of the Lira-SAPR 2016 software complex a study of the stress-strain state of the monolithic core and overlap taking into account the action of various types of loads was carried out.

Будівлі великої поверховості вимагають особливої уваги на етапі проектування з точки зору врахування дії, в тому числі і сумісної, усіх зовнішніх і внутрішніх факторів, що з'являються у процесі будівництва та експлуатації. У таких спорудах важливо використовувати різні конструктивні елементи для забезпечення необхідної міцності, жорсткості та експлуатаційної стійкості. Для вирішення цього завдання, відповідно до нормативних документів [1], як правило, будівлю проектують з монолітним ядром жорсткості. Також одним із актуальних питань є розрахунок монолітного перекриття висотної будівлі [2, 3].

Метою даної роботи є моделювання роботи просторового каркасу висотної будівлі ділового центру та розрахунок монолітного ядра і перекриття з врахуванням дії різних видів навантаження.

Статичний розрахунок виконано з використанням програмного комплексу "Ліра-САПР 2016" з лінійними характеристиками залізобетону. Розрахунковою схемою була просторова система, модельована оболонковими скінченними елементами. Застосовували жорстке з'єднання всіх елементів між собою.

Розрахункова схема будівлі подана на рисунку 1.

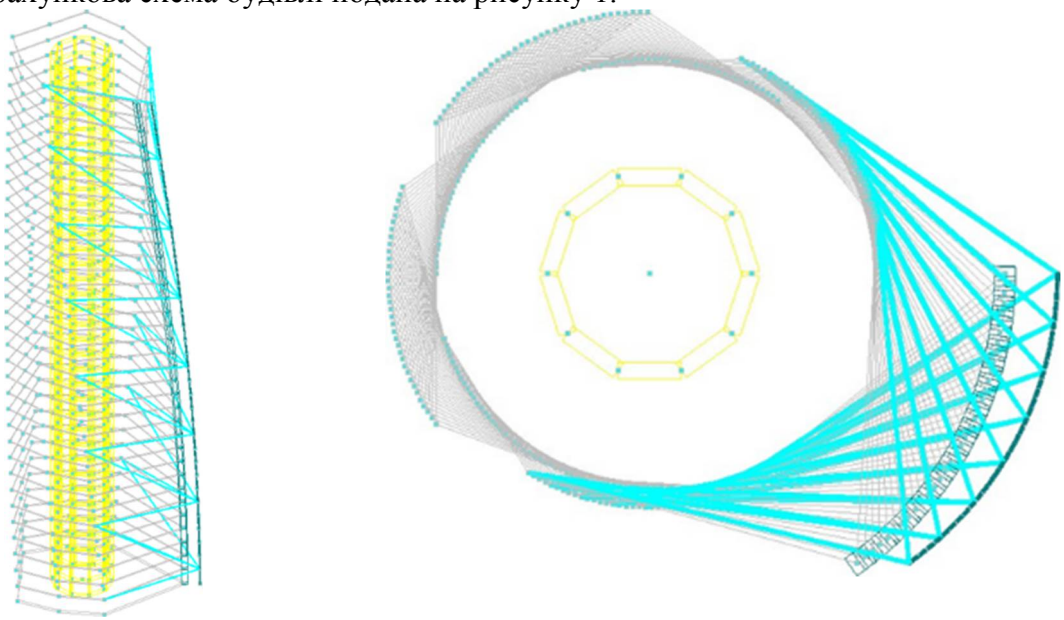
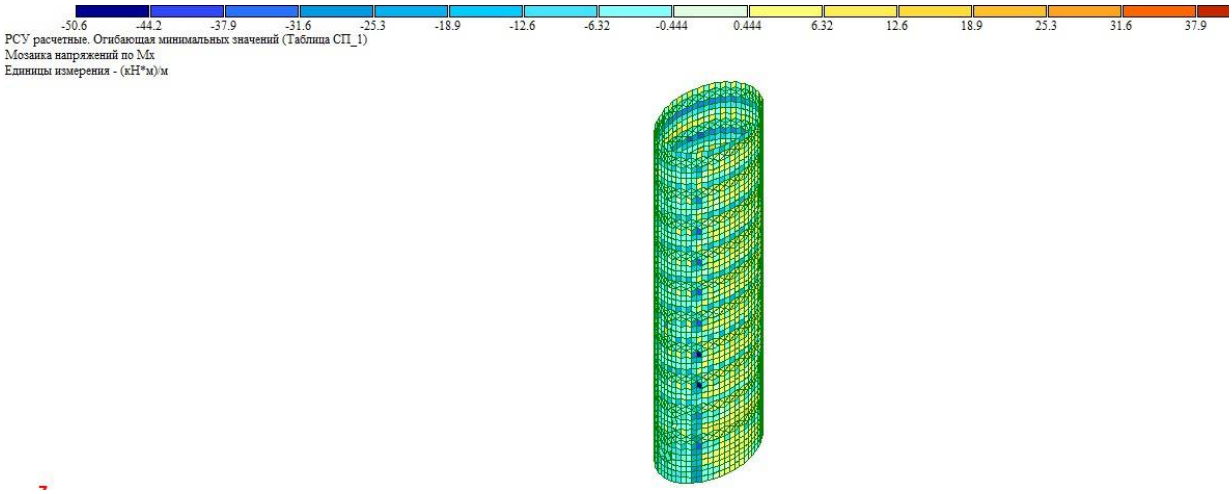


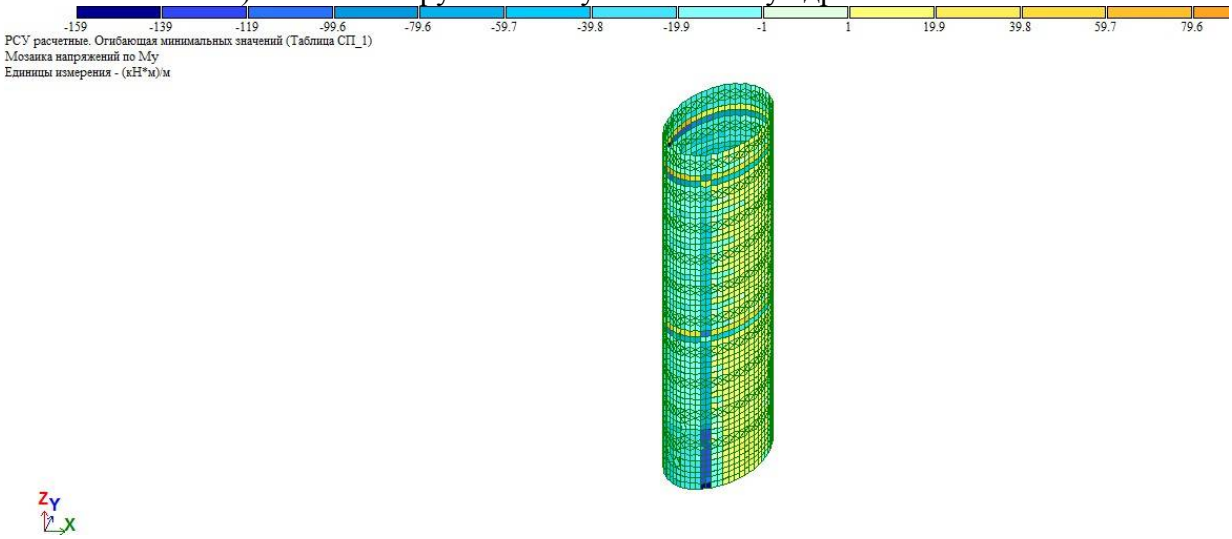
Рис. 1. Розрахункова схема каркасу висотної будівлі

При розрахунку схеми було задано такі завантаження: власна вага елементів будівлі (задається автоматично залежно від заданої питомої ваги, навантаження від сходів та ліфтового обладнання); тиск ґрунту на обрізи фундаменту та стіни підвалу (задається у вигляді розподіленого навантаження); вага покрівлі будівлі (задається у вигляді рівномірно розподіленого навантаження на елементи плит покриття); вага підлог, скління та перегородок (задається у вигляді рівномірно розподіленого навантаження на елементи плит перекриття); корисне навантаження на перекриття та (задається у вигляді рівномірно розподіленого навантаження на елементи перекриття); снігове навантаження (задається у вигляді рівномірно розподіленого навантаження на елементи плит покриття); вітрове навантаження (задається у вигляді погонного рівномірно розподіленого навантаження на контурні елементи плит перекриття (були спеціально задані стрижневі елементи нескінченно малої ваги по контуру) та екзоскелет). Вітрові навантаження задавались із врахуванням взаємовиключеної дії.

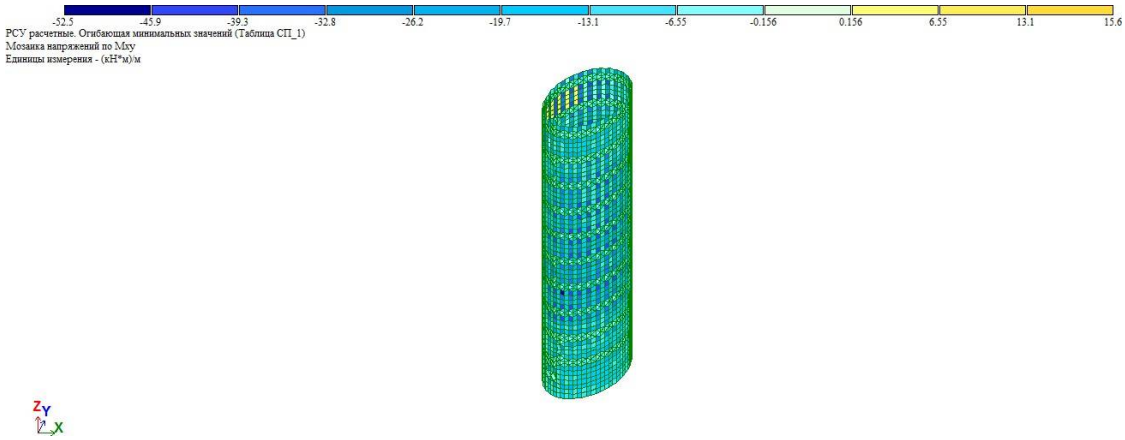
За результатами моделювання отримані внутрішні зусилля у монолітному ядрі по осі В-2 та отримано ізополя напружень Мх, Му, Мху, Qx та Qy. На рисунку 2 наведено розподіл напружень Мх, Му, Мху.



а) Ізополя напружень Мх у монолітному ядрі по осі В-2



б) Ізополя напружень Му у монолітному ядрі по осі В-2



в) Ізополя напружень Mxy у монолітному ядрі по осі В-2

Рис. 2. Ізополя напружень Mx, My, Mxy

За певними внутрішніми зусиллями у ПК ЛІРА-САПР 2016 залежно від заданих жорсткостей та матеріалів виконано підбір армування в монолітному ядрі по осі В-2. Армування ядра обох граней вертикальне і горизонтальне однаково показано на рисунку 3.

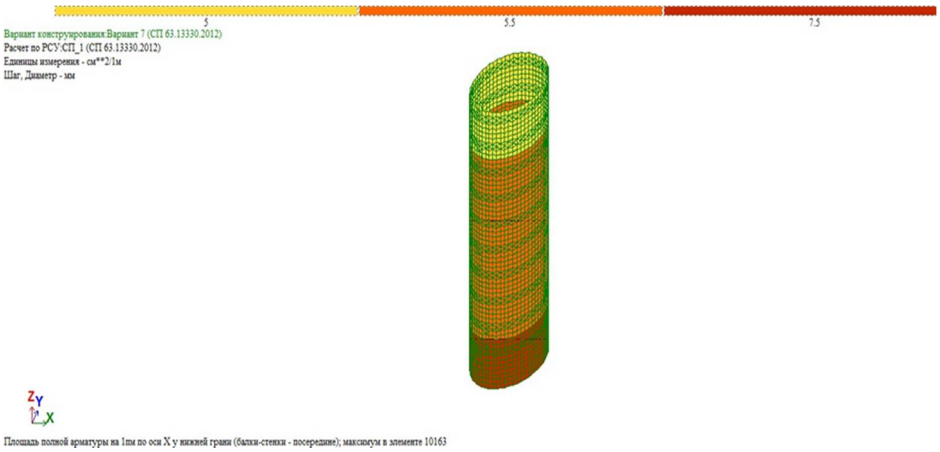


Рис. 3. Ізополя армування в монолітному ядрі по осі В-2.

Аналогічно було отримано внутрішні зусилля у монолітній плиті (на відмітці +40,350) та побудовано епюри внутрішніх зусиль.

Отримані розрахункові значення задовольняють вимогам нормативних документів, що свідчить про те, що розрахункова схема обрана правильно.

Література.

1. ДБН В.2.2-41:2019 Висотні будівлі. Основні положення.

2. Гудь М. Фактори впливу на міцність та ефективність бетону / М. Гудь М., Г.М. Крамар, І. Гудь // Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: матеріали Міжнар. науково-техн. конф. до 100 річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам’яті Івана Пулюя (100 річчя з дня смерті), 2018. - С. 44-45.

3. Ігнатьєва В.Б. Залежність фізико-механічних властивостей бетонних сумішей від виду модифікуючи добавок / В.Б. Ігнатьєва, Д.В. Скакун // Naukowy i innowacyjny potencjal prezentacji: Miedzynar. naukowo-prakt. konf., 18 listopada 2018 r.: kolekcja prac naukowych z materialami, Opole, Polska. – Rowne, 2018. – Т. 5. - С. 11-12. Режим доступу: https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/conferences/issue/view/2018-11-18/110.

УДК 693.542
В. Сверблюк, магістр
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІЩЕННЯ АУТРИГЕРНИХ ПОВЕРХІВ У БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДІВЛЯХ

V. Sverblyuk, master
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

OPTIMIZATION OF THE PLACEMENT OF OUTRIGER FLOORS IN MULTI-STORY BUILDINGS

Abstract. For the optimal design of a multi-story building, a comparative analysis of two options for the placement of outrigger floors was carried out from the point of view of minimizing movements from constant, long-term and main loads, as well as saving steel frame material. Calculations were carried out using the SCAD 21 software complex. The option of placing outriggers on the 12th and 23rd floors of the building was chosen.

Підвищення жорсткості та експлуатаційної стійкості багатоповерхових будівель досягають за рахунок різних конструктивних рішень, які потрібно проаналізувати на етапі проектування. Необхідно підібрати раціональну конструктивну схему будівлі, яка задовольнятиме вимогам економічної ефективності, технологічності та безпеки. Одним із можливих шляхів вирішення цього питання є використання аутригерних поверхів. Однак, максимальні переміщення від нормативних постійних та тривалих навантажень, основних навантажень і витрати сталі на металевий каркас суттєво залежать від розміщення таких поверхів по висоті будівлі. У зв’язку з цим порівняльний розрахунок різних варіантів розташування аутригерних поверхів є актуальною задачею

Метою даної роботи є оптимізація розміщення аутригерних поверхів у 30-и поверховій будівлі торгово-офісного центру за техніко-економічними показниками.

При проектуванні багатоповерхової будівлі досліджували два варіанти розташування аутригерних поверхів.

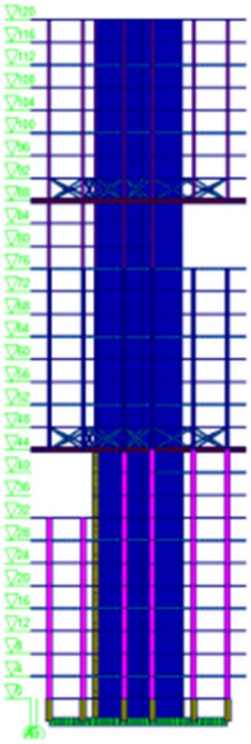
За першим варіантом аутригерні поверхи розташовували на 12 і 23 поверхах за допомогою вертикальних зв'язків, що утворюють просторову ферму навколо поверху, що оперізує, а також з'єднують колони з ядром жорсткості і знімають частину навантаження з консольного поверху, передаючи її в ядро жорсткості (Рис.1). Задано такі перерізи: стіни ядра жорсткості 350 мм, плити перекриття 300 мм, балки перекриття 600х1000 мм, колони 1100х1100мм, зв'язки аутригерного поверху виготовлені з квадратної труби 14х14 мм.

У другому варіанті аутригерні поверхи розташовували на 19 і 30 поверхах також за допомогою вертикальних зв'язків, що утворюють ферму навколо поверху, а також з'єднують колони з ядром жорсткості і підвішують консольні поверхи до ядра жорсткості. Задано аналогічні перерізи і матеріали стін ядра жорсткості, плит і балок перекриття, колон і зв'язків аутригерного поверху, що забезпечує коректність порівняння.

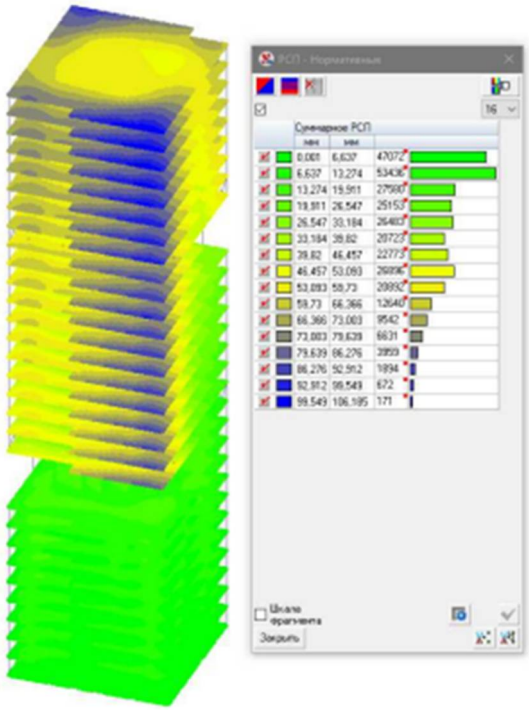
Розташування зв'язків аутригерного поверху та сумарні переміщення будівлі за обома варіантами розміщення аутригерних поверхів показано на рисунку 1.

Для порівняльних розрахунків використовували програмний комплекс SCAD 21. Для порівняння у кожній із схем були обрані максимальні переміщення від

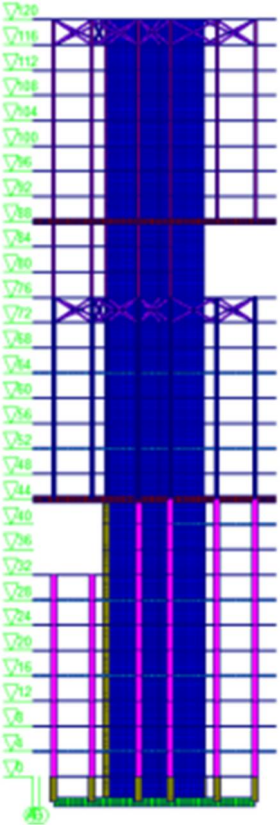
вертикальних нормативних постійних та тривалих навантажень, переміщення будівлі від основного поєднання навантажень, витрата сталі на металевий зовнішній каркас.



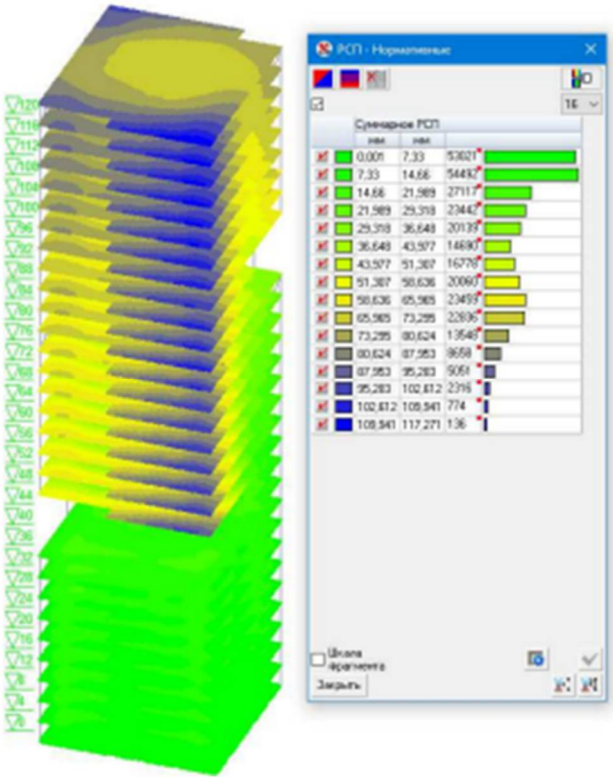
а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Розташування зв'язків аутригерних поверхів (а, в) та сумарні переміщення будівлі (б, г) при розміщенні аутригерних поверхів за першим (а, б) і другим (в,г) варіантами.

Розташування зв'язків типового аутригерного поверху показано на рисунку 2.

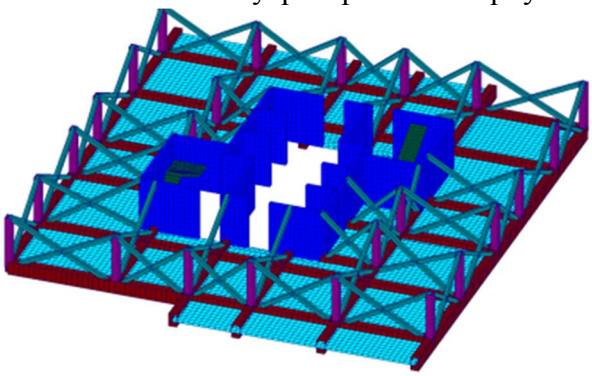


Рис. 2. Розташування зв'язків аутригерного поверху.

Для обох варіантів здійснено розрахунок на діючі навантаження, представлені в таблиці 1 і виконано порівняльний аналіз.

Табл. 1. Порівняльний аналіз техніко-економічних показників двох варіантів розміщення аутригерних поверхів

№	Найменування показника	Од. вим	Значення показника	
			Варіант 1	Варіант 2
1.	Максимальне переміщення від нормативних постійних та тривалих навантажень	мм	106,2	117,27
2.	Максимальне горизонтальне переміщення від основного поєднання навантажень	мм	42,62	55,13
3.	Витрати сталі на металевий каркас	т	149,2	151,6

Аналіз отриманих результатів показав, що розміщення аутригерних поверхів за другим варіантом має на 9,44% вищий показник сумарних переміщень і на 22,69% більші горизонтальні переміщення.

Таким чином, розташування аутригерних поверхів у верхній частині будівлі при даній висоті призводить до збільшення витрат сталі на металевий каркас і збільшення переміщення. Тому перший варіант розташування аутригерних поверхів є доцільним з точки зору забезпечення техніко-економічних показників.

Література.

4. ДБН В.2.2-41:2019 Висотні будівлі. Основні положення.

5. Ясній, П. В., Пиндус, Ю. І. і Гудь, М. І. (2020) «Аналіз напружено-деформованого стану підсиленої циліндричної оболонки при вільних поперечних коливаннях», *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, (4(77), с. 41–49. doi: 10.31471/1993-9973-2020-4(77)-41-49.

6. Ковальчук Я. О. Комп’ютерне моделювання деформації зварної ферми з косинками у вузлах / Ярослав Олексійович Ковальчук, Наталія Ярославівна Шингера // Вісник ТНТУ, — Т.:ТНТУ, 2016 — Том 83. — № 3. — С. 73-78. — (Механіка та матеріалознавство).

УДК 693.542
В. Телемко, магістр
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМІВНОГО СТАНУ КАРКАСУ АНГАРУ ДЛЯ ЛІТАКІВ

V. Telemko, master.
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

COMPUTER SIMULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE HANGAR FRAME FOR AIRCRAFT

Abstract. Three structural schemes of covering the hangar frame were analyzed and the optimal - frame beam covering was chosen. Modeling of the spatial scheme of the frame was carried out. On the basis of the calculation, which was carried out with using the "Scad 21.1" software complex, taking into account all the necessary factors, the stress-strain state of the load-bearing elements and nodes was investigated.

При проектуванні промислових будівель великих розмірів (цехів, ангарів тощо) важливим питанням є вибір конструктивної схеми покриття з точки зору експлуатаційних та архітектурних вимог, просідання опор, витрат матеріалу, геологічних умов, технологічності виготовлення та монтажу, а також дослідження його поведінки при дії статичних навантажень. Існує багато можливих варіантів конструктивних рішень покриттів, кожен із яких має свої переваги та недоліки, а тому актуальним завданням є його обґрунтований вибір. Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану (НДС) будівлі дозволяє з високою точністю встановити вплив значної кількості зовнішніх і внутрішніх чинників в умовах експлуатації та не допустити появи граничних станів.

Метою даної роботи є вибір конструктивної схеми покриття і комп'ютерне моделювання НДС каркасу ангару для обслуговування літаків з розмірами в плані 108х72 м.

Порівнювали три конструктивних схеми покриття ангару: балочне покриття з двоскатних ферм, рамно-балкове покриття, арочне покриття з балковим розміщенням. Аналіз показав, що оптимальним є рамно-балкове покриття, при застосуванні якого найбільш раціонально використовується внутрішній простір, найменша матеріаломісткість конструкції, яка виготовляється на заводі і укрупнюється на місці. Незважаючи на його основний недолік - схильність до просідання опор, такий варіант покриття найбільш перспективний при проектуванні споруд даного призначення (рис.1, 2).

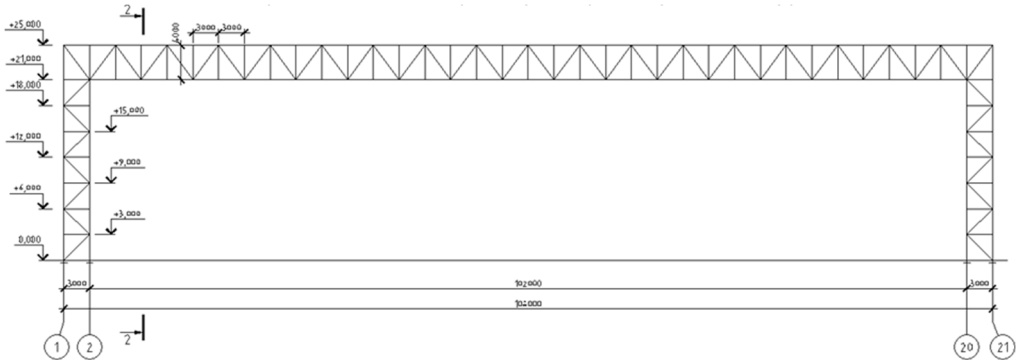


Рис. 1. Конструктивна схема ангару із рамно-балковим покриттям

У поздовжньому напрямку це дві рами прольотом 102 м, з’єднані в жорсткий блок системою зв'язків. У поперечному – це ферми прольотом 66 м, які спираються на колону з одного боку і на нижній пояс рами з іншого. Жорсткість прогонових конструкцій забезпечується зв'язками по верхніх і нижніх поясах ферм та рам. Висота до низу конструкцій покриття змінна – від 15 до 21 м. З’єднання ферм з рамою – шарнірне, ферм з колонами – шарнірне, сполучення колон з фундаментами – шарнірне. Похила ферма, прольотом 66 метрів, виконана з труб квадратного перерізу, складається з 5 відправних елементів двох типорозмірів довжиною 12 і 18 м. Пояси та стійки поздовжньої рами прольотом 102 м виконані зі зварних двотаврів. Розкоси, затяжки і зв'язки рами виконані з труб квадратного перерізу. Рама складається з 13 відправних елементів чотирьох типорозмірів. Поздовжня рама – безшарнірна.

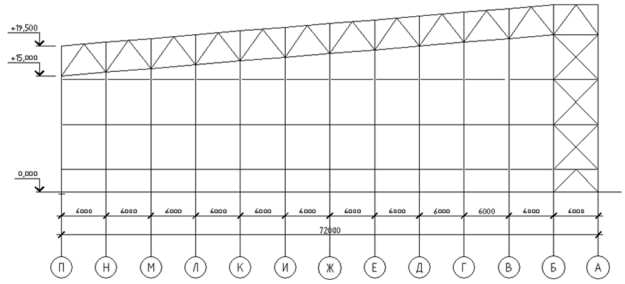


Рис. 2. Розріз 2-2

Для будівлі ангару прийнято поздовжньо-поперечне компонування (рис.3). Будівля прямокутної форми у плані. Розміри будівлі в плані в осях 1-21 та А-П становлять 108х72м. У поздовжньому напрямку по осях А і Б застосовано блок двох безшарнірних портальних рам прольотом 102 м. У поперечному напрямку ферми прольотом 66 м з кроком 6м спираються на портальну раму осі Б, і на колони осі П.

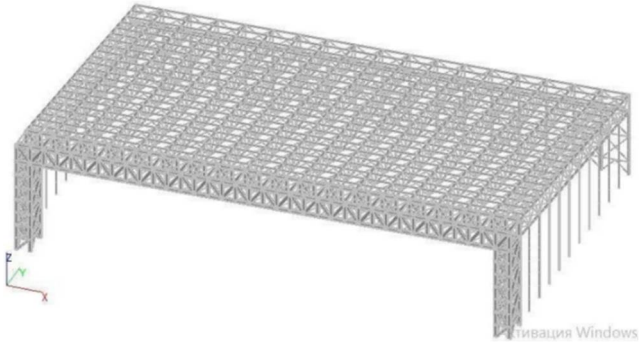


Рис. 3. Просторова схема каркасу будівлі.

Розрахунок з урахуванням просторової роботи каркасу ангару було здійснено у програмному комплексі «Scad 21.1». Крок колон був рівний 6 м по осі П і безпосередньо на них спирали поздовжні Схему застосування навантажень по осі П подано на рис. 4.

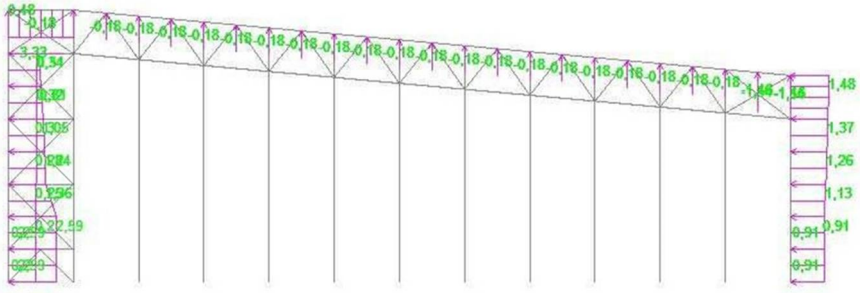


Рис. 4. Схема прикладання навантажень по осі П.

Визначали коефіцієнти використання перерізів верхнього і нижнього поясів та розкосів ферми (рис.5).

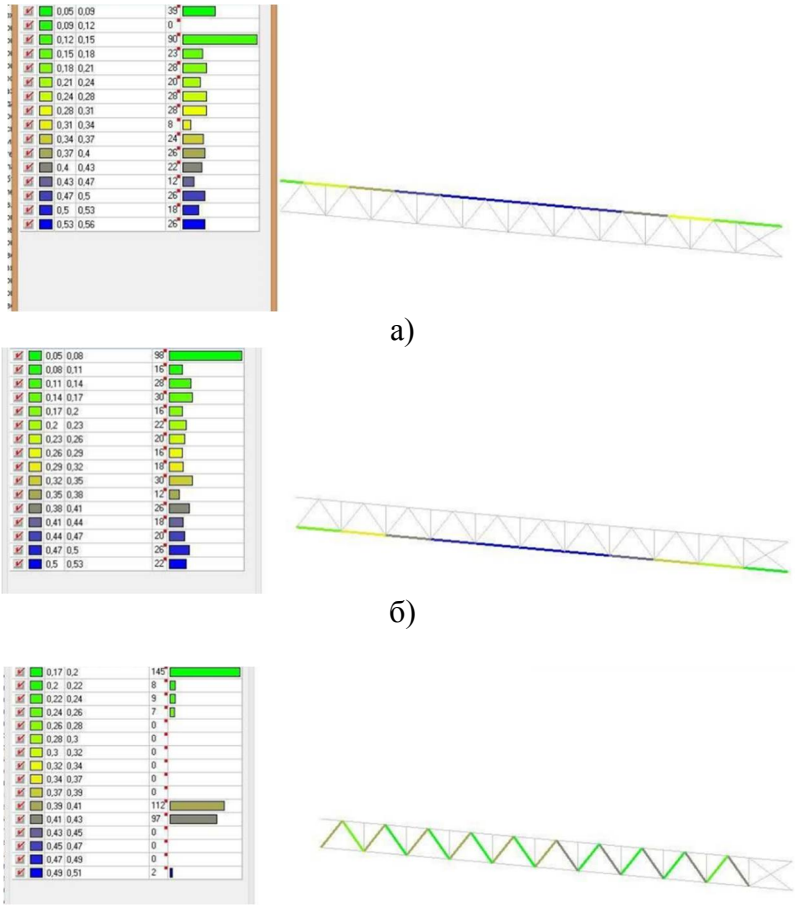


Рис. 5. Коефіцієнти використання перерізів верхнього (а), нижнього(б) поясів та розкосів (в) ферми.

На основі розрахунку каркаса проводили точний розрахунок за міцністю та стійкістю несучих елементів, а також розрахунок вузлів, з урахуванням усіх необхідних факторів за нормами, вносили коригування в конструкцію каркасу будівлі заданням жорсткості в програмі "SCAD" і перевіряли деформативні властивості каркасу.

Література.

1. Оцінка технічного стану стальних конструкцій виробничих будинків і споруд, що експлуатуються : ДБН 362-92. – К.: Вид-во Держкомбуд України, 1995.

2. Ковальчук Я. О. Комп’ютерне моделювання деформації зварної ферми з косинками у вузлах / Ярослав Олексійович Ковальчук, Наталія Ярославівна Шингера // Вісник ТНТУ, — Т. : ТНТУ, 2016 — Том 83. — № 3. — С. 73-78. — (Механіка та матеріалознавство).

3. Mykhailo Hud, Simulation of the stress-strain state of a cylindrical tank under the action of forced oscillations, Procedia Structural Integrity, Volume 36,2022, Pages 79-86, ISSN 2452-3216, https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.006.

4. Ясній, П. В., Пиндус, Ю. І. і Гудь, М. І. (2020) «Аналіз напружено-деформованого стану підсиленої циліндричної оболонки при вільних поперечних коливаннях», *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, (4(77), с. 41–49. doi: 10.31471/1993-9973-2020-4(77)-41-49.

УДК 539.3

Р. Кушнір[1], д.ф.-м.н., проф., Я. Пастернак[2], д.ф.-м.н., проф., Г. Сулим[1], д.ф.-м.н., проф.
[1]Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України
[2]Волинський національний університет імені Лесі Українки, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТІЛ ІЗ ОБОЛОНКОВИМИ НЕОДНОРІДНОСТЯМИ НА ОСНОВІ ПОЄДНАННЯ СІТКОВИХ ТА БЕЗСІТКОВИХ МЕТОДІВ

R.M. Kushnir [1], DSc, Prof.; Ia.M. Pasternak [2], DSc, Prof.; H.T. Sulym [1], DSc, Prof.
[1]Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics of NAS of Ukraine
[2]LesyaUkraikaVolyn National University, Ukraine

STRESS-STRAIN STATE DETERMINATION IN SOLIDS CONTAINING SHELL-LIKE INHOMOGENEITIES BASED ON COMBINATION OF MESH REDUCTION AND MESHFREE METHODS

Abstract.This study considers numerical methods for analysis of stress/strain state of anisotropic solids containing 3D shell-like deformable inhomogeneities. Based on the coupling principle for continua of different dimension the problem is reduced to the analysis of a 3D solid containing the surface of field discontinuity and the shell with coupled boundary conditions set on the surface of the shell and field discontinuity surface. The problem for a solid with a field discontinuity surface is solved using the boundary element approach, and the problem for a shell is considered using the Petrov – Galerkin meshfree approach with moving least square approximation. Substantiation and validation of the proposed approach is presented.

На даний час поряд із механікою руйнування тіл із тріщинами активно розвивається теорія міцності тіл із тонкостінними неоднорідностями, у якій щілини є лише одним із часткових випадків властивостей матеріалу включення [1]. Поряд із аналітичними підходами аналізу задач для середовищ із тонкими дефектами розробляються також і числові методи. Зокрема, у двовимірних та просторових задачах термопружності анізотропних тіл ефективним виявився граничноелементний метод функцій стрибка (див. напр., [2]). Останній полягає у наступному.

Як і в базовому методі функцій стрибка задачу для тіла, що містить тонкі включення розмірності на одиницю меншої від розмірності базової структури, можна умовно розбити на три частково пов’язані підзадачі: (а) *зовнішню* для середовища із умовно заданими (наперед невідомими) на поверхнях функціях впливу (стрибків чи розривів фізико-механічних полів); (б) *проміжну* у вигляді *умов контактної взаємодії* середовища із неоднорідністю та (в) *внутрішню*. Остання полягає у побудові більш чи менш адекватної математичної моделі неоднорідності, у якій виявляється зв’язок між поверхневими (на поверхні неоднорідності) функціями впливу та поведінкою (деформуванням, теплопровідністю тощо) серединної поверхні тонкого (оболонкового) включення та його поперечних перерізів. Проміжна задача пов’язує між собою згадані поверхневі функції впливу внутрішньої та функції впливу зовнішньої задач за допомогою умов контактної взаємодії, результатом чого є конкретна система інтегральних рівнянь (чи нерівностей) задачі з урахуванням характеру контакту між

включенням і середовищем – ідеального чи неідеального. У разі ідеального контакту відповідні функції впливу зовнішньої та внутрішньої задач будуть збігатися.

Граничноелементний метод функцій стрибка при побудові базової системи сингулярних інтегродиференціальних рівнянь щодо шуканих функцій стрибка використовує викладені вище принципи, а при розв'язуванні згаданої системи застосовує числову схему методу граничних елементів, особливостями якої є використання спеціальних функцій форми для врахування кореневої особливості на фронтальній лінії неоднорідності, спеціальних квадратурних формул інтерполяційного типу для обчислення сингулярних та гіперсингулярних інтегралів, а також нелінійних відображень для згладження підінтегральних виразів поблизу фронту включення. Така схема була апробована на задачах для недеформівних електропровідних та магнітопроникних включень у термомагнітоелектропружних анізотропних середовищах [2], а також при моделюванні впливу деформівних оболонкових неоднорідностей [3].

Одним із недоліків підходу [3] є використання однакових функцій форми для граничноелементного моделювання зовнішньої та скінченноелементного опису внутрішньої задач. Річ у тім, що метод [2] використовує розривні граничні елементи, жоден із вузлів яких не розміщений на реальній фізичній межі елементів. Це зумовлює додаткові проблеми «зшивання» відповідних їх скінченних елементів, що моделюють включення, між собою. Більше того, екстраполяція шуканих функцій на межі елементів вносить деякі неточності в обчислювальну схему.

Для усунення цих недоліків у цьому дослідженні для моделювання оболонкової неоднорідності запропоновано використовувати безсітковий підхід на основі застосування методу рухомих найменших квадратів (moving least squares, MLS) для апроксимації шуканих функцій за вузловими значеннями та схеми Петрова – Гальоркіна для розв'язування визначальної системи рівнянь деформування оболонки [4]. При цьому вузли для MLS-апроксимації вибираються тими ж, що й вузли розривних граничних елементів. Такий підхід усуває необхідність «зшивання» елементів оболонки, адже шукана функція апроксимується за усіма вузловими значеннями, причому домінування окремих забезпечується належним вибором вагових функцій для MLS.

Розроблено низку математичних моделей оболонкових неоднорідностей, починаючи із найпростішої мембранної із подальшим ускладненням з урахуванням ефектів згину за різними гіпотезами тощо. Здійснений аналіз тестових задач засвідчив високі швидкість та точність запропонованого підходу. Це істотно розширює сферу можливого застосування опрацьованих науковою школою проф. П.В. Яснія методів оцінки міцності та довготривалості конструкційних елементів і композитів.

Література.

1. Сулим Г.Т. Основи математичної теорії термопружної рівноваги деформівних твердих тіл з тонкими включеннями. Львів: Дослідно-видавничий центр НТШ, 2007. 716 с.

2. Pasternak Ia., Sulym H., Ilchuk N. Boundary element analysis of 3D shell-like rigid electrically conducting inclusions in anisotropic thermomagnetoelectroelastic solids // Z Angew Math Mech. 2019. e201800319. https://doi.org/10.1002/zamm.201800319

3. Сулим Г., Пастернак Я., Михалюк Ю. Математичне моделювання впливу просторових оболонкових включень у термомагнітоелектропружних тілах // Міжнар. наук. конф. «Сучасні проблеми термомеханіки – 2021» 15 – 17 вересня 2021 р., Львів, Україна. Режим доступу: http://iapmm.lviv.ua/cpt2021/materials/C01.21.pdf

4. Atluri S. N., Zhu T. A new Meshless Local Petrov-Galerkin (MLPG) approach in computational mechanics // Computational Mechanics. 1998. 22. P. 117–127.

УДК 539.3

Н. Антоненко[1], к.ф.-м.н., доц., І. Ткаченко[2], к.ф.-м.н., доц., А. Ткаченко[2], студент
[1]Національний університет «Запорізька політехніка», Україна
[2]Запорізький національний університет, Україна

ПРОСТОРОВА ЗАДАЧА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ДЛЯ ДВОШАРОВОЇ ОСНОВИ З НЕІДЕАЛЬНИМ ТЕПЛОВИМ КОНТАКТОМ МІЖ ШАРАМИ

N. Antonenko, Ph.D., Assoc. Prof., I. Tkachenk, Ph.D., Assoc. Prof., A. Tkachenko, student
[1] National University "Zaporizhzhia Polytechnic" Ukraine,
[2] Zaporizhzhia National University, Ukraine

SPATIAL PROBLEM OF THERMAL CONDUCTIVITY OF A TWO-LAYER FOUNDATION WITH IMPERFECT THERMAL CONTACT OF ITS LAYERS

An analytical solution of a three-dimensional stationary problem of determining temperature field at the points of a two-layer foundation with imperfect thermal contact between its layers is obtained. The considered problem is solved by the two-dimensional Fourier transform. The influence of the thermal resistance coefficient on the temperature distributions at the points of the lower boundary of the upper layer is researched.

Розглянемо двошарову основу, яка знаходиться під впливом температурного поля. Під двошаровою основою розумітимемо пакет із двох однорідних, невагомих та ізотропних зчеплених між собою шарів, що лежить на півпросторі. На спільних межах шарів виконуються умови неідеального теплового контакту [1], а між пакетом та півпростором – ідеального теплового контакту. На верхній межі основи відомо закон розподілу температури, а на поверхні півпростору підтримується нульова температура. Необхідно знайти розподіл температури в точках основи.

Нумерацію шарів будемо проводити зверху вниз, починаючи з одиниці, півпростору присвоїмо номер 3. У кожному шарі введемо локальну декартову систему координат з початком на верхній межі шару так, щоб усі вісі $O_k z_k$ лежали на одній прямій, а вісі $O_k x_k$, $(O_k y_k)$ були паралельні $O_1 x_1$ ($O_1 y_1$).

Задача зводиться до розв'язання диференціального рівняння відносно температури $T_k = T_k(x, y, z)$ для кожного шару основи:

$$\frac{\partial^2 T_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_k}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_k}{\partial z^2} = 0,\ k = 1,2.$$

Граничні умови:

$$T_1(x, y, 0) = f(x, y),\ T_3(x, y, 0) = 0. \tag{1}$$

Умови на спільних межах шарів [1]:

$$k_{T,1} \frac{\partial T_1}{\partial z}(x, y, h_1) = \frac{1}{R}\left[T_2(x, y, 0) - T_1(x, y, h_1)\right],\ k_{T,2} \frac{\partial T_2}{\partial z}(x, y, 0) = k_{T,1} \frac{\partial T_1}{\partial z}(x, y, h_1), \tag{2}$$

$$T_3(x, y, 0) = T_2(x, y, h_1),\ k_{T,3} \frac{\partial T_3}{\partial z}(x, y, 0) = k_{T,2} \frac{\partial T_2}{\partial z}(x, y, h_2), \tag{3}$$

де R – коефіцієнт теплового опору.

Задача розв'язується за допомогою двомірного інтегрального перетворення Фур'є за змінними x та y:

$$\overline{f(x, y)} = \bar{f}(\xi, \zeta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{i(\xi x + \zeta y)} dx dy,\ f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{f}(\xi, \zeta) e^{-i(\xi x + \zeta y)} d\xi d\zeta.$$

Відомо [2], що трансформанту температури $\overline{T}_k(\xi,\zeta,z)$ k-го шару основи можна подати у вигляді лінійної комбінації допоміжних функцій $\eta_k(\xi,\zeta)=\overline{T}_k(\xi,\zeta,0)$, $\varepsilon_k(\xi,\zeta)=\frac{1}{p}\frac{d\overline{T}_k}{dz}(\xi,\zeta,0)$:

$$\overline{T}_k(\xi,\zeta,z)=\mathrm{ch}pz\,\eta_k(\xi,\zeta)+\mathrm{sh}pz\,\varepsilon_k(\xi,\zeta),$$

де $p^2=\xi^2+\zeta^2$, $k=1,2$.

Запишемо граничні умови (1) та умови на спільних межах шарів (2), (3) у просторі трансформант. Будемо мати:

$$\overline{T}_1(\xi,\zeta,0)=\bar{f}(\xi,\zeta),\ \overline{T}_3(\xi,\zeta,0)=\overline{T}_2(\xi,\zeta,h_2)=0, \tag{4}$$

$$\overline{T}_2(\xi,\zeta,0)=\overline{T}_1(\xi,\zeta,h_1)+L\frac{d\overline{T}_1}{dz}(\xi,\zeta,h_1),\ k_{T,2}\frac{1}{p}\frac{d\overline{T}_2}{dz}(\xi,\zeta,0)=k_{T,1}\frac{1}{p}\frac{d\overline{T}_1}{dz}(\xi,h_1),\ L=Rk_{T,1}. \tag{5}$$

Підставимо у рівності (4) та (5) вирази для трансформанти температури при $z=h_1$ та $z=h_2$. Використовуючи отримані співвідношення, знайдено рекурентні формули для обчислення допоміжних функцій шарів основи:

$$\eta_1=\overline{T}_1(\xi,\zeta,0),\ \eta_2=\left[C_1+LpS_1-r_1(S_1+LpC_1)\right]\eta_1,\ \varepsilon_k=-r_k\eta_k,\ r_1=\frac{\Delta S_1+r_2(C_1+LpS_1)}{\Delta C_1+r_2(S_1+LpC_1)},\ r_2=\mathrm{cth}\,p_2,$$

де $p_k=ph_k$, $\Delta=k_{T,1}/k_{T,2}$, $S_k=\mathrm{sh}p_k$, $C_i=\mathrm{ch}p_k$, $k=1,2$.

Оскільки $\varepsilon_k=-r_k\eta_k$, а $\lim\limits_{p\to\infty}r_k(p)=1$, то для чисельної реалізації поставленої задачі вирази для трансформант температури представлено у вигляді:

$$\overline{T}_k(\xi,\zeta,z)=\left(\mathrm{e}^{-pz}+\tilde{r}_k\mathrm{sh}pz\right)\eta_k(\xi,\zeta),\ k=1,2,$$

де $\tilde{r}_1=\left(\Delta+(1-\tilde{r}_2)(Lp-1)\right)e^{-p_1}/\left(\Delta C_1+(1-\tilde{r}_2)(S_1+LpC_1)\right)$, $\tilde{r}_2=-e^{-p_2}/S_2$.

Застосовуючи до останньої формули обернене перетворення Фур'є, отримаємо формулу, що дозволяє знайти температуру в будь-якій точці k-го шару основи.

Чисельні розрахунки проведено для двошарової основи з такими параметрами шарів: $h_1=h_2=1$, $k_{T,1}/k_{T,2}=1$. На її верхній межі $T_1(x,y,0)=T_0\delta(x,y)$. На рис. 1 та рис. 2 наведено графіки розподілу температури в перерізах $x=0$ та $x=1$ у точках нижньої межі верхнього шару основи при різних значеннях коефіцієнта теплового опору.

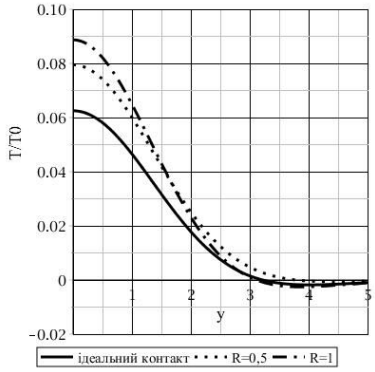


Рис. 1

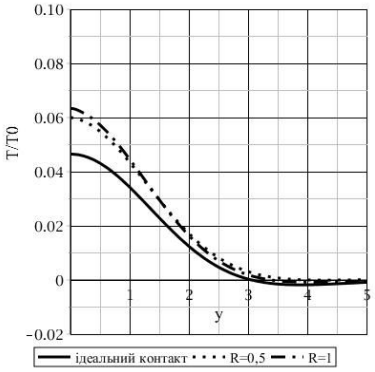


Рис. 2

Література.

1. Немиш Б. Ю. Трехмерные задачи термоупругости для неравномерно нагретых слоистых трансверсально-изотропных пластин / Б. Ю. Немиш // Прикл. механика. – 1999. – 35, № 7. – С. 95–103.

2. Величко І. Г. Просторова та осесиметрична термопружна деформація багатошарової основи / І. Г. Величко, І. Г. Ткаченко // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Механіка. – 2004. – Вип. 8. – 2, № 6/2. – С. 36–43.

УДК 621.855

І. Луців[1], докт .тех .наук, проф., Т. Дубиняк[1], к.т.н., доц., О. Манзій[2] канд. фіз. мат. наук, доц., С. Андрейчук[2] канд. наук держ.упр., доц.
[1]Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна,
[2]Національний університет «Львівська політехніка», Україна;

РОЗРАХУНОК ДЕФОРМАЦІЙ ЕЛЕМЕНТІВ РОЛИКОВОГО ЛАНЦЮГА

I. Lutsiv[1], Ph.D., Prof., T. Dubyniak[1], Ph.D, Assoc.Prof., O. Manziy[2], Ph.D, Assoc.Prof., S. Andreichuk[2], Ph.D, Assoc.Prof.
[1]Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine,
[2]Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

DEFORMATION CALCULATIONS OF ROLLER CHAIN ELEMENTS

Abstract. In order to evaluate the influence of the various factors on the performance of the roller chains, approach is presented to determine the deformations of the chain elements. The calculations are carried out at different levels of chain loading, taking into account the functional clearances between the intermediate plates. As a result the system total deformations as well as the bending moment acting on the outer plate are determined.

Роликові ланцюги [1], в тому числі і багаторядні знайшли широке застосування у приводах сучасних машин. Вони можуть працювати при високих швидкостях і навантаженнях, і за таких самих частот обертання, як і однорядні ланцюги, передавати значно більшу корисну потужність.

Часто такі ланцюги зображають схемою паралельного з'єднання двох, трьох і більше однорядних ланцюгів, при цьому очікуючи відповідного підвищення навантажувальної спроможності передачі. Але на практиці цього досягнути неможливо. Навіть при застосуванні конструкторсько-технологічних спроб підсилення окремих деталей цьому заважає різнорозмірність їх елементів [2].

Тому актуальним є комплексне дослідження деформаційного стану всіх елементів багаторядного ланцюга для виявлення причин зниження його несучої здатності.

Зауважимо, що ідеальна модель відповідного ланцюга забезпечує рівномірний розподіл навантаження між однотипними деталями паралельних рядів. Проте реальну модель від ідеальної відрізняє ряд характерних ознак. Зокрема, в результаті різнорозмірності пластин форма внутрішніх ланок відхиляється від прямокутника в сторону трапеції, а контакт втулки з валиком від лінійного прямує до точкового; проміжні пластини також різнорозмірні й у загальному випадку не контактують з валиком; точка контакту втулок з валиком може зміщуватися в бік зовнішніх або проміжних пластин.

В зв'язку із цим актуальним є комплексне визначення деформацій елементів ланцюга, а власне – механічної системи ролик - пластина.

Запропонований підхід передбачає розгляд двох етапів.

На першому - зовнішнє навантаження через внутрішні ланки (блоки) викликає згин валиків, а також розтяг і певний згин напресованих на них зовнішніх пластин. Проміжні пластини на цьому етапі не сприймають навантаження.

Початку другого етапу відповідає сприйняттю навантаження однією з проміжних пластин. При цьому доля навантаження на зовнішні пластини дещо зменшується за рахунок сприйняття частини навантаження проміжними пластинами. Додатковий прогин валика в місці контакту з проміжною пластиною визначається деформацією останньої.

Аналіз деформаційної картини елементів ланцюга проводився окремо для цих етапів.

В якості розрахункової схеми для визначення деформацій елементів зовнішньої ланки прийнята пружно-деформована рама з жорсткими кутами (рис. 1,а).

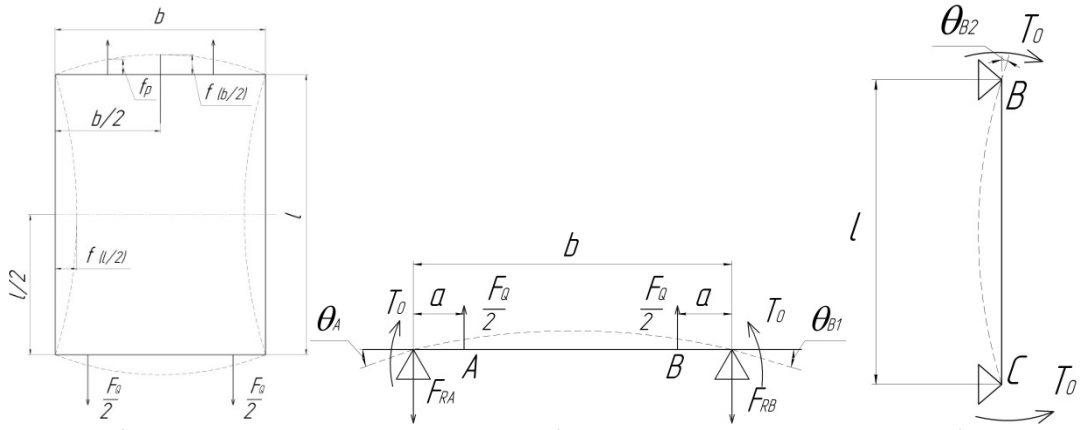


Рис. 1. Розрахункова схема деформації елементів ланцюга (а) та лінійних (б) і крутних (в) деформацій

У розрахунку - зусилля, що діють з боку внутрішніх ланок, представлені зосередженими силами $F_Q/2$, прикладеними на певній відстані a від зовнішніх пластин, причому $0 < a < a_p$. Внаслідок повної симетрії розглянутої рами її можна поділити на дві балки АВ і ВС (рис. 1,б і в) і розглядати поздовжні й поперечні деформації в них окремо. Застосувавши метод початкових параметрів з урахуванням абсолютної жорсткості кутів рами, яка забезпечує рівність кутів повороту кінців балок ($\theta_{B1} = \theta_{B2}$), можемо визначити момент згину T_0, який діє у вузлах:

$$T_0 = \frac{F_Q \cdot a(b-a)E_P I_P}{2(bE_P I_P + lE_S I_S)}$$

де b - ширина зовнішньої ланки; E_P, E_S - відповідно модулі пружності матеріалу зовнішньої пластини і валика; I_P , I_S - моменти інерції поперечних перерізів зовнішньої пластини і валика; l - міжцентрова відстань отворів пластини. Розвиваючи такий підхід, визначені сумарні деформації пластин і валиків, а також момент згину, що діє на зовнішню пластину.

При цьому зрозуміло, що достатньо інформативним показником деформації елементів ланцюга є різниця Δ видовжень зовнішньої і проміжної пластин. В результаті розрахунків виявлено, що коли розміщення рівнодійної сили відповідає середині ширини внутрішньої ланки (а=12мм, зазвичай прийнята схема), деформація проміжних пластин є більшою, ніж для зовнішніх величин (Δ - від'ємна). Для ближчих до реальних умов навантажень, що враховують деформацію валика (а=6мм; а=3мм), більш деформованими завжди виявляються зовнішні пластини ($\Delta > 0$).

Література.

1. Зубченко І.І. Кінематика і динаміка ланцюгових передач/ І.І. Зубченко, С.А. Дубиняк, В.Є. Рибак. – Львів: Вид-во Львівського ун-ту. – 1972. 124 с.

2. Назаревич О. Розмірні характеристики приводних ланцюгів/ О. Назаревич// Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 1999,том 4, число 3, с. 126-135.

УДК 693.542
С. Курач, магістр, Д. Вознюк, магістр, Е. Сидоренко, магістр, Я. Ковальчук, к.т.н.
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВЕЛИКОПРОЛІТНОГО ПРОСТОРОВГО АРОЧНОГО КАРКАСУ БУДІВЛІ ГРОМАДСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

S. Kurach, master, D. Vozniuk, master, E. Sydorenko, master, Ya. Kovalchuk, Ph.D.
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

STUDY OF THE WORK OF THE LARGE-SPAN SPATIAL ARCH FRAME OF A PUBLIC BUILDING

Abstract. The calculation of spatial arched structures was carried out according to two execution options. Calculations were carried out taking into account the limit states of the first and second groups under unfavorable combinations of loads or corresponding efforts. These combinations are established from the analysis of real variants of the simultaneous action of various loads for the analyzed stage of the structure or foundation.

При виборі конструкції покриття в громадській будівлях, основними є виконання наступних вимог:

- органічної та логічної єдності несучих конструкції та архітектурних форм;
- виразного та функціонального архітектурного рішення внутрішнього простору та споруди в цілому;
- використання конструкцій із невеликою власною маси, підвищивши за ефективність сприйняття конструкцією експлуатаційних навантажень;
- за рахунок багаторазової уніфікації елементів та вузлових деталей, забезпечення можливості потокового виготовлення їх на заводах.

Усього цього можна досягти, застосовуючи аркове покриття. Розглянемо його переваги та недоліки.

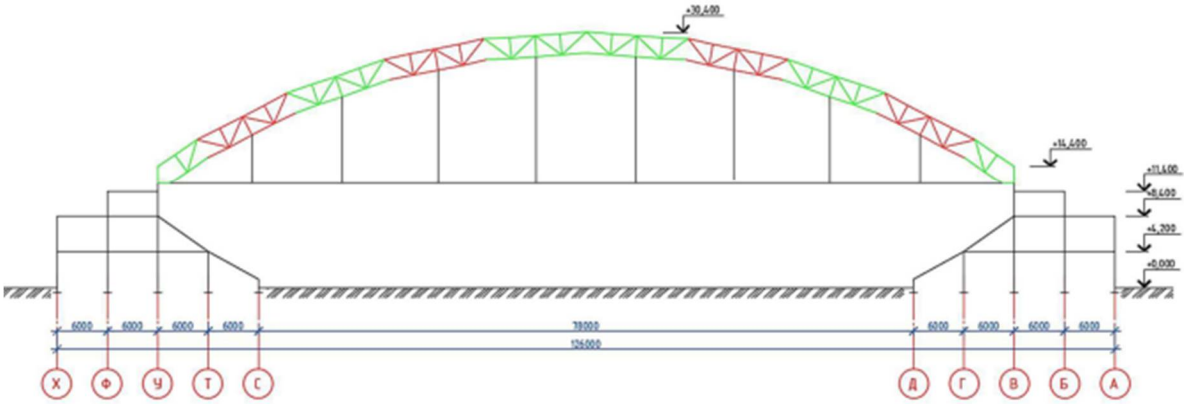
Основні переваги арочних покриттів:

- архітектурна виразність;
- велика несуча здатність при невеликих перерізах елементів;
- сприятливий розподіл моментів у всій довжині;
- можливість виготовлення елементів конструкції на заводах.

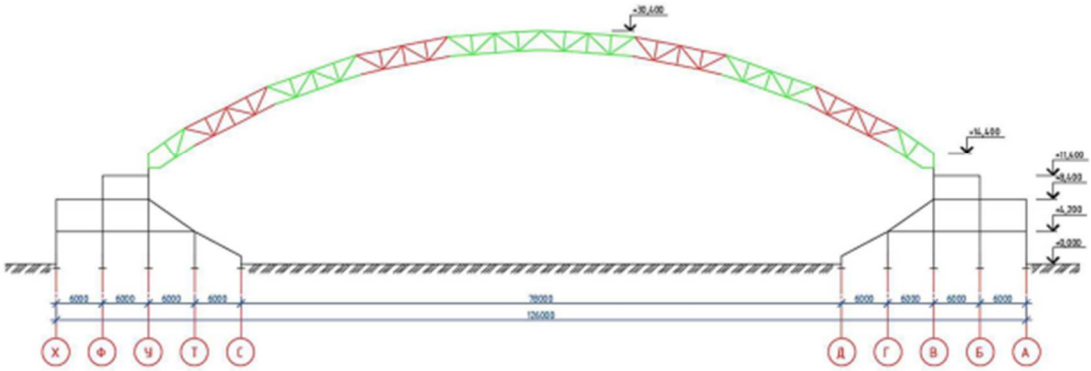
Основні недоліки арочних покриттів:

- велика будівельна висота;
- необхідність улаштування потужних опор або затяжки;
- складність монтажу.

Оскільки складність монтажу залежить від наявності затяжки, то проведено скніченно-елементний розрахунок арочного покриття без затяжки. Для цього проведемо моделювання роботи двох рівноцінних варіантів влаштування покриття та порівняємо їх за жорсткістю та матеріаломісткістю. Арочне покриття із затяжкою та без неї показано на рисунку 1.



а)



б)

Рис. 1. Схема влаштування покриття із затяжкою(а) та без неї (б)

Очевидно, що за відсутності затяжки розпір зумовить додаткові переміщення та збільшення зусилля в елементах каркасу (особливо в колонах), що спричинить необхідність збільшення перерізів цих елементів і як наслідок збільшення металоємності.

З результатів розрахунків, стало відомо значення власної ваги арочного каркасу при використанні затяжки - 1850 т, а за її відсутності – 2320 т. Збільшення металоємності становило 490 т, що становить близько 27 %..

Враховуючи отримані дані, можна дійти висновку, що використання затяжки необхідно, оскільки. це дає значну економію сталі (особливо в опорах), хоч і збільшує складність і тривалість монтажу.

Література.

7. ДБН В.2.2-41:2019 Висотні будівлі. Основні положення.

8. Ясній, П. В., Пиндус, Ю. І. і Гудь, М. І. (2020) «Аналіз напружено-деформованого стану підсиленої циліндричної оболонки при вільних поперечних коливаннях», *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, (4(77), с. 41–49. doi: 10.31471/1993-9973-2020-4(77)-41-49.

9. Ковальчук Я. О. Комп’ютерне моделювання деформації зварної ферми з косинками у вузлах / Ярослав Олексійович Ковальчук, Наталія Ярославівна Шингера // Вісник ТНТУ, — Т. : ТНТУ, 2016 — Том 83. — № 3. — С. 73-78. — (Механіка та матеріалознавство).

УДК 693.542
В. Дзьоба, магістр, О. Стасюк, магістр, С. Данильченко, Н. Чорномаз, к.т.н.
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ КОМБІНОВАНОГО КАРКАСУ ІЗ ЗАЛІЗОБЕТОНУ ТА ДЕРЕВА БАГАТОПОВЕРХОВОЇ ЖИТЛОВОЇ БУДІВЛІ ПРИ ДІЇ ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Dzoba V., master, Stasiuk O., master, Danylchenko S.M. sr. lect. N. Chornomaz, Ph.D.

STUDY OF THE OPERATION OF THE COMBINED FRAME OF REINFORCED CONCRETE AND WOOD OF A MULTI-STORY RESIDENTIAL BUILDING UNDER THE EFFECT OF WIND LOAD

Abstract. The construction of high-rise residential buildings and business centers from wood is a trend that is gaining more and more popularity in Europe and America. The technologies of wooden construction are constantly being improved, and it becomes obvious that building from wood is profitable, fast, reliable and safe. New records for the construction of multi-story buildings using CLT wooden panels and LVL glued beams appear every year.

З усіх будівельних матеріалів деревина має найтривалішу історію застосування. Ще первісні люди будували з дерев'яних колод примітивні житла, невеликі мости та огорожі. Першочерговість деревини в історії будівництва обумовлена її поширеністю та простотою обробки. З розвитком науки відбувався розвиток будівництва з деревини і багатоповерхових житлових будівель.

З кожним роком з'являються нові рекорди зведення багатоповерхових будівель із застосуванням дерев'яних панелей CLT і клеєного бруса LVL.

Переваг у CLT-панелей багато, що дозволяє деяким експертам називати їх матеріалом майбутнього:

- матеріал екологічно чистий. У виробництві використовують клей класу Е1, меблевий, тобто безпечний для людини;
- CLT-панелі забезпечують здоровий мікроклімат у приміщенні;
- немає усадки на відміну від зрубаних колод;
- не виникають щілини в стінах, відсутня необхідність герметизації швів;
- немає потреби штукатурити стіни, так як вони вже мають рівну поверхню;
- процесі будівництва утворюється мінімальна кількість сміття та відходів;
- CLT панелі не горять. Так, вони дерев'яні, але завдяки склеюванню під сильним тиском дуже щільні. Як показали випробування, стіна з цього матеріалу витримує нагрівання до +1200 °С.
- будинки виходять сейсмостійкими, зараз їх будують у Японії. CLT-панелі можуть витримати дев'ятибальний землетрус.

Розрахунок проводимо методом скінченних елементів. Основними невідомими є переміщення та повороти вузлів розрахункової схеми. Тому дана розрахункова схема представлена у вигляді набору елементів стандартного типу – стрижнів, пластин, оболонок тощо.

Відповідно до проведених обчислень, встановлено, що запропонований конструктивний варіант багатоповерхової житлової будівлі відповідає вимогам [1] стосовно деформативності, при дії вітрових навантажень.

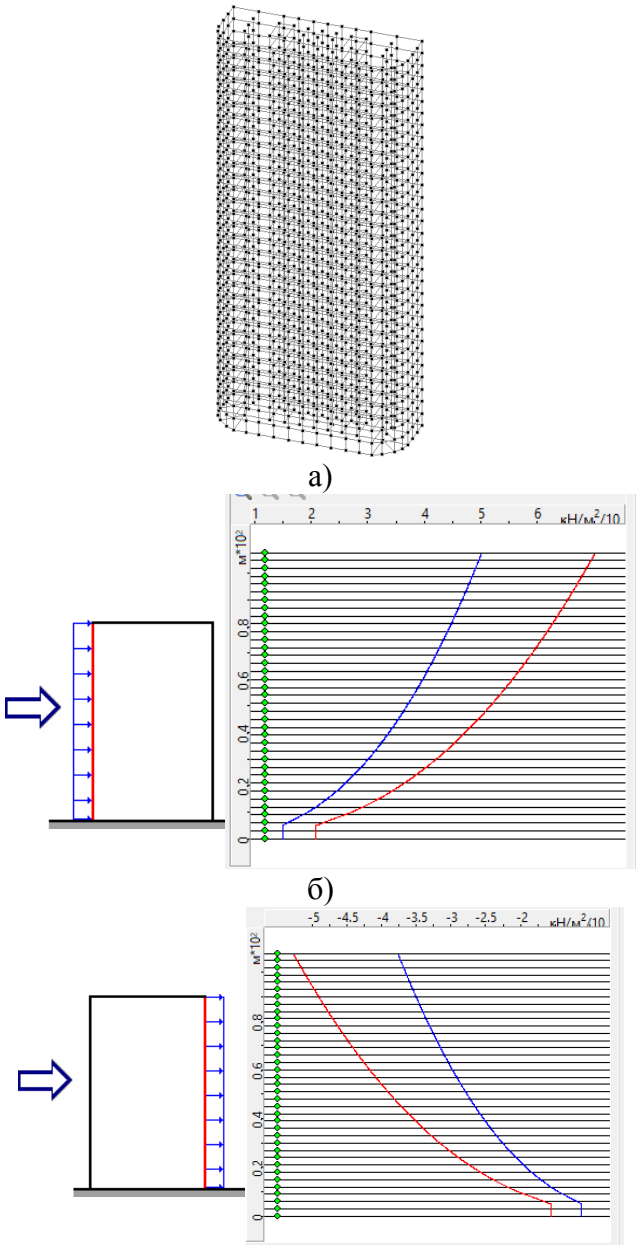


Рис. 1. Розрахункова схема будівлі (а), результати розрахунку вітрового навантаження з навітряного боку (б), результати розрахунку вітрового навантаження з підвітряного боку (в)

Література.

1. ДБН В.2.2-41:2019 Висотні будівлі. Основні положення.

2. Гомон, Святослав; Матвіюк, Олександр; Чорномаз, Наталія. Поліпшення механічних властивостей деревини за рахунок їх склеювання. Сучасні проблеми Архітектури та Містобудування, 2022, 62: 333-342.

3. Чорномаз, Наталія Юріївна; Гудь, Михайло Іванович. Методичні вказівки до виконання курсової роботи на тему «Проектування одноповерхової виробничої будівлі» з навчальної дисципліни «Проектування конструкцій з дерева і пластмас» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» для денної та заочної форм навчання. 2020.

УДК 693.542
А-А. Семчук, магістр, Г. Крамар, к.т.н., М. Гудь, к.т.н.
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО КАРКАСУ ГРОМАДСЬКОЇ БУДІВЛІ ПРИ БАГАТОФАКТОРНОМУ РОЗРАХУНКУ

A-A. Semchuk, master, H. Kramar, Ph.D., Hud M., Ph.D.
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

SIMULATION OF THE WORK OF THE REINFORCED CONCRETE FRAME OF A PUBLIC BUILDING IN THE MULTIFACTOR CALCULATION

Abstract. Calculations of building frame elements: metal columns, rails, beams, connections, monolithic floors and walls were carried out in the SCAD Office software complex. The main forces arising in the frame from the action of operational loads under the most unfavorable combination are determined. Also, the movement of the frame of the building in the vertical and horizontal planes was calculated, and the cracking of the building under seismic forces was determined.

При проектуванні будівель важливим питанням є врахування впливу усіх типів навантажень та проведення розрахунків з урахуванням сумісної дії їх конструктивних елементів [1]. Громадська будівля, що призначена для біржової та ділової активності, має специфічну планувальну, просторову і функціональну організацію. Зокрема, конструктивна схема будівлі запроектована в каркасному виконанні – основна частина виконана із залізобетонного монолітного каркасу, що складається з залізобетонних колон і монолітних перекриттів, а консоль – в металевому каркасі у вигляді двоповерхової ферми. Розрахунок таких ферм має певні особливості [2], а вивчення напружено-деформівного стану залізобетонних каркасів будівель різного призначення є предметом досліджень багатьох дослідників [3, 4]. Тому моделювання роботи залізобетонного каркасу громадської будівлі складної конфігурації є актуальною задачею.

Метою даної роботи є, визначення площі армування основних конструктивних елементів громадської будівлі із залізобетонним каркасом при багатофакторному розрахунку, зокрема, деформативності, максимального відсотку армування та максимальних прискорень (при дії циклічних навантажень).

Шестиповерхова будівля з підвальним поверхом, має прямокутну форму в плані розміром 24 х 44 м, висота – 27 м. Покрівля не експлуатується, запроектовано внутрішній водостік. Геометрична незмінність забезпечується жорстким з'єднанням колон у фундаменти і колон з консольною частиною.

Комплексний розрахунок несучих конструкцій будівлі виконаний в обчислювальному комплексі SCAD з використанням методу скінченних елементів. При розрахунку розглядалася просторова система системи будівлі із 6 ступенями свободи. Просторова скінченно-елементна модель складається з несучих елементів будівлі: стін, колон, плит, балок, зв'язків, прогонів.

Навантаження на каркас будівлі збирали згідно з вимогами [1]. Залежно від тривалості дії навантажень всі вони розділяються на постійні, тимчасові: тривалі, короткочасні і інші. До постійних навантажень відносено: власну вагу металевих конструкцій (автоматично враховується в програмному комплексі SCAD; коефіцієнт надійності за навантаженням - 1,05); власну вагу залізобетонних конструкцій (враховується автоматично, коефіцієнт надійності за навантаженням -1,3),

навантаження від стін при висоті поверху 4,0 м прикладали у вигляді рівномірно-розподіленого нормативного навантаження.

Вітрове навантаження прикладали як рівномірно-розподілене залежно від напрямку вітру, при цьому отримали 4 варіанти завантажень. Пульсаційна складова вітрового тиску врахована програмним комплексом SCAD як динамічний вплив.

В результаті розрахунку отримано значення прискорень (рис.1) переміщень каркасу будівлі (рис.2) та відсоток армування залізобетонного каркасу (рис.3).

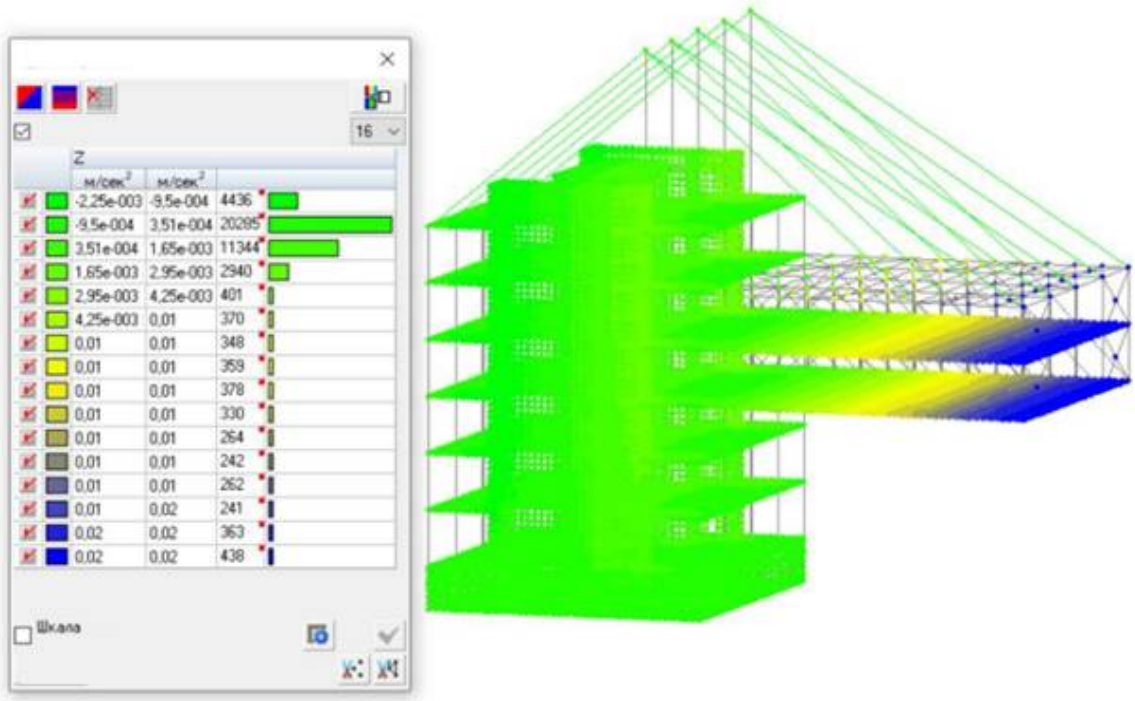
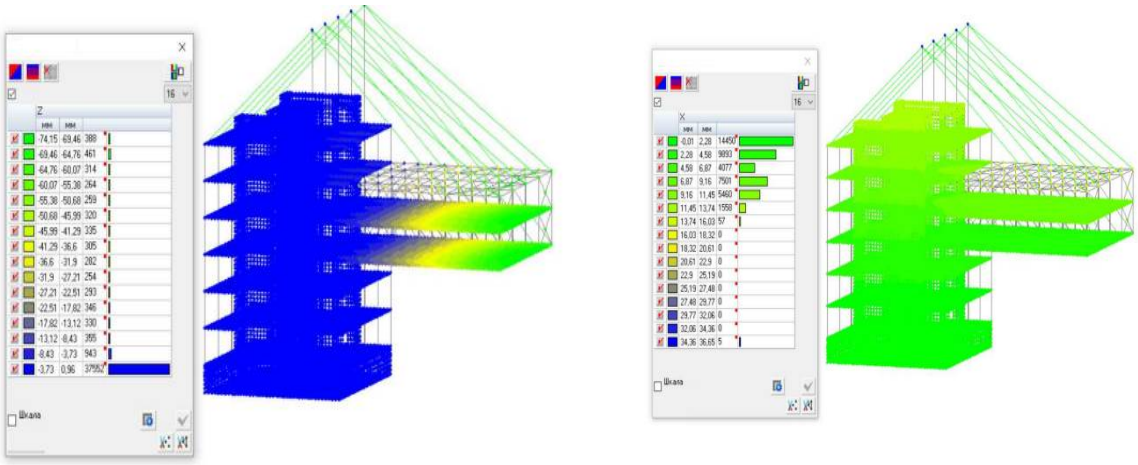


Рис. 1. Прискорення від дії вітрових навантажень.



а) б)

Рис. 2. Переміщення каркасу по осі OZ (а), мм і по осі OX (б), мм.

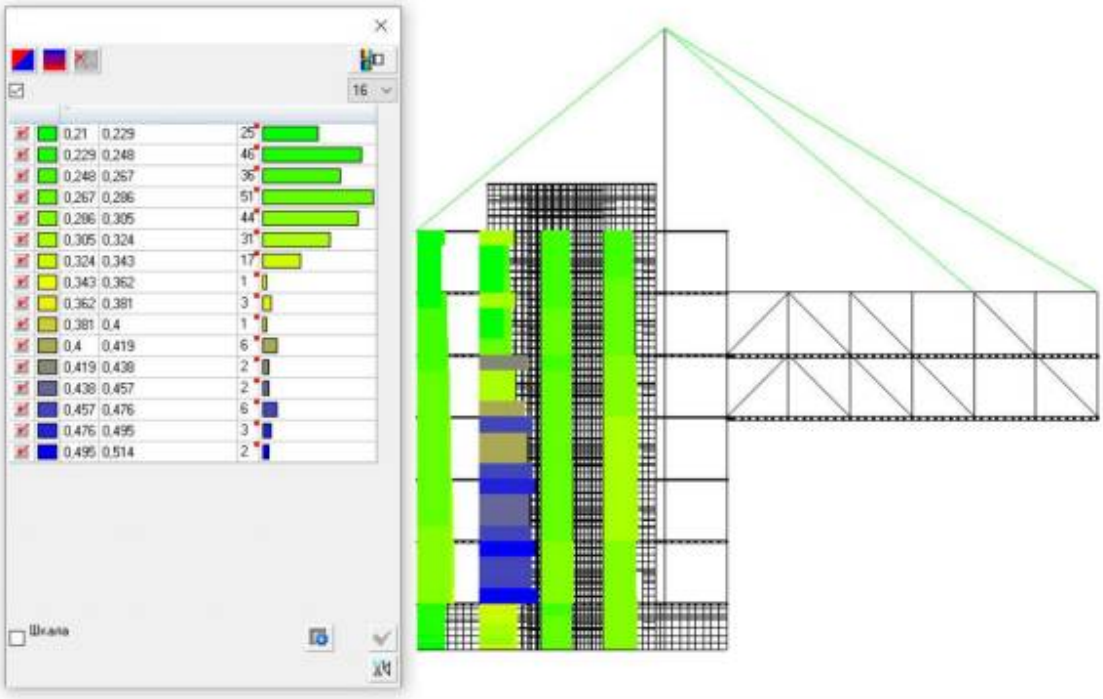


Рис. 3. Відсоток армування залізобетонного каркасу.

Обчислені переміщення мають такі максимальні значення:

- горизонтальні – 36,7 мм;
- вертикальні – 73,5 мм;
- прискорення – 0,002 м/с^2
- відсоток армування – 0,5%.

Значення вертикальних і горизонтальних переміщень розрахованої схеми менші, ніж допустимі, тобто вимоги [1] задовольняються.

Література.

5. Оцінка технічного стану стальних конструкцій виробничих будинків і споруд, що експлуатуються : ДБН 362-92. – К.: Вид-во Держкомбуд України, 1995.

6. Ковальчук Я. О. Комп'ютерне моделювання деформації зварної ферми з косинками у вузлах / Ярослав Олексійович Ковальчук, Наталія Ярославівна Шингера // Вісник ТНТУ, — Т. : ТНТУ, 2016 — Том 83. — № 3. — С. 73-78. — (Механіка та матеріалознавство).

7. Гудь М. Фактори впливу на міцність та ефективність бетону / М. Гудь М., Г.М. Крамар, І. Гудь // Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: матеріали Міжнар. науково-техн. конф. до 100 річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя (100 річчя з дня смерті), 2018. - С. 44-45.

8. Mykhailo Hud, Simulation of the stress-strain state of a cylindrical tank under the action of forced oscillations, Procedia Structural Integrity, Volume 36,2022, Pages 79-86, ISSN 2452-3216, https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.006.

УДК 693.224
В. Плисюк, Т. Ганущак
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ І ПІДБІР МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ ПЛИТИ

V. Plysiuk, T. Hanushchak
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

DETERMINATION AND SELECTION OF THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF A REINFORCED CONCRETE SLAB

Abstract. Modern constructions and buildings require the creation and carrying out of a complex calculation in the design process, in particular the study of the impact of loads and the selection of the necessary materials for bearing elements. In this study, the calculation of the reinforced concrete floor slab of a typical floor as part of a nine-story residential building is performed. As a result of the study, the distribution of the theoretical slab reinforcement was obtained.

Сучасні будівельні конструкції та споруди вимагають створення й проведення комплексу розрахунку у процесі проєктування, зокрема дослідження впливу навантажень і підбір необхідних матеріалів для тримких елементів. Використання комп'ютерних технологій дає можливість створити інформаційну модель будинку чи споруди до початку її зведення із заданням умов експлуатації та впливу силових факторів. Програмні комплекси для розрахунку конструкцій використовують метод скінченних елементів (МСЕ), який базується на створенні простих геометричних форм та частин на основі отриманої інформаційної моделі. Кожен скінченний елемент опрацьовується й входить в загальну структуру конструкції. Точність розрахунку залежить від розміру умовної сітки скінченних елементів, на які розділяється модель.

У роботі виконано розрахунок монолітної залізобетонної плити перекриття типового поверху у складі дев'ятиповерхового житлового будинку. Розміри плити в плані – 18х36 м, товщина – 200 мм. Матеріалом для плити перекриття використано бетон класу С20/25 (М350) та арматурні стержні класу А400С. Дослідження виконано у програмному комплексі Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2021 методом скінченних елементів у кілька етапів:

1) Створено загальну залізобетонну модель BIM у програмі Autodesk Revit 2020 із розташуванням усіх перекриттів, несучих колон та інших конструктивних елементів. На основі загальної моделі отримано аналітичну модель будинку, яка використана для розрахунку армування.

2) Аналітичну модель надіслано у програму Autodesk Robot Structure Analysis Professional 2021 через Robot Structure Analysis Link. Для розрахунку необхідно було задати в'язі, перевірити коректність з'єднання конструктивних елементів будинку й відповідність матеріалів українським стандартам та вимогам.

3) Усі навантаження та впливи було задано у Robot Structure Analysis по усі моделі конструкції. Під час розрахунку враховано власну вагу конструкції, експлуатаційне навантаження та вплив кліматичних факторів. Для результатів першого наближення було виконано розрахунок теоретичної арматури At, що представлено на рисунках 1, 2.

	Колір	ϕ_1 (мм)	ϕ_2 (мм)	S (м)	Амакс (см2/м)	Амін (см2/м)	Вид
		12,0		0,03	---	>37,70	☑
		12,0		0,03	37,70	>18,85	☑
		12,0		0,06	18,85	>9,42	☑
		12,0		0,12	9,42	>4,71	☑
		12,0		0,24	4,71	>0,00	☑
		---	---	---	0,00	---	☑

Рис. 1. Результати теоретичного армування At

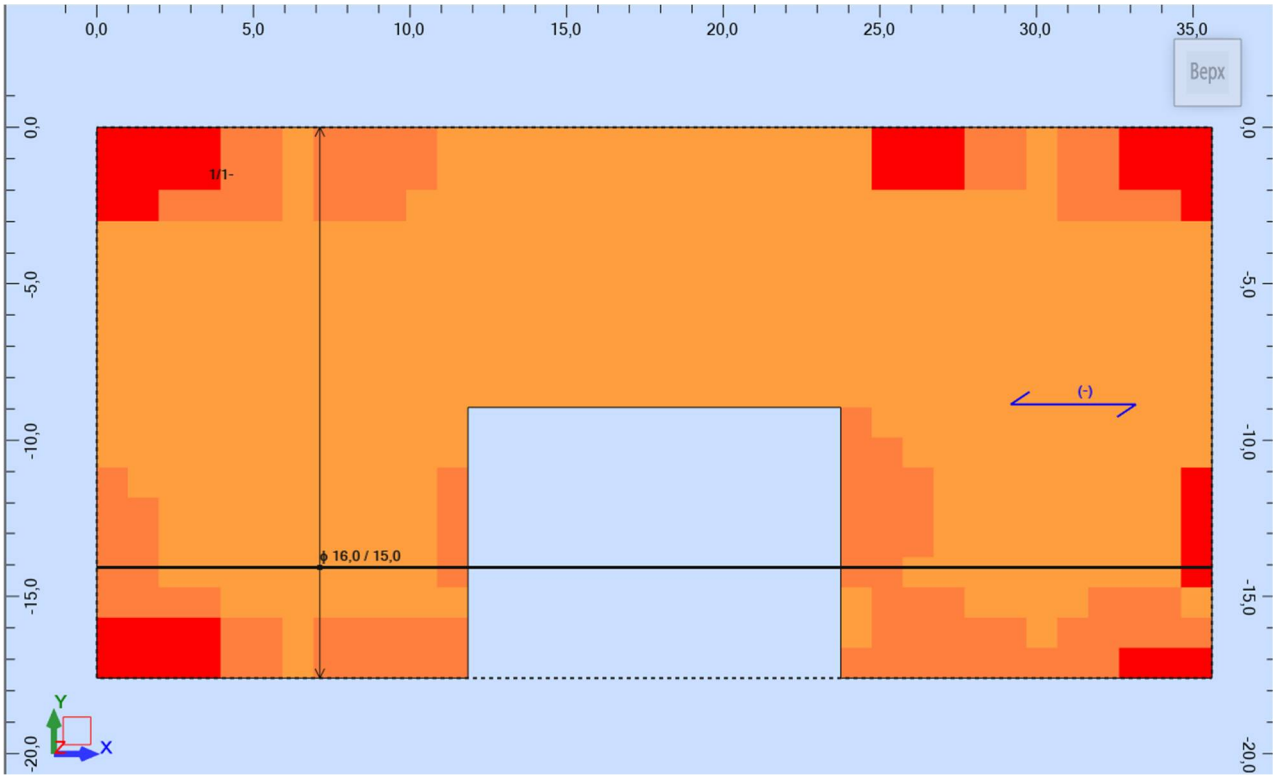


Рис. 2. Карта результатів теоретичного армування At нижньої частини монолітної залізобетонної плити

Розрахунок у Robot Structure Analysis дає можливість оцінити вплив навантажень різного роду на несучу здатність будівлі в цілому, а також окремих зон конструктивних елементів. Зокрема, карта армування відображає необхідність закладення різної кількості арматури через неоднорідність силових впливів, які діють на конструкцію перекриття, що найбільше спостерігається у кутових зонах із поширенням вздовж країв. Запропонований метод дає можливість продовжити розрахунок для фактичної арматури Ar із подальшим створенням робочих креслень для виконання будівельно-монтажних робіт.

У результаті дослідження було отримано важливий практичний досвід застосування методу розрахунку конструкцій із застосуванням BIM та САПР, що сприяє якісному створенню конструкцій різної складності та конфігурації. Використаний інформаційний зв'язок програм та метод скінченних елементів зменшили часові й ресурсні витрати на процес обробки комплексу силових впливів та факторів, що підвищує якість подальшого процесу створення будівельних конструкцій.

УДК 621.78:669.295
І. Погрелюк д.т.н., проф., С. Лаврись, к.т.н.
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Україна

КОРОЗІЙНА ТРИВКІСТЬ ПОРУВАТОГО ТИТАНУ В НЕОГРАНІЧНИХ КИСЛОТАХ

I. Pohrelyuk, Dr., Prof., S. Lavrys, Ph.D.
Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Ukraine

CORROSION RESISTANCE OF POROUS TITANIUM IN INORGANIC ACIDS

Abstract. In this work, it was determined the relationship between synthesis parameters, microstructure, porosity, and corrosion resistance of titanium obtained by powder metallurgy. It was shown that the corrosion resistance in hydrochloric acid is very sensitive to the residual porosity of titanium, where the corrosion rate decreases with the increase of the porosity. However, the porosity has a lesser effect on the corrosion rate of titanium in sulfuric acid. During long-term corrosion tests, the porosity doesn't effect the corrosion resistance of titanium.

Порошкова металургія (ПМ) є рентабельною альтернативою традиційній технології виготовлення титану. ПМ дозволяє виготовляти деталі складної геометрії та не потребує додаткових обробок (точіння, фрезерування) титанових заготовок, що призводить до значного зниження вартості титанових виробів. Проте титан, отриманий методом ПМ, має одну характерну структурну особливість – поруватість, яка зазвичай негативно впливає на його експлуатаційні властивості. Вплив поруватості титану на корозійну тривкість у агресивних неорганічних кислотах мало вивчений, що гальмує його широке використання у хімічній чи металургійній промисловості.

Робота спрямована на вивчення впливу технологічних параметрів синтезу (тиск пресування, температура спікання та розмір порошку) на еволюцію мікроструктури та корозійну тривкість титану, отриманого методом ПМ у неорганічних кислотах.

Як вихідний матеріал для отримання порошку титану використовували титанову губку марки ТГ-110. Губку гідрували воднем високої чистоти з отриманням гідриду титану δ-TiH_2 (3,5 мас. %H), який подрібнювали у планетарному млині RETSCH PM100 з отриманням порошку TiH_2. Порошок просіювали для отримання фракції необхідного розміру частинок 0–100 та 100–200 мкм. Порошкову суміш пресували за кімнатної температури під тиском 450 та 650 МПа. Пресовки піддавали спіканню у вакуумі (13,3 Па) за температур 1050, 1200 та 1350°C з ізотермічною витримкою 4 годин з подальшим охолодженням у печі.

Корозійну тривкість спеченого поруватого титану досліджували методом статичного занурення (гравіметричний метод) за кімнатної температури (20°C). Як електроліти обрано 20% та 40% розчини неорганічних кислот HCl та H_2SO_4 відповідно. Масу зразків визначали за допомогою аналітичних ваг OHAUS з точністю ±0,1 мг. Кожен зразок занурювали в склянку з досліджуваними розчинами об’ємом 100 мл. Зразки відбирали кожні 72, 192, 360, 480 і 720 годин (30 днів), послідовно очищали ацетоном, спиртом і дистильованою водою для видалення продуктів корозії, сушили і зважували. Після статичного занурення середню швидкість корозії зразка титану розраховували відповідно до стандарту ASTM G31-72 (2004). Згідно з металографічним аналізом встановлено, що за усіх режимів синтезу формується однофазна мікроструктура титану, що складається із колоній крупних зерен α-фази . Це пояснюється тим, що температура спікання титану за усіма режимами є вищою, ніж

температура α↔β перетворення. Після спікання за усіма режимами у мікроструктурі титану фіксуємо пори як в тілі зерна, так і межами зерен. Одночасно, залежно від режимів синтезу (розміри порошку, тиск пресування, температура спікання), мікроструктура титану характеризується параметрами, відмінними за кількісними та якісними показниками (розмір та форма зерен α-фаз, рівень залишкової поруватості, тощо) (Табл. 1).

Табл. 1. Режими синтезу та поруватість титану, отриманого ПМ

Режим	TiH_2, мкм	Тиск, МПа	Температура, °С	Поруватість, %
R1	0–100	650	1350	1,1
R2	0–100	650	1200	2,2
R3	0–100	650	1050	5,1
R4	0–100	450	1350	3,1
R5	100–200	650	1200	4,2

За результатами досліджень на занурення можна зробити висновок, що корозійна поведінка поруватого титану є складною та залежить не лише від структури та поруватості, але і від середовища. Для зручності корозійну поведінку поруватого титану можна оцінювати за двома етапами: I етап – корозійна поведінка поруватого титану у неорганічних кислот до 192 годин занурення та II етап – корозійна поведінка поруватого титану у неорганічних кислотах після 192 годин занурення.

На першому етапі (від 0 до 192 годин) досліджень на занурення у сульфатній кислоті швидкість корозії залежить від поруватості титану, де зі зменшенням поруватості від 5,1% до 1,1% швидкість корозії зменшується від 5,3 до 4,4 мм/рік. Поряд з цим, у хлоридній кислоті також спостерігаємо тенденцію до зменшення швидкості корозії титану зі зменшенням поруватості. Проте після 192 годин занурення у хлоридній кислоті у титану з поруватістю вище 4% спостерігаємо стрімке підвищення швидкості корозії (практично на порядок), що призводить до руйнування (розчинення) титану. Тобто, поруватість титану вище 4% призводить до катастрофічних наслідків за витримки у хлоридній кислоті.

На другому етапі (від 192 до 720 годин) швидкість корозії поруватого титану у розчині сульфатної кислоти знижується практично у 2…2,.5 рази та стабілізується, що свідчить про реалізацію процесу пасивації титану. Зв'язку між поруватістю і швидкістю корозії після 720 год практично не спостерігаємо. Можна зробити висновок, що поруватість титану впливає на швидкість корозії лише на початку занурення (до 192 годин), а зі збільшенням експозиції швидкість корозії мало залежить від поруватості титану. Натомість, швидкість корозії титану у хлоридній кислоті збільшується зі збільшенням часової експозиції практично у 2 рази. Також спостерігаємо залежність, у якій зі збільшенням поруватості (від 1.1…3.1%) швидкість корозії підвищується (2,4…4,2 мм/рік). Слід відзначити, що зі збільшення часу занурення (>192 годин) швидкість корозії поруватого титану у хлоридній кислоті збільшується та перевищує швидкість корозії у сульфатній кислоті. Це свідчить про те, що на відміну від сульфатної кислоти у хлоридній кислоті не проходять процеси пасивації поруватого титану та переважають процеси розчинення.

Отже, встановлено взаємозв'язок між параметрами синтезу, мікроструктурою, поруватістю та корозійною тривкістю титану, отриманого ПМ. Показано, що корозійна тривкість у хлоридній кислоті дуже чутлива до залишкової поруватості титану і зі збільшенням його поруватості швидкість корозії зростає. Коли поруватість титану є більшою за 4%, швидкість корозії катастрофічно збільшується. Поруватість меншою мірою впливає на швидкість корозії титану у сульфатній кислоті і за довготривалих корозійних випробувань поруватість практично не впливає на корозійну тривкість титану.

УДК 534.134

І. Лисий, магістр, А. Лиса, магістр, Г. Крамар, к.т.н., М. Гудь, к.т.н.
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПОШКОДЖЕНОЇ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ КОЛОНИ З ВИКОРИСТАННЯ ПК «ЛІРА»

I. Lysyi, master, A. Lysa, master, H. Kramar, Ph.D., M. Hud, Ph.D.
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

SIMULATION OF A DAMAGED REINFORCED CONCRETE COLUMN WORK USING THE "LIRA" SOFTWARE

Abstract. To develop a project for the reconstruction of an industrial building, an examination of reinforced concrete columns was carried out and it was determined that they need strengthening. The static calculation of the damaged and undamaged column was carried out using the "Lira-SAPR 2016" software complex by skin elements method. Ways to strengthen damaged columns are proposed.

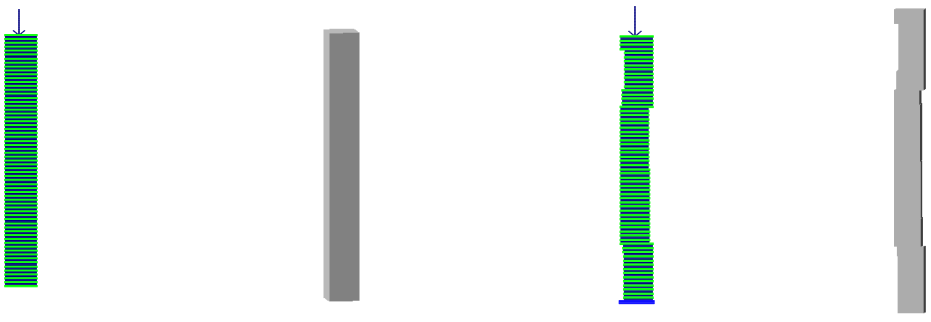
Як правило, процес реконструкції будівель надзвичайно витратний з точки зору часу та інтелектуальних зусиль. Нове будівництво, в порівнянні з реконструкцією, не вимагає такого досвіду і кваліфікації персоналу. Однак, для комунальних об'єктів єдиним виходом є реконструкція, оскільки відновлення необхідних мереж призведе до більших витрат, ніж процес зміцнення існуючих елементів конструкції. В процесі експлуатації елементи конструкцій пошкоджуються під впливом значної кількості факторів [1].

Метою даної роботи є моделювання роботи колони промислової будівлі з врахуванням набутих пошкоджень.

Статичний розрахунок колони проведено з використанням програмного комплексу "Ліра-САПР 2016" методом скінченних елементів відповідно до вимог [2]. Розміри колони в плані 40х40 см, висота 4 м, бетон класу С20/25.

В результаті обстеження виявлено зменшення площі поперечного перерізу колони в її нижній частині до 1225 см^2, у середній частині до 1525 см^2 та у верхній частині до 1351 см^2, початкова площа поперечного перерізу рівномірна по всій довжині і становить 1600см^2. Для того, щоб запропонувати раціональний метод її підсилення і прогнозування ресурсу роботи підсиленої колони, було проведено розрахунок непошкодженої та пошкодженої колони. Навантаження на колону прикладено у вигляді зосередженої сили P=1000 кН.

Модель непошкодженої і пошкодженої колон подано на рис 1.

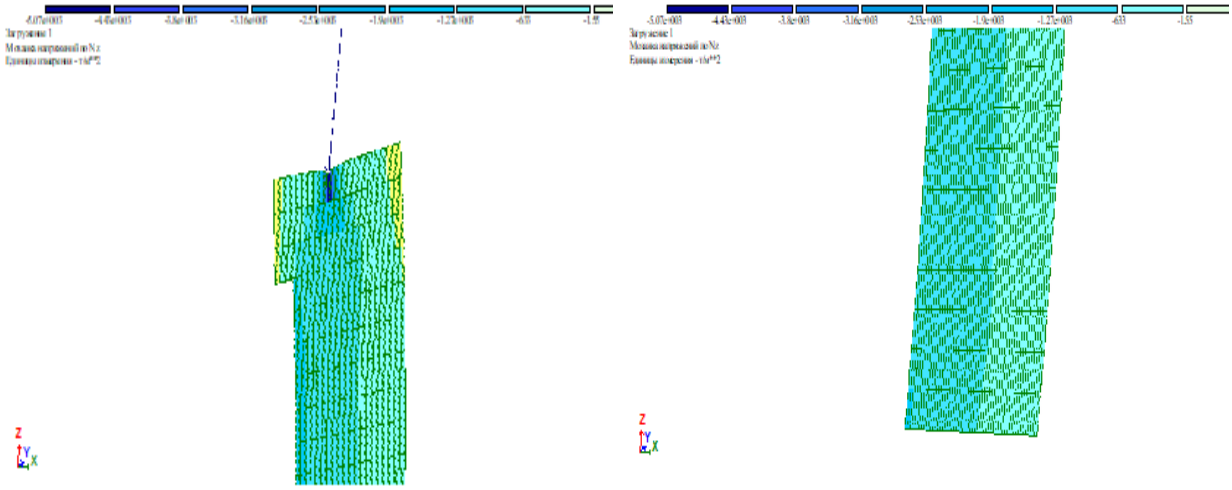


а) б) в) г)

Рис. 1. Скінченно-елементна модель колони і 3D модель непошкодженої (а,б) і пошкодженої колон (в,г).

За результатами розрахунків отримано ізополя внутрішніх зусиль у непошкодженій та пошкодженій колонах. Зусилля Nz у критичних перерізах пошкодженої колони подано на рис. 2.

За результатами обчислень отримано ізополя внутрішніх зусиль у непошкодженій та пошкодженій колонах. Зусилля Nz у критичних перерізах пошкодженої колони наведено на рис. 3. Максимальне значення Nz в оголовку колони становить 480,3 МПа, у нижній частині 530,1 МПа.



б) Ізополя напружень Nz в) Ізополя напружень Nz

Рис. 2. Ізополя напружень пошкодженої колони Nz в оголовку пошкодженої колони а) і у базі пошкодженої колони б).

Встановлено, що пошкоджена колона не здатна сприймати проектних навантажень, тобто обґрунтовано раціональність підсилення пошкодженої експлуатаційними чинниками колони. Запропоновано підсилення колони шляхом взяття її в металеву обойму з кутника 100 х 7 мм і металевих смуг розмірами 350 х 50 мм товщиною 6 мм р наступним тортретуванням бетоном з модифікуючими добавками [3]. Такий спосіб підсилення не призводить до втрату внутрішнього простору будівлі, є легким у виконанні та не потребує специфічного обладнання.

Література.

1. Гудь М. Фактори впливу на міцність та ефективність бетону / М. Гудь М., Г.М. Крамар, І. Гудь // Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: матеріали Міжнар. науково-техн. конф. до 100 річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам’яті Івана Пулюя (100 річчя з дня смерті), 2018. - С. 44-45.

2. ДБН В.2.6-98:2009 Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення.

3. Ігнатьєва В.Б. Залежність фізико-механічних властивостей бетонних сумішей від виду модифікуючи добавок / В.Б. Ігнатьєва, Д.В. Скакун // Naukowy i innowacyjny potencjal prezentacji: Miedzynar. naukowo-prakt. konf., 18 listopada 2018 r.: kolekcja prac naukowych z materialami, Opole, Polska. – Rowne, 2018. – Т. 5. - С. 11-12. Режим доступу: https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/conferences/issue/view/2018-11-18/110.

УДК 691:699.841:621.763
В. Ігнатьєва, к.т.н., доц.
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

АНАЛІЗ РОБОТИ ПРОФІЛЬНИХ ВИРОБІВ, АРМОВАНИХ ВОЛОКНАМИ КОМПОЗИТІВ У КОНСТРУКЦІЇ

V. Ihnatieva, Ph.D., Assoc. Prof.
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

ANALYSIS OF THE WORK OF PROFILE PRODUCTS REINFORCED WITH FIBRE COMPOSITES IN THE STRUCTURE

Abstract. Analysis of the work of products made of composite materials of simple and complex cross-section in constructions under simple and complex loads is carried out. The existing methods of increasing mechanical characteristics of products from composite materials are given. Negative consequences and disadvantages of application of existing methods of increasing mechanical characteristics of products from composite materials are formulated.

Композиційні матеріали знаходять дедалі ширше застосування в різних галузях транспортного машинобудування, авіабудування, ракетобудування, будівництва. Їх структура дає змогу здійснювати широке варіювання властивостей армованого матеріалу, посилення його в найнавантаженіших напрямках [1].

Профільні вироби використовуються як самостійні вироби у вигляді балок, валів, стержнів, і як елементи силового набору конструкцій у вигляді підкріплювальних елементів (лонжеронів, стрінгерів, шпангоутів і т. і.). Вид профілю визначається конструкцією та умовами роботи виробу. Перерізи стержневих елементів можуть утворювати суцільний, порожнистий, замкнутий або розімкнений профілі і можуть мати вигляд простих або складних геометричних фігур.

До декоративних, слабонавантажених профільних виробів зазвичай не висувається особливо високих вимог з погляду механіки, і їх конструкція визначається експлуатаційними вимогами та дизайном.

При простих видах навантаження (розтяг, стиск, кручення) оптимальною конструкцією є стержневі елементи круглого та кільцевого поперечних перерізів. Вироби такої форми добре механічно та термічно врівноважені та прості у виготовленні.

Найбільш складні види механічного впливу відчувають конструкції, що працюють в умовах вигину та при складному навантаженні. У поперечних перерізах стержневого виробу, при цьому, діють нормальні та дотичні напруги, які нерівномірно розподілені площею поперечного перерізу. Внаслідок цього стержні оптимальної конструкції повинні мати складну форму профілю. Для виробів, що працюють в умовах вигину, найчастіше використовуються двотаврові, швелерові, коробчасті, П - і Z - образні профілі поперечного перерізу. Кутові та таврові профілі використовуються для стержнів які працюють як підкріплюючі елементи [2].

У всіх перерахованих вище видах профільних виробів при прикладанні згинального навантаження в точках, найбільш віддалених від нейтральної лінії, діють максимальні розтягуючи та стискаючи осьові напруги, які сприймаються в основному полицями профілю. У стійці профілю з'являються дотичні напруги, які досягають максимальної величини в точках на нейтральній осі. Також, особливістю тонкостінних складнопрофільних виробів є те, що і в полицях також виникають горизонтальні дотичні напруги, які змінюються за лінійним законом і досягають найбільшої величини в точках з'єднання полиць та стійки [2].

Дотичними напругами, при використанні ізотропних матеріалів, можна знехтувати, тому що в порівнянні з діючими нормальними напругами вони мають малу величину [1].

При використанні для виготовлення профілів армованих волокнами композитів їх міцність при зсуві може бути порівнянна з діючими значеннями дотичних напруг, що суттєво знижує несучу здатність таких виробів. Особливо це стосується матеріалів на основі високомодульних та високоміцних наповнювачів – органопластиків, боропластиків та вуглепластиків, ступінь анізотропії яких досягає 40…100. Це пов'язано з тим, що механічні характеристики армованих матеріалів у трансверсальних напрямках і при зсуві визначаються в основному механічними властивостями полімерної матриці та міцністю зчеплення компонентів, які значно нижчі за властивості волокнистих наповнювачів.

Підвищення трансверсальних і зсувних характеристик армованих полімерних матеріалів є актуальним напрямком у галузі виробництва конструкцій з композиційних матеріалів. Низькі значення цих характеристик можуть відігравати значну роль під час стискання та вигину виробів із композиційних матеріалів.

Руйнування від міжшарових зрушень спостерігається і в таких типових конструкціях, як стрижні, пластини, оболонки в момент втрати стійкості, в зонах крайових ефектів та місця застосування зосереджених сил. Поганий опір поперечному відриву є причиною розшарування конструкцій під дією порівняно невеликих технологічних або експлуатаційних трансверсальних напруг, що призводить до випучування окремих шарів при стисканні, згинанні, при навантаженні намотувальних конструкцій зовнішнім тиском. Методи боротьби з цим явищем – конструктивне доопрацювання виробу.

Поряд зі створенням нових типів арматури і сполучних, велику роль у підвищенні механічних характеристик армованих пластиків відіграють удосконалення конструктивних схем виробів із композиційних матеріалів і розроблення нових технологічних процесів, що забезпечують максимальне використання міцності вихідних матеріалів.

Відмінною особливістю конструкційних методів підвищення характеристик композитів є запровадження додаткового наповнювача під кутом до основної арматури. В результаті підвищуються механічні характеристики в трансверсальних напрямках і забезпечується додатковий механічний зв'язок між шарами основного армуючого матеріалу.

Дослідження у цьому напрямку проводилися шляхом створення шаруватих багатоспрямованих структур, плетених і просторово армованих матеріалів, використанні гібридних композитів, що забезпечують високі значення механічних характеристик композиційних матеріалів у напрямку дії головних напруг [1].

Однак використання цих методів тягне за собою й низку негативних наслідків. Введення додаткового матеріалу в напрямках, що не збігаються з основним напрямом армування, призводить до відповідного зниження механічних характеристик композиту у напрямку укладання головної арматури. Крім того, виготовлення просторово армованих і тканих структур призводить, як правило, до викривлення волокон, що суттєво знижує їх механічні характеристики.

Література.

1. Фрегер Г. Е. Основы механики и технологии композиционных материалов. [Текст]: уч. пос. / Г.Е. Фрегер, М.Д. Аптекарь, Б.Б. Игнатьев, В.В. Чесноков, А.Х. Меликбекян, В.А. Коструб. – К.: Аристей, 2004. – 524 с.

2. Ігнатьєва В.Б. Особливості роботи профільних виробів з композиційних матеріалів у будівельних конструкціях, розташованих в сейсмічних районах. [Текст] / В.Б. Ігнатьєва, М.І. Гудь // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика: зб. наук. праць. – Дніпро. – 2021. – № 20. – С. 19 – 25.

УДК 539.3

Св. Гомон[1], д.т.н., проф., С. Гомон[1], д.т.н., проф., Л. Кулаковський[2], к.т.н., доц.
[1]Національний університет водного господарства та природокористування, Україна
[2]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

ДО ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ КЛЕЄНОЇ ДЕРЕВИНИ ХВОЙНИХ ПОРІД

S. Homon[1], Dr., Prof., S. Gomon[1], Dr., Prof., L. Kulakovskyi[2], Ph.D., Assoc. Prof.
[1]National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine
[2]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine

TO DETERMINATION CRITICAL DEFORMATIONS OF GLUED CONIFEROUS TIMBER

Abstract. The methodology of experimental studies of glued coniferous wood with an average moisture content of 12% under a strict test regime is presented. Complete deformation diagrams of glued wood «σ_c-u_c». were constructed. The values of critical deformations of glued larch, pine, and spruce wood were determined experimentally and theoretically.

Для експериментальних досліджень були вибрані наступні хвойні породи клеєної деревини: модрина, сосна, ялина. Вік деревини складав приблизно 60 років. Розмір зразків був 30х30х120 мм. Всі породи деревини були без вад і пошкоджень. Загальна кількість зразків – 18 шт.

Експериментальні дослідження проводились на сервогідравлічній випробувальній машині СТМ-100 [1] за жорсткого режиму випробувань (за приростом переміщень пресу випробувальної машини) осьовим стиском уздовж волокон. Швидкість деформування 3 мм/хв.

На основі проведених експериментальних досліджень зразків клеєної деревини хвойних та листяних порід побудовані дійсні (повні) діаграми «напруження σ_c – деформації u_c» (Рис.1) та визначені основні міцнісні та деформівні параметри на всіх розглядуваних ділянках, в тому числі усереднених критичних деформацій (Табл.1).

Отже, величину критичних відносних деформацій деревини пропонується визначати за сумою відносних пружних та пластичних деформацій за формулою

$$u_{c,0,d} = u_{c,el} + u_{c,pl}, \tag{1}$$

де $u_{c,el}$ – відносна пружна деформація клеєної деревини;
$u_{c,pl}$ – відносна пластична деформація клеєної деревини.

Враховуючи [2] формула (1) набуде вигляду

$$u_{c,0,d} = f_{c,0,d} / E_0 + c_1 \cdot f_{c,0,d}^2, \tag{2}$$

де E_0 – початковий модуль пружності клеєної деревини;

c_1 – коефіцієнт, що залежить від вологості і віку клеєної деревини, ($\mathbf{c_1 = 5,94 \cdot 10^{-7}}$ (МПа)$^{-2}$).

Таким чином значення критичних деформацій, визначених за формулою (2), мають наступні показники (Табл.1): модрини $u_{c,0,d,th}$=0,00619; $u_{c,0,d,th}$=0,00515; ялини $u_{c,0,d,th}$=0,00503.

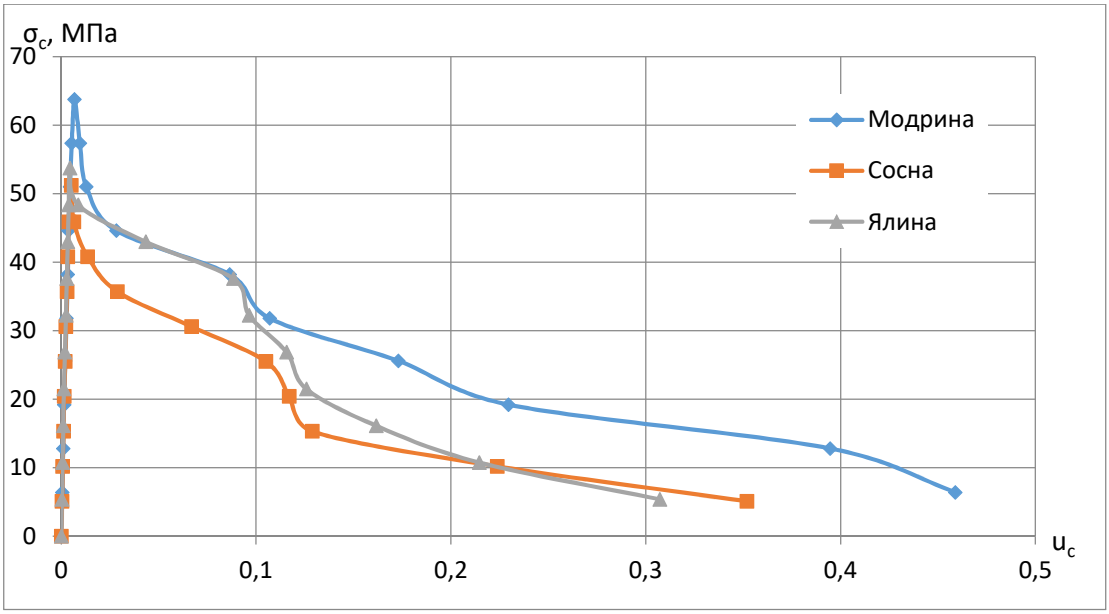


Рис.1. Дійсні (повні) діаграми «напруження σ_c – деформації u_c» клеєної деревини хвойних порід

Табл. 1. Значення експериментальних та теоретичних показників усереднених критичних деформацій клеєної деревини

№п/п	Порода деревини	$f_{c,0,d}$, МПа	E_0, МПа	$u_{c,0,d,exp}$	$u_{c,el,th}$	$u_{c,pl,th}$	$u_{c,0,d,th}$
1	Модрина	63,8	16900	0,00672	0,00378	0,00242	0,00619
2	Сосна	52,2	14800	0,00516	0,00353	0,00162	0,00515
3	Ялина	53,7	16200	0,00453	0,00332	0,00171	0,00503

Для критичних відносних деформацій, які визначені теоретичним шляхом, відбувається характерне несуттєве збільшення та зменшення значень в порівнянні з суцільною деревиною вологістю 12% віком 60 років [2]. Таким же чином спостерігається зміна деформацій пружної складової функції (2), а от пластична складова значно збільшується на 3,9–41,3%.

Максимальна розбіжність експериментальних та теоретичних значень складає $\Delta_{u,max}$=23,26 %.

Література.

1. Гомон Св.Св., Довбенко Т.О., Матвіюк О.В., Верешко О.В., Кулаковський Л.Я., Чорномаз Н.Ю. Аналіз випробувального обладнання для дослідження матеріалів за жорсткого режиму прикладання навантаження. *Містобудування та територіальне планування*. Київ: КНУБА, 2021. Вип. 78. С. 166–172.

2. Homon S., Pilipaka L.M., Experimental studies of the glued wood strength and deformation properties under the hard test mode. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Київ, 2020. Том 31 (70). № 3. Ч.2. С. 130–135.

УДК 539.3

Р. Кушнір[1], д.ф.-м.н., проф., академік НАН України, Г. Сулим[1], д.ф.-м.н., проф., Й. Піскозуб[2,3], д.ф.-м.н., доц.
[1]Інститут прикладних проблем механіки і математики ім.Я.С.Підстригача НАН України
[2]Краківська Політехніка, Краків, Польща;
[3]Українська академія друкарства, Україна

ДЕФОРМУВАННЯ ТА МІЦНІСТЬ КОМПОЗИТНИХ СТРУКТУР З ТОНКИМИ СТРІЧКОВИМИ ВКЛЮЧЕННЯМИ

R. Kushnir[1], Dr, Prof., Member of NAS of Ukraine, H. Sulym[1], Dr, Prof., Y. Piskozub[2,3], Dr., Assoc. Prof.
[1]Pidstryhach IAPMM of NAS of Ukraine, Ukraine;
[2]Cracow University of Technology, Poland;
[3]Ukrainian Academy of Printing, Ukraine

DEFORMATION AND STRENGTH PARAMETERS OF A COMPOSITE STRUCTURE WITH A THIN RIBBON-LIKE INCLUSIONS

Abstract. Within the framework of the concept of deformable solid mechanics, an analytical numerical method to the problem of determining the mechanical fields in the composite structures with thin interphase ribbon-like deformable multilayered physically nonlinear inhomogeneities under combined force and dislocation loading has been proposed.

Тонкі неоднорідності різноманітної фізичної природи у вигляді дефектів практично завжди порушують однорідну будову матеріалів і тіл (тріщини, включення), а разом із тим виконують позитивну роль конструкційних (підкріплення, накладки) чи функціональних (різного типу давачі) елементів, арматури композитів, наповнювачів при застосуванні ін'єкційних технологій для «заліковування» тріщин та щілин тощо. Визначення напружено-деформованого стану та інших параметрів таких структур, підданих впливу різноманітних чинників є складною та важливою проблемою. Задачі такого типу у разі нелінійності фізико-механічних властивостей таких неоднорідностей, неідеального контакту між складовими за невизначеність області їх контакту у разі можливості її порушення вивчені цілком недостатньо. Поміж праць на цю тематику варто згадати дослідження напружено-деформованого стану скінченних тіл та з урахуванням термічних і електромагнітних ефектів із використанням гранично-елементного методу функцій стрибка, чи фрикційного контакту, створення та застосування конститутивних співвідношень моделі включення з функційно-ґрадієнтного матеріалу, деформування аркуша паперу чи ґумової мембрани.

Метою даного напряму досліджень є розвиток нещодавно запропонованого структурно-модульного методу функцій стрибка та побудова математичних моделей тонких включень-прошарків, в т.ч. багатошарових, матеріал яких має істотно нелінійні деформаційні властивості, за різного навантаження тіла, в тому числі багатокрокового чи циклічного.

Досліджено напружено-деформований стан перерізу безмежного ізотропного масиву, що складається з двох півпросторів з пружними сталими G_1, G_2, площиною xOy, перпендикулярною до напряму z його поздовжнього зсуву. Перпендикулярні до цієї осі плоскі перерізи півпросторів утворюють дві півплощини S_k $(k=1,2)$, а межі поділу між ними відповідає вісь абсцис $L \sim x$ (рис.1). На ній вздовж відрізка $L'=[-a;a]$ розташоване тонке включення завтовшки $2h \square a$, механічні властивості якого у різних

напрямках можуть різнитися (ортотропія, функційна ґрадієнтність) і характеризуватися конститутивним рівнянням доволі загального нелінійного вигляду

$$\frac{\partial w^{in}}{\partial s} = \varpi_s\left(\sigma_{xz}^{in}, \sigma_{yz}^{in}, x, y\right),\ s = \{x, y\}, \tag{1}$$

де монотонна функція $\varpi_s\left(\sigma_{xz}^{in}, \sigma_{yz}^{in}, x, y\right)$ обирається із загальнотеоретичних міркувань чи вимог щодо деформаційних властивостей проектованого функційно-градієнтного матеріалу або є якоюсь апроксимаційною залежністю емпіричних даних.

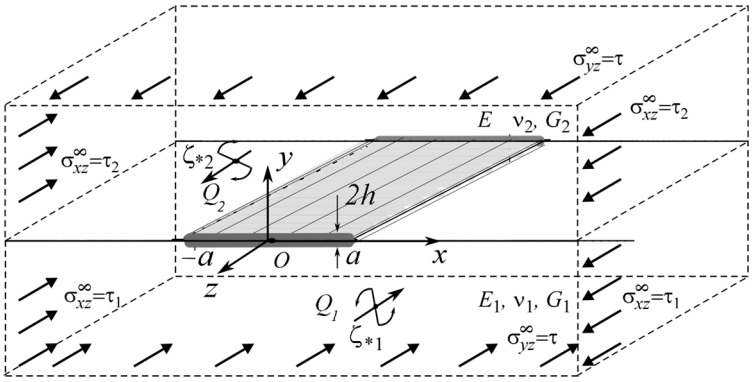


Рис.1. Геометрична та силова структура задачі

Величина й напрямок дії зовнішніх силових чинників (рівномірно розподілених на нескінченності напружень $\sigma_{yz}^{\infty} = \sum_p \tau_{(p)}(t)$, $\sigma_{xzk}^{\infty} = \sum_p \tau_{k(p)}(t)$, зосереджених сил інтенсивності $Q_k(t) = \sum_p Q_{k(p)}(t)$, гвинтових дислокацій із складовою вектора Бюргерса $b_k(t) = \sum_p b_{k(p)}(t)$ в точках $\varsigma_{*k} \in S_k$ $(k = 1,2)$.) уздовж осі z, що здійснюють поздовжній зсув масиву, змінюються квазістатично за довільним законом у вигляді монотонно змінюваних у часових проміжках $\left[t_{(p-1)}; t_{(p)}\right]$ покрокових послідовностей. Тут (p) — номер кроку навантажування. Напруження на нескінченності повинні в довільний момент часу задовольняти умові $\tau_{2(p)}(t)G_1 = \tau_{1(p)}(t)G_2$, що забезпечує прямолінійність межі розділу матеріалів на нескінченності.

Наявність тонкого включення в масиві на межі поділу матеріалів моделюються стрибками компонент векторів напружень і переміщень на L':

$$\begin{gathered}\left[\sigma_{yz}\right]_{h(p)} \cong \sigma_{yz}^{-} - \sigma_{yz}^{+} = f_{3(p)}(x,t),\\ \left[\frac{\partial w}{\partial x}\right]_{h(p)} \cong \frac{\partial w^{-}}{\partial x} - \frac{\partial w^{+}}{\partial x} = \left[\frac{\sigma_{xz}}{G}\right]_{h(p)} \equiv \frac{\sigma_{xz}^{-}}{G_1} - \frac{\sigma_{xz}^{+}}{G_2} = f_{6(p)}(x,t),\ x \in L';\end{gathered} \tag{2}$$

$$f_{3(p)}(x,t) = f_{6(p)}(x,t) = 0 \text{, якщо } x \notin L', \tag{3}$$

де t − деякий момент часу, як формальний монотонно зростаючий параметр, пов'язаний із змінюваністю навантаження. Тут і далі позначено: $[\varphi]_h = \varphi(x,-h) - \varphi(x,+h)$, $\langle\varphi\rangle_h = \varphi(x,-h) + \varphi(x,+h)$; індекси "+" та "–" відповідають граничним значенням функцій на верхньому і нижньому краях лінії L.

Контакт між півпросторами уздовж лінії $L'' = L \setminus L'$ та між масивом і берегами включення вздовж L' можна вважати як ідеальним

$$w^{in}(x,\pm h) = w_k(x,\pm h),\ \sigma_{yz}^{in}(x,\pm h) = \sigma_{yzk}(x,\pm h)\ \ (x \in L'), \tag{4}$$

так і ковзним

$$\sigma_{yz}^{in}(x,\pm h)=\sigma_{yz2}(x,\pm h)=-\operatorname{sgn}\left(w^{in}(x,\pm h)-w(x,\pm h)\right)\tau_{yz}^{\max}(x),\ \ \left(x\in L''',\ L'''\subset L'\right). \qquad (5)$$

Тут $\tau_{yz}^{\max}(x)=-\alpha\sigma_{yy}(x)\ \left(\sigma_{yy}<0\right)$, α - коефіцієнт тертя, причому в цьому випадку зона проковзування є апріорі невідомою.

Математичну модель тонкого включення подамо у вигляді так званих умов взаємодії, які еквівалентні умовам неідеального контакту між прилеглими до включення поверхнями матриці. В основі застосованої методики моделювання впливу тонкого об'єкту лежить схема інтегрування по його об'єму рівнянь опису фізико-механічного стану матеріалу включення, з наступним урахуванням малості його товщини та заданих конститутивних залежностей.

Для тонкого фізично нелінійного включення отримані рівняння математичної моделі виду

$$-\frac{[w]_h}{h}=\left\langle \varpi_s\left(\sigma_{xz},\sigma_{yz}\right)\right\rangle,\ \left\langle \varpi_x^{-1}\left(\frac{\sigma_{xz}}{G_k},\frac{\sigma_{yz}}{G_k}\right)\right\rangle_h-2\sigma_{xz}^{in}(-a)-\frac{1}{h}\int_{-a}^{x}\left[\sigma_{yz}\right]_h(\xi)d\xi=0. \qquad (6)$$

Спрощення функції $\varpi_s\left(\sigma_{xz}^{in},\sigma_{yz}^{in}\right)$ можливе у разі нехтування у ній взаємним впливом напружень: $\varpi_s\left(\sigma_{xz}^{in},\sigma_{yz}^{in}\right)\sim\varpi_s\left(\sigma_{sz}^{in}\right)$ (модель нелінійних пружинок типу основи Вінклера). Тоді співвідношення (1) можна записати у простішому вигляді $\partial w^{in}/\partial s=\varpi_s(\sigma_{sz}^{in})\ \{s=x,y\}$ або

$$\sigma_{sz}^{in}=G_s^{in}(\sigma_{xs}^{in})\frac{\partial w^{in}}{\partial s},\ \{s=x,y\} \qquad (7)$$

із заданими певним чином змінюваними модулями зсуву $G_s^{in}(\sigma_{xs}^{in})$. Це може бути класичний закон лінійної пружності Гука; моделі пластичного деформування Баха-Шюле, Соколовського, Ільюшина; модель деформування, задана функцією, що апроксимує емпіричні дані конкретного матеріалу; модель лінійного пружно-пластичного деформування зі зміцненням [15-17], модель деформування у формі Рамберга – Осгуда тощо.

Для тонкого функційно градієнтного включення отримані рівняння математичної моделі дещо відрізняються завдяки залежності $\varpi_s\left(\sigma_{xz}^{in},\sigma_{yz}^{in},x,y\right)\approx\varpi_s\left(x,y\right)$ і, відповідно, трансверсальної чи поздовжньої залежності модулів зсуву $G_x^{in}(x,y)$, $G_y^{in}(x,y)$.

У всіх випадках рівняння математичної моделі такого тонкого включення можна подати у вигляді

$$\begin{cases} G_x^{in}(\bullet)\left\langle\dfrac{\partial w^{in}}{\partial x}\right\rangle_h(x)-2\sigma_{xz}^{in}(-a)-\dfrac{1}{h}\displaystyle\int_{-a}^{x}\left[\sigma_{yz}^{in}\right]_h(\xi)d\xi=0,\\ G_y^{in}(\bullet)\left[w^{in}\right]_h(x)+h\left\langle\sigma_{yz}^{in}\right\rangle_h(x)=0, \end{cases} \qquad (8)$$

який при застосуванні граничних умов контакту (4), (5) породжує систему сингулярних інтегральних рівнянь зі змінними коефіцієнтами, які у загальному випадку вдається розв'язати аналітико-числовими методи та обчислити напружено-деформований стан у довільній точці такої складної структури.

Поєднання запропонованого підходу із здобутками наукової школи професора Петра Яснія створює широкі перспективи для опрацювання ефективних методів оптимізації інженерних конструкцій з метою підвищення їхньої міцності та ресурсу експлуатації.

UDC 004.85:539.3
R. Babudzhan, O. Vodka, Ph.D., Assoc. Prof, M. Shapovalova, Ph.D.
Department of Dynamics and Strength of Machines, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine

APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS FOR PREDICTING THE MECHANICAL BEHAVIOR OF DISPERSION-STRENGTHENED COMPOSITE MATERIAL

Abstract. The work is devoted for creating a model for approximating the solution by the finite element method of the problem of plane deformation of a dispersion-strengthened composite material. An algorithm for constructing a parametric 2-D composite model is proposed. The processing of the parameters of the microstructure material stress-strain state occurs using a convolutional neural network. A surrogate model is used for calculations speed up and determine the overall approximations quality of such type mechanics problems.

The modern world is characterized by the processes of adapting and changing the manufacturing technology of the product to the needs of individual audiences. To meet the needs of broad markets, such products must be low cost, manufacturable, and able to change and modify quickly during production.

The dynamic development of artificial intelligence and the relevance of using machine learning methods for analyzing large data sets contributed to the decision to study the approximation of a finite element (*FEM*) solution to the problem of deformation of a plane sample of a dispersion-strengthened composite using a convolutional neural network. Using a surrogate model, it is proposed to solve the problem of accelerating the calculations of the material microstructure stress-strain state (*SSS*), as well as to determine the overall quality of the approximation of such type of mechanics problem.

The following steps are taken to achieve the goals:

1) create a computational model of deformation of a representative sample of a composite material;

2) to obtain a set of solutions for the *SSS* of a certain number of arbitrary configurations of composite material samples and the formation of a data set to create a surrogate model;

3) determine the architecture of a surrogate model based on a neural network for approximating the distribution of equivalent stresses using the *FEM*;

4) to train the neural network to obtain a surrogate model for approximating the results;

5) evaluate the error of the solutions by comparing the solutions obtained using the *FEM* and the surrogate model.

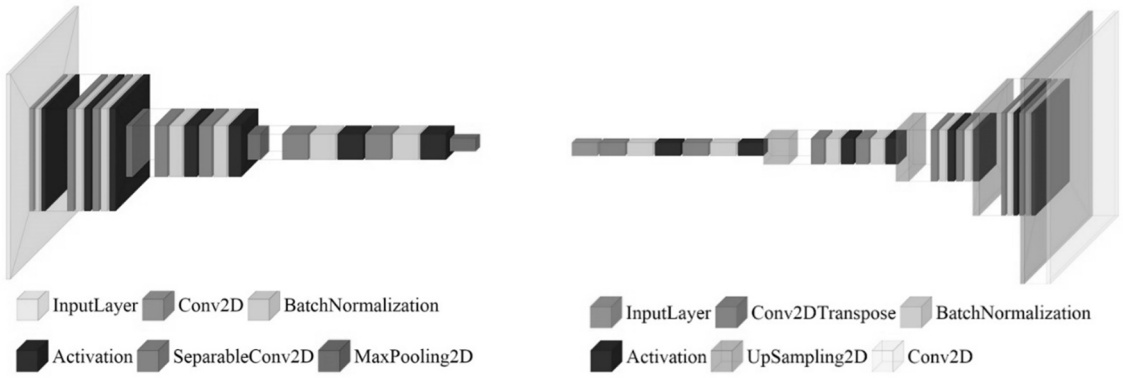
Construction of a surrogate model. The sample is a square two-dimensional plate with inclusions in the form of circles. To calculate the *SSS*, the model is fixed on two adjacent edges, and a load is applied to two opposite edges. The displacement of the ribs along the *X* and *Y* axes is taken as the latter in the work, while the magnitude of the displacements is a constant value. The calculation model is created based on the work [1-2], using ANSYS Mechanical automated design and analysis tools, using the APDL scripting tool for building models.

Data set generation. The collection and subsequent processing of the calculation results is carried out automatically. This makes it possible to form a data set for further training of the neural network. The required number of examples for training set is at 10,000. It`s known from *FEM* that the formation of the stiffness matrix is the costliest action in the process of system analysis. Therefore, the decision is made to form 1000 different samples of the composite material, and to each of them apply tension / compression in 10 different directions. The scheme is implemented using the Load Step functionality in the Ansys

Mechanical software package. At each loading step, a displacement vector is formed, which is applied to the corresponding nodes of the finite element grid. The initial bias is obtained from the uniform distribution. The *SSS* calculation is performed simultaneously for all load steps for one generated sample. After the automatic solution of the equations system, the resulting displacements of each node of the structure are used to calculate the stresses inside the finite elements.

The formation of an algorithm for constructing a computational model and subsequent processing of the results is performed using the Python programming language. The convolutional neural network algorithm takes structured matrices as input, so stress data imported into Python requires further processing. The corresponding data arrays are restructured using cubic spline interpolation. At the output, stresses are obtained in central pixels.

The neural network creation. A neural network for predicting the von Mises equivalent stress distribution under tension/compression of a two-dimensional composite sample, implemented in the Python using the TensorFlow open-source deep learning library. To achieve the purpose of the work encoder-decoder type model selected, where the encoder "compresses" the input data array into a latent space (limited in size); decoder - "reveals" the feature vector compressed into the latent space in order to obtain a modified data array at the output. The serial connection of the encoder-decoder model in combination with the algorithm for simultaneously optimizing the weights of the neurons of both networks makes it possible to obtain a neural network, which is a surrogate model for the *SSS* analysis of a composite sample. The developed neural network architecture (Fig. 1) is based on the U-NET architecture [3].



a *b*

Fig. 1 – Architecture of a neural network: a) encoder; b) decoder

After initialization of the neural network, the loss function and target metrics are determined. The loss function calculates the difference between the actual value of the target variable (in our case, the stress distribution calculated in the ANSYS software), and the value generated by the surrogate model. As a loss function, the root of the root-mean-square error (*RMSE*) over all points of the original matrix (1) is chosen:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{256 \times 256}\sum_{i=1}^{256}\sum_{j=1}^{256}\left(y_{ij} - \widehat{y_{ij}}\right)^2}. \quad (1)$$

Thus, the training of the neural network occurs by minimizing the *RMSE*. At each iteration of network training, the values of the functions are also calculated: the root of the root-mean-square difference of the maxima of equivalent stresses ($RMSE_{max}$) and the root-mean-square error for 80% of the quantile ($RMSE_{80\%}$). The considered metrics are defined as the difference between the actual and model-generated stress values.

Using the first-order gradient local optimization method (ADAM) [4], the loss functions is optimized. At each iteration of the network weights optimization, the method takes into account the exponential damping of the gradient and the square of the gradient in previous iterations.

A sample of 10,000 examples for training a neural network is divided into three sub-samples: training for network training (6000 elements), validation - for controlling the cost function and metrics (2000 elements), test sub-sample - for the final assessment of the quality of the model (2000 elements). The network is trained over 30 epochs. This corresponds to 30 passes of the test data set through the network. Each epoch takes an average of 270 seconds, and network weight optimization is 135 minutes. The results of the proposed model architecture are presented in Table 1.

Table 1 – Loss function results on subsamples

Sample	*RMSE*, GPa	Metrics $RMSE_{80\%}$, GPa	Metrics $RMSE_{max}$, GPa
Training	0.339	0.386	0.474
Validation	0.386	0.460	0.521
Test	0.412	0.478	0.540

Conclusions. In this work, studies are carried out on the construction of a surrogate model based on a convolutional neural network for approximating a finite element solution of the dispersion-strengthened composite deformation in order to speed up calculations of finding the material microstructure *SSS* and determining the general quality of approximations of this type of problems in mechanics.

To train the neural network, 10,000 variants of the stress-strain state of the parametrized computational model of a composite material sample are analyzed. A neural network based on the U-Net architecture of the encoder-decoder type has been created to predict the distribution of equivalent stresses in the material according to the sample geometry and load values.

Analysis of the results shows:

1) that the value of the network weights after training is still not optimal in terms of minimizing the loss function;

2) the model is still simple to accurately reproduce the *FEM* solution;

3) comparing the speed of *FEM* calculations (which takes 430 minutes) and a trained neural network on 10,000 configurations using a stationary PC. Time advantage up to 70 times for the latter. At the same time, it takes 19 seconds to form the stiffness matrix and calculate one load step. The training of the neural network took 135 minutes. The surrogate model generates a matrix of equivalent stresses simultaneously for 32 samples in 9 seconds.

References.

1. Shapovalova M., Vodka O. Image processing technology to determine the parameters of the internal structure of composite materials. *IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, September* 13 – 17. 2021. P. 539-543.

2. Shapovalova M., Vodka O. Computer methods for constructing parametric statistically equivalent models of the microstructure of ductile iron for the analysis of its elastic characteristics. *Scientific notes of the Taurida State University named after V.I. Vernadsky. Series: Engineering sciences*. 2019. T. 6, № 1. C. 179–187.

3. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention. *Springer*, м. Cham, 2015. C. 234-241.

4. Kingma D. P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization. arXiv preprint arXiv:1412.6980. – 2014.

УДК 539.3
С. Федак, к.т.н., доц.
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕРИВЧАСТОЇ ПОВЗУЧОСТІ СПЛАВУ АМг6

S. Fedak, Ph.D.
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

METHODS OF PREDICTION OF AMg6 ALLOY JUMP-LIKE CREEP

Abstract. The use of different methods for investigating the jump-like creep of the AMg6 aluminum alloy based on its preliminary plastic deformation during tensile test in the soft mode of loading are compared. It is more efficient to predict the magnitude of the jump during the creep by methods of machine learning, in particular, neural networks, which show the best results.

Деформування розтягом сплаву АМг6 в умовах м'якого типу навантажування супроводжується переривчастою текучістю (стрибкоподібною деформацією), що реєструється графічно у вигляді "сходинок" на діаграмі деформування $\Delta\varepsilon(\alpha_i)$ за напруження $\sigma_p(\alpha_i)$ (рис. 1).

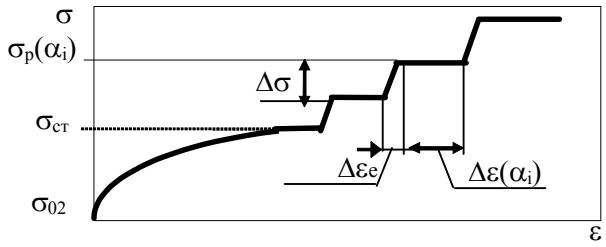


Рис. 1. Діаграма деформування сплаву АМг6 за квазістатичного розтягу в умовах м'якого типу навантажування.

Ділянка стрибкоподібного приросту деформацій за м'якого типу навантажування характеризується: напруженням початку процесу стрибків $\sigma_{ст}$, приростом напруження між стрибками $\Delta\sigma$ та відповідної деформації $\Delta\varepsilon_e$, коефіцієнтом пропорційності на цих ділянках E' та деформацією стрибка $\Delta\varepsilon(\alpha_i)$ за відповідного напруження $\sigma_p(\alpha_i)$. Зі збільшенням напруження $\sigma_p(\alpha_i)$ зростає деформація стрибка (ширина "сходинки" на діаграмі розтягу).

Стрибкоподібна деформація Δp також виникає за умов повзучості після досягнення певного рівня напруження на діаграмі деформування (рис. 2).

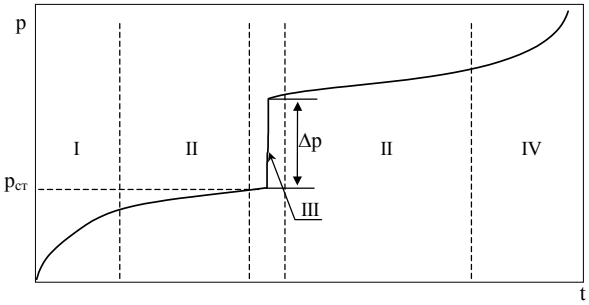


Рис. 2. Діаграма повзучості сплаву АМг6: I – ділянка зміцнення, II – ділянка сталої повзучості, III – ділянка стрибкоподібної повзучості, IV – ділянка руйнування.

Сам процес повзучості характеризується чотирма ділянками на діаграмі: спершу ділянка зміцнення матеріалу, після чого ділянка сталої повзучості, яка супроводжується стрибкоподібними приростами деформації, і наступна ділянка руйнування.

Раніше під керівництвом проф. П.В. Яснія було проведено дослідження діаграми деформування сплаву АМг6 за квазістатичного розтягу в умовах м'якого типу навантажування, які виявили зміни в мікроструктурі матеріалу, та було запропоновано моделі, що встановлюють зв'язок між ними. Такі ж дослідження стосувались і процесів повзучості та динамічної повзучості сплаву АМг6 [1, 2].

Аналіз мікроструктури свідчить, що після випробувань на повзучість у сплаві АМг6 є зруйновані і ще суцільні дисперсоїди. Їх розподіл у залежності від коефіцієнта форми описується динамічною гістограмою при розтязі. Тож для моделювання вважаємо, що процес стрибкоподібної повзучості, подібно стрибкоподібній деформації розтягу, спричинюється розтріскуванням дисперсоїдів у об'ємі матеріалу. На основі такого припущення була запропонована методика прогнозування ініціації стрибкоподібної повзучості в залежності від частки зруйнованих включень [3]. Середні значення відносної похибки прогнозування для параметрів ініціації миттєвого приросту при повзучості, а саме, деформації повзучості $p_{ст}$, часу $t_{ст}$ та значення приросту деформації стрибка Δp відповідно становлять 21,4%, 29,7%, 45,3%. Відповідно до запропонованої моделі задовільно узгоджуються дані відносно деформації та часу ініціації стрибка при повзучості. Більший розкид даних спостерігається у прогнозуванні стрибкоподібних приростів деформації. Це можна пояснити процесами гомогенізації в об'ємі матеріалу при повзучості. Перерозподіл напружено-деформівного стану в об'ємах неоднорідної структури матеріалу призводить до менш прогнозованої величини локального зміцнення матеріалу та, відповідно, менш прогнозованої величини приросту деформації.

Як розвиток цих досліджень для прогнозування стрибкоподібної повзучості було використано програмний комплекс ANSYS, в якому були розроблені групи скінченноелементних моделей для визначення основних закономірностей впливу параметрів структурної неоднорідності модельованого середовища на НДС [4]. Деформацію повзучості та динамічної повзучості сплаву АМг6 розраховували МСЕ. Моделювання проводили в умовах плоского деформованого стану на розрахунковій моделі. Під час проведення розрахунків були активовані опції повзучості та руйнування структурних складових моделі при досягненні у них критичних напружень. Для побудови скінченноелементної сітки використовували плоский елемент plane 82. Виявлено, що повзучість за статичного та циклічного навантаження супроводжується руйнуванням включень. За динамічної повзучості високочастотна складова навантаження спричиняє виникнення більших напружень на включеннях, порівняно із повзучістю, що збільшує кількість зруйнованих включень. Руйнування включень спричиняє перерозподіл напружень і деформацій у моделі та інтенсифікує повзучість при циклічному навантажуванні, порівняно із статичним. Накопичена деформація за динамічної повзучості більша, ніж за статичної повзучості за однакового рівня максимального навантаження. Це можна пояснити інтенсивним перерозподілом полів напружень та деформацій за циклічного навантаження і відповідним збільшенням максимального напруження на включенні і в матеріалі матриці. За рахунок збільшення локальних напружень у розрахунковій моделі в умовах динамічної повзучості швидше досягається граничний стан включень і матриці. Пошкоджуваність матеріалу загалом зростає і, відповідно, загальна деформація повзучості істотно збільшується, порівняно із повзучістю. Мінімальне напруження повзучості, при якому починається руйнування включень модельного матеріалу, становить σ^*=229 МПа, згідно з експериментальними даними. Необхідно зауважити, що відносна кількість зруйнованих включень в умовах

динамічної повзучості, порівняно зі статичною за вказаного рівня напружень, максимальна. При збільшенні напруження повзучості різниця у відносній кількості зруйнованих включень в умовах динамічної і статичної повзучості буде зменшуватись. Отримані розрахункові дані задовільно узгоджуються з експериментальними. Максимальна похибка між результатами, отриманими МСЕ, та експериментальними даними не перевищує 12%.

Розвиток нових підходів до аналізу та прогнозування процесів механіки руйнування передбачає можливість використовувати методи машинного навчання. Зважаючи на значний обсяг експериментальних даних, було використано методи машинного навчання, зокрема, метод нейронних мереж [5]. Під час навчання дані, що складалися з результатів деформації, за якої відбулись стрибки деформації та відповідних величин стрибків деформації, були розділені на дві частини – навчальну та тестову. Набір даних складався з 89 елементів. Перша (більша) частина була використана для навчального набору. Вхідними параметрами для тестового набору були параметри напружень повзучості, що відповідають повній пластичній деформації і величини стрибкоподібної повзучості. Параметр приросту Δp було обрано як вихідний параметр для оцінки якості прогнозів. Встановлено, що отримані моделі можуть робити прогнози відповідно до даних, які не використовувалися в навчальному наборі. Прогнозована методом нейронних мереж стрибкоподібна повзучість добре узгоджується з експериментальними даними. Встановлено, що точність прогнозу нейромереж становить 96,2%. Тому пропонований метод машинного навчання є потужним інструментом, який можна використовувати для вирішення завдань механіки.

Література.

1. Ясній П.В., Федак С.І., Галущак М.П., Гладьо В.Б. Стрибкоподібна деформація сплаву АМг6 при розтязі.// Проблеми міцності. - 2004. - №2 (368). -С. 5-12

2. Ясній П.В., Гладьо В.Б., Федак С.І. Взаємозв'язок між пластичною деформацією і мікроструктурними параметрами в умовах активного розтягу і повзучості сплаву АМг6.// Проблеми міцності. - 2004. - N6. - С.48-58.

3. Федак С. Стрибкоподібна деформація сплаву АМг6 при повзучості // Вісник Тернопільського державного технічного університету. - 2003. –Т.8, ч.2. - С. 16-23.

4. П.В. Ясній, В.Б. Гладьо, С.І. Федак, І.В. Шульган Моделювання деформування гладких зразків і зразків з тріщинами за динамічної повзучості // Тези допов. міжнародної науково-технічної конференції «Міцність матеріалів та елементів конструкцій». 28-30 вересня 2010 р.. Київ, Україна. С. 214-215.

5. Iryna Didych, Oleh Yasniy, Sergiy Fedak,Yuri Lapusta Prediction of jump-like creep using preliminary plastic strain // Procedia Structural Integrity, Volume 36, 2022, – P. 166–170

УДК: 539.3

Б. Шелестовський, к.ф.-м.н., доц., Г. Габрусєв, к.ф.-м.н., доц., І. Габрусєва, к.т.н.
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ОЦІНКА МІЦНОСТІ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНОЇ ПЛИТИ ПРИ ЇЇ СТИСНЕННІ ДВОМА ШТАМПАМИ

B. Shelestovskyi, Ph.D., Assoc. Prof., H. Habrusiev, Ph.D., Assoc. Prof., I. Habrusieva, Ph.D.
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

STRENGTH ESTIMATION OF THE PRELIMINARY STRESSED PLATE COMPRESSED WITH TWO INDENTERS

Abstract. The stress-strain state of a predeformed plate, which is modeled by a prestressed layer, is analyzed in the case of its smooth contact interaction with two rigid axisymmetric parabolic indenters. The influence of plate thickness and its initial strains on the magnitude and features of the contact stresses and vertical displacements on the surface of the plate is analyzed for the case of compressible and incompressible solids.

Розрахунок на міцність елементів конструкцій та деталей машин є одним із найважливіших етапів їх проектування. Мінімізація похибки розрахунку вимагає врахування максимальної кількості факторів, які впливають на контактну взаємодію тіл, зокрема наявність початкових напружень або деформацій.

Розглянемо задачу про стиснення попередньо напруженої плити двома співвісними жорсткими штампами. Плита стискається штампами поступально без обертання та тертя під дією постійної сили P. Кожен із штампів утворено обертанням навколо спільної осі вітки параболи та відрізка прямої, яка перпендикулярна до осі параболи. Фокальні параметри парабол для верхнього та нижнього штампів відповідно дорівнюють R_1 та R_2. Осі парабол, що обмежують штампи, паралельні до спільної осі обертання, яка співпадає із лінією дії сил P. Виберемо циліндричну систему координат (O, r, θ, z) так, щоб координатна площина (O, r, θ) співпадала із серединною площиною плити, а вісь Oz – із віссю симетрії штампів (рис. 1).

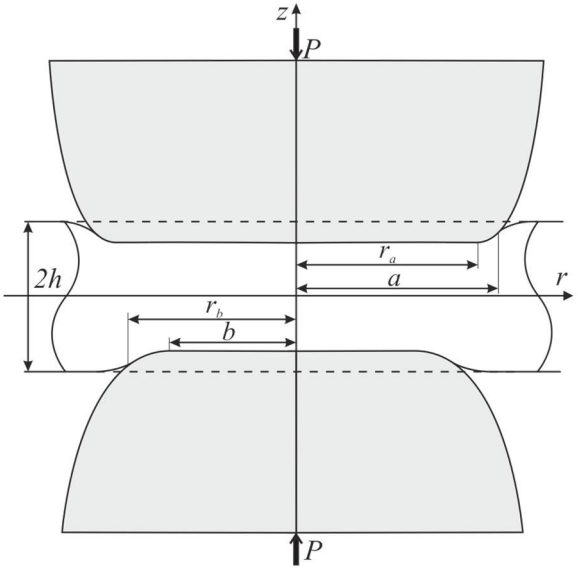


Рис. 1. Схема стиснення плити

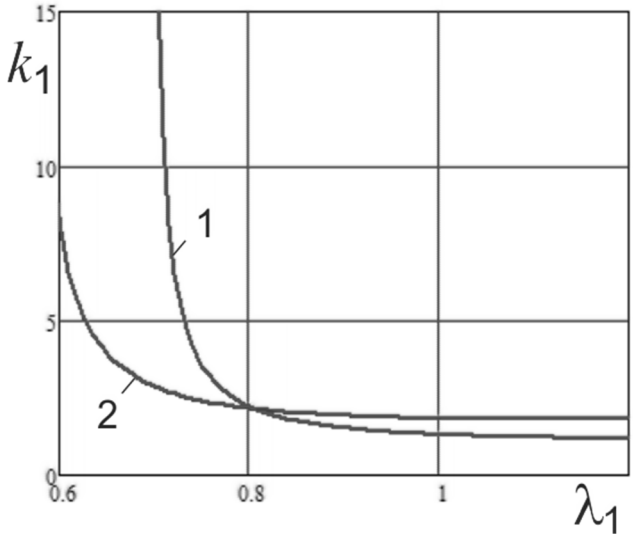


Рис. 2. Залежність k_1 від λ_1

Граничні умови поставленої задачі матимуть вигляд

$$\sigma_{zz}(r,h)=0,\ a\le r;\qquad \sigma_{zz}(r,-h)=0,\ b\le r;$$
$$\sigma_{rz}(r,h)=0,\ 0\le r<\infty;\qquad \sigma_{rz}(r,-h)=0,\ 0\le r<\infty;$$
$$u_z(r,h)=\omega_1(r),\ 0\le r\le a;\qquad u_z(r,-h)=\omega_2(r),\ 0\le r\le b,$$

функції $\omega_1(r)$ та $\omega_2(r)$ описують форму штампів

Розв'язання задачі проведено із використанням розробленої методики [1 – 2] у рамках лінеаризованої постановки задачі теорії пружності. Парні інтегральні рівняння, що виникають у результаті задоволення граничних умов, розв'язано за допомогою подання шуканих функцій контактних напружень у вигляді частинної суми ряду за функціями Бесселя з невідомими коефіцієнтами $a_n^{(i)}$, $b_n^{(i)}$ та $R^{(i)}$, для визначення яких будуються скінченні системи лінійних алгебричних рівнянь.

Остаточно функції розподілу контактних напружень під штампами мають вигляд

$$\sigma_{zz}(r,h)=\frac{P}{2\pi}\sum_{n=1}^{N}\left[R^{(1)}a_n^{(1)}+R^{(2)}a_n^{(2)}\right]J_0\left(\frac{r}{a}\beta_n\right),$$
$$\sigma_{zz}(r,-h)=\frac{P}{2\pi}\sum_{n=1}^{N}\left[R^{(1)}b_n^{(1)}+R^{(2)}b_n^{(2)}\right]J_0\left(\frac{r}{b}\beta_n\right), \tag{1}$$

а вертикальні переміщення точок граничних площин плити визначаються співвідношеннями

$$u_z(r,h)=\frac{k_1}{2}\frac{P}{2\pi}\left\{\sum_{n=1}^{N}\left(R^{(1)}a_n^{(1)}+R^{(2)}a_n^{(2)}\right)\int_0^{\infty}I_n^{(1)}(\alpha)J_0(\alpha r)\,d\alpha+\right.$$
$$\left.+\sum_{n=1}^{N}\left(R^{(1)}b_n^{(1)}+R^{(2)}b_n^{(2)}\right)\int_0^{\infty}I_n^{(2)}(\alpha)J_0(\alpha r)\,d\alpha\right\}; \tag{2}$$
$$u_z(r,-h)=\frac{k_1}{2}\frac{P}{2\pi}\left\{\sum_{n=1}^{N}\left(R^{(1)}a_n^{(1)}+R^{(2)}a_n^{(2)}\right)\int_0^{\infty}I_n^{(1)}(\alpha)J_0(\alpha r)\,d\alpha+\right.$$
$$\left.+\sum_{n=1}^{N}\left(R^{(1)}b_n^{(1)}+R^{(2)}b_n^{(2)}\right)\int_0^{\infty}I_n^{(2)}(\alpha)J_0(\alpha r)\,d\alpha\right\},$$

де β_n – додатні нулі функції Бесселя $J_0(r)$, а $I_n^{(1)}(\alpha)$ та $I_n^{(2)}(\alpha)$ – відомі функції.

Коефіцієнт k_1, який входить до співвідношень (1) – (2), характеризує вплив початкових деформацій та залежить від структури пружного потенціалу попередньо напруженої плити. Зокрема, у випадку потенціалу Бартенєва-Хазановича (нестисливі тіла)

$$k_1=\frac{2(1+\nu)}{E}\frac{\lambda_1^{\frac{7}{2}}}{3\lambda_1^3-1},$$

де ν – коефіцієнт Пуассона, E – модуль Юнга матеріалу плити, λ_1 – параметр лінійного видовження. Останнє співвідношення прямує до нескінченості при $3\lambda_1^3-1=0$, тобто при $\lambda_1\to\lambda_{kp}\approx 0.693$. Значення λ_{kp} відповідає поверхневій нестійкості при рівномірному двовісному стиску. При цьому, як випливає зі (1) та (2), вертикальні переміщення точок граничних площин плити необмежено зростають, а контактні напруження відсутні. Отже, спостерігається такий механічний ефект: при наближенні λ_1 до критичного значення λ_{kp} у плиті виникають явища «резонансного характеру», які були раніше виявлені О.М. Гузем у задачах крихкого руйнування матеріалів із

початковими напруженнями [3]. Аналогічний ефект спостерігається у тілах із пружним потенціалом гармонічного типу (стисливі тіла), для якого

$$k_1 = \frac{2\left(1-\nu^2\right)}{E}\,\frac{\lambda_1^2}{\lambda_1\left(2+\nu\right)-\left(1+\nu\right)}.$$

Для різних матеріалів критичні значення λ_{kp} є різними, оскільки залежать від ν. Зокрема, при $\nu = 0.3$ «резонансні» явища спостерігаються при $\lambda_1 \to \lambda_{kp} \approx 0.565$.

На рис. 2 ілюструється графічна залежність k_1 від параметра лінійного видовження λ_1 для випадку наявності у плиті пружного потенціалу Бартенєва-Хазановича (крива 1) та потенціалу гармонічного типу (крива 2). З наведених графіків випливає, що вплив початкових напружень на вертикальні переміщення як для стисливих, так і для нестисливих тіл значно вищий у випадку попередніх деформацій стиску ($\lambda_1 < 1$), ніж у випадку попередніх деформацій розтягу ($\lambda_1 > 1$).

На рис. 3 зображено графік функції $\sigma^*\left(r\right) = \dfrac{\sigma_{zz}\left(r,0\right)}{P}$, що описує розподіл контактних напружень для випадку стиснення плити двома однаковими співвісними параболічними штампами при $R_1 = R_2 = 2$, $r_a = r_b = 0$. Графік величини $u^*\left(r\right) = \dfrac{u_z\left(r,0\right)}{P}$, що описує вертикальні переміщення точок верхньої граничної площини плити для цього ж випадку, побудовано на рис. 4.

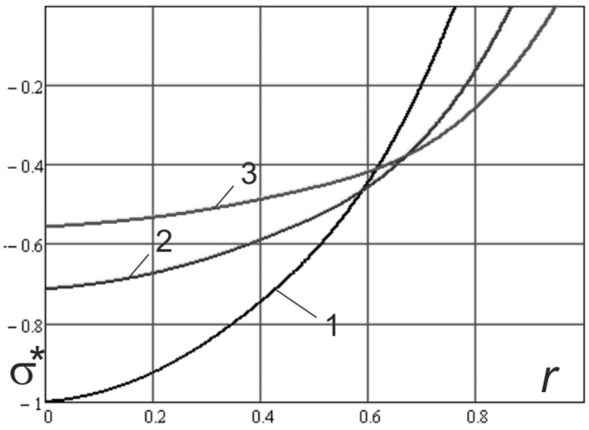


Рис. 3. Контактні напруження

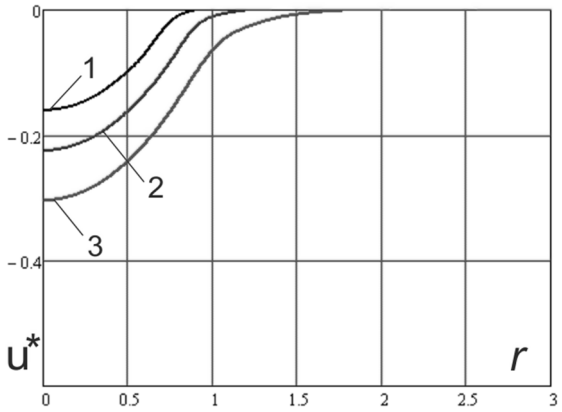


Рис. 4. Вертикальні переміщення

Крива 1 відповідає товщині плити $H = 0.5$, крива 2 – $H = 1$, крива 3 – $H = 2$. Як видно із рисунків, товщина плити впливає на екстремальні значення контактних напружень. Зокрема, при стисненні плити товщиною $H = 0.5$ двома параболічними штампами, екстремальні значення контактних напружень більші на 40% ніж при $H = 1$.

Література.

1. Габрусєва І.Ю. Контактна задача про стиснення ізотропного шару двома параболоїдальними штампами з урахуванням поля залишкових деформацій / Б.Г. Шелестовський, І.Ю. Габрусєва // Вісник ТНТУ. – 2014. – 73.№1. – С. 44-52.

2. Habrusiev, H.V., Habrusieva, I.Y. & Shelestovskyi, B.H. Contact Interaction of a Prestrained Thick Plate with Parabolic Punch. J Math Sci 263, 129–137 (2022).

3. Гузь О. М. Контактна взаємодія пружних тіл з початковими напруженнями: Навч. посібник / Гузь О. М., Бабич С. Ю., Рудницький В. Б. – К: Вища школа, 1995. – 304 с.

УДК 539.37:612.76
О. Мусієнко, Д. Фам, к.т.н., О. Моргун, Р. Діденко
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМПОНОВКИ СТРИЖНІВ АПАРАТУ ЗОВНІШНЬОЇ ФІКСАЦІЇ НА ЖОРСТКІСТЬ СИСТЕМИ FEM АНАЛІЗОМ

O. Musiienko, Q. Pham, Ph.D., O. Morhun, R. Didenko
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF THE RODS OF THE EXTERNAL FIXATION APPARATUS ON THE RIGIDITY OF THE SYSTEM BY FEM ANALYSIS

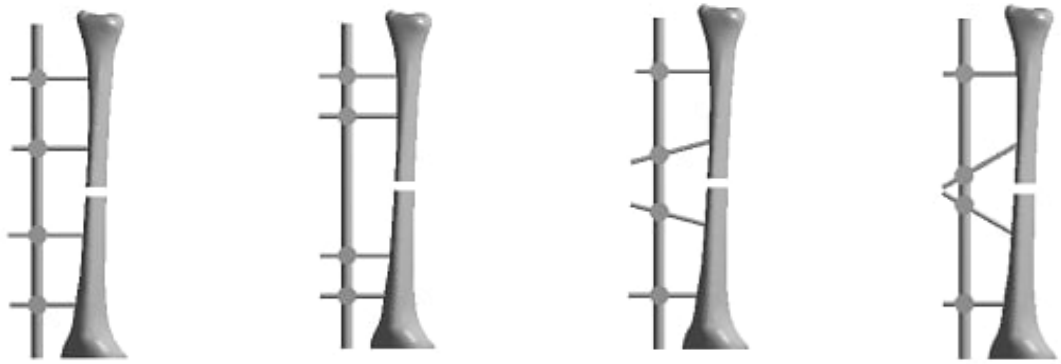
Abstract. A CAD/CAE model of the system was created. In accordance with the created models, load simulation (compression, bending, torsion) of these systems was carried out using the finite element method. According to the results of the FEM analysis, a comparison of the stiffness of the system with different layouts of the rods was made. It was established that the stiffness of the system has a correlation with the distance between the internal rods.

Для фіксації вогнепальних переломів використовують стержневі апарати зовнішньої фіксації (СтАЗФ), але встановлення систем фіксації за звичайною схемою є неприпустимим, оскільки призводить до повторного пошкодження кісткової тканини і до зменшення міцності та жорсткості системи «кістка – СтАЗФ» [1]. Спираючись на це, актуальним є дослідження впливу компоновки стержнів СтАЗФ на жорсткість системи, що дає змогу біль якісно лікувати пацієнтів. Експериментальні дослідження по визначенню жорсткості систем потребує відповідного обладнання, тому для дослідження проблематики даній роботи, використовується FEM аналіз [2,3].

У якості об’єктів дослідження було вибрано великогомілкову кістку з апаратом зовнішньої фіксації, що зображено на рис. 1.

Рис. 1. Об’єкт дослідження

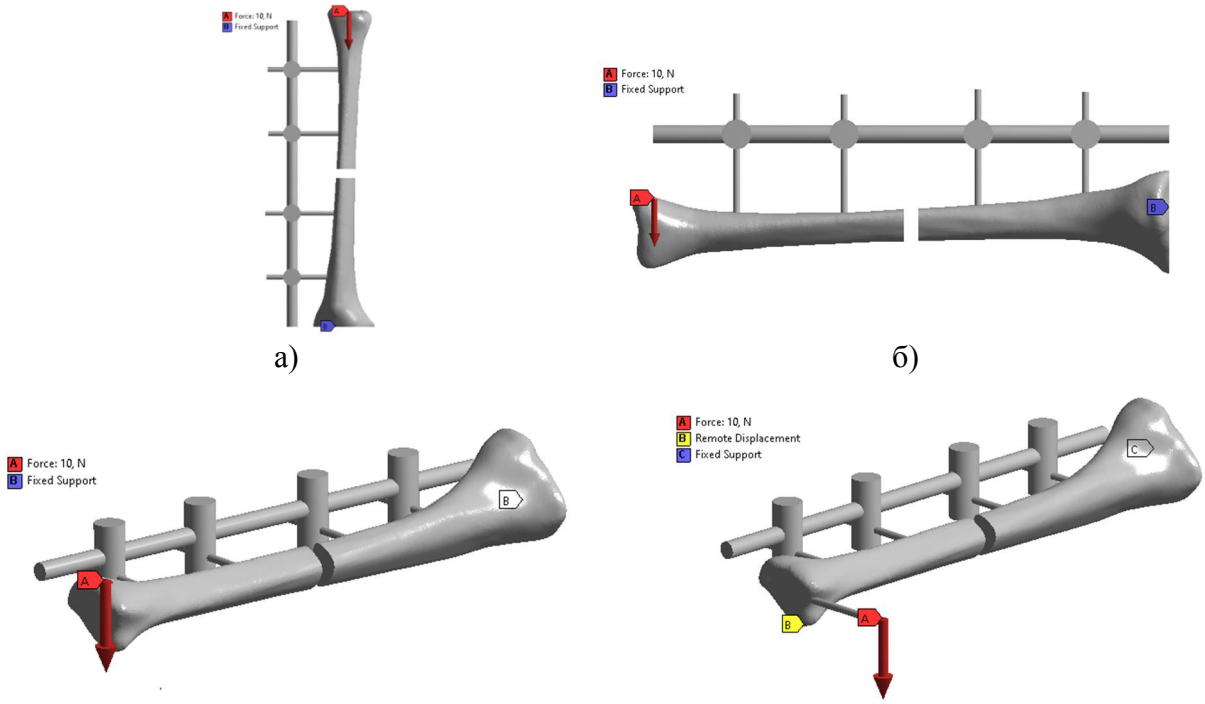
Розглядалось 4 варіанти розміщення стержнів (рис. 2) досліджуваної моделі: стандартна схема розміщення внутрішніх стержнів (рис. 2а), схема з розведеними стержнями (рис. 2б), схема з внутрішніми стержнями, розташованими під кутом 75^0 до осі кістки (рис. 2в) та схема з внутрішніми стержнями, розташованими під кутом 60^0 до осі кістки (рис. 2г).



а) б) в) г)

Рис. 2. Схеми розміщення внутрішніх стержнів системи

CAD модель системи «великогомілкова кістка – СтАЗФ» було створено у програмному комплексі SOLIDWORKS. Розрахунки методом скінчених елементів були проведені в програмному пакеті ANSYS Workbench. Реалізували чотири види навантаження: стиск, згин у площині розташування стержнів, згин перпендикулярно площині розташування стержнів та кручення. Схеми закріплення та навантаження зображені на рис. 3. В усіх випадках системи були навантажені силою 10Н.

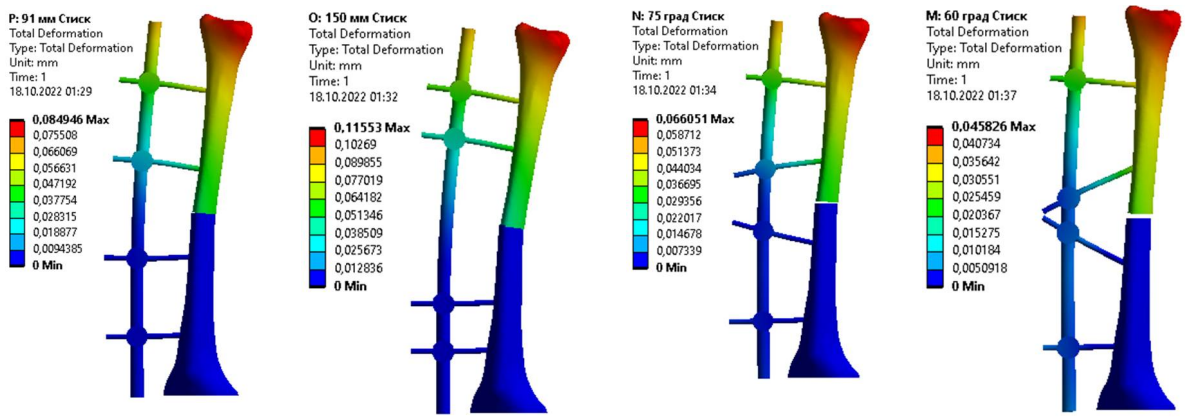


а) б)

в) г)

Рис. 3. Схеми закріплення для чотирьох видів навантаження, де а) – стиск, б) – згин у площині розміщення стержнів, в) – згин перпендикулярно розміщенню стержнів та г) – кручення

Для представлених систем було проведено чисельне моделювання та отримано залежності переміщень кістки від прикладеної сили, також отримані поля розподілу переміщень для різних постановок розрахункової моделі та різних розташувань стержнів, як представлено на рис. 4.



а) б) в) г)

Рис. 4. Результати переміщень точок систем при прикладанні сили 10Н в чотирьох видах навантаження

За результатами чисельного моделювання отримано значення жорсткості систем при різному розташування стержнів, що представлено в табл. 1.

Табл. 1. Жорсткість систем при різних видах навантажень, Н/мм

Розташування стрижнів	**Стиск**	**Згин у площині розташування стержнів**	**Згин перпендикулярно до площини розташування стержнів**	**Кручення**
Стандартне	117,65	35,34	12,69	16,42
З віддаленими стержнями	86,21	27,25	7,6	15,43
75град	151,52	40,65	13,79	14,08
60град	217,39	44,44	12,62	16,61

З результатів, показаних у табл. 1, можна зробити висновок, що жорсткість систем залежить від варіантів розташування внутрішніх стержнів АЗФ. що найменшу жорсткість має система з віддаленим розташуванням стрижнів, а найбільшу система з розміщенням стержнів під кутом 60.

Література.

1. Shydlovs'kyi M. S., Musienko O. S., Laksha A. A. The Effect of Gunshot Injuries of the Bone Tissue on Its Mechanical Characteristics. *Strength of Materials*. Vol. 53, No. 3, 2021, P. 463-470.

2. Mathematical modeling of options for osteosynthesis of distal tibial metaphyseal fractures type C1 / V. L. Vasyuk et al. *TRAUMA*. 2019. Vol. 20, no. 1. P. 28–37.

3. Дослідження напружено-деформованого стану моделі гомілки з переломом середньої третини великогомілкової кістки при різних варіантах остеосинтезу в умовах зростаючого стискаючого навантаження на систему «імплантат – кістка» / M. Y. Stroiev та ін. *TRAUMA*. 2022. Т. 23, № 1. С. 19–29.

УДК 620.178.3

Г. Никифорчин[1], д.т.н., проф., П. Семенов[2], к.т.н., доц. О. Цирульник[1], д.т.н., ст.н.с., О. Звірко[1], д.т.н., проф.
[1] Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України, Україна
[2] Одеський національний морський університет, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНЮВАННЯ ДЕГРАДАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ЗА ДІЇ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТА СЕРЕДОВИЩ

H. Nykyforchyn[1], D.Sc., Prof., P. Semenov[2], Ph.D., Assoc. Prof., O. Tsyrulnyk[1], D.Sc., Sen. Res., O. Zvirko[1], D.Sc., Prof.
[1] Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine
[2] Odessa National Maritime University, Ukraine

PECULIARITIES OF ASSESSING THE DEGRADATION OF STRUCTURAL STEELS UNDER THE ACTION OF CYCLIC LOADING AND ENVIRONMENTS

Abstract. Long-term operation of structural steels often intensifies their degradation, which manifests itself in a decrease in initial physical and mechanical properties. The work highlights the peculiarities of the steel degradation process and its assessment under conditions of cyclic loading, as well as under the action of corrosive hydrogenating environments. Special attention is paid to the role of in-bulk dissipated damage in the metal degradation.

Елементи конструкцій відповідальних інженерних об'єктів часто зазнають циклічного навантаження, яке розглядають важливим чинником прискорення руйнування порівняно зі статичним навантаженням, яке супроводжується вичерпанням пластичності металу та розвитком у ньому пошкодженості. Подібні закономірності властиві також експлуатаційній деградації сталей за тривалого статичного навантаження, особливо за дії наводнювальних середовищ. Мета роботи полягала у виокремленні ролі саме циклічного навантаження у загальних закономірностях зміни стану металу за його циклічного навантаження.

Одним із важливих аспектів в оцінюванні експлуатаційної деградації сталей є чутливість до неї показників опору руйнуванню. При цьому в такому аналізі взято до уваги не тільки показники втомного руйнування, але і тих механічних властивостей металу, які характеризують його експлуатаційне окрихчення. До них віднесено характеристики пластичності, ударної в'язкості та тріщиностійкості. На рис. 1 наведено закономірності зміни в часі експлуатації низки механічних властивостей з урахуванням стадійності процесів деградації, яка у загальному випадку зводиться до деформаційного старіння сталей та розвитку в них розсіяної мікропошкодженості. Для характеристик втомної міцності, як і міцності взагалі, властива інверсія впливу часу експлуатації, тоді як характеристики опору крихкому руйнуванню однозначно знижуються і тому можуть бути визначальніші для оцінювання стану металу на стадії розвитку пошкодженості. Схема демонструє також, що стадія пошкодженості за циклічного навантаження наступає раніше порівняно зі тривалим статичним і тому можливе порушення симбатності між експлуатаційною зміною статичної міцності і втомної міцності.

Згідно схеми на рис. 1 симбатна зміна характеристик втомної міцності і опору крихкому руйнуванню очікується лише на стаді II деградації сталей. Такі особливості підтверджують і експериментальні оцінки (рис. 2) механічних характеристик для

нержавної сталі 20Х13 лопатки циліндра низького тиску парової турбіни ТЕС у вихідному стані та після ~$3\cdot10^5$ год експлуатації [1]. Тріщиностійкість за статичного навантаження визначали з використанням методу *J*-інтеграла, а за циклічного – на основі порогів втоми ΔK_{th} і $\Delta K_{th\,eff}$, визначених без та врахування ефекту закриття тріщини відповідно. Використали показник λ, що характеризує відносну зміну відповідних показників внаслідок експлуатації. Зазначимо, що номінальний поріг втоми ΔK_{th} виявився мало ефективним для оцінювання деградації, оскільки експлуатація сталі спричинила зростання ефекту закриття тріщини, що майже нівелювало відмінності у порогах втоми вихідного та експлуатованого металу – вони відрізняються лише на 10%.

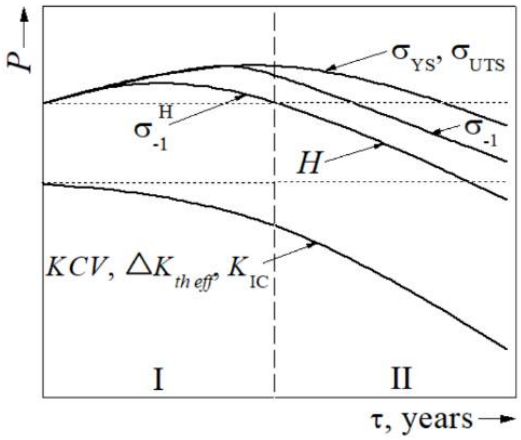


Рис. 1. Схема стадійної деградації сталей: стадія I – деформаційне старіння (зміцнення); стадія II – розвиток розсіяної пошкодженості. P – показник; H – вплив наводнювання.

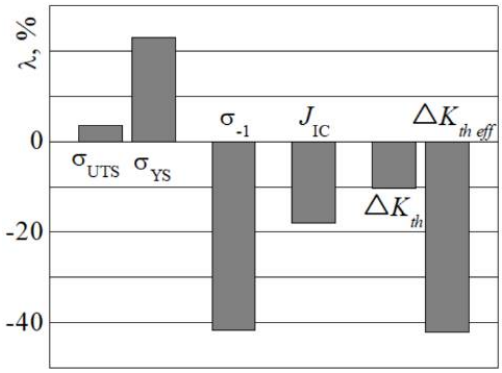


Рис. 2. Чутливість механічних характеристик сталі 20Х13 (міцності σ_{YS} та σ_{UTS}, границі витривалості σ_{-1}, в'язкості руйнування J_{IC} та номінального ΔK_{th} і ефективного $\Delta K_{th\,eff}$ порогів втоми) до її експлуатаційної деградації. $\lambda = \frac{P_{\exp} - P_{\text{in}}}{P_{\text{in}}} \cdot 100\%$, де P_{in} та P_{exp} – характеристики металу у вихідному стані та після експлуатації, відповідно)

Роль наводнювального середовища в деградації сталей проявляється у двох принципових аспектах: наводнювання металу внаслідок його електрохімічної взаємодії з корозивним середовищем та сильніший вплив водню для експлуатованого металу порівняно з вихідним його станом. Останній аспект використано для підвищення чутливості механічних показників до оцінювання деградації сталей.

Література.

1. Nykyforchyn H. M., Tkachuk Yu. M., Student O. Z. In-service degradation of 20Kh13 steel for blades of steam turbines of thermal power plants // Mater. Sci. – 2012. – 47, № 4. – P. 447–456.

УДК 539.3
А. Середа[1], гол. інж.–досл., О. Каток[1], к.т.н., с.н.с., В. Харченко[1], д.т.н., проф., академік НАН України, Р. Кравчук[1], к.т.н., М. Рудницький[1], к.т.н., с.н.с., В. Швець[1], к.т.н., С. Бісик[2], д.т.н., проф.
[1]Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Україна
[2]Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України

ВИМІРЮВАННЯ ТВЕРДОСТІ ВИСОКОМІЦНИХ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СТАНДАРТУ СОУ 56-36-2021

A. Sereda[1], Chief Egineer Researcher, O. Katok[1], Ph.D., Senior Researcher, V. Kharchenko[1], Dr.Sci., Prof., Academician of the NAS of Ukraine, R. Kravchuk[1], Ph.D., M. Rudnitskyi[1], Ph.D., Senior Researcher, V. Svets[1], Ph.D., S. Bisyk[2], Dr.Sci., Professor

MEASUREMENT OF THE HARDNESS OF HIGH-TENSION AND ARMORED STEEL USING THE STANDARD SOU 56-36-2021

Abstract. A standard for measuring the Brinell hardness of sheet high-strength alloy steels is presented. The features of the presented technique are shown on the example of sheet steels 28GRA and 28ГХНМР.

На сьогоднішній день із збільшенням об'єму виготовлюваної продукції з високоміцних легованих сталей важливим напрямком в дослідженнях та контролі їх якості є коректне та достовірне вимірювання твердості. На кожну плавку, окремо, проводять випробування на твердість за методом Брінелля відповідно до стандарту EN ISO 6506-1. В свою чергу достовірне визначення твердості цих сталей викликає деякі труднощі, через появу зневуглецьованого верхнього шару металу під час виготовлення.

На основі проведених експериментальних досліджень і відповідного аналізу нормативних документів, що регламентують вимірювання твердості за методом Брінелля, в Інституті проблем міцності було розроблено стандарт СОУ 56-36-2021, який дозволяє отримувати більш точні значення в зазначеній ситуації, що призводили на практиці до питань щодо невідповідності якості металу заявленим характеристикам. Крім дотримання вимог стандарту ДСТУ ISO 6506, в запропонованому стандарті містяться додаткові вимоги щодо врахування ряду факторів, характерних саме для цього класу матеріалів, зокрема підготовки поверхні, вибору кульки-індентора і рівня навантаження. Отримано патент України № 148856 від 22.09.2021 р. на спосіб визначення твердості товстолистових високоміцних сталей.

Апробацію стандарту СОУ 56-31-2021 проводили на зразках розміром 150×150×8,6 мм вирізаних із листового прокату сталей 28ГХНМР і 28ГРА.

Випробування листової сталі 28ГХНМР проводилось шляхом пошарового видалення поверхневого шару з наступним вимірюванням твердості з двох зовнішніх сторін зразка. На початку з зовнішніх поверхонь зразка знімали по 50 мкм, що дозволило отримати вихідні значення твердості. Далі по черзі знімали по 50 мкм металу з кожної сторони. Після кожного видалення шару металу вимірювали твердість на стаціонарному твердомірі ТШ-2 з навантаженням 3000 кгс і використанням кульки з карбіду вольфраму діаметром 10 мм (по п’ять вимірювань) та для порівняння вимірювали твердість портативним твердоміром Computest SC (п'ятнадцять вимірювань). Процедури пошарового зняття шарів металу повторювали до тих пір, поки твердість не набувала однакових значень на двох останніх процедурах. На рис. 1 і

2 показано розподіл твердості при пошаровому знятті металу з поверхонь зразків з сталей 28ГХНМР і 28ГРА.

На рис. 1 червоною лінією показано величину твердості згідно сертифікату. З рисунка також видно, що після видалення поверхневого шару металу товщиною 350 мкм твердість сталі досягла заявленої, про що свідчать результати вимірювань твердості за допомогою твердоміру ТШ-2 та заявленої в сертифікаті виробником. Максимальні відхилення середньої величини твердості двох поверхонь від величини твердості зазначеної в сертифікаті EN 10 204-3.1 для досліджуваної сталі склало 510 ± 1 HBW.

На рис. 2 показано розподіл твердості при пошаровому знятті металу з поверхонь зразка з сталі 28ГРА. Твердість поверхневого шару після першого зняття металу нижче реальних значень твердості (~462 HBW) і при подальших видаленнязх металу до товщини 250 мкм досягає заявленої (514 HBW) і з подальшим видаленням шарів металу не змінюється,про що свідчіть збіг результатів вимірювань твердості за допомогою твердоміру ТШ-2 при різних навантаженнях та твердоміру Computest SC.

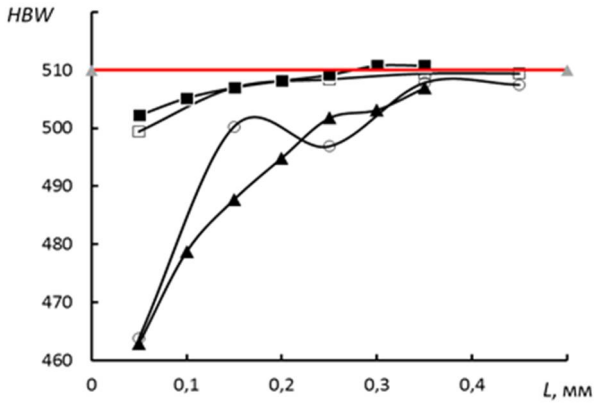


Рис. 1. Зміна значень твердості HBW при пошаровому знятті металу L з двох зовнішніх поверхонь зразка із сталі 28ГХНМР (○, □ – поверхня А; ●, ■ – поверхня Б) твердоміром ТШ-2 (□, ■) згідно ДСТУ EN ISO 6506-2:2019 та портативним приладом Computest SC (○, ●) (довідкові результати).

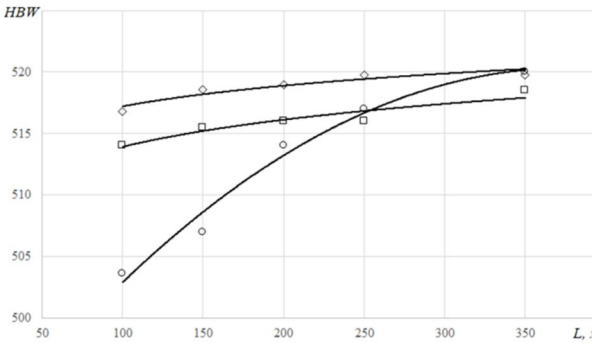


Рис. 2. Зміна значень твердості HBW при пошаровому знятті металу L з двох зовнішніх поверхонь зразка із сталі 28ГРА твердоміром ТШ-2 з навантаженням 3000 кгс і діаметром індентора 10 мм (□) та навантаженням 187,5 кгс і індентором 2,5 мм (◇) згідно ДСТУ EN ISO 6506-2:2019 та портативним приладом Computest SC (○).

З рисунків видно, що поверхневий шар досліджених листових легованих сталей в стані поставки занижує реальні значення твердості і при видаленні зневуглецьованого шару забезпечується можливість вимірювання твердості основного металу, про що свідчить незмінність значень твердості на рисунках при подальшому знятті шарів металу. Глибина такого шару для досліджуваноих сталей становить від 250 до 350 мкм.

На рис. 3 представлені результати твердості по товщині бічної поверхні зразка (8,0 мм) із сталі 28ГХНМР, що отримані портативним приладом Computest SC. Наведено характерний розподіл чисел твердості НВ 30 по бічній поверхні зразка листа (для решти товщин зразків характер розподілу має аналогічний характер).

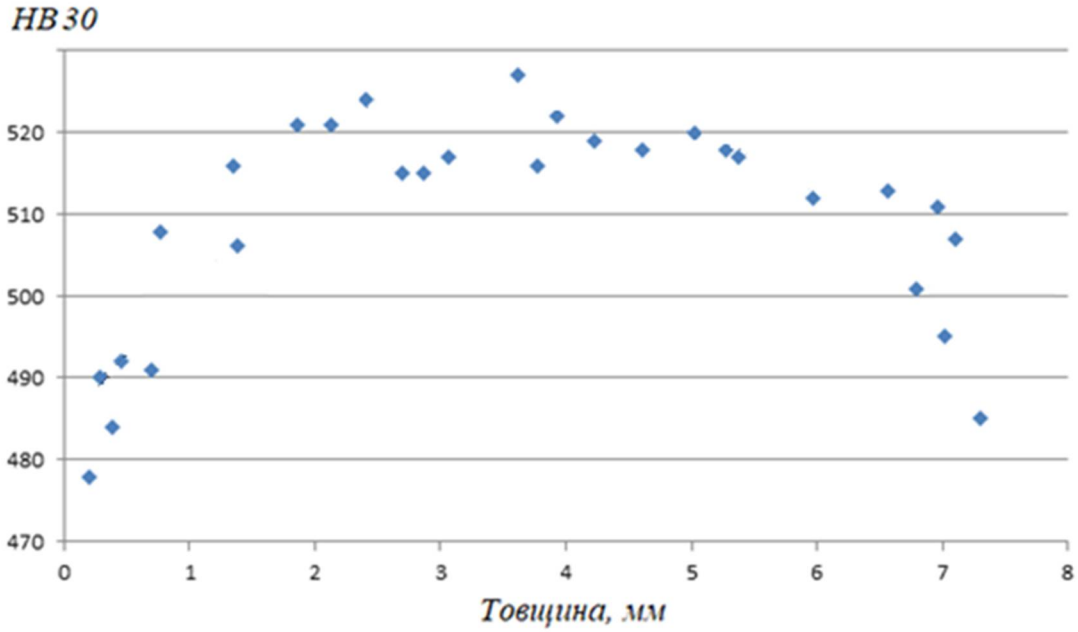


Рис. 3. Розподіл твердості сталі 28ГХНМР по товщині листа.

За результатами дослідження твердості торців листів було виявлено крайові ефекти зниження значень твердості відносно центральної частини бічної поверхні листів до кромок, що свідчить про деяку неоднорідність структури досліджуваних листових матеріалів по товщині. Невизначеність перехідної зони від центральної частини бічної поверхні листів до верхніх і нижніх кромок листа та технічна обмеженість можливості виконувати вимірювання твердості в безпосередній близькості до кромки бічної поверхні листа значно ускладнили кількісне визначення її величини.

Таким чином на прикладі листових високоміцних легованих сталей 28ГРА і 28ГХНМР проведено апробацію стандарту СОУ 56-36-2021 «Матеріали металеві. Високоміцні та броньовані листові сталі. Визначення твердості за методом Брінелля». Для досліджуваних сталей встановлено товщину зневуглецьованого шару, визначено достатній для отримання достовірних значень твердості рівень чистоти поверхні основного металу, тобто без зневуглецьованого шару, отримано характер розподілу твердості по товщині зразків.

УДК 620.172

М. Підгурський[1], д.т.н., проф., І. Підгурський[1], к.т.н., доц., М. Сташків[1] к.т.н., доц., Ю. Рудяк[2], д.т.н., проф.
[1]Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна
[2]Тернопільський національний медичний університет імені І.Я. Горбачевського, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ДВОХ ПОВЕРХНЕВИХ ПІВЕЛІПТИЧНИХ КОМПЛАНАРНИХ ТРІЩИН ДОВІЛЬНИХ РОЗМІРІВ ЗА ОДНОВІСНОГО РОЗТЯГУ ПЛАСТИНИ СКІНЧЕНИХ РОЗМІРІВ

M. Pidgurskyi[1], Dr., Prof., I. Pidgurskyi[1], Ph.D., Assoc. Prof., M. Stashkiv[1], Ph.D., Assoc. Prof., Ю. Рудяк[2], Dr., Prof.
[1]Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine
[2]I. Horbachevsky Ternopil National Medical University, Ukraine

MODELING OF THE INTERACTION OF TWO COPLANAR SEMI-ELLIPTICAL SURFACE CRACKS OF ARBITRARY DIMENSIONS UNDER UNIAXIAL TENSION OF A FINITE-DIMENSIONAL PLATE

Abstract. Definition of the stress intensity factors is one of the most important tasks for the estimation of residual life of structures. Precise computation of stress intensity factors accurately is of great importance in any linear elastic fracture mechanics problem. The analysis of available methods for determining stress intensity factors (SIF) for surface semi-elliptical cracks along their contour has been carried out and data on the mutual influence of several cracks on the change of SIF has been obtained.

Підвищення надійності та довговічності машин і конструкцій є однією з найактуальніших науково-технічних проблем, особливо для машин та конструкцій, що зазнають під час експлуатації значних циклічних навантажень. За таких умов можуть ініціюватись поверхневі тріщини, що є найбільш небезпечними дефектами з точки зору міцності та довговічності. Іноді виникає кілька поверхневих півеліптичних тріщин, розташованих на близькій відстані одна від одної. Правила об'єднання суміжних поверхневих в розрахункові схеми в існуючих стандартах (ASME Code Sec. XI, BS 7910, FITNET, API 579, GB/T 19624) є різними (і у більшості випадків консервативними) та потребують уточнень.

Критеріальна оцінка живучості (залишкового ресурсу) конструкції при наявних тріщинах пов'язана, як правило, з визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) [1], які характеризують напружено-деформівний стан (НДС) вздовж фронту тріщини. Розрахунок КІН в реальних конструкціях є складною задачею [2, 3, 4], зважаючи на геометрію і граничні умови, особливо для тривимірних тіл. Задача з визначення КІН значно ускладнюється при розгляді кількох поверхневих тріщин, що знаходяться близько одна від одної і взаємодіють між собою.

У зв'язку з цим здійснено моделювання взаємовпливу двох поверхневих тріщин довільних розмірів та визначення КІН [1] вздовж їх контурів. Розподіл КІН отримано методом скінчених елементів і застосуванням спеціалізованого пакету прикладних програм "ANSYS Workbench". Поверхневі тріщини моделювалися у зразках товщиною 20 мм з низьколегованої сталі 09Г2С з σ_T = 380 МПа. Коефіцієнт Пуассона при

пружному деформуванні становив ν = 0,3; модуль пружності $E = 2 \cdot 10^5$ МПа. Визначення КІН вздовж фронту поверхневих тріщин обчислювався за одновісного розтягу взірців.

Для моделювання вибирались найбільш значущі параметри і розміри поверхневих тріщин та відстані між ними.

У першому випадку досліджувались дві пари однакових за розмірами на поверхні ($2c$ = 15 і $2c$ = 20 мм) та формою (a/c = 0,7) поверхневих півеліптичних тріщин. Встановлено, що взаємодія між поверхневими тріщинами спостерігається при відстанях, співрозмірними із розмірами самих тріщин, що співпадає з даними. Для такого випадку збільшення КІН для внутрішніх поверхневих точок тріщин, що лежать на поверхні зразка, не перевищує 1%. Зі зменшенням відстані між тріщинами збільшення КІН стає щораз суттєвішим. Причому більші за розмірами поверхневі тріщини суттєвіше впливають одна на другу. Так, при відстані 2 мм між тріщинами КІН для внутрішніх поверхневих точок (вони найближче розташовані одна до одної) збільшується на 11,2 % (при розмірах тріщин $2c$ = 15 мм; a/c = 0,7) та на 16% (при розмірах тріщин $2c$ = 20 мм; a/c = 0,7). Таким чином, зі збільшенням розмірів тріщин їх взаємний вплив посилюється і значення КІН, особливо вздовж внутрішніх частин контурів тріщин, зростають.

У другому випадку моделювався вплив різних за розмірами поверхневих тріщин (рис. 1). При цьому одна із тріщин мала незмінні розміри $2c_1$ = 20 мм, відстань між тріщинами теж залишалась незмінною (2 мм), а змінювались розміри другої тріщини ($2c_2$ = 2,5; 5,0; 7,5; 10; 15; 20 мм). КІН вздовж фронту поверхневих тріщин обчислено за одновісного розтягу взірців при σ = 300 МПа.

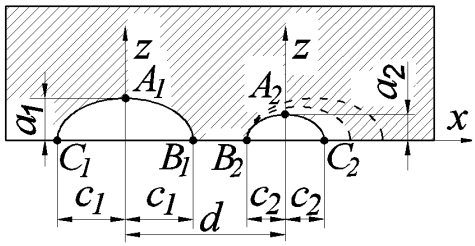
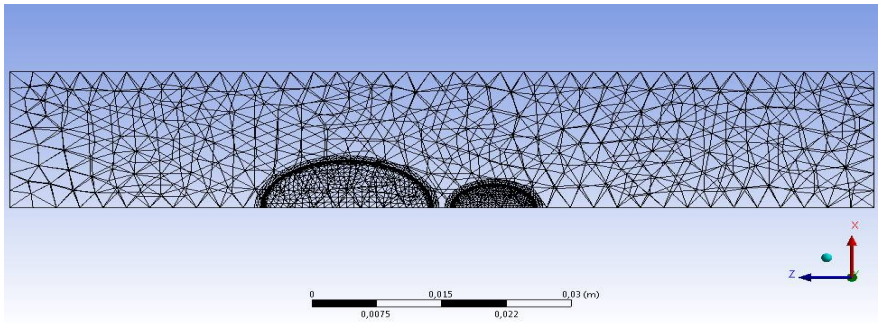
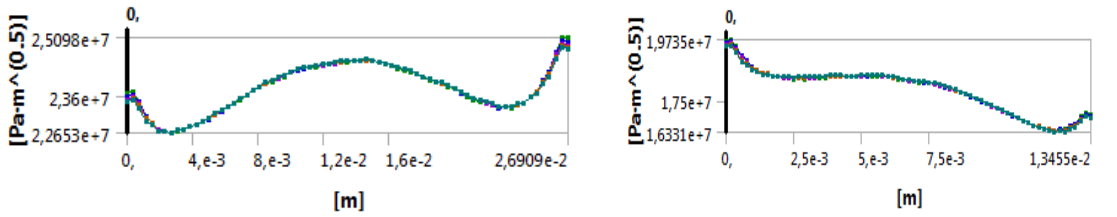


Рис. 1. Схема моделювання поверхневих півеліптичних компланарних тріщин різних розмірів у пластині скінченних розмірів

Скінчено-елементна модель для одного з випадків показана на рис. 2, а; розподіл значень КІН вздовж кожної з тріщин зображено на рис. 2 б.



(а)



(б)

Рис. 2. Скінчено-елементна модель – а) та характерний розподіл КІН – б) вздовж фронту двох поверхневих тріщин різного розміру при їх взаємодії.

Видно, що при близькій відстані між двома тріщинами, їх взаємний вплив виявляється у збільшенні (як і в попередньому випадку) значень КІН у внутрішній області їх взаємодії. Такий розподіл КІН є характерним при взаємодії поверхневих тріщин різних розмірів. Видно, що при близькій відстані між двома тріщинами, їх взаємний вплив виявляється у збільшенні (як і для випадку однакових тріщин) значень КІН у внутрішній області взаємодії. Але характерною особливістю є домінуючий вплив КІН більшої поверхневої тріщини. Зазначимо, що домінуючий вплив більшої поверхневої тріщин на зміну КІН у меншій за розмірами тріщині (рис. 2 б) призводить до пришвидшеного об'єднання тріщин. Отримані результати дають змогу уточнити розрахунок залишкового ресурсу конструкції з кількома поверхневими тріщинами та є основою для розробки математичної моделі, що описує зміну КІН вздовж контурів поверхневих тріщин при їх взаємодії.

Література.

1. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений / Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – Т.1, Т.2. – 1016с.

2. Chang Dr., Kotousov A. A strip yield model for two collinear cracks / Eng. Fract. Mech., 2012. – №90. – p.121-128.

3. Raju I.S., Newman J.C. Jr. Stress-intensity factors for a wide range semi-elliptical surface cracks in finite-thickness plates // Eng. Fract. Mech., 11. - №4. - pp. 817-829.

4. Моделювання розкриття втомної тріщини в сплаві Д16Т за регулярного навантаження методом скінчених елементів/П.Ясній, Ю.Пиндус, О.Галущак, В.Фостик// Вісник ТНТУ, 2013. – Том 70. – № 2. – С.7-14.

УДК 624.072.014.2

М. Підгурський, д.т.н., проф., М. Сташків, к.т.н., доц., І. Підгурський, к.т.н., доц., В. Сенчишин, к.т.н., О. Підлужний асп., Д. Биків, магістр, В. Слободян, інж., О. Підвисоцький, магістр, В. Гоголюк, магістр
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ПЕРФОРОВАНИХ БАЛОК З ОДНОРЯДНИМ ТА ДВОРЯДНИМ РОЗТАШУВАННЯМ ОТВОРІВ

M. Pidgurskyi, Dr., Prof., M. Stashkiv, Ph.D., Assoc. Prof., I. Pidgurskyi, Ph.D., Assoc. Prof., B. Сенчишин, Ph.D., Assoc. Prof., O. Pidluzhnyi Ph.D. student, D. Bykiv, master, V. Slobodian, eng., O. Pidvysotskyi, master, V. Hoholiuk, master
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

RESEARCH OF THE STRENGTH OF CELLULAR BEAMS WITH A SINGLE AND DOUBLE ROW ARRANGEMENT OF OPENINGS

Abstract. Cellular beams with circular openings were modeled using the finite element method. The distribution of stresses in the perforation zones of the beam with round openings for the single-row and double-row variants was obtained. A comparative analysis of these beams was carried out for perforated beams of almost the same weight. Recommendations for increasing the durability of beams with perforations of various configurations are provided.

Застосування перфорованих балок при спорудженні будівель і споруд приводить до зниження ваги конструкцій і робить такі балки конкурентоздатними з решітчастими конструкціями. Крім технічних переваг перфорація створює ще й кращий естетичний вигляд, а використання різноманітних форм перфорованих елементів є цікавим архітектурно-будівельним рішенням інтер'єру.

Перфорована балка – це конструкція, яку отримують з прокатного двотавра після його зигзагоподібного розрізання і зварювання виступів стінки. Це дозволяє значно збільшити висоту балки у порівнянні з вихідним профілем. Несуча здатність таких перфорованих балок в 1,3 – 1,5 рази перевищує несучу здатність початкових профілів за рахунок збільшення моментів інерції в 1,5 ÷ 2,0 рази.

У будівлях та спорудах широко застосовуються перфоровані балки з шести- та восьмикутними вирізами, у тому числі балки з дворядною перфорацією. За останній час у будівництві широко застосовуються інші форми вирізів – овальні, синусоїдальні і, найчастіше, круглі. Таке різноманіття конструктивних рішень засвідчує, що пошук раціональних форм балок з перфорованими стінками продовжується і є далеким від завершення. Вибір оптимальних варіантів можливий лише після аналізу впливу геометричних особливостей вирізів на напружено-деформівний стан та стійкість балок. Застосування дворядної перфорації шестикутними отворами, як показали дослідження, дозволяє підвищити міцність, жорсткість і стійкість балок завдяки більш рівномірному розподілу матеріалу в їх стінці.

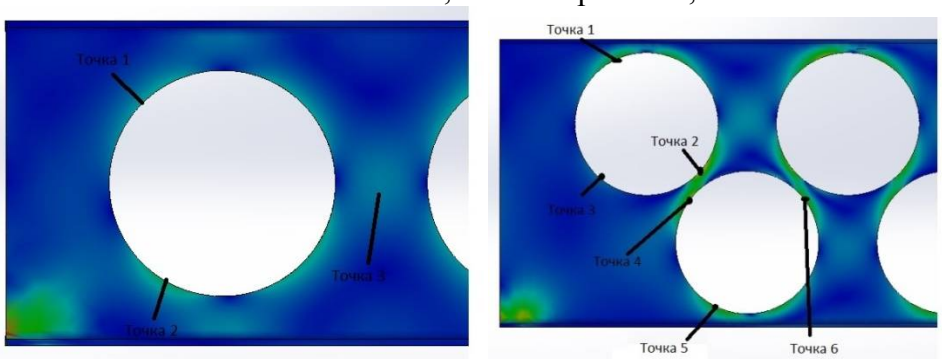
У зв'язку з цим проведено порівняльні властивості балок з одно- та дворядною круглою перфорацією стінок методом скінчених елементів.

Розглянуто шарнірно закріплені балки прольотом 12м з рівномірно розподіленим навантаженням q=50кН/м. Балки виготовлені з низьколегованої сталі 09Г2С з механічними характеристиками σ_y = 380 МПа та σ_u = 530 МПа. Формоутворюючим профілем для балок з однорядною перфорацією є прокатний двотавр № 60Б2, а для балок з дворядною перфорацією – прокатний двотавр №70Б1.

Зазначимо, що для порівняльного аналізу моделювались балки з майже однаковою вагою (табл. 1). Для цього були підібрані отвори діаметром 590 мм.

Відстань між отворами у балках з однорядною перфорацією складала 240 мм, а з дворядною – 52 мм (рис. 1)

Балки моделювались у програмному комплексі SolidWorks. Оцінка напружено-деформівного стану здійснювалась за допомогою як програмного пакету прикладних програм SolidWorks, так і ANSYS. При оцінці НДС в зонах вирізів присутня концентрація напружень, тому в цій області важливо правильно вибрати розмір скінченого елемента. Він повинен бути суттєво меншим розміру перетинки між вирізами. Особливо це стосується дворядної перфорації, у якій вирізи розташовуються у шаховому порядку. У зв'язку з цим створювалась модель з глобальною сіткою елементів розміром 40,8 мм з її згущенням біля вирізів з величиною скінченого елемента 2,6 мм. Для балок з однорядною перфорацією стінки розмір скінченого елемента глобальної сітки становив 86 мм, а біля вирізів – 2,4 мм.



а) б)

Рис. 1. Фрагмент розподілу напружень в перетинах між круглими вирізами при:
а) однорядній перфорації стінки; б) дворядній перфорації стінки.

Порівняльний аналіз майже однакових за вагою перфорованих балок показує (табл. 1), що максимальний прогин у балках з дворядною перфорацією при оцінці жорсткості є в 1,65 раз меншим, а критична сила при оцінці загальної стійкості є в 1,31 рази вищою, ніж у балках з однорядною перфорацією стінки. Також у таких балках меншими є максимальні напруження в полицях.

Табл. 1. Порівняльний аналіз розрахунку балок з круглою перфорацією.

Тип перфорації	Критерії порівняння						
	діаметр вирізів, мм	кількість вирізів	вага перфорованої балки, кг	висота перфорованої балки, мм	максимальний прогин, мм	критична сила, кН/м	максимальні напруження у перемичках, МПа
однорядна	590	14	937,8	847	44,6	14,6	307,9
дворядна	590	27	861,0	1191	27,1	19,0995	400,4

Таким чином, у порівнянні з однорядною перфорацією, утворена балка з дворядним розташуванням круглих вирізів (за однакової ваги) буде мати більшу висоту і відповідно вищу міцність і жорсткість, що свідчить про перспективність застосування таких конструкцій.

Аналізуючи картини напружень балок з однорядною та дворядною перфорацією (рис. 1) зазначимо, що у балках з дворядною перфорацією напруження у перемичках є суттєво вищими (табл. 1). Це пояснюється меншою шириною перемичок при дворядному розташуванні отворів. Встановлення коректних розмірів вирізів та відстаней між ними є вирішальними при конструюванні балок з дворядною перфорацією стінок, особливо для конструкцій, що зазнають циклічного навантаження. Одним з можливих варіантів підвищення їх довговічності таких конструкцій за умов циклічного навантаження є підсилення отворів.

УДК 693.542
Д. Баран к.т.н., М. Гудь, к.т.н., В. Шумейко
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ВПЛИВ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА УДАРНУ В'ЯЗКІСТЬ СТАЛІ 25Х1М1Ф

M. Hud, Ph.D., D. Baran, Ph.D., V. Shumeiko
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

EFFECT OF HIGH TEMPERATURES ON IMPACT STRENGTH OF STEEL 25X1M1F

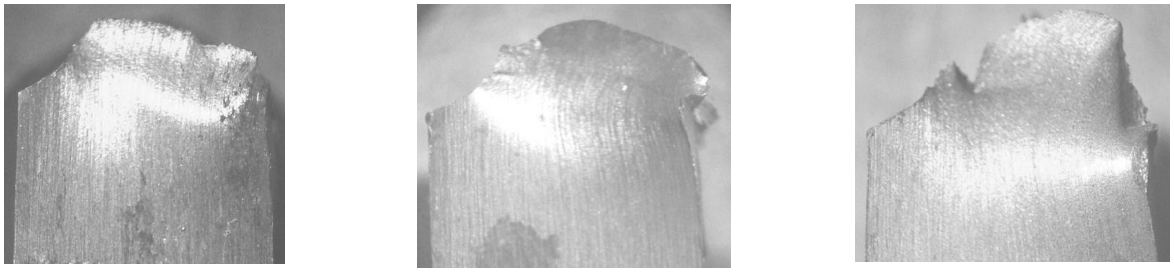
Abstract. Most of the durable structures of metallurgical equipment, in particular, the rollers of continuous casting machines, operate at elevated temperatures, which leads to changes in the mechanical characteristics of the material and subsequently leads to the destruction and stoppage of metallurgical equipment. Determining the specifics of the course of these processes is an important issue of both the mechanics of destruction and the economy as a whole.

В результаті проведеного дослідження усереднено за п'ятьма зразкам дані впливу температури на енергоємність зародження та поширення тріщини при ударному руйнуванні, табл. 1.

Табл. 1. Енергоємність руйнування і ударна в'язкість сталі 25Х1М1Ф

Температура випробувань, °С	$A_з$, *Дж*	$A_р$, *Дж*	*А, Дж*	*KCV, МДж/м²*
20	33,55	65,75	99,3	1,24
375	54,65	124,6	180,0	2,33
600	39,95	71,35	111,3	1,39

При дослідженні зламів зразків Шарпі виявлено зміну форми губ зсуву утворених на їх бічних поверхнях. При 20 °С губи зсуву мають слабо розвинутий профіль, рис. 1а. Формування губ зсуву для матеріалу при 20 °С супроводжувалось формуванням розшарувань матеріалу в зонах зсувного та стабільного підростання тріщини з ділянками сколювання в околі їх берегів. Зростання температури спричиняє збільшення кута повороту губ зсуву відносно повздовжньої осі зразка. Форми губ зсуву при 375 °С та при 600 °С є подібними, проте із зростанням температури збільшується їх висота, з'являються локальні надриви матеріалу, рис. 1 б,в.

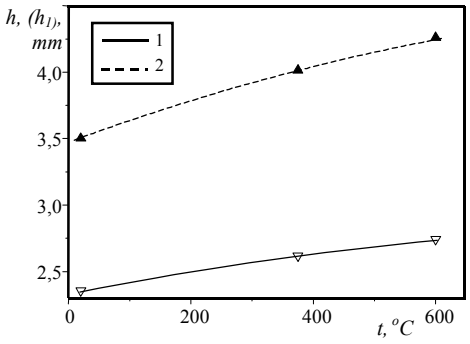


а б в

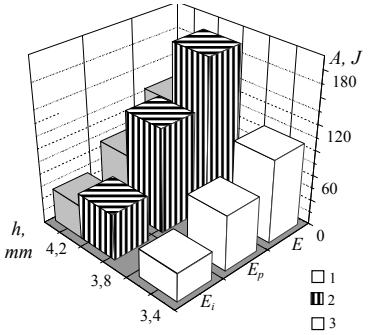
Рис. 1 Фотозображення губ ззсуву зразків Шарпі випробуваних за температури 20 °С (а), 375 °С (б) та 600 °С (в)

Максимальна висота губ зсуву становила 3,5 мм при 20 °С, зростала до 4,0 мм при 375°С та досягала значення 4,3 мм при 600°С. Отже, слід зазначити, що висота губ зсуву зростає із збільшенням температури випробувань, що свідчить про зростання пластичності матеріалу зразка на макрорівні. Проте, якщо для кімнатних та підвищених

температур це зростання губ зсуву корелює з енергоємністю руйнування, то при 600 °С зростання губ зсуву (пластичності) супроводжується зниженням енергії руйнування сталі 25Х1М1Ф. Очевидно, при цій температурі відбулась зміна механізму руйнування матеріалу на нижчих структурних рівнях, насамперед на мікрорівні рис. 2.



а



б

Рис. 2. Залежність висоти губ зрізу від температури випробувань – а та від енергоємності руйнування за температур 20 °С (1), 375 °С (2), 600 °С (3) - б

Слід зазначити що зростання енергоємності руйнування відбувається із пропорційним збільшення енергії зародження, поширення тріщини. Це в свою чергу спричиняє збільшення загальної енергоємності руйнування зразків. Разом із зміною висоти губ зсуву відбувається зміна форми зламу зразків.

Динамічне руйнування зразків Шарпі має стадійний характер. Процес пластичної деформації носить негомогенний характер, як за розподілом деформацій так і в часі. Із зростанням зовнішнього навантаження на бічній поверхні зразка зароджуються смуги локалізований деформації і поширюються вглиб зразка. При цьому на одній поверхні присутні локальні області, що знаходяться на різних стадіях розвитку деформаційного процесу. Рух смуг носить імпульсний характер, обумовлений, з одного боку процесом генерації дефектів у вершині надрізу, а з іншого неоднорідним напружено - деформівним станом, який виникає в результаті градієнта деформацій пружно - пластично деформованих областей. Окремі прояви цих процесів помітні на макрозламах зразка.

Вимірювання зміщень і кількісна оцінка пластичної деформації і енергоємності руйнування, а також характер деформаційного рельєфу дозволяє визначити стадійність процесу. Пластична деформація на мезорівні пов'язана з ротаційною динамікою фрагментів матеріалу, а дисипація енергії відбувається в результаті роботи тертя на їх межах.

Отже, мезодеформуванню відводиться особлива роль в дисипативних процесах, активність яких зростає з підвищенням ступеня гетерогенності матеріалу. Таким чином, об'єднуючим фактором мезомеханізмів руйнування є розвиненість внутрішніх меж розділу зерен, і підвищена щільність дефектів кристалітної будови при 20°С, а при високих температурах зменшення (відпуску) цих дефектів.

Література.

1. Ясній П. В. Міцність і довговічність елементів конструкцій за змінної амплітуди навантаження: монографія / Ясній П. В., Пиндус Ю. І., Ясній О. П.; Терноп. нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. - Тернопіль : ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2013. - 172 с.

2. Шніцар Т. О. Залежність параметрів зони витягування від в’язкості руйнування теплостійкої сталі / Т. О. Шніцар, В. К. Зеленський, В. П. Ясній // Збірник тез доповідей V Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 17-18 листопада 2016 року — Т. : ТНТУ, 2016 — Том І. — С. 63-64. — (Нові матеріали, міцність і довговічність елементів конструкцій).

УДК 539.4:629.7
О. Дивдик, д.ф., В. Ясній, д.т.н., доц., О. Ляшук, д.т.н., проф., І. Окіпний, к.т.н., доц., Р. Комар, к.т.н., доц., П. Сокіл
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ВПЛИВ НАТЯГУ ДОРНУВАННЯ НА КІНЕТИКУ РОСТУ ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ ЗА СТАЛОЇ АМПЛІТУДИ НАВАНТАЖЕННЯ

O. Dyvdyk, PhD., V. Iasnii, Dr., Assoc. Prof., O. Lyashuk, Dr., Prof., I. Okipnyi, PhD., Assoc. Prof., R. Komar, PhD., Assoc. Prof., P. Sokil
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

THE INFLUENCE OF COLD EXPANDED HOLE ON FATIGUE CRACK GROWTH UNDER CONSTANT AMPLITUDE

Abstract. In the paper, the influence of cold expanded hole on the fatigue crack grown of aluminum alloy D16chT was studied. There were revealed the main regularities of the fatigue crack growth rate of quarter elliptical crack in the vicinity of hole on SIF. There was obtained the dependence of the fatigue crack growth rate of an angular crack in aluminum alloy plates on the SIF range.

Підвищення витривалості з'єднань дорнуванням отворів в авіаційних конструкціях є надзвичайно важливим для безпечної їх експлуатації. Експлуатаційні навантаження призводять до процесів втоми, пошкодження структури матеріалу та накопичення дефектів. Із аналізу літературних даних відомо багато випадків пошкоджень силових елементів різних типів авіаційних конструкцій, зокрема у вигляді тріщин, спричинених дією циклічного навантаження під час експлуатації.

Поверхневе пластичне деформування широко використовується для підвищення довговічності функціональних і технологічних отворів. Підтверджено в багатьох працях позитивний вплив дорнування в елементах конструкції з отворами на довговічність, мікротвердість, шорсткість, залишкові стискаючі напруження. Відомо, що техніка відновлення, заснована на холодному розширенні отворів є досить ефективною для продовження ресурсу пошкоджених конструкцій. Також досліджено вплив холодного розширення на довговічність поширення тріщини в пластинах з кріпильними отворами з попередньо наведеними тріщинами в алюмінієвому сплаві 2024Т3 і виявлено, що параметри початкової тріщини, а також тип параметри навантаження (постійна амплітуда або спектр польоту) і початкова довжина тріщини мають значний вплив на швидкість поширення тріщини.

Для дослідження росту втомних тріщин у пластин з центральним отвором використовували сервогідравлічну випробувальну машину СТМ-100. Плоскі зразки з алюмінієвого сплаву Д16чТ з центральним отвором випробовували на тріщиностійкість за сталоамплітудного навантаження. Для дослідження впливу дорнування на швидкість росту втомних тріщин в пошкоджених зразках, використовували зразки з діаметром отвору 8, 10 та 12 мм: ширина робочої ділянки – 60 мм; довжина робочої ділянки – 120 мм; товщина – 6 мм.

Перший тип – зразки без дорнування з центральним отвором і одним кутовим надрізом, перпендикулярним до напрямку прокатування. Другий тип – зразки після дорнування i = 2,7 %, i = 2,4 % та i = 2,8 % з центральним отвором і попередньо зробленим одним кутовим надрізом, перпендикулярним до напрямку прокатування. Кутовий надріз біля отвору, розмірами 0,5 х 0,5 мм наносили електроіскровим методом з точністю ± 0,03 мм. Після цього зразок піддавали циклічному навантаженню за сталої

амплітуди з розмахом напруження Δσ= 147 МПа, коефіцієнту асиметрії циклу навантаження $\boldsymbol{R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = 0,05}$, частота навантаження 10 Гц, форма циклу синусоїдальна,

Перед початком випробування ділянки поверхонь поширення тріщини полірували до шорсткості R_a = 0,05. Для забезпечення необхідної точності вимірювання приросту тріщини на поверхні отвору зразка через 0,5 мм наносили риски перпендикулярно до напрямку поширення тріщини. Початкову тріщину довжиною 0,5 мм від надрізу вирощували за м'якого режиму навантаження при $R = K_{min}/K_{max}$ = 0,05 (тут K_{min},, K_{max} – відповідно найменший і найбільший коефіцієнт інтенсивності напружень). Довжини приросту втомної тріщини на поверхні *c* та по товщині пластини *a* вимірювали з використанням бінокулярного мікроскопу МБС-10.

Для зміцнення отвору використовували дорни діаметром 8, 10 та 12 мм, виготовлені із сталі марки 40Х та загартовані до твердості 35-38 HRC. Швидкість переміщення дорну складала 0,1 мм/с.

Досліджено залежності швидкості росту чвертьеліптичної втомної тріщини в околі отвору в напрямку dc/dN (швидкість РВТ на поверхні зразка) і da/dN (швидкість РВТ вздовж товщини зразка) у зразках діаметром отворів *d* = 8 мм, 10 мм та 12 мм від коефіцієнту інтенсивності напружень. Встановлено, що незалежно від діаметру отвору експериментальні залежності швидкості РВТ на поверхні та по товщині зразка знаходяться у межах однієї смуги розкиду. Зазначено також слабку залежність швидкості РВТ від розмаху КІН ΔK в межах 5 МПа*√м – 23 МПа*√м.

Також виявлено залежності швидкості росту кутової тріщини в пластинах з алюмінієвого сплаву Д16чТ діаметром отвору *d* = 8 мм, 10 мм та 12 мм *dc/dN* і *da/dN* та наскрізної тріщини від розмаху КІН, яка отримана за розтягу пластини із центральною наскрізною тріщиною за асиметрії циклу *R* = 0,1.

Порівнюючи ці дані видно, що швидкість РВТ наскрізної втомної тріщини за розмаху КІН < 20 МПа·√м значно менше від швидкості росту кутової тріщини біля отвору. Також зазначено повільніший ріст тріщини на поверхні зразка порівняно із ростом на поверхні отвору при ΔK < 12 МПа·√м. Очевидно, що ця різниця спричинена різним напрямом росту тріщини по відношенню до напрямку прокатування пластини, довжиною тріщини і її формою фронту.

Подібні співвідношення між швидкістю росту кутової і наскрізної тріщини спостерігали і для пластин з отвором діаметром 10 мм і 12 мм. Швидкості росту кутової втомної тріщини на поверхні пластини *dc/dN* і на поверхні отвору *da/dN* діаметром 8 мм і 10 мм співпадають у всьому діапазоні зміни розмаху КІН.

Швидкість РВТ *dc/dN* за діаметру отвору 8 мм і 12 мм має стрімко спадаючу ділянку, що спричинено одноразовим перевантаженням після дорнування, а в подальшому із збільшенням ΔK після досягнення мінімального значення $(dc/dN)_{min}$ швидкість РВТ стрімко зростає, з переходом у пологу ділянку. При значенні $\Delta K \geq$ 13 – 15 МПа√м швидкості РВТ *dc/dN* і *da/dN* не залежать від діаметру отвору і можуть бути описані одною залежністю від ΔK. Отримана залежність подібна до закономірностей впливу одноразових перевантажень на швидкість РВТ в сплаві Д16чТ після одноразових перевантажень із розтягом пластин із центральною наскрізною тріщиною. Слід зазначити, що ефект зменшення швидкості РВТ відступній після дорнування із найменшим натягом *i* = 2,4 % для зразка з отвором діаметром 10 мм.

УДК 534.134
М. Гудь., к.т.н.
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ПІДБІР РАЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ РОЗМІЩЕННЯ В'ЯЗЕЙ У ДНИЩІ ПЛАВАЮЧОГО БАСЕЙНУ

M. Hud, Ph.D.
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

SELECTION OF A RATIONAL SCHEME FOR THE PLACEMENT OF ELMS AT THE BOTTOM OF A FLOATING POOL

Abstract. Floating pools are a special type of structures that are only affected by the forces of their own weight during transportation and installation of such a structure. During operation, the pool is partially immersed in the reservoir and is in a state of constant equilibrium, since the mass of water in the middle and the mass of the supporting structure of the pool bowl are completely compensated by the Archimedean force.

Метою роботи є чисельна оцінка впливу горизонтальних зв'язків на прогини днища чаші плаваючого басейну.

Чисельний розрахунок проводили з використанням вітчизняного програмного комплексу ЛІРА, який працює на базі методу скінченних елементів (МСЕ). Для визначення деформативності днища була побудована стержнева модель (Рис. 1) розміром 25х10 м, що відповідає дійсним габаритам реальної конструкції. Основним конструктивним елементом є ферми, що розташовані з кроком 1 м та зв'язані між собою розпірками та горизонтальними і вертикальними зв'язками, утворюючи таким чином просторову конструкцію. Як основний поперечний переріз прийнято профільну трубу прямокутного січення. При моделюванні застосовували механічні властивості матеріалу сталь С235. Короткі торцеві сторони днища басейну закріплялись у вигляді шарнірно опертої балки, імітуючи монтажне положення конструкції.

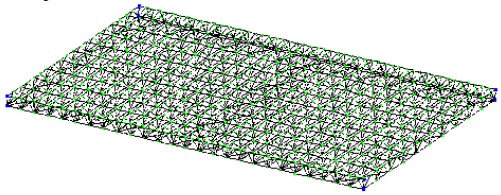
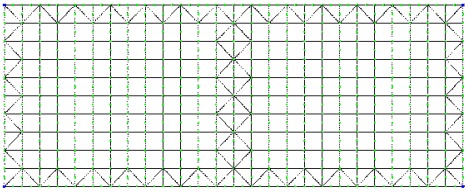
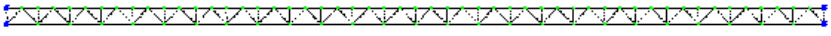


Рис. 1. Скінченноелементна стрижнева модель днища басейну

На початковому етапі розрахунку прийнято, що горизонтальні в'язі розташовано в крайніх та середніх прольотах (Рис.2.а.) по нижньому поясу ферм, також додатково розміщено вертикальні в'язі в торцевих ділянках (Рис.2.б.) днища басейну. Розпірки розташовані по нижньому та верхньому поясі усіх ферм.



а)



б)

Рис. 2. Схема розміщення горизонтальних зв'язків по нижньому поясі ферм (а) та вертикальних в'язей у торцевих ділянках (б)

У другому варіанті конструкції додатково встановлено в’язі у 10 прольотах по нижньому поясу ферм в центральній частині днища, симетрично відносно поперечної осі симетрії. Також, додано в’язі по верхніх поясах ферм в торцевих крайніх прогонах по довших сторонах (Рис.3). У третьому варіанті конструкції окрім того, встановлено зв’язки по верхньому поясу ферм в коротких сторонах днища

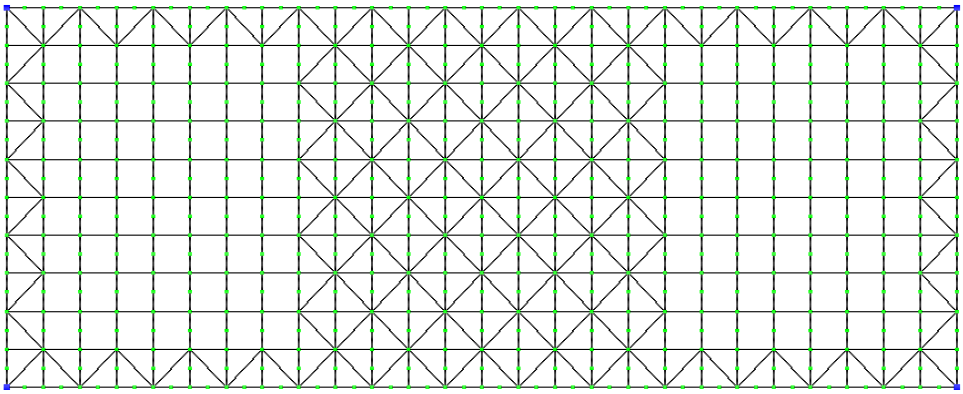


Рис. 3. Схема розміщення зв’язків у другому варіанті розрахунку

В результаті скінченно-елементного моделювання отримано чисельні значення прогинів днища басейну. Так, за умови розміщення зв’язків тільки по нижньому поясу ферм (варіант I) максимальні значення прогинів становлять 8,55 см. При додатковому встановленні в’язей по верхньому поясі у торцевих ділянках та по нижньому поясу в серединній частині днища (варіант II) спостерігається зменшення прогинів до 6,99 см., при III варіанті розміщення зв’язків прогини становлять 6,93 см.

При цьому, характер деформацій в обох випадках, ідентичний. Найбільші прогини зосереджені у середині прольоту.

За результатами оцінки впливу горизонтальних зв’язків на деформативність днища чаші плаваючого басейну виявлено:

1. При розміщенні зв’язків тільки по нижньому поясу ферм максимальні значення прогинів становлять 8,55 см та не перевищують 1/200*l*.

2. При додатковому встановленні в’язей (варіант II) прогини зменшуються до 6.99 см. та до 6,93 см відповідно.

Спостерігається ідентичний характер утворення деформацій в усіх випадках розміщення в’язей.

Література.

1. Ковальчук Я. О. Комп’ютерне моделювання деформації зварної ферми з косинками у вузлах / Ярослав Олексійович Ковальчук, Наталія Ярославівна Шингера // Вісник ТНТУ, — Т. : ТНТУ, 2016 — Том 83. — № 3. — С. 73-78. — (Механіка та матеріалознавство).

2. Ковальчук Я. О. Конструювання вузлів зварних ферм із використанням ПК ANSYS / Ковальчук Ярослав Олексійович, Шингера Наталія Ярославівна, Басара Микола // Вісник ТНТУ. — Т. : ТНТУ, 2017. — Том 85. — № 1. — С. 47–52. — (Механіка та матеріалознавство).

3. Підгурський М.І. Проектування металевих конструкцій. Сталевий каркас одноповерхової виробничої будівлі. Теоретичні основи проектування з прикладами розрахунку / М.І. Підгурський, І.М. Підгурський. – Тернопіль: ФОП Паляниця В.М, 2021. – 236 с.

4. Hud, Mykhailo, et al. "Study of the joint work of the foundations and the spatial tower under the action of dynamic loads." Procedia Structural Integrity 36 (2022): 87-91.

УДК

Р. Кравчук, к.т.н., А. Кравчук, к.т.н.
Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ ДЕФОРМУВАННЯ МАТЕРІАЛУ ДЖОНСОНА-КУКА ДЛЯ ТОНКОЛИСТОВОГО ПРОКАТУ ВИСОКОМІЦНОЇ СТАЛІ ARMOX 500T

R. Kravchuk, Ph.D., A. Kravchuk, Ph.D.
G.S. Pisarenko Institute for problems of strength of the NAS of Ukraine, Ukraine

DETERMINATION OF THE MATERIAL PARAMETERS OF THE JOHNSON-COOK MODEL FOR THIN-SHEET HIGH-STRENGTH STEEL ARMOX 500T

Abstract. The paper presents the results of complex experimental and computational studies of the behavior of thin-sheet high-strength steel ARMOX 500T under various types of load, which made it possible to determine the material parameters of the Johnson-Cook model.

Для обґрунтування безпечної експлуатації елементів конструкцій із високоміцних сталей в умовах екстремального навантаження необхідно знати закономірності їх деформування та руйнування. Для цього проводять комплексні експериментальні дослідження, які включають випробування як при статичному, так і динамічному навантаженні. Проте реалізувати їх доволі складно через високу вартість самого матеріалу, складність його обробки, потребу у наявності спеціального експериментального обладнання. Тому останнім часом для дослідження особливостей деформування та руйнування високоміцних матеріалів при екстремальних умовах навантаження крім експериментальних використовують також розрахункові методики з використанням різних моделей деформування матеріалу та критеріїв руйнування [1-3].

Однією з найбільш вживаних моделей деформування матеріалу, що використовуються для чисельного моделювання високошвидкісних процесів є модель Джонсона-Кука [4, 5]. Модель деформування матеріалу (1) та руйнування (2) Джонсона-Кука має вигляд:

Деформаційне зміцнення матеріалу записується рівнянням:

$$\sigma = \left(A + B\varepsilon^{n}\right)\left(1 + C\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\left(1 + \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^{m}\right) \tag{1}$$

де A, B, n, C та m – параметри матеріалу, які визначаються за результатами різних випробувань.

Критерій руйнування включає вплив трьохвісності напруженого стану, траєкторії деформації, швидкості деформації та температури у виразі деформації руйнування:

$$\varepsilon_f = \left(D_1 + D_2 e^{D_3\sigma^*}\right)\left(1 + D_4\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\left(1 + D_5\left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)\right) \tag{2}$$

де D_1 – D_5 – параметри матеріалу, які визначаються за результатами різних випробувань.

Через різноманітність механізмів руйнування та їх залежність від багатьох факторів, питання визначення параметрів таких моделей є дуже актуальним та достатньо складним і потребує проведення комплексних експериментально-розрахункових досліджень при різних швидкостях деформації та видах напруженого стану [1-3, 6,7].

Для визначення параметрів моделі деформування матеріалу Джонсона-Кука для високоміцної сталі Armox 500T проведено випробування зразків різних типів на розтяг, стиск; розроблено спеціальне устаткування для статичного та динамічного продавлювання тонколистових зразків в широкому діапазоні швидкостей деформації.

Експериментальні досліджування проводились для високоміцної сталі Armox 500T з тонколистового прокату товщиною 3 мм. Для визначення параметрів A, B та n було проведено випробування на розтяг трьох типів плоских зразків (без концентратора та з концентратором радіуса 2 мм та 4 мм) та чисельне моделювання процесу їх деформування. Випробування на одновісний розтяг проводились на сервогідравлічній машині Instron 8802. В розрахунковій моделі завдяки симетрії розглядалась 1/8 частина зразка. Розмір скінченних елементів (СЕ) в центральній зоні зразка становив 50 мкм. Переміщення всіх вузлів моделі в площинах розрізу обмежувались умовами симетрії. Навантаження здійснювалось в жорсткому режимі за рахунок прикладання переміщення до верхньої грані зразка. На рис. 1 показано порівняння експериментальних та розрахункових діаграм деформування на розтяг трьох типів зразків з використанням таких значень параметрів: A = 1360,73 МПа, B = 474,36 МПа, n = 0,17. Видно, що криві мають задовільну збіжність, зокрема для зразка без концентратора відхилення значення границі міцності та деформації при цьому склало 1,3% та 19% відповідно.

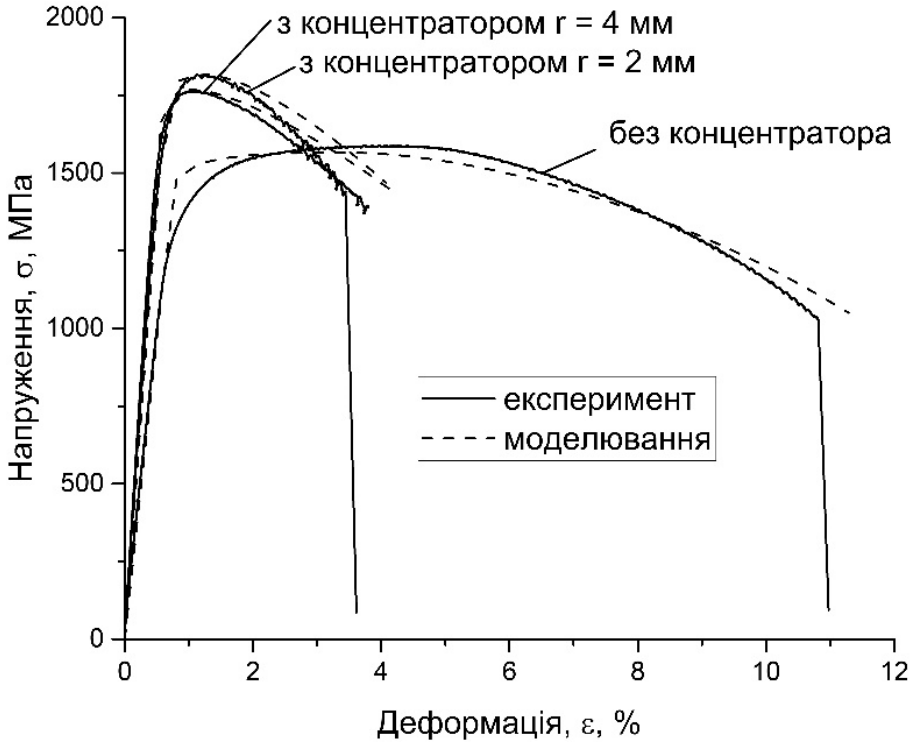


Рис. 1. Порівняння експериментальних та розрахункових діаграм на розтяг.

Для визначення параметрів критерію руйнування (2) проводились випробування на статичне та динамічне продавлювання тонколистових зразків зі сталі Armox 500T товщиною 1 мм із застосуванням різних типів інденторів. Ці випробування дозволяють промоделювати процеси, що виникають при такому типі навантаження, наближені до тих, які виникають в реальних елементах конструкцій та техніки при високошвидкісних та вибухових навантаженнях високоміцних матеріалів. Отримані експериментальні дані було співставлено з результатами чисельних розрахунків, що дозволило оцінити вплив

значень параметрів моделі деформування матеріалу та критерію руйнування Джонсона-Кука на поведінку високоміцної сталі Armox 500T при різних видах навантаження.

Література.

1. Popławski A., Kędzierski P., Morka A. Identification of Armox 500T steel failure properties in the modeling of perforation problems / A.Popławski, P. Kędzierski, A. Morka // Materials & Design. – 2020. – Vol. 190. P. 1 – 28.

2. Kharchenko V. V. Numerical simulation of deformation and fracture processes during static and dynamic perforation of thin plates from high-strength materials / V. V. Kharchenko, E. O. Kondryakov, O. A. Katok, R. V. Kravchuk // Structural Integrity Procedia. – 2022. – Vol. 36. – P. 137 – 144.

3. Kharchenko V. V. Experimental and calculation investigations of deformation and fracture processes of various types of steels during impact shear tests/ V. V. Kharchenko, E. O. Kondryakov, A. V. Kravchuk, A. A. Kotliarenko // Structural Integrity Procedia. – 2022. – Vol. 36. – P. 145 – 152.

4. Johnson G. R. A constitutive model and data for metals subjected to large strains / G. R. Johnson, W. N. Cook // High rates and high temperatures, Proc. of the 7th Intern. symp. on ballistics, Hague, (Netherlands), 19–21 Apr. 1983. Hague: Roy. Inst. of Engrs in the Netherlands. – 1983. P. 541 – 547.

5. Johnson G. R. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures / G. R. Johnson, W. H. Cook // Eng. Fract. Mech.. – 1985. – Vol. 21. № 1. – P. 31 – 48.

6. Choudhary Sh. Ballistic impact behaviour of newly developed armour grade steel: An experimental and numerical study / Sh. Choudhary, Singh P. K., S. Khare, K. Kumar, P. Mahajan, R. K. Verma // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – Vol. 140. – 103557.

7. Jia W. Study on Intrinsic Influence Law of Specimen Size and Loading Speed on Charpy Impact Test / W. Jia, A. Pi, Z. Zhao, S. Wang, C. Wei, Z. Jie, F. Huang // Materials (Basel). – 2022. – Vol. 15(11). – 3855.

UDC 539.3
Yu. Lapusta[1], Dr., Prof., F. Chapelle[1], Dr., Assoc. Prof., A. Sheveleva[2], Dr., Prof., V. Loboda[2], Dr., Prof.
[1]Université Clermont Auvergne, CNRS, Clermont Auvergne INP, Institut Pascal, France
[2]Oles Honchar Dnipro National University, Gagarin Av., 72, Dnipro 49010, Ukraine

ANALYSIS OF ELECTRICALLY PERMEABLE CRACKS ON THE INTERFACE BETWEEN TWO ONE-DIMENSIONAL PIEZOELECTRIC QUASICRYSTALS

Abstract. A set of finite number collinear cracks along the interface of two 1D piezoelectric hexagonal quasicrystals is considered. The cracks can have arbitrary lengths and distances between their tips. The problem of linear relationship is formulated and solved in an analytical form. The analytical formula for the ERR have been obtained. The variations of the phonon and phason crack faces displacement jumps, stresses along the interface and the ERR are presented in graph and table forms.

Consider the plane problem in $x_1 - x_3$ plane for a set of n electrically permeable cracks $a_1 \le x_1 \le b_1$, $a_2 \le x_1 \le b_2$, …, $a_n \le x_1 \le b_n$ in the interface between two semi-infinite 1D piezoelectric hexagonal quasi-crystalline spaces with point group 6mm. The plane $(x_1, 0, x_2)$ is periodic and x_3-axis is identical to the quasi-periodic direction. It is assumed that the cracks are electrically permeable, and uniformly distributed phonon $(\sigma^\infty, \tau^\infty)$ and phason H^∞ stresses are prescribed at infinity. The conditions along the material interface can be written in the following form

$$\begin{aligned} &\sigma_{13}^{(m)} = 0,\ \sigma_{33}^{(m)} = 0,\ H_{33}^{(m)} = 0,\ \langle \varphi \rangle = 0,\ \langle D_3 \rangle = 0 \text{ for } x_1 \in L_I, \\ &\langle \sigma_{13} \rangle = 0,\ \langle \sigma_{33} \rangle = 0,\ \langle H_{33} \rangle = 0,\ \langle u_1 \rangle = 0,\ \langle u_3 \rangle = 0, \\ &\langle W_3 \rangle = 0,\ \langle \varphi \rangle = 0,\ \langle D_3 \rangle = 0 \text{ for } x_1 \in L_{II}, \end{aligned} \tag{1}$$

where $L_I = \bigcup_{k=1}^{n} (a_k, b_k)$, $L_{II} = (-\infty, \infty) \setminus L_I$, $m = 1, 2$; the upper index (1) corresponds to the upper material and (2) is related to the lower one; the designation $\langle f \rangle$ means the jump of the function f through the material interface $x_3 = 0$.

The following presentations were obtained in paper [1]

$$\sigma_{33}^{(1)}(x_1, 0) + m_{j5} H_{33}^{(1)}(x_1, 0) + i m_{j1} \sigma_{13}^{(1)}(x_1, 0) = \Phi_j^+(x_1) + \lambda_j \Phi_j^-(x_1), \tag{2}$$

$$n_{j1} \langle u_1'(x_1) \rangle + i n_{j3} \langle u_3'(x_1) \rangle + i n_{j5} \langle W_3'(x_1) \rangle = \Phi_j^+(x_1) - \Phi_j^-(x_1), \tag{3}$$

where $j = 1, 3, 5$; $\Phi_j(z)$ are the functions analytic in the whole complex plane except the cracks region; (…)' means the differentiation on x_1; m_{ji}, n_{ji}, λ_j are the constants defined by materials properties.

Satisfying the interface conditions (1) by using Eqs. (2), one arrives at the following problem of linear relationship:

$$\Phi_j^+(x_1) + \lambda_j \Phi_j^-(x_1) = 0 \text{ for } x_1 \in L_I \tag{4}$$

The solution of Eq. (4) can be presented in the form

$$\Phi_j(z) = F_j(z) \Psi_{nj}(z), \tag{5}$$

where

$$F_j(z)=\prod_{k=1}^{n}(z-a_k)^{-\frac{1}{2}+i\kappa_j}\cdot(z-b_k)^{-\frac{1}{2}-i\kappa_j},\ \kappa_j=\frac{\ln\lambda_j}{2\pi}, \tag{6}$$

$$\Psi_{nj}(z)=c_{0j}z^n+c_{1j}z^{n-1}+\ldots+c_{nj}. \tag{7}$$

c_{kj} $(k=0,1,...n)$ are arbitrary complex coefficients, which are found from the conditions at infinity.

$$\Phi_j(z)|_{z\to\infty}=\sigma_j^*-i\tau_j^*, \tag{8}$$

the single-valued ness of the displacements and zero net charge for each crack.

All required quantities at the interface are found on the base of the relations (2), (3) and the solution (5).

According to the crack closure integral the energy release rate (ERR) at a crack tip b_k can be defined in the form:

$$G_{b_k}=\lim_{\Delta l\to 0}\frac{1}{2\Delta l}\left\{\int_{b_k}^{b_k+\Delta l}\left[\sigma_{33}^{(1)}(x_1,0)\left\langle u_3(x_1-\Delta l)\right\rangle+\sigma_{13}^{(1)}(x_1,0)\left\langle u_1(x_1-\Delta l)\right\rangle+\right.\right.$$

$$\left.\left.H_{33}^{(1)}(x_1,0)\left\langle W_3(x_1-\Delta l)\right\rangle\right]dx_1\right\}.$$

Substituting the phonon and phason asymptotic expressions for the required quantities into the last formula and performing the integration, we arrive to the following expression for the ERR:

$$G_{b_k}=\frac{\pi\left(1+4\kappa_1^2\right)}{8\cosh(\pi\kappa_1)}\eta_1\eta_{2k}+\frac{\pi}{4}\eta_3\bar{J}_{5k}Q_{5k}, \tag{9}$$

where all coefficients in this formula are expressed via elementary functions.

For the certain quasicristalline bimaterial , the set of three cracks of length $20\ mm$ is considered. The positions of two cracks with $a_1=-200\ mm$ and $a_2=-10\ mm$ are fixed and the right crack (a_3,b_3) changes its location. The values of ERR of the middle crack, obtained for $\sigma^\infty=10^7\ Pa$, $\tau^\infty=H_{33}^\infty=0$ are presented in Table 1.

Table 1. The ERRs of the middle crack for the fixed position of the left crack and variable position of the right one

Locations of the left crack tip a_3, mm	180	80	40	20	12	10.2
ERR G_{b_2}, N/m	23.512	23.778	24.734	29.012	52.142	211.59
ERR G_{a_2}, N/m	23.512	23.717	24.296	25.936	29.521	34.094

It is clearly seen from these results that the position of right crack influences the ERRs of both crack tips of the middle crack, but the growth of the ERR for the neighboring tip b_2 is much more intensive than for the remote crack tip a_2.

The variation of the phonon and phason crack openings for the middle crack and approaching to the right crack are shown in Figures 1 and 2, respectively. The same position of the left and right cracks and loading as for Table 1 are considered. The solid lines correspond to $a_3=40mm$, dashed – to $a_3=20mm$, dash-dotted – to $a_3=12mm$ and dotted– to $a_3=10.2mm$.

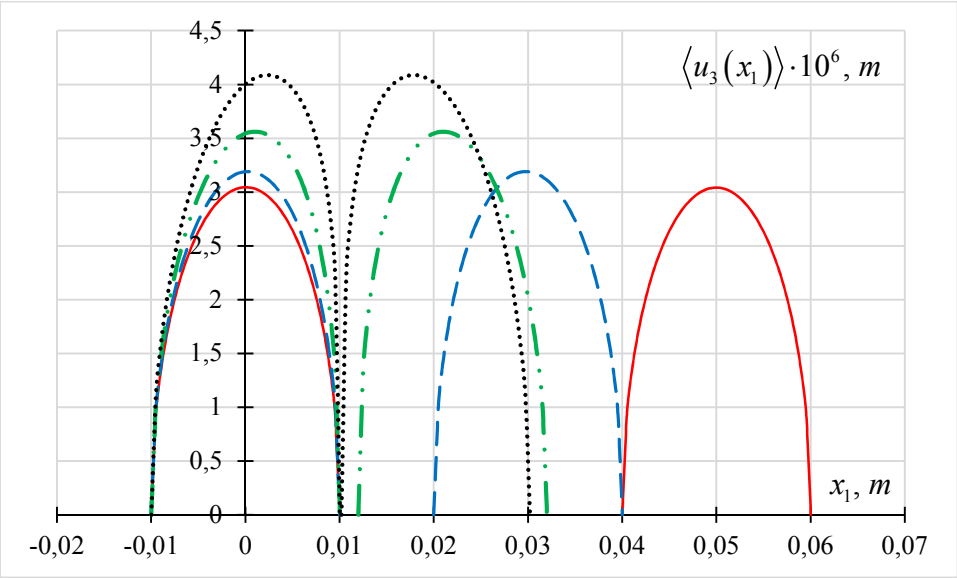


Fig. 1 The influence of the cracks convergence on their phonon opening

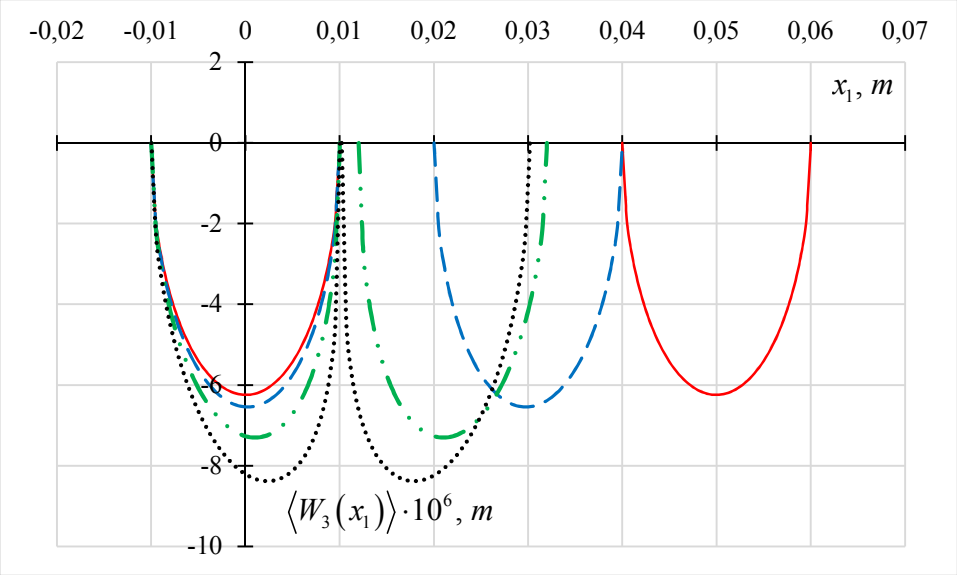


Fig. 2 The influence of the cracks convergence on their phason opening

References

1. Loboda V, Komarov O, Bilyi D, Lapusta Y. An analytical approach to the analysis of an electrically permeable interface crack in a 1D piezoelectric quasicrystal. Acta Mech. 2020; 231: 3419–3433.

УДК 620.178.162:621.893

В. Косарчук[1], д.т.н., проф.; М. Чаусов[2], д.т.н., проф.; П. Марущак[3], д.т.н., проф.; А. Пилипенко[2], к.т.н, доц.; В. Твердомед[1], к.т.н, доц.

[1]Державний університет інфраструктури та технологій, Україна
[2]Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна
[3]Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

МАСТИЛЬНІ КОМПОЗИЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ ПАР ТЕРТЯ

V. Kosarchuk[1], D.Sc., Prof.; **M. Chausov[2]**, D.Sc., Prof.; **P. Maruschak[3],** D.Sc., Prof.; **A. Pylypenko[2]**, PhD, Assoc. Prof.; **V. Tverdomed[1]**, PhD, Assoc. Prof.,
[1]State University of Infrastructure and Technologies, Ukraine
[2]National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine
[3] Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

LUBRICANT COMPOSITIONS FOR INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF FRICTION STEEL PAIRS

Abstract. The kinetics of wear, change in hardness and accumulation of damage in the surface layers of samples of K74 rail steel and structural steel 20 were determined and certain correlations between these parameters was establish. A physical explanation of the effects of increasing the wear resistance of steel friction pairs due to the use of lubricating compositions with additives of metal nano powders was offered.

Наведено результати досліджень впливу добавок різного хімічного складу до промислового мастила Bio Rail на трибологічні характеристики двох марок середнє вуглецевих сталей. У якості добавок використовували нанопорошки міді, магнієвого сплаву, вуглецю та сталей, що досліджувались. Для виготовлення мастильних композицій використовували нанопорошки, які були виготовлені методом електроерозійного диспергування гранул матеріалу присадки у 40% спиртовому середовищі. Гранули із матеріалів, що досліджувались, виготовляли із відходів механічної обробки (стружки) при виготовленні зразків. Отримані порошки металів мали дисперсність 100 … 300 нм. Порошок вуглецю мав дисперсність 6 … 40 мкм. Вміст добавок в усіх варіантах мастильних композицій складав приблизно 10 мас. %.

Зразки для випробувань на тертя і зношування в умовах ковзання виготовляли із рейкової сталі марки К74 та конструкційної сталі 20. Для проведення експериментів використовували серійну випробувальну установку 2070 СМТ-1 із додатковим обладнанням для автоматичної фіксації моменту і сили тертя, температури та зношування зразків. Диски контртіла вирізали із бандажів знятих з експлуатації локомотивних коліс. Експерименти проводили за наступних умов: частота обертання – 300 об/хв, сила нормального тиску – 555 Н, час безперервної роботи – 3 год. За прийнятих розмірів зразків й контртіла рівень контактних напружень дорівнював 2,83 МПа.

Для визначення основних механічних характеристик (модуля пружності, межі текучості та умовної межі міцності) сталей та матеріалів, що використовувались для виготовлення нанопорошків (сталі марок К74, 20, міді марки М2 та магнієвого сплаву МА2) використовували пласкі зразки товщиною 3 мм. Для проведення експериментів на розтяг використовували сервогидравлічну випробувальну установку Bi-00-201 виробництва фірми BiSS.

В процесі тертя шорстких поверхонь твердість поверхневих шарів деталей змінюється внаслідок локального пластичного деформування і це явище безпосередньо пов'язано із інтенсивністю зношування, однак стійких кореляцій цих процесів поки що не виявлено. З цією метою перед початком експериментів і після їх закінчення визначали мікротвердість робочої частини зразків. Вимірювання твердості (за Роквеллом, шкала HRC) здійснювали портативним твердоміром. У вихідному стані відношення твердості матеріалу контртіла (HRC=35,3) до середньої твердості зразків рейкової сталі складає 1,1, а для сталі 20 – 1,14. Рівень пошкодження мікроструктури матеріалів в зоні контакту і його вплив на трибологічні характеристики сталевих пар тертя оцінювали за методикою ДСТУ 7793:2015. Вона забезпечила можливість визначення рівеня пошкодженості матеріалу за параметрами розсіювання значень твердості.

Сумісний аналіз даних щодо величини зношування, зміни коефіцієнту тертя, твердості поверхні зразків і рівня її пошкодження дозволив зробити певні висновки про доцільність використання мастильних композицій із добавкпми металевих нанопорошків для практичного використання.

Для рейкової сталі К74 найкращі результати щодо підвищення зносостійкості і досягнення оптимального рівня коефіцієнту тертя досягаються при використанні у якості добавки до мастила Bio Rail нанопорошку цієї ж сталі. Після трьох годин напрацювання, що відповідає довжині шляху тертя у 8,5 км, величина зношування зразка не перевищила 0,0015 мм, а коефіцієнт тертя уже після першої години напрацювання досяг оптимальної для пари колесо-рейка величини ~0,25 і у подальшому майже не змінювався. При цьому твердість поверхні зразка збільшилась на 14,7%.

Для конструкційної сталі 20 найменші показники зношування зафіксовані для добавок наноматеріалів самої сталі 20 та магнієвого сплаву МА2, причому в останньому випадку коефіцієнт тертя був найменшим. Добавки вуглецю у вигляді гранул графіту марки ГК1 несуттєво вплинули на трибологічні показники. Найгірші результати щодо величини зношування виявились для мастильної композиції із порошком міді марки М2, що вочевидь пов'язано з досить великими розмірами частинок порошку.

Загалом, за результатами експериментів можна зробити висновок, що використання мастильних композицій із промислових мастил із добавками наноматеріалів, виготовлених із матеріалу тієї складової пари тертя, що має меншу твердість (у нашому випадку це сталі К74 і 20), забезпечує суттєве підвищення зносостійкості та прийнятне значення коефіцієнту тертя. Це підтверджує можливість використання таких мастильних композицій для підвищення зносостійкості деяких елементів залізничної колії (рейок, гостряків стрілочних переводів, тощо). Також перспективним є використання схожих мастильних композицій для відкритих вузлів тертя сільськогосподарської техніки.

Щодо практичного використання у якості добавок до промислових мастил нанопорошків деяких інших металів або сплавів (наприклад міді, латуні, бронзи), то слід зважати на можливу значну різницю електрохімічних потенціалів матеріалів деталі і добавки. Для відкритих сталевих пар тертя (наприклад колесо – рейка) використання таких добавок є неприйнятним, оскільки на відкритому повітрі приведе до корозії контактуючих деталей. Для закритих сталевих пар тертя, які працюють у мастильному середовищі, матеріалами для виготовлення нанопорошків - присадок можуть бути різні метали і сплави, а також деякі неметалеві матеріали. Проте ефективність таких присадок слід визначати експериментально в умовах, максимально наближених до умов експлуатації деталей.

УДК 539.4
Г. Цибаньов, д. т. н.
Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка Національної академії наук України

ЗАРОДЖЕННЯ ТРІЩИНИ І ЗМІНА ГРАНИЦІ ВИТРИВАЛОСТІ У ПРОЦЕСІ ВТОМИ СТАЛЕЙ

G. Tsyban'ov, Dr.
G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine, Ukraine

CRACK INITIATION AND ENDURANCE LIMIT CHANGE IN THE PROCESS OF FATIGUE OF STEELS

Abstract. The previously proposed dependence for the calculated construction of the French line has been adjusted based on the new results. For this purpose a new model of the kinetics of the endurance limit in the process of cyclic loading of steels was developed and used. The obtained results show a satisfactory description of the experiments taken from literary sources. The possibility of using the performed development to determine fatigue damage is shown.

Вступ. Виходячи з інформації в літературних джерелах, моделі підсумовування втомних пошкоджень в матеріалах, запропоновані до теперішнього часу, не можуть урахувати всі чинники, які впливають на довговічність за різних спектрів навантаження. Це пов'язано з використанням в існуючих моделях передумови про єдиний механізм пошкодження матеріалів. В той же час процес утомного пошкодження кожного матеріалу складається зі стадій накопичення пошкоджень, кожна з яких може відбуватися за різними закономірностями. Одним з підходів для описання стадійності втомного пошкодження є описання кінетики зміни однієї з характеристик властивостей матеріалу (пластичність, границя текучості, твердість, границя витривалості, деформаційний параметр границі витривалості) за умов дії змінних амплітуд навантаження. Такий підхід обрано в цьому дослідженні. На відміну від відомих описань зниження границі витривалості за дії змінних амплітуд напружень від його стандартно визначеної величини до критичного значення, припускається наявність більш високого значення цього параметру у непошкодженого матеріалу. Описується кінетика його постійного зниження при циклічному навантаженні за різними залежностями на двох стадіях: від початку навантаження до лінії Френча (ЛФ) [1] і від лінії Френча до руйнування. Для цього початково розглянуто метод побудови ЛФ, який відрізняється від запропонованого в [1].

Розрахунково-експериментальна побудова ЛФ як стадії зародження тріщини втоми. Напрацювання до відмови відповідальних елементів багатьох конструкцій залежить від достовірного прогнозування стадій зародження і росту коротких тріщин втоми, так як ці дві стадії сумарно можуть становити до 90 % від їх повної довговічності. Довговічність до зародження тріщини втоми може бути визначена за різними критеріями. Для цього використовують макроскопічні феноменологічні критерії у вигляді залежності втомної довговічності від напружень, деформацій, енергії циклічного деформування. У зв'язку з відсутністю у цих критеріях параметру розмірності для їх використання необхідно мати методики виявлення і виміру поверхневих тріщин малого розміру. Крім того, що в експериментах на гладких зразках, які зазвичай використовуються як вихідна інформація про втомні властивості матеріалу у вигляді кривих втоми, виникають утруднення з визначенням місця зародження тріщини, її розмір при зародженні визначається методичними можливостями дослідника. У зв'язку з цим наявні у літературних джерелах дані свідчать про широкий діапазон розміру тріщини, прийнятий за момент її зародження, який часто включає як стадію зародження, так і росту короткої тріщини.

Так як осередками зародження тріщин є певні особливості мікроструктури матеріалу такі, як границі зерен полікристала чи пластинчатих структур, неметалеві включення, вторинні фази, розмір тріщини при її зародженні (і відповідна кількість циклів навантаження) має визначатися цим чинником. Для багатьох конструкційних матеріалів це може бути розмір зерна [2, 3]. Допускаючи цю умову та експериментальний метод побудови ЛФ [1], можна прийняти, що ЛФ являє собою криву втоми за критерієм зародження тріщини втоми з розміром мікроструктурного елемента матеріалу.

Для розрахункової побудови ЛФ за даними для кривої втоми у [4] запропонована наступна залежність:

$$\boldsymbol{N_{inc}} = \left(\frac{\sigma_r - \sigma_d}{\sigma_a - \sigma_d}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot \boldsymbol{N}, \qquad (1)$$

де $\boldsymbol{N_{inc}}$ – розрахункова кількість циклів навантаження до ЛФ (прийнята як довговічність до зародження тріщини); $\boldsymbol{\sigma_r}$ – границя витривалості; $\boldsymbol{\sigma_d}$ - пошкоджуюче напруження (прийнято $\boldsymbol{\sigma_d = 0,707\sigma_r}$ [4]); $\boldsymbol{\sigma_a}$- амплітуда напруження; k – показник степеня модифікованої кривої втоми $(\boldsymbol{\sigma_a - \sigma_d})\boldsymbol{N^k} = \mathrm{C}$, C – постійна; $\boldsymbol{N}$ – кількість циклів навантаження до повного руйнування зразка.

Як витікає з (1), за умови $\boldsymbol{\sigma_a = \sigma_r}$ маємо $\boldsymbol{N_{inc} = N_0}$, де $\boldsymbol{N_0}$ – абсциса зламу кривої втоми (на границі витривалості). Перевірка застосовності залежності (1) для описання експериментальних даних була виконана з використанням даних з прискореної побудови ЛФ [5], де ця умова виконується. Нові результати експериментальної побудови ЛФ (не прискореної), наведені в роботах [6,7] свідчать про те, що лінійна екстраполяція довговічності на рівень $\boldsymbol{\sigma_a = \sigma_r}$ даних для побудови ЛФ суттєво менша у порівнянні з $\boldsymbol{N_0}$. У зв'язку з цим виконано корегування залежності (1), яке грунтується на виявленій закономірності відхилень розрахункових і експериментальних $(\boldsymbol{N_{ine}})$ довговічностей до ЛФ. Для цього запропонована модель кінетики зміни границі витривалості у процессі циклічного навантаження (рис.), в якій використано припущення Холдена (Holden J.), Фроста (Frost E.), Іванової В.С. [8] про наявність вихідної границі витривалості зразка перед його циклічним навантаженням $\boldsymbol{\sigma_{r0}}$, яка перевищує стандартно визначену $\boldsymbol{\sigma_r}$ і визначається як напруження переходу від механізму пошкодження багатоциклової втоми до механізму пошкодження малоциклової втоми.

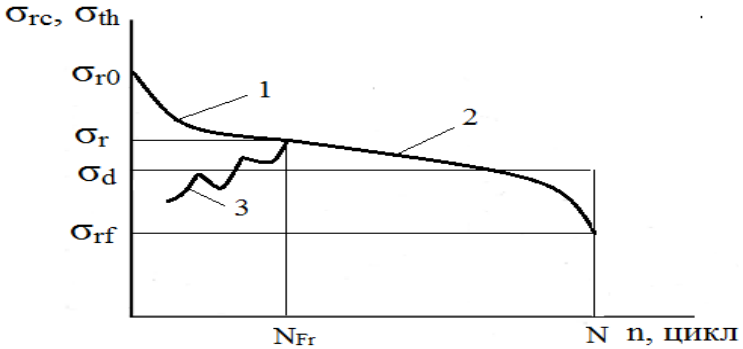


Рис. Кінетика поточної границі витривалості $\boldsymbol{\sigma_{rc}}$ при навантаження $\boldsymbol{\sigma_a > \sigma_r}$: 1, 2 – циклічне напрацювання $(\boldsymbol{n})$ від початку навантаження до ЛФ $(\boldsymbol{N_{Fr}, \sigma_r})$ і від ЛФ до руйнування $(\boldsymbol{N, \sigma_{rf}})$ відповідно; 3 – зміна граничного напруження $\boldsymbol{\sigma_{th}}$ при переході через слабкі мікроструктурні бар'єри [9]; $\boldsymbol{\sigma_{rf}}$ – границя витривалості матеріалу перед руйнуванням за наявності довгої тріщини розміром $\boldsymbol{a_f}$.

Як видно з рисунка, уявна початкова границя витривалості знижується до $\boldsymbol{\sigma_r}$ на ЛФ і далі знижується до $\boldsymbol{\sigma_{rf}}$ при зростанні короткої тріщини. Опис зміни границі витривалості до ЛФ $(\boldsymbol{\sigma_{rc1}})$ і після ЛФ $(\boldsymbol{\sigma_{rc2}})$ виконано за залежностями:

$$\boldsymbol{\sigma_{rc1} = \sigma_{r0} \cdot \left(1 - \frac{b_1 n}{N}\right)^{\frac{1}{k}}}; \qquad (2)$$

$$\boldsymbol{\sigma_{rc2} = \sigma_r \cdot \left(c - \frac{b_2 n}{N}\right)^k}, \quad (3)$$

де $\boldsymbol{\sigma_{r0}}$ визначається як $\boldsymbol{\sigma_a}$ при $\boldsymbol{N = 5 \cdot 10^4}$ цикл [8], постійні $\boldsymbol{b_1, c, b_2}$ розраховуються, виходячи з граничних умов: $\boldsymbol{n}$ =0, $\boldsymbol{n = N_{inc}}$ - для $\boldsymbol{b_1}$ та $\boldsymbol{n = N_{inc}}$, $\boldsymbol{n = N}$ для $\boldsymbol{c, b_2}$.

Коригування довговічностей до ЛФ. Використовуючи запропоновану розрахункову модель та експериментальні дані для побудови ЛФ сталей ČSN 12010 [6], 34CrMo4 (I), 34CrMo4 (II) [7], виконано коригування довговічностей $\boldsymbol{N_{inc}}$ залежності (1) для розрахункового визначення параметрів ЛФ у вигляді:

$$\boldsymbol{(\sigma_a - \sigma_d) N_{inc}^{k_{in}} = C_{inc}}. \quad (4)$$

Для цього розраховано $\boldsymbol{N_{inc}}$ для рівня $\boldsymbol{\sigma_a = \sigma_0}$ і координати точки перетину розрахункової за (1) і експериментальної ЛФ, визначену за емпіричною залежністю, встановленою для сталей. Результати розрахунку для сталі ČSN 12010 наведені у наступній таблиці.

Табл. Порівняння розрахункових і експериментальних довговічностей до ЛФ

$\boldsymbol{\sigma_a}$, МПа	$\boldsymbol{N}$, цикл	$\boldsymbol{N_{ine}}$, цикл	$\boldsymbol{N_{inc}}$, цикл	Похибка, %
353,01	50000	1539	1619	5,2
269,42	559509	70907	78180	10,26
245,3	1626519	385216	433625	12,66

Як видно з результатів розрахунку, запропонований розрахунково-експериментальний метод побудови ЛФ дозволяє одержувати довговічності до ЛФ, які статистично незначно відрізняються від експериментальних. Подібний результат одержано для сталі 34CrMo4. Цей результат разом з запропонованою моделлю зміни границі витривалості у процесі циклічного навантаження дозволяє надалі розглянути метод підсумовування втомних пошкоджень за змінних амплітуд навантаження. Поточне втомне пошкодження *d* визначається зміною відносної границі витривалості від початку навантаження зі змінною амплітудою і до руйнування за наведеними вище залежностями на різних рівнях амплітуди напружень:

$$\boldsymbol{d = \frac{\sigma_{r0} - \sigma_{rc}}{\sigma_{r0} - \sigma_{rf}}}. \quad (5)$$

Як видно з (5), поточне пошкодження відслідковує поточну границю витривалості $\boldsymbol{\sigma_{rc}}$ від $\boldsymbol{\sigma_{r0}}$ ($\boldsymbol{d = 0}$) до її остаточного значення при руйнуванні $\boldsymbol{\sigma_{rf}}$ ($\boldsymbol{d = 1}$).

Література.

1. French H. “Fatigue and hardening of steel”, *Tr. Amer. Soc. Steel Treat*., **21,** 899-946, 1933.

2. Chapetti M.D.“Fatigue propagation threshold of short cracks under constant amplitude loading”, *Intern. J. Fatigue,* **25**, 1319–1326, 2003.

3. He C. Wu, L. Peng, et al. “Effect of microstructure on small fatigue crack initiation and early propagation behavior in Mg-10Gd-3Y-0.3Zr alloy”, *Intern. J. Fat.,* **119**, 311-319, 2019.

4. Цыбанёв Г.В. “Энергетическая трактовка результатов усталостных испытаний и ее использование для определения стадии зарождения трещины”, *Пробл. прочности,* №2, 19-27, 1994.

5. Иванова В.С., Марьяновская Т.С., Терентьев В.Ф. “Ускоренный метод построения линии Френча с применением энергетических критериев усталости”, *Зав. лаборатория*. №2, 225-228, 1966.

6. Klesnil M., Lukaš P., *Fatigue of Metallic Materials*, Academia, Prague, 1981.

7. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. *Усталость металлов*, Наука, Москва, 2015.

8. Иванова В.С., Терентьев В.Ф., *Природа усталости металлов*, Металлургия, Москва, 1975.

9. Miller K.J. “The two thresholds of the fatigue behaviour”, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct*., **16**, No 9, 931–939 (1993).

УДК 539.4
В. Сидяченко, к.т.н., ст.досл., А. Котляренко, к.т.н.
Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України, Україна

ПРОГНОЗУВАННЯ В'ЯЗКОСТІ РУЙНУВАННЯ КОРПУСНИХ РЕАКТОРНИХ СТАЛЕЙ В ОБЛАСТІ КРИХКО-ВЯЗКОГО ПЕРЕХОДУ НА ОСНОВІ ЛОКАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ДВОВІСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

V. Sidyachenko, Ph.D., Senior Researcher, A. Kotliarenko, Ph.D
G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine, Ukraine

PREDICTION OF THE FRACTURE TOUGHNESS OF REACTOR PRESSURE VESSEL STEEL IN THE AREA OF THE BRITTLE-DUCTILE TRANSITION BASED ON LOCAL MODELS AND TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF BIAXIAL LOADING

Abstract. The Master curve for reactor pressure vessel steel 15Cr2NiMoFA-A was experimentally constructed. Fracture toughness estimation using the Rice-Tracey model showed satisfactory agreement with the Master curve. A small-sized cruciform specimen was developed, the effect of biaxial bending on the crack resistance of 15Cr2NiMoFA-A steel was investigated, and a decrease in fracture toughness compared to uniaxial loading was shown.

На ділянці крихко-в'язкого переходу механізм руйнування сколом викликає значний розкид в'язкості руйнування у порівнянні з нижнім шельфом, що спонукає до застосування методів математичної статистики.

На основі великої кількості експериментальних випробувань реакторних сталей було зроблено наступні висновки, які лягли в основу розробки стандарту [1] на Майстер-криву:

- Розкид в'язкості руйнування в перехідній області підлягає характерному статистичному розподілу схожому для всіх феритних сталей
- Форма температурної кривої для всіх феритних сталей на перехідній температурній ділянці має схожий характер і відмінність між ними полягає тільки в позиціюванні на температурній осі.

Оскільки в області крихко–в'язкого переходу початкове підростання тріщини відбувається в'язко, тобто за механізмом зародження, росту та об'єднання пор то постає питання верифікації локальних моделей в'язкого руйнування (Райса-Трейсі) для оцінки статичної тріщиностійкості реакторної корпусної сталі в області крихко-в'язкого переходу.

Крім того, одним з можливих шляхів пошуку резервів міцності при розрахунках на опір крихкому руйнуванню корпусу реактора є врахування впливу реального двовісного навантаження на береги поверхневої постульованої тріщини в стінці корпусу реактора з врахуванням її глибини.

Отже, враховуючи зазначене вище, метою даної роботи є верифікація моделей локального в'язкого руйнування для оцінки величини в'язкості руйнування в області крихко-в'язкого переходу та експериментальне дослідження статичної тріщиностійкості при двовісному згині для корпусної реакторної сталі 15Х2НМФА-А.

За одно температурним методом [1] на стандартних СТ-1 зразках було побудовано Майстер криву та довірчі інтервали для сталі 15Х2НМФА-А з наступною, згідно сертифікату, термообробкою: нормалізація при температурі 890^0…920^0С, відпуск при 650^0…670^0С.

Мікроструктурі дослідження сталі показали значну неоднорідність, що може обумовлювати розкид властивостей в різних зонах вирізки зразків, а волокниста структура призводить до вираженої анізотропії властивостей в різних перерізах заготовки. Після дослідження механічних властивостей сталі в трьох взаємно ортогональних напрямках було прийнято рішення вирізати СТ-1 і спеціальні хрестоподібні зразки для дослідження тріщиностійкості при двовісному згині (рис.1) так, щоб площина тріщини була перпендикулярна напрямку де було отримано максимальні характеристики умовної границі текучості ($\sigma_{0,2}$=462,08 МПа, $\sigma_в$=715,75 МПа). Із загальних закономірностей для цих зразків слід очікувати мінімальні характеристики тріщиностійкості, тобто консервативний результат.

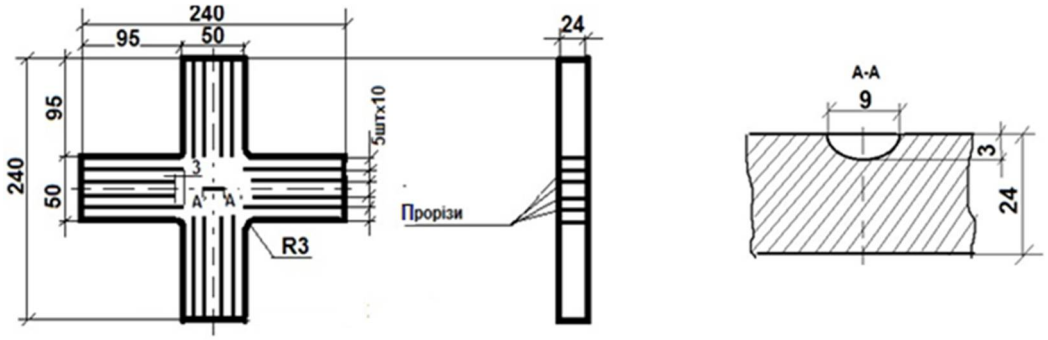


Рис.1. Хрестоподібний зразок із поверхневим напівеліптичним концентратором для випробувань на двовісний згин [2].

У відповідності до моделі Райса-Трейсі [3] критерієм зрушення тріщини є критичний радіус пор $(R/R_0)_c$ оцінка якого здійснювалась попередньо при розтягуванні циліндричних зразків з врахуванням шийкоутворення. При цьому експериментальна діаграма в координатах «навантаження – звуження», отримана при розтягуванні гладких циліндричних зразків порівнюється з розрахунковою (МСЕ) і визначається критичний радіус пори за формулою (1) в момент коли розрахункове звуження зразка буде дорівнювати експериментальному в момент руйнування. З цією метою використовують данні про гідростатичне напруження (σ_m), границю текучості (σ_{ys}) та еквіваленту пластичну деформацію (ε_{eq}^p) в центральному елементі в перерізі виникнення шийки.

Для пост процесорної обробки розрахунків пропонується використовувати формулу Райса-Трейсі в наступному вигляді:

$$\ln\left(R/R_0\right)_{i+1} = \ln\left(R/R_0\right)_i + 0.283 \cdot \Delta\varepsilon_{eq}^{p} \cdot \exp\left(1.5\,\sigma_m/\sigma_{ys}\right), \qquad (1)$$

де $\left(R/R_0\right)_{i+1}$ - швидкість росту пори на кроці $i+1$, $\left(R/R_0\right)_i$ - швидкість росту пори на кроці i, $\left(R/R_0\right)_0$=1 .

Раніше [4] було показано, що результати прогнозування за залежністю (1) суттєво залежать від розміру скінчених елементів.

В роботі [4] запропонована модифікація моделі Райса – Трейсі:

$$\Psi = \int_{A(r=2J/\sigma_y)} \left\{ \int 0.283 exp\left(3\sigma_m/2\sigma_{eq}\right) d\varepsilon_{eq}^{p} \right\} dA \quad , \qquad (2)$$

яка полягає осередненні відносного радіусу пор в зоні процесу, розмір якої визначається як $2J/\sigma_y$. Це дозволило позбутися залежності параметра $(R/R_0)_i$ від розміру скінченого елементу. В даній роботі було здійснено (МСЕ) 3D моделювання в'язкого зрушення тріщини в СТ-1 зразку за формулою (2). При розрахунку статичної тріщиностійкості *Jc* моделювали зростання параметра R/R_0 перед вершиною тріщини в СТ-1 зразку при навантаженні його по лінії дії сили переміщенням по аналогії з експериментом. При цьому на кожному кроці навантаження розраховувався *J*-інтеграл і

розмір зони процесу біля вершини тріщини що дорівнював $2J/\sigma_{0,2}$. Параметр R/R_0 осереднювався по розміру зони процесу за формулою (2), що нівелює вплив розміру елементів на величину параметру. При перерахунку отриманого при (МСЕ) моделюванні J_c в K_{Jc} за формулою: $K_{jc} = \sqrt{J_c E} = \sqrt{40653 \times 2 \times 10^{11}} = 90$ МПа м$^{1/2}$, можна помітити з рис.2 (Майстер кривої) задовільний збіг з експериментальними даними при температурі 25^0C

Дані моделювання в'язкості руйнування за формулою (2) і результати експериментів по впливу двовісного згину на тріщиностійкість корпусної сталі 15Х2НМФА-А перераховані за залежністю роботи [1]:

$$K_{Jc} = K_{min} + \left[K_{Jc(0)} - K_{min}\right](B_0/B_x)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

на стандартні СТ-1 зразки показані на рис.2 у порівнянні з експериментальними результатами по в'язкості руйнування отриманими при випробуваннях на триточковий згин зразків з короткими (a/W=0.1…0.2) тріщинами [2].

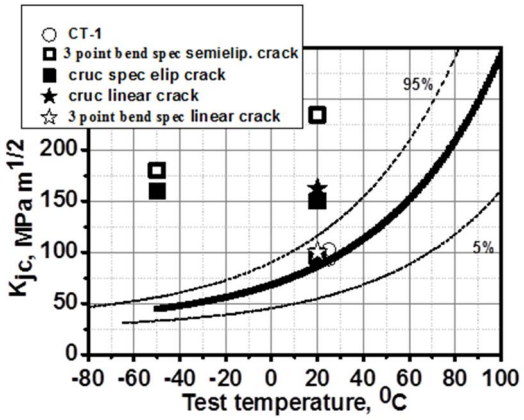


Рис.2. Майстер крива для сталі 15Х2НМФА-А, побудована на СТ-1 зразках, результати тестових експериментів на в'язкість руйнування на триточковий згин і на хрестоподібних зразках при двовісному згині перераховані за стандартом [1] на СТ-1 зразки [2].

Проведений аналіз показав, що данні по тріщиностійкості, отримані в роботі [2] на зразках з «короткими» (a/W=0.1…0.2) лінійними і напівеліптичними тріщинами виходять за верхню межу довірчого інтервалу Майстер кривої, а двовісне навантаження хрестоподібних зразків, з врахуванням моменту зрушення тріщини знижує тріщиностійкість у порівнянні з одновісним навантаженням зразків з короткою тріщиною, що в цілому підтверджує тенденції описані в літературних джерелах. Задовільний збіг прогнозування за моделлю Райса-Трейсі та експерименту свідчить про можливість застосування останньої для оцінки в'язкості руйнування реакторних сталей в умовах обмеженої кількості матеріалу.

Література.

1. ASTM E 1921–17a. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, To, for Ferritic Steels in the Transition Range.

2. Покровський В.В., Сидяченко В.Г., Єжов В.М. До розробки експериментальної методики оцінки впливу двовісного навантаження на характеристики статичної тріщиностійкості корпусних реакторних сталей. *Пробл. Міцності*. 2022. №2. С.28-39.

3. Rice J.R., Tracey D.M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields. *J. of the Mech. and Phys. of Solids.* 1969. Vol.17. P.201-217.

4. Dutta B.K., Kushwaha H.S. A modified damage potential to predict crack initiation: theory and experimental verification. *Eng. Fract. Mech*. Vol.71. P.263–275.

УДК 621.77; 621.314

Я. Ковальчук, к.т.н., доц., Н. Шингера, к.т.н., доц., Я. Швед, асп.
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ЛОКАЛІЗАЦІЯ НАПРУЖЕНЬ І ВТОМНЕ ПОШКОДЖЕННЯ ЗВАРНОЇ ФЕРМИ

Y. Kovalchuk, Ph.D., assoc. prof., N. Shynhera, Ph.D., assoc. prof., Y. Shwed
Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University

LOCALIZATION OF STRESSES AND FATIGUE DAMAGE OF A WELDED TRUSS

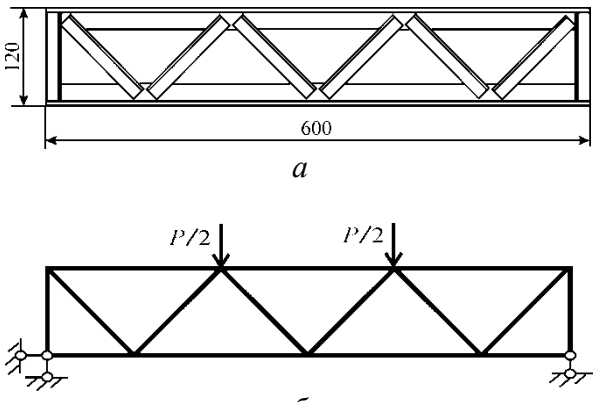
Abstract. An experimental study of the physical model of a rectangular welded truss under the action of a cyclic load on the structure was performed. It was found that under such conditions, the maximum stresses are formed in the upper part of the lower chord of the truss at the point where the brace of the K-shaped node is attached to it. As a result, a fatigue crack appears there, which spreads along the edge of the weld until the structure is completely destroyed.

Циклічні навантаження сприймають зварні фермові конструкції підіймальних кранів, опор ліній електропередач, мостів. Їх надійність і довговічність при дії експлуатаційних навантажень залежить від параметрів напружено-деформівного стану (НДС), які формуються в елементах ферм і місцях їх з'єднання й зумовлюють зародження і поширення втомних тріщин аж до руйнування конструкції. Комплексний вплив стохастичних чинників на параметри НДС суттєво знижує вірогідність результатів, отриманих за класичними розрахунковими методиками та із використанням комп'ютерних моделюючих експериментів.

Метою роботи є виявлення місця зародження втомної тріщини й інтенсивності її поширення впродовж циклічного навантажування прямокутної зварної ферми.

Для досягнення поставленої мети використано методику напівнатурного експериментального дослідження.

Дослідження виконано на фізичній моделі зварної підкроквяної ферми 600 мм х 120 мм (рис. 1,а) за схемою базування і навантажування, що відповідає експлуатаційним умовам для ферм такого типу (рис. 1,б).



а

б

в

Рис. 1. Зварна ферма
а – конструктивна схема; *б* – схема базування і навантажування; *в* – на випробувальному комплексі СТМ-100

Такий підхід дав можливість отримати якісну картину пошкодження і руйнування прямокутної зварної ферми при зменшенні витрат на виготовлення повномасштабних зразків і можливістю застосування існуючого випробувального комплексу СТМ-100 (рис.1,в).

Досліджено 5 зразків, виготовлених з вальцьованого кутникового профілю 20х20х4 мм зі сталі ВСт3пс з однієї поставочної партії. Вузлові з'єднання виконано ручним дуговим зварюванням електродами АНО-21 діаметром 3 мм зі струмами 150 А при горизонтальному розміщенні зразків одним зварювальником .

При напівнатурному експерименті створювали силові циклічні впливи з середнім навантаження циклу P_m=10 кН, коефіцієнтом асиметрії навантаження $R= P_{min}/P_{max}$=0,3 і частоті циклу навантажуванняω =30 Гц. Такі навантаження не виходили за межі пружних деформацій конструкції.

Впродовж експериментів виконувався постійний візуальний контроль за станом досліджуваних зразків для виявлення моменту появи початкової втомної тріщини і місця її локалізації. Після фіксування початкової тріщини визначали приріст її довжини впродовж експерименту (рис. 2,а,б) аж до руйнування конструкції (рис. 2,в).

а *б* *в*

Рис. 2. Втомне пошкодження зварної ферми: *а* – локальне зі сторони зварного шва; *б* – локальне зі сторони протилежної до зварного шва; *в* – загальне руйнування зварної ферми внаслідок втомного пошкодження

Для кожного зразка визначено місце локалізації початкової тріщини та кількість циклів навантажування до появи пошкоджень, які можна виявити візуально N_1. Визначено швидкість росту втомної тріщини на різних етапах її поширення та кількість циклів навантажування зразків з тріщиною до втрати ними тримкості.

За результатами роботи отримано закономірності формування місць локалізації напружень в прямокутній зварній фермі та втомного пошкодження в околі зварних швів у вузлах ферми. Виявлено, що максимальні напруження формуються у верхній частині нижнього пояса ферми в місці приєднання до нього розкоса К-подібного вузла. Внаслідок цього там зароджується втомна тріщина, яка поширюється вздовж краю зварного шва аж до повного руйнування конструкції.

Отримані результати доцільно використати при визначенні залишкового ресурсу зварних конструкції, які експлуатуються при циклічних навантаженнях для попередження їх аварійного руйнування.

Література.

1. Пат. №40196 Україна, МПК G01N 3/00. Пристрій для базування зварних ферм при випробуваннях на статичну та циклічну міцність / Шингера Н. Я., Ковальчук Я. О.; заявник і патентовласник Тернопіль. держ. техніч. ун-т. – №40196 ; заявл.13.11.08 ; опубл. 25.03.09, Бюл. №6.

УДК 669.296:621.785.062
В. Труш, к.т.н., старш. досл., І. Погрелюк, д.т.н., проф., О. Лук'яненко, к.т.н., Т. Кравчишин к.т.н.
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ Zr-1%Nb ДИФУЗІЙНИМ НАСИЧЕННЯМ КИСНЕМ

V. Trush, Ph.D, senior researcher, I. Pohrelyuk, Dr., Prof., A. Luk'yanenko, Ph.D, T. Kravchyshyn Ph.D.
Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Ukraine

INCREASING THE DURABILITY OF Zr-1%Nb BY OXYGEN DIFFUSION SATURATION

Abstract. During the operation of fuel element claddings, the tubes are subject to static loads. Therefore, increasing the durability of such tubes under static load is important. The paper shows that diffusion treatment in an oxygen-containing gaseous medium provides an increase in the breaking stresses of rings cut from zirconium tubes of the Zr-1%Nb alloy. It was found that as a result of diffuse treatment, a modified surface layer enriched with oxygen is formed. The test results correlated with fractographic studies.

До конструкційних матеріалів активної зони ядерних реакторів належать, перш за все, цирконієві сплави. Значний вплив на службові властивості цирконію мають елементи втілення, зокрема, кисень та азот. Хіміко-термічна обробка (ХТО) є одним з ефективних методів керування структурою та характеристиками приповерхневих шарів металів, що поліпшує різні їх фізико-механічні властивості. У даній роботі досліджено вплив дифузійно зміцнених приповерхневих шарів сформованих обробкою у кисневмісному газовому середовищі, на довговічність за тривалого статичного навантаження на базі 100 год на повітрі за кімнатної та підвищеної температури $T = 380°C$ цирконієвих зразків, вирізаних з ТВЕЛьної трубки сплаву Zr-1%Nb (Zr – 98,87 % ваг., Nb – 1,03 % ваг.).

Випробування на сповільнене руйнування проводили на зразках-кільцях шириною 4 мм з V-подібним концентратором глибиною 0,5 мм (рис. 1).

Рис. 1. Принципова схема виготовлення зразків-кілець з концентратором для випробувань на сповільнене руйнування за тривалого статичного навантаження.

Поверхневий модифікований шар формували дифузійним насиченням з контрольованого кисневмісного газового середовища при $\boldsymbol{T} = 580°C$, $\tau = 3$ год. Після насичення визначали відносний приріст твердості поверхні $\boldsymbol{K}$: $\boldsymbol{K}$ = [(HVпов. – HVсерц.)/ HVсерц.]·100%, де HVпов. – мікротвердість поверхні, HVсерц. – мікротвердість серцевини. Мікротвердість визначали за навантаження $P = 0{,}49$Н.

В результаті дифузійного насичення з вище згаданого середовища відносний приріст твердості поверхні цирконієвого сплаву становив, ***K*** = 60%, глибина модифікованого шару 30 мкм.

Відповідно до отриманих результатів досліджень, тривала міцність зразків-кілець з концентратором без ХТО та обробки у кисневмісному газовому середовищі за кімнатної температури та при ***T***=380°С у повітрі мають деякі відмінності (рис. 2). Так руйнівні напруження зразків-кілець після термічної обробки у кисневмісному газовому середовищі упродовж 100 год витримки на 10-15% перевищують напруження, за яких руйнуються зразки-кільця без ХТО.

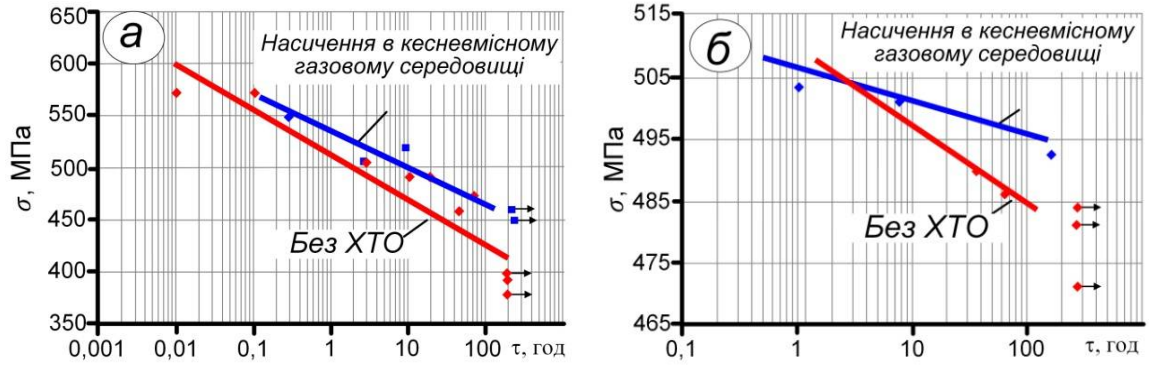


Рис.2. Тривала міцність зразків-кілець зі сплаву Zr-1%Nb за витримки при кімнатній температурі (*а*) та при ***T***=380°С (*б*) у повітрі

Результати випробувань корелюють з фрактографічними дослідженнями (рис. 3): у приповерхневому шарі після окиснення чітко проявляється модифікований шар. Такий шар характеризується подрібненням мікрорельєфу руйнування, з великою кількістю деформаційний гребенів (рис. 3*б*), що свідчить про збільшення енергоємності руйнування.

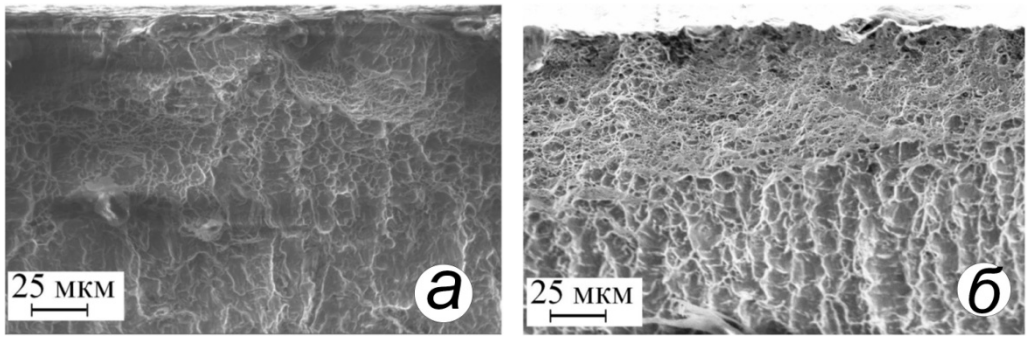


Рис.3. Поверхня зламу зразків-кілець зі сплаву Zr-1%Nb за витримки при кімнатній температурі (*а*) та при ***T***=380°С (*б*) у повітрі

Отже, можна зробити висновок, що модифікований шар, сформований дифузійним насиченням з контрольованого кисневмісного газового середовища, забезпечує на 10-15% підвищення руйнівних напружень зразків-кілець, вирізаних з цирконієвої ТВЕЛьної трубки зі сплаву Zr-1%Nb, за статичного навантаження на базі 100 год на повітрі за кімнатної та підвищеної температури (T = 380°С).

УДК 539.3:620.17
O. Zvirko[1], D.Sc., Prof., I. Dzioba[2], D.Sc., Prof., S. Lipiec[2], Ph.D., O. Tsyrulnyk[1], D.Sc., Sen. Res., O. Venhryniuk, Ph.D. Student
[1] Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine
[2] Kielce University of Technology, Poland

ON THE RELATIONSHIP BETWEEN MICROSTRUCTURE, MECHANICAL PROPERTIES AND HYDROGEN EMBRITTLEMENT OF PIPE STEELS

Abstract. The medium carbon casing pipe steels for oil and gas wells with fine grain bainitic microstructure and with coarse microstructure of ferrite-pearlite were tested. The steel with higher strength and with more dispersed microstructure was less susceptible to hydrogen embrittlement than the another one. The finite element method of load simulation of the specimens with crack was used for assessment of the embrittlement of the studied steels.

Casing pipe steels are operated under simultaneous effect of corrosive and hydrogenating environments and mechanical loading. There is currently tendency to use steels with higher strength but they could be more sensitive to an influence of aggressive environments. Moreover, pipe steels produced by different manufactures and met the requirements to strength and plasticity can have different microstructure [1–3], since there is no requirement for initial microstructure in the standards. The study was aimed to assess the mechanical behaviour and hydrogen embrittlement of two casing pipe steels depending on their microstructure from the point of view their serviceability in oil and gas oilfield.

Two medium carbon steels of casing pipes with fine grain bainitic microstructure (mass. %: 0.35 C; 1.22 Mn; 0.26 Si; 0.135 Cr; 0.01 S; 0.020 P; 0.129 Cu; Fe – balance) and with coarse microstructure of ferrite-pearlite (mass. %: 0.53 C; 0.72 Mn; 0.25 Si; 0.046 Cr; 0.03 S; 0.023 P; 0.024 Cu; Fe – balance) were studied. Basic mechanical properties of the investigated steels, namely, yield strength σ_Y. ultimate strength σ_{UTS}, elongation δ, and reduction in area (RA), and impact strength KCV were determined. Susceptibility of the investigated steels to hydrogen embrittlement was studied by tension of specimens in air after electrolytically hydrogen pre-charging and assessed by changes in plasticity of steels due to pre-charging. To estimate the embrittlement of steels, calculations using finite element method were used, taking into account the true stress-strain relationships [4].

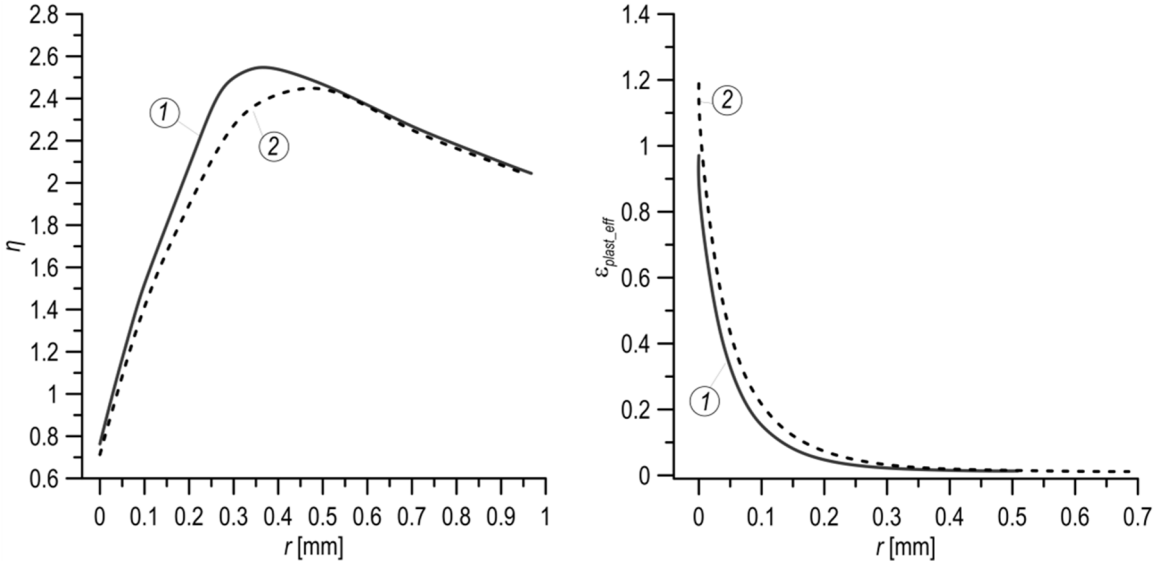
Tensile mechanical properties of the investigated casing pipe steels with different microstructure before and after their hydrogen charging are presented in Table 1. It should be noted that the 0.53 C steel with lower strength and with coarse-grained microstructure was characterized by lower plasticity compared to another steel with the fine grain bainitic microstructure. The impact strength values KCV of the investigated steels also show the remarkable difference between them. The fracture surface for the 0.53 C steel with lower value of brittle fracture resistance was characterised by the signs of cleavage fracture mechanism predominantly.

Table 1. Mechanical properties of casing pipe steels before (in the numerator) та after (in the denominator) their hydrogen charging.

Steel	σ_Y [MPa]	σ_{UTS} [MPa]	δ_H [%]	RA_H [%]	KCV [J/cm^2]
0.35 C	654/652	787/773	25.3/17.2	72.9/61.6	16.2/-
0.53 C	391/383	710/715	19.0/9.6	42.6/24.3	2.2

The 0.53 C steel with lower strength was characterized also by higher susceptibility to hydrogen embrittlement compared with that of the 0.35 C steel with higher strength and higher initial characteristics of plasticity.

The usage of the numerical modelling of specimen with crack allows us to calculate stress and strain distributions in front of the crack tip and to evaluate the crack growth resistance of the material. Finally, it was obtained (Fig. 1) that for the 0.53 C steel with lower strength the distribution of the stress triaxiality factor reaches higher values and the maximum value is closer to the crack tip (Fig. 1a) than that for another one. For the 0.53 C steel the level of effective plastic deformation before the crack tip is lower than that for the higher strength 0.35 C steel (Fig. 1b), which is also a feature of its lower fracture toughness.



a b

Fig. 1. The stress triaxiality factor (a) and the effective plastic strain (b) distributions for 0.53 C steel (*1*) and 0.35 C steel (*2*).

Thus, the presented results of experimental tests and numerical simulations clearly prove higher strength characteristics and also crack development resistance for the steel with fine grain bainitic microstructure compared to that with coarse microstructure of ferrite-pearlite. Usage of casing pipes made of the 0.53 C steel with coarse-grained ferrite/pearlite microstructure in corrosive and hydrogenating environments in oil and gas wells should be limited due to their high susceptibility to hydrogen embrittlement.

References.

1. Stress corrosion cracking behavior of high strength casing steel in working fluids / X. Guo, T. Shi, Z. Zhang, B. Ma // J. Nat. Gas Sci. Eng. – 2016. – 29. – P. 134–140.
2. Microstructure evolution of the semi-macro segregation induced banded structure in high strength oil tubes during quenching and tempering treatments / B. Li, M. Luo, Z. Yang, et al. // Materials. – 2019. – 12. – 3310.
3. Influence of the structural features of steels of casing pipes on their mechanical properties and hydrogen brittleness / O. I. Zvirko, O. T. Tsyrulnyk, I. Dzioba, et al. // Mater. Sci. – 2021. – 56(6). – P. 748–754.
4. Dzioba I., Lipiec S. Fracture mechanisms of S355 steel—experimental research, FEM simulation and SEM observation // Materials. – 2019. – 12. – P. 1–17.

УДК 539.432
О. Герасимчук, д.т.н., с.н.с., О. Кононученко, к.т.н., с.н.с.
Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

МОДЕЛЬ ШВИДКОСТІ РОСТУ КОРОТКОЇ ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ

O. Herasymchuk, Dr., O. Kononuchenko, Ph.D.
G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

SHORT FATIGUE CRACK GROWTH RATE MODEL

Abstract. The proposed model allows to calculate the kinetic curves of short fatigue crack growth rate in structural elements with a blunt notch and to estimate the number of cycles from the moment of initiation of the crack to reach a certain size, using only the characteristics of monotonic strength and microstructure of the initial material.

Вступ. На сьогодні загально прийнято розділяти процес втомного руйнування металевих матеріалів, які знаходяться під дією змінних навантажень, на стадію зародження втомної тріщини і стадію її росту до руйнування. У свою чергу, стадію росту підрозділяють на стадії росту *короткої* та росту *довгої* тріщини, оскільки їхні кінетики росту суттєво відрізняються. Частка довговічності, що припадає на ріст короткої тріщини, може перевищувати ріст довгої тріщини до руйнування, а за наявності концентратора напружень може бути переважаючою у загальній довговічності. Отже, необхідність мати достовірні й доволі прості, з інженерної точки зору, рівняння для швидкості росту коротких тріщин є актуальною для проблеми прогнозування довговічності елементів конструкцій, в яких допускається наявність тріщин певного розміру.

Опис моделі. У даній праці пропонується модель для описання кінетики швидкості росту короткої втомної тріщини від тупого концентратора напружень. За рушійну силу втомної тріщини приймається ефективний розмах КІН ΔK_{eff}, що визначається як різниця між прикладеним розмахом КІН ΔK і розмахом КІН ΔK_R, який характеризує опір матеріалу росту тріщини. Модель дозволяє розрахувати кінетичну діаграму швидкості росту короткої втомної тріщини від концентратора та оцінити втомну довговічність (кількість циклів навантаження N) від моменту ініціювання тріщини $l = 0$ до моменту досягнення нею певного розміру $l = l_t$ за постійного розмаху прикладених номінальних напружень $\Delta\sigma_{nom}$. Рівняння швидкості росту dl/dN такої тріщини пропонується у наступному вигляді:

$$\frac{dl}{dN} = C\left\{\left(\Delta K - \left(\Delta K_{th} - \Delta K_{th,eff}\right)\left(2 - e^{-k_1(l)} - e^{-k_2(l)}\right)\right)^3 - \Delta K_{th,eff}{}^3\right\} \qquad (1)$$

де $C = b/\Delta K_{th,eff}{}^3$, $\Delta K_{th,eff}$ – пороговий ефективний розмах КІН; b – мінімальна швидкість тріщини, яка дорівнює одній міжатомній відстані у напрямку вектора Бюрґерса за цикл і відповідає прикладеному розмаху КІН, що дорівнює $\Delta K_{th,eff}$; ΔK_{th} – порогове значення прикладеного розмаху КІН циклу для довгих тріщин; $k_1(l)$ і $k_2(l)$ – параметри матеріалу, які визначають швидкість розвитку ефекту закриття тріщини (ЗТ) та інших ефектів із ростом тріщини; $k_1(l)$ враховує дію механізму ЗТ, зумовленого шорсткістю поверхонь руйнування, що діє на початковому етапі росту тріщини, а $k_2(l)$ – механізму пластичного деформування поверхонь руйнування та інших ефектів

короткої тріщини. Від точності визначення параметрів $k_1(l)$ і $k_2(l)$ залежить точність визначення кривої опору ΔK_R (від'ємник у квадратних дужках рівняння (1)), яка *залежить від рівня навантаження і його історії*, а відтак і точність розрахунку кінетичної кривої швидкості росту короткої тріщини. Прикладений розмах КІН ΔK для короткої тріщини визначається, використовуючи поправку Ель Гаддада l_D, наступним чином:

$$\Delta K = \Delta\sigma Y\sqrt{\pi(l + l_D)}\,, \tag{2}$$

де $\Delta\sigma$ – прикладений розмах напружень; Y – геометричний фактор (визначається за формулами з довідників); $l_D = (\Delta K_{th}/\sqrt{\pi}Y\Delta\sigma_e)^2$, $\Delta\sigma_e$ – границя витривалості гладких зразків. Параметри рівняння (1): $\Delta K_{th,eff}$, ΔK_{th} і $\Delta\sigma_e$ можна визначити експериментально за стандартними методиками. Натомість їх можна також оцінити за формулами, запропонованими у [1]. Параметри $k_1(l)$ і $k_2(l)$ визначаються так:

$$k_1(l) = \big((l-d)/l_D\big)\big(\Delta\sigma/\Delta\sigma_e\big)^2;\quad k_2(l) = \big((l-d)/12d\big)\big(Y\cdot\sigma_{max}/\sigma_Y\big)^2, \tag{3}$$

де σ_Y – напруження початку макротекучості; σ_{max} – прикладене максимальне напруження циклу; d – розмір зерна.

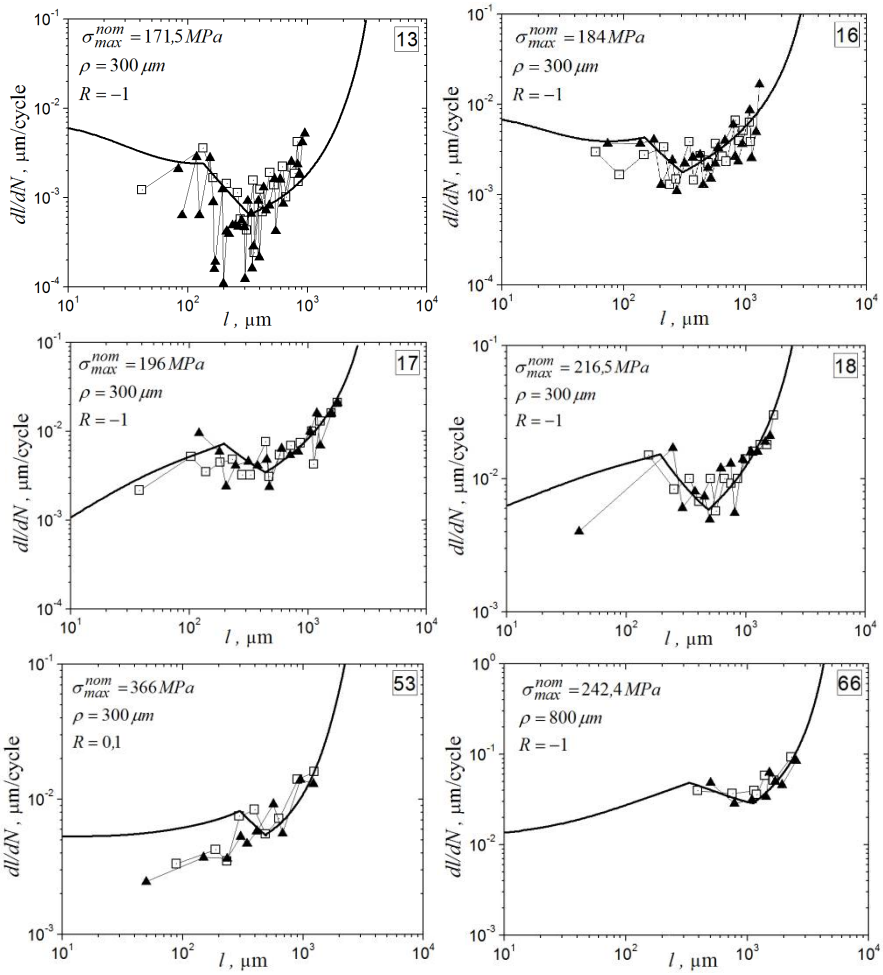


Рис. 1. Порівняння розрахованих кінетичних кривих (лінії) з експериментальними даними (ріст тріщин із протилежних боків отвору на поверхні зразка позначено різними значками).

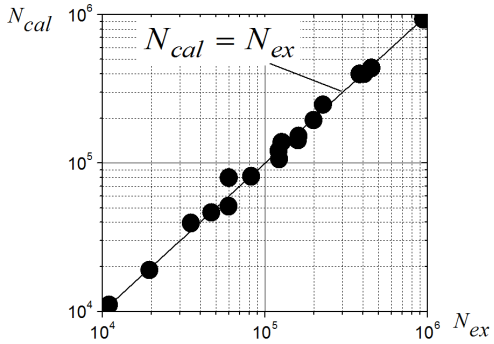


Рис. 2. Порівняння розрахованої та визначеної експериментально кількості циклів під час росту тріщини для 18 випробуваних зразків.

За наявності тупого концентратора, потрібно знати розподіл локального напруження $\sigma_{loc}(l)$ в його околі. Для отворів добре підходить вираз $\sigma_{loc}(l) = \sigma_{nom} \cdot K_t \big/ \sqrt{1 + 4.5l/\rho}$, де ρ – радіус вершини концентратора, $K_t = \sigma_{loc}(0)/\sigma_{nom}$, теоретичний коефіцієнт концентрації напружень. Тоді рівняння (1) записується для трьох ділянок росту тріщини. На першій ділянці від 0 до l_c, тобто в межах критичної відстані, припускається, що тріщина росте під дією постійного розмаху локальних напружень $\Delta\sigma = \Delta\sigma_{loc}(l_c)$, де $l_c = (E\sqrt{b}\big/\sigma_{-1,e})^2$, $\sigma_{-1,e}$ – границя витривалості гладких зразків за симетричного циклу, E – модуль пружності. На другій ділянці, від l_c до l_z, тріщина росте під дією змінного розмаху локальних напружень $\Delta\sigma = \Delta\sigma_{loc}(l)$, де $l_z = \rho(K_t^2 - 1)/4.5$ – межа зони впливу концентратора, і на третій ділянці тріщина росте вже під дією постійного $\Delta\sigma = \Delta\sigma_{nom}$. Кількість циклів N під час росту тріщини визначається сумою результатів інтегрування рівняння (1) на трьох ділянках росту.

На рис. 1 наведено розраховані за моделлю (1) кінетичні криві швидкості росту кутової чверть-кругової поверхневої тріщини від отвору в зразках зі сталі 45 із глухим отвором різного діаметру за різних рівнів прикладеного номінального максимального напруження циклу σ_{max}^{nom} і різної асиметрії циклу R у порівнянні з експериментальними даними, а на рис. 2 – порівняння розрахованої N_{cal} та визначеної експериментально N_{ex} кількості циклів під час росту такої тріщини для випробуваних зразків. У розрахунках було використано наступні вихідні дані: $\nu = 0.3$; $E = 2.1 \cdot 10^5$ МПа; $\sigma_Y = 374.4$ МПа; $b = 2.108 \cdot 10^{-10}$ м; $d = 50 \cdot 10^{-6}$ м; $\rho_1 = 0.3 \cdot 10^{-3}$ м, $K_{t,1} = 2.88$; $\rho_2 = 0.8 \cdot 10^{-3}$ м, $K_{t,2} = 2.7$.

Висновки. Запропонована модель дозволяє розрахувати кінетичні криві швидкості росту короткої тріщини від тупого концентратора напружень в елементах конструкцій з металевих матеріалів і визначити кількість циклів від моменту ініціювання тріщини до досягнення нею певного розміру, використовуючи при цьому тільки характеристики статичної міцності та мікроструктури вихідного матеріалу.

Література.

1. Herasymchuk O. M. Microstructurally–dependent model for predicting the kinetics of physically small and long fatigue crack growth / O. M. Herasymchuk. // Int. J. Fatigue. – 2015. – №81. – С. 148–161.

УДК 539.422.24; 620.186.4
А. Сорочак, к.т.н., доц.
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ВПЛИВ СТРУКТУРНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ МАТЕРІАЛУ ОСЕЙ КОЛІСНИХ ПАР ЛОКОМОТИВІВ НА МІКРОМЕХАНІЗМИ РОСТУ ВТОМНИХ ТРІЩИН

A. Sorochak, Ph.D., Assoc. Prof.
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

THE INFLUENCE OF STRUCTURAL INHOMOGENITY OF THE MATERIAL OF THE WHEEL PAIR AXLES OF LOCOMOTIVES ON THE MICRO-MECHANISMS OF THE FATIGUE CRACKS GROWTH

Abstract. To assess the residual resource of the axles of wheel pairs of railway transport and predict their durability, it is necessary to take into account the features of the structural inhomogeneity of the material. The reason for the inhomogeneity in the material of wheel pair axles is their manufacturing technology. The regularities of fatigue crack propagation in the axle material of a wheel pair are summarized.

Для оцінки залишкового ресурсу важливих елементів конструкцій, що працюють в умовах втоми, таких як осі колісних пар залізничного транспорту, та прогнозування їх довговічності необхідно враховувати особливості структурної неоднорідності матеріалу.

Причиною виникнення неоднорідності в матеріалі осей колісних пар залізничного транспорту є технологія їх виготовлення. Найбільший вплив на формування мікроструктури матеріалу осей в процесі виготовлення мають особливості процесів ліквації і фазових перетворень в сталі, а також температурно-деформаційні параметри обробки прокату. Зокрема, значна роль тут відводиться величині деформації центральної зони заготовки при обтисканні на блюмінгу. При прокаті заготовок значного діаметру величина деформації вздовж перерізу є нерівномірною, що спричиняє формування нерівномірної структури матеріалу [1].

Іншим чинником, що впливає на неоднорідність структури матеріалу, є режим нормалізації осі та нерівномірне остигання матеріалу вздовж перерізу. Нерівномірність структури в свою чергу призводить до деякої нерівномірності механічних властивостей матеріалу вздовж перерізу осі колісної пари [2].

Для дослідження тріщиностійкості матеріалу випробовували серію плоских зразків з центральною тріщиною за одновісного розтягу з коефіцієнтом асиметрії циклу навантаження $R = -1$ та $R = 0$. Зразки вирізалися на різній відстані від центру осі – 20, 50 та 80 мм, що дозволило відстежити вплив структурної неоднорідності матеріалу на мікромеханізми росту втомних тріщин.

Поверхні руйнування зразків на ділянках з різним КІН досліджували на растровому електронному мікроскопі РЭМ-106И в режимі вторинних електронів. Для кількісного аналізу отриманих зображень використовували спеціалізоване програмне забезпечення KAPPA ImageBase.

Проведені мікроструктурні дослідження матеріалу осі на різній відстані від її центру виявили певну неоднорідність структури, що проявляється в зменшенні середнього розміру зерна зі збільшенням радіусу вирізки зразків. Структура містить дрібні зерна фериту та перліту неправильної форми. Межі зерен звивисті, часто незамкнуті. Розмір зерна має значний розкид, середнє значення залишається в межах номера зерна 7-7,5. Слід зазначити, що для всіх досліджених ділянок середній розмір

зерна залишається в межах, встановлених нормативними документами – не більше 5-го номеру.

За результатами фрактографічних досліджень встановлено, що в зразках вирізаних на відстані 20 та 80 мм від центру осі було реалізовано схему втомного поширення тріщини. Проте, у зразках вирізаних на відстані 50 мм від центру спостерігали змішаний (втома + квазісколювання) механізм поширення тріщини.

Вплив негативних асиметрій протягом поширення втомної тріщини спричинив два основні ефекти, які спостерігали у нашому випадку [3]:

а) зминання нерівностей та збільшення ефективного розмаху розкриття тріщини;

б) відсутність зминання – тоді спостерігали зниження швидкості поширення втомної тріщини.

Крім того, є відмінності на ділянці передруйнування та квазістатичного долому. Для зразків із R = 0 виявлено пусті ямки, форма яких є близькою до вирваних із матеріалу частинок дисперсних включень. Для матеріалу, дослідженого за R = -1, виявлено вкриті великі включення, розміщені у порожнинах, що утворилися навколо них протягом пластичного деформування. Створюючи ділянки локальних пластичних деформацій, вони водночас перешкоджають проходженню фронту тріщини через них. Внаслідок цього фронт тріщини «подрібнюється» і вкривається розорієнтованими терасами.

За морфологічними особливостями втомного зламу можна оцінити вплив циклічного навантаження на мікролокалізації деформаційних процесів у матеріалі (табл. 1).

Табл. 1. Узагальнені закономірності поширення втомної тріщини в матеріалі осі колісної пари

R	Основні механізми руйнування зразків із різних зон вирізання		
	A (r = 20 мм)	B (r = 50 мм)	C (r = 80 мм)
0	Борозенковий (чіткі впорядковані борозенки) Фасетки сколювання. Ямки відриву	Фасетки сколювання. Фасетки руйнування перлітних зерен. Псевдоборозенки	Борозенковий (чіткі впорядковані борозенки)
-1	Борозенковий (чіткі впорядковані борозенки) Великі фасетки сколювання, декоровані борозенками	Фасетки сколювання перлітних зерен. Злам має в'язко-крихкий вигляд, подібний до квазістатичного руйнування	Борозенковий (чіткі впорядковані борозенки)

Одержані результати дозволяють стверджувати, що макро- та мікрозакономірності поширення втомних тріщин у матеріалі осі колісної пари залежить від структури матеріалу, сформованої протягом технологічного процесу виготовлення.

Література.

1. Effect of billet strained condition on microstructure homogeneity of railway axles [Text] / G. V. Levchenko, E. G. Dyomina, E. E. Nefedyeva, I. D. Buga, Y. G. Antonov, G. A. Medinskiy // Metallurgical and Mining Industry. – 2010. – Vol. 2. – P. 207-214.

2. Sorochak, A. Cyclic fracture toughness of railway axle and mechanisms of its fatigue fracture / A. Sorochak, P. Maruschak, O. Prentkovskis // Transport and Telecommunication. – Vol. 16, No. 2. – 2015. – P. 158-166.

3. Maruschak, P. Effect of Load Ratio on Fatigue Failure Micromechanisms of Railway Axle Steel / P. Maruschak, A. Sorochak, S. Panin // Applied Mechanics and Materials. – Vol. 770. – 2015. – P. 209-215.

A. Sedmak, Dr., Prof., T. Smoljanic, Ph.D. student, A. Milovanovic, Ph.D. student
Innovation Center of the Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia

REMAINING LIFE OF TI-6AL-4V ELI HIP IMPLANT WITH A CRACK

Abstract. Fatigue failure is the main issue in design of hip implants. One way to prolong fatigue life is to use newly developed Ti6Al4V Extra Low Interstitials (ELI) alloy. As the most critical part, hip neck has been in the focus of this analysis, keeping in mind that the lower the thickness is, the higher the movement of joint may be, but reducing remaining life of implants with a crack at the same time. In this research extended Finite Element Method (xFEM) is used to analyse this effect.

Introduction.

Extensive research has been performed in recent years to assess fatigue life of hip implants, [1-3] in order to explain failures and then to prevent them. The main issue is fatigue crack growth, related to amplitude loading, e.g. simple walking or running, [2-3]. Different methods have been used to analyze fatigue crack growth in hip implants, including advanced numerical simulation, like xFEM, [2-3]. They all contributed also to better understanding of hip implant design aspects, as shown in more details in [4], where static loading was taken into account. In this paper we focus analysis to amplitude loading, i.e. fatigue crack growth, using total hip replacement implant made of Ti-6Al-4V ELI by precision casting method. All basic data is already given in [4], so here we shortly describe most important results.

Fatigue crack growth – xFEM analysis

Fatigue crack growth has been simulated by using XFEM. Amplitude loading was 3 kN, according to recommended values for normal walking load on hip joint for a person of 90 kg. Normal walking condition is the most suitable for numerical simulation of dynamic loading for regular multiyear exploitation of the total hip replacement implant. Boundary conditions include fixed support on stem surfaces that are facing the inner bone, and fixed vertical movement and rotations around both horizontal axes on bottom surface of the implant collar. Defined boundary conditions are the same as in previous research, [4]. Advanced new alloy based on Titanium, Ti-6Al-4V Extra Low Interstitials (ELI), produced by precision casting method, is used recently to prolong fatigue life, providing the following material properties: $R_{p0.2}$=881 MPa, R_m=971 MPa, K_{Ic}=2100 MPa$\sqrt{mm}$, coefficients in Paris equation n=2.2, $C=6.72\cdot10^{-13}$. Modulus of elasticity was set at 120 GPa and Poisson coefficient 0.3.

The xFEM model with boundary conditions, loading and geometry is shown in Fig. 1a, whereas the initial crack length (1 mm), positioned at the site of the highest stress states, is shown in Fig. 1b. Ratio between minimal and maximal load was R=0, i.e. the numerical model after applied load is unloaded, like in a walking cycle. The xFEM analysis is performed in software package Ansys 2019R2 (Ansys Inc., Canonsburg, PA).

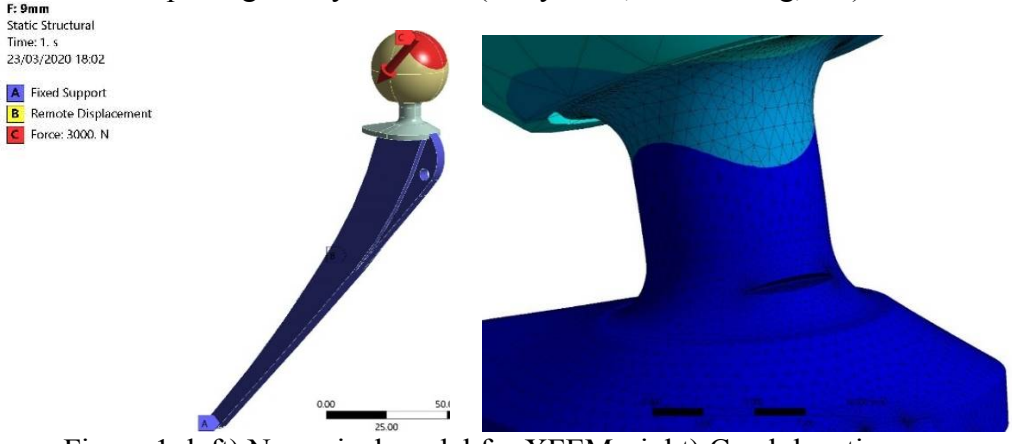


Figure 1. left) Numerical model for XFEM, right) Crack location

Two total hip replacement numerical models, with different neck diameters, 14.6 mm and 9 mm, were taken into consideration for the xFEM. The first one is the originally 3D scanned model, whereas the second one has the recommended neck thickness for the best angle movement, [4]. Stress distributions during fatigue crack growth in these two implants are shown in Fig. 2, indicating the highest stresses in the vicinity of crack front.

Crack length vs. number of walking cycles is shown in Fig. 3, indicating that the implant with 14.6 mm neck diameter can withstand 4.2 million cycles before reaching 4.87 mm (one third of diameter, taken as the critical value), whereas only 1.45 million cycles were enough to reach crack length 3 mm in the case of the implant with 9 mm neck diameter.

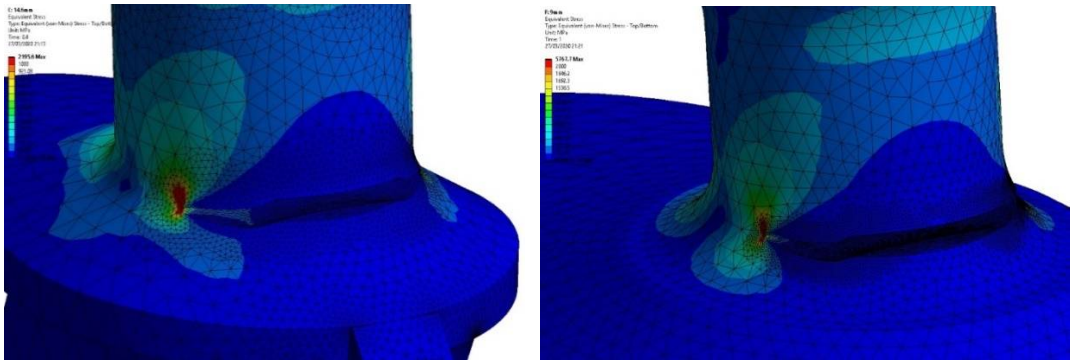


Figure 2. Stress distribution - fatigue crack growth in hip implant with neck diameter (left) 14.6 mm (right) 9 mm

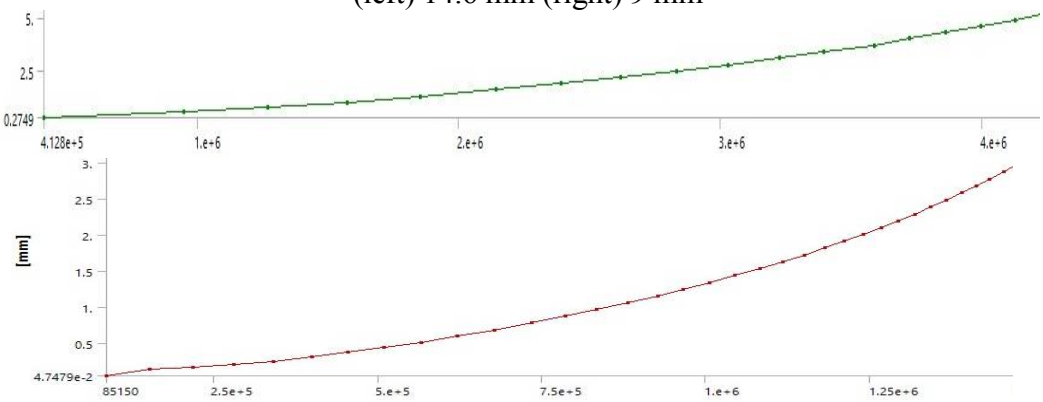


Figure 3. Crack length vs. number of cycles (upper -14.6 mm diameter, lower - 9 mm diameter)

Conclusions. Based on results presented here, one can conclude that the reduction in implant neck thickness from original 14.6 mm to 9 mm, reduces remaining life 3.3 times (from 4.2 million cycles to 1.56 million) in the case of fatigue crack growth from the initial 1 mm to the critical crack length. Such a data is of utmost importance for designers if they try to reduce thickness and improve movement capabilities of a patient. It is not very likely that such a reduction will be accepted, but most probably one can find an optimum thickness value in between 14.6 mm and 9 mm.

References.

[1] Chao, J., Lopez, V. (2007): Failure analysis of a Ti6Al4V cementless HIP prosthesis. Engineering Failure Analysis, 14, pp. 822–830.

[2] Sedmak, A., Čolić, K., Grbović, A., Balać, I., Burzić, M. (2019): Numerical analysis of fatigue crack growth of hip implant. Engineering Fracture Mechanics 216, pp. 1-14.

[3] Sedmak, A., Čolić, K. (2019): Fracture and Fatigue Behaviour of Implants Made of Ti Alloys. 9th International Conference on Materials Structure and Micromechanics of Fracture, Procedia Structural Integrity 23, pp. 45-50.

[4] Mijatović, T., Milovanović, A., Sedmak, A., Milović, Lj., Čolić, K. (2019): Integrity assessment of reverse engineered Ti-6Al-4V ELI total hip replacement implant. Structural Integrity and Life, 19(3), pp. 237-242.

УДК 621.791

В. Лебедєв[1], д.т.н. проф., С. Новиков[2], пров. інж.
[1]Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ, Україна
[2]Дослідно-конструкторсько-технологічне бюро (ДКТБ) Інституту електрозварювання імені Є.О.Патона НАНУ, Україна.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ КОЛИВАНЬ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ВАННИ НА ЧАСТОТУ ПЕРЕНЕСЕННЯ ЕЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛУ

V. Lebedev[1], Dr, Prof, S. Novykov, lead eng.
[1]E.O. Paton Electric Welding Institute, Ukraine,
[2]Experimental design and technological bureau of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine

ANALYSIS OF INFLUENCE OF LOW-FREQUENCY OSCILLATIONS OF WELD POOL ON TRANSFER FREQUENCY OF METAL OF ELECTRODE WIRE

Abstract. The goal is to determine the influence of welding pool oscillations on the transfer of electrode metal, the dependence of the arc burning period on the oscillation parameters was obtained and investigated, which was carried out on the basis of oscillograms, which were obtained on different amplitude-frequency parameters and one technological mode of surfacing by GMAW: welding current I = 125 A., arc voltage U = 24 ÷ 26 V, surfacing speed V = 14 m/h.

Застосування періодичного впливу на зварювальну ванну або зварювальний інструмент виправдано з метою підвищення технологічної міцності зварних конструкцій, що обумовлено підвищенням механічних властивостей завдяки збільшенню ступеню дисперсності мікроструктури наплавленого металу, а також покращення його та металу зони термічного впливу за рахунок утворення корисних структурних складових та збільшення їх долі. За допомогою коливань можливо регулювати перенос крапель електродного металу у зварювальну ванну, що дає змогу контролювати введення теплоти в основний метал завдяки зниженню частоти переносу крапель у порівнянні із аналогічним процесом зварювання або наплавлення без коливань.

Для проведення відповідних експериментів в ДКТБ інституту електрозварювання імені Є.О.Патона НАНУ була створена експериментальна установка для механізованого напівавтоматичного зварювання та наплавлення з керованими коливаннями зварювальної ванни, де генератором коливань виступає програмований кроковий двигун [1]. Дана установка дозволяє генерувати поперечні гармонічні коливання столу, де закріплюються дета у діапазоні частот (υ) до 5 Гц, а амплітуд (A) до 7 мм.

Експериментальна частина складалася з 5 наплавлень на пласкі зразки з вуглецевої сталі товщиною 8 мм типу Ст 3сп суцільним плавким дротом діаметром 1,2 мм марки ER70S-6 (C: 0,06-0,15%; Si: 0,80-1,15%; Mn: 1,40–1,85%; P: 0,025%; S: 0,035%), що є аналогом дроту Св 08Г2С. Всі зразки були наплавлені за єдиним технологічним режимом вказаним вище з витратою вуглекислого газу 9 – 12 л/хв. 4 зразки наплавлялися з накладанням на них коливань з наступними коливальними режимами: 1. υ = 3 Гц та A = 7 мм; 2. υ = 3 Гц та A = 3 мм; 3. υ = 4,5 Гц та A = 3 мм; 4. υ

= 4,5 Гц та A = 7 мм. Дані коливальні режими були обрані як не граничні та такі, що забезпечують більш стабільний процес наплавлення на заданому технологічному режимі. Запис осцилограм здійснювався за допомогою спеціалізованого комплексу для моніторингу процесу зварювання на базі АЦП *L-Card*, що забезпечує безперервне введення сигналів на частотах дискретизації від 0,122 до 100,0 кГц[2].

Попередній аналіз осцилограм [3, 4] вказує на можливість суттєво зменшити частоту переносу електродного металу завдяки коливанням ванни у порівнянні з режимом наплавлення без коливань. Основна тенденція полягає в тому, що зниження частоти переносу збільшується зі збільшенням параметрів амплітудно – частотних характеристик коливань зварювальної ванни, причому вплив амплітуди і частоти коливань ванни є різним: вплив амплітуди тим менше, чим менше значення частоти, із збільшенням частоти значення впливу амплітуди теж зростає. У кількісному вираженні середня частота переносу крапель на режимах з коливаннями зварювальної ванни максимально знижується у 1,86 рази (режим 4). На певних ділянках осцилограм спостерігається зниження частоти в 3,5 рази. Таким чином, є певний сенс встановлення закономірності між амплітудно – частотними характеристиками коливань зварювальної ванни (υ, A) та частоти переносу електродного металу, що визначається періодом горіння дуги t. На основі закономірностей, які описують процес переносу електродного металу у зварювальну ванну при наплавлені плавким електродом на постійному струмі у середовищі вуглекислого газу[5], було отримано вираз:

$$\left(V_{ey} - V_n\right) + \left(V_{\max} - V_{ey}\right) \cdot e^{-\frac{t}{T_{зл}}} - t \cdot \frac{\left(L \cdot \pi \cdot \upsilon\right)^2 \cdot \cos\left(4 \cdot \pi \cdot \upsilon \cdot t\right)}{\sqrt{l_{\partial 0}^2 + \left(\frac{L}{2} \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \upsilon \cdot t\right)\right)^2}} +$$

$$+ t \cdot \frac{\frac{L^4 \cdot \left(\pi \cdot \upsilon\right)^2}{16} \cdot \sin^2\left(4 \cdot \pi \cdot \upsilon \cdot t\right)}{\sqrt{\left(l_{\partial 0}^2 + \left(\frac{L}{2} \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \upsilon \cdot t\right)\right)^2\right)^3}} = 0 \qquad (1)$$

де $l_{\partial 0}$ – значення міждугового проміжку у момент рівноваги, тобто положення дуги є вертикальним, м; t – період горіння дуги, с; V_{ey} – швидкість плавлення електроду, що встановилася після досягнення сили струму значенням 125 А, м/хв; V_n – швидкість подавання електроду у зварювальну ванну, м/хв, V_{max}– швидкість плавлення електроду, що відповідає піковому значенню сили струму у 467 А, м/хв,; e – основа натурального логарифму; $T_{зл}$ – постійна часу зварювального ланцюга, с. ====-0=-0=-0=-0=-0=-0=-0=-0=-0=-

Перші 2 доданки у виразі (1) описують зміну дугового проміжку за рахунок плавлення дроту завдяки енергетичним параметрам технологічного режиму, інші 2 – зміну проміжку за рахунок коливань зварювальної ванни із заданими параметрам коливального режиму. Дана залежність є трансцендентною відносно t і вирішувалась чисельними методами за допомогою пакету *Mathcad*.

Щодо верифікації залежності (1) були здійснені відповідні розрахунки за означеними вище технологічному та коливальному режимах при наступних значеннях інших параметрів, що входять у вираз (1): V_{ey} = 2,671 м/хв,V_n = 2,677 м/хв, V_{max} = 14,721 м/хв,$T_{зл}$ = 0,007 с, $l_{\partial 0}$ = 4 мм. Результати розрахованих за (1) та середніх виміряних за осцилограмами значень t наведено у таблиці 1.

Табл. 1. Значення розрахункових та експериментальних середніх значень періоду горіння дуги *t*

Номер експерименту	Амплітуда, *A*, м	Частота, *υ*, Гц	Розрахункове значення періоду *t* за (1), с	Експериментальне середнє значення періоду *t*, с
0	-	-	-	0,038
1	0,007	3	0,032	0,042
2	0,003	3	0,038	0,041
3	0,003	4,5	0,085	0,061
4	0,007	4,5	0,089	0,071

З таблиці 1 видно, що залежність (1) має задовільну ступінь верифікації з експериментальними даними, що дає змогу застосовувати її щодо прогнозування збільшення величини *t* на певному технологічно-коливальному режимі наплавлення у заданих амплітудно-частотному діапазоні.

Література

1. Лебедєв В.О., Новиков С. В.Установка для наплавлення та зварювання в середовищі CO_2 з механічними поперечними гармонічними коливаннями зварювальної ванни [Текст] / В. О.Лебедєв //Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем. Матеріали XII - ї міжнародної науково – практичної конференції. Т.2 – 2022, 26 – 27 травня, 2022 р., Чернігів, Україна. – 264 с.
2. Пирумов А.Е., Скачков И. О., Супрун С.А., Максимов С.Ю. Специализированный комплекс для мониторинга процесса сварки / А.Е.Пирумов, И. О.Скачков, С.А.Супрун, С.Ю.Максимов //ПИКАД: промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика. — 2007. — № 4. — С. 18–19.
3. Лебедев В. А.,Новиков С. В.Влияние параметров колебаний сварочной ванны на частоту переноса электродного металла [Текст] / В. А.Лебедев //Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем. Матеріали X - ї міжнародної науково – практичної конференції. Т.2 – 2020, 29 – 30 квітня, 2020 р., Чернігів, Україна. – 252 с.
4. Лебедев В. А.,Новиков С. В.Влияние амплитудно – частотных характеристик колебаний сварочной ванны на частоту переноса электродного металла [Текст] / В. А.Лебедев //Проблеми зварювання та споріднених технологій. Матеріали Всеукраїнської конференції з міжнародною участю. 2019, 17 – 19 вересня, 2019 р., Миколаїв, Україна. – 104 с.
5. Ищенко И.Л., Дюргеров Н. Г. Плавление электрода и саморегулирование дуги при сварке с периодическими замыканиями дугового промежутка/И.Л.Ищенко, Н. Г. Дюргеров // Сварочное производство. — 1961. — № 6. — С. 9 –12.

УДК 621.791.927.5
В. Лебедєв, д.т.н., проф.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона ім. Є.О. Патона НАН України

ЕФЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ МОДУЛЬОВАНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДУГОВОГО МЕХАНІЗОВАНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА НАПЛАВЛЕННЯ

V. Lebedev, Dr., prof.
E.O. Paton Electric Welding Institute, Ukraine

EFFECTS OF USING MODULATED MODES OF OPERATION EQUIPMENT FOR ARC MECHANIZED WELDING AND SURFACING

Abstract. Different variants of systems that provide modulation of process parameters of electric arc mechanized and automatic welding and surfacing are considered. It is suggested that the adjustable influence of any system of welding and surfacing equipment and some auxiliary systems on the process be attributed to general systems modulated influences. Examples of effective use of modulated effects are given.

В останній час в одному ряду з новими технічними рішеннями щодо конструкцій та можливостей обладнання для дугового механізованого та автоматичного зварювання та наплавлення ведеться постійний пошук алгоритмів його функціонування, які б давали нові можливості та підвищували ефективність виконання зварювальних робіт та робіт по відновленню та зміцненню машин та механізмів. Модульовані та імпульсні режими роботи зварювального та наплавного обладнання дозволяють розширити сфери їх застосування, поліпшити як якість виконання відповідних робіт, так і покращити показники ресурсних витрат при використанні як суцільних так порошкових дротів, в тому числі при процесах в захисному газі і по можливості без нього.

Застосування інших систем обладнання та ряду спеціальних допоміжних систем для ефективного формування характеристик дугового процесу можна відзначити наступним чином:

- подавання захисного газу;
- електромагнітне керування;
- різні способи керування коливаннями електродного дроту;
- коливання металевої ванни;
- комбіновані впливи

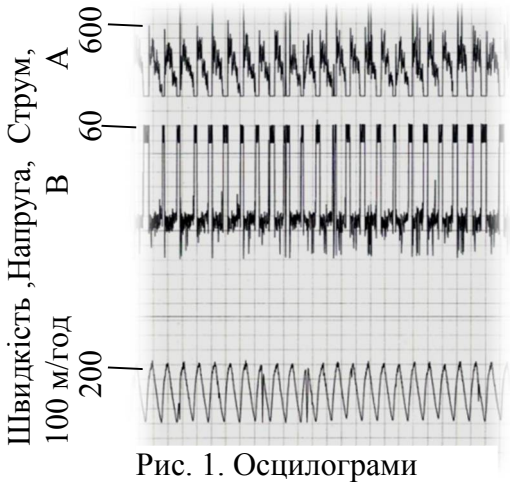


Рис. 1. Осцилограми модульованогопроцесу

Раніше модульовані процеси вивчалися і здійснювались завдяки використанню періодичних змін напруги чи струму дугового процесу, або синхронних їх змін з частотами в діапазоні 0,1…5,0 Гц. Такий алгоритм роботи забезпечувався завдяки організованому формуванню вихідних характеристик джерела зварювального струму та механізму подавання електродного дроту.Для посилення ефектів впливу модуляції застосовують регулювання амплітуди та шпаруватості імпульсів і це можливо при використанні сучасних конструкцій джерела живлення дуги та системи подачі електродного дроту. Можливості застосування модуляції напруги та струму вивчались системно та комплексно з документуванням параметрів процесу та

аналізом отриманих результатів з застосуванням металографічних, хімічних та інших методів дослідження.

На рис.1 представлені характерні осцилограми модульованого режиму за рахунок дії механізму подавання з частотою 1,0 Гц. Час дії імпульсу та паузи однаковий і становить 0,5 с, що і визначає шпаруватість. Слід зазначити, що сучасні системи подачі електродного дроту створені на базі вентильних двигунів з комп'ютеризованим керуванням здатні забезпечити високу точність відтворення імпульсного руху з частотами до 50…60 Гц.

Експериментальні дослідження продовжувались обробкою даних до одержання математичних описів впливів частоти, шпаруватості, значень струму та напруги майже на всі характеристики результату, який отримується, а це геометричні розміри, хімічний склад, механічні характеристик. Для прикладу рис. 2 дані залежності твердості наплавленого шару в залежності від характеристик модульованого процесу, який можна з достатньою точністю представити виразом

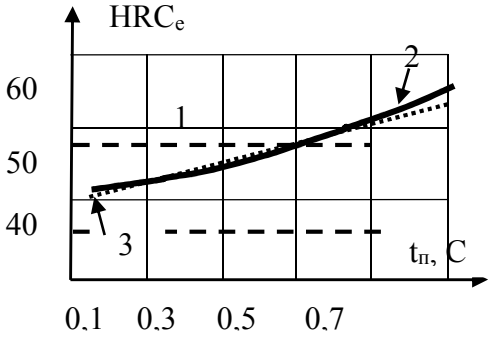


Рис. 2 Залежності твердості наплавленого металу від часу дії паузи $t_п$при постійному часі дії імпульсу t_i -0,8 С. 1 - стаціонарна дуга; 2 -модульований струм; 3 – лінія апроксимації

$$HRC = HRC_1 + \frac{(t_n - t_{n1})(HRC_2 - HRC_1)}{t_{n2} - t_{n1}} \qquad (1)$$

де $HRC_1, HRC_2\ t_{n1},\ t_{n1}$ - значення відповідних параметрів в початкових та кінцевих точках графіку на рис. 2

Використовувалися режими наплавлення: струм - 220 - 240 А; напруга 24 - 26 В; швидкість ведення процесу – 10,5 м/годину; виліт електродного дроту - 0,02 - 0,025 м.

Можна відзначити, що залежності типу (1) для всіх експериментальних досліджень, достатньо представлені в наших роботах [1], [2].

Зазначимо, що застосування модульованих режимів значно полегшують формування швів та шарів відновлюваного наплавлення в положеннях відмінних від нижнього. Ми вважаємо, що ця технологія є однією з найбільш вивчених з цілого ряду інших способів застосування процесів зі зміною параметрів впливу, тобто модуляцією в керованому режимі.

Цікавою технологією є подавання захисного газу з визначеними параметрами модуляції для впливу на процес зварювання, яке описано в технічній літературі, наприклад [3]. Особливостями цього способу є можливість змінювати характер переносу електродного металу, кристалізацію зварювальної ванни та інше. Серед недоліків слід вказати на слабку керованість процесом подавання газу. Цей спосіб потребує подальшого вивчення та пошуку ефективних засобів керування.

Важливими вважаються дослідження та впровадження результатів по вивченню впливу змінних електромагнітних полів як модульованих на процес зварювання. Цьому способу впливу присвячено багато досліджень та запропоновано ряд технічних рішень. Серед отриманих результатів можна зазначити ефективне перемішування рідкої ванни з її дегазацією та подрібненням первинної структури кристалітів, що сприяє покращенню механічних характеристик шва та наплавленого шару. Відзначається дієвий вплив модульованих та імпульсних магнітних полів на процес перенесення крапель електродного металу.

Також перспективними та тими, що потребують подальшого вивчення і нових технічних розробок, ми вважаємо різні способи зварювання та наплавлення з

використанням рухів як зварювального інструменту так і забезпечення керованих коливань рідкої ванни.

Ці види модулювання також описані в технічній літературі, зокрема [4], можуть бути реалізовані як з використанням систем самого зварювального обладнання, наприклад механізмів пошукових систем, керованих коректуючих вузлів, так і з залученням спеціальних додаткових систем.Робота систем самого зварювально-наплавного автомата досить відома, за деякими виключеннями. Розглянемо одну з них, потреба в якій виникла через необхідність забезпечити приварку герметизуючих заглушок до внутрішньої поверхні труби на глибині понад 200 м. Між стінками труби та заглушкою є нерівномірний зазор, який при зварюванні треба перекрити (рис.3). При розробці зварювального автомата для вирішення цієї задачі було винайдена оригінальна система коливань струмопідводу з приводом від системи подачі з нерухомим центром. Система дозволила гарантовано заповнити зазор та додатково забезпечити модуляцію зварювального струму, що видно на рис.4. Автомат для такої технології успішно впроваджено на технологічному об'єкті в Великобританії.

Рис. 3. Зварювання а-без коливань; б-з коливанням

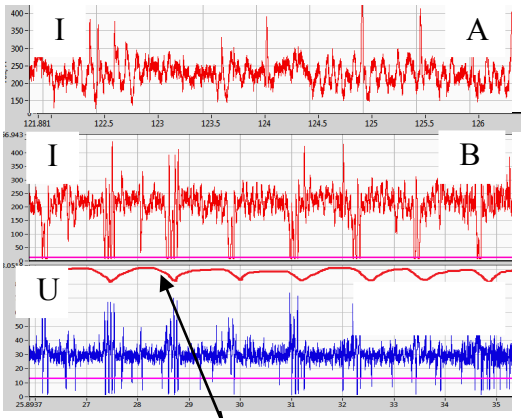


Рис. 4. Осцилограма струму Ii напруги U: A-звичайний процесс; B-з коливаннями

Слід неодмінно згадати нову розробку системи поперечних коливань зварювальної ванни щодо напрямку ведення процесу з регульованими параметрами, яка представлена в роботі [4] з досягненням вагомих результатів при використанні частот 1,0…5, Гц: підвищення продуктивності наплавлення, регулювання геометричних параметрів наплавленого шару, покращення ряду механічних характеристик, тощо. Установка впроваджена в виробництво при відновленні матриць штампового інструменту.

Усі згадані розробки з використанням модуляції можуть бути застосовані не тільки в звичайному становищі, а й при зварюванні під водою. Є досвід в ІЕЗ ім. Є. О. Патона з використанням електромагнітних полів, модуляції струму тощо.

Є ще багато систем та способів зварювання та наплавлення за використанням модуляції які мало відомі через поки їх відносно слабку вивченість.

Література

1. В. Лебедєв, В. Тищенко, С.Лой. Особливості структуро утворення металу при електродуговому механізованому наплавленні з модуляцією режимів //Технічні наука та технології. Чернігів №1 2022 С.27-36

2. В. О. Лебедєв, В. О Тищенко, М.М. Бриков Вивчення особливостей механізованого електродугового наплавлення з періодичною зміною режимів процесу //Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні №1 2022 С.1-8.

3. Тарасов Н.М. Управление переносом електродного метала при кратковременном повышении скорости истечения защитного газа //Сварочное производство 1982 №8. С. 23-25

4. Лебедев, В.А., Драган С.В., Новиков С.В., Симутенков И.В. Управление формированием структуры шва при воздействии низкочастотными механическими колебаниями на расплав сварочной ванны (Обзор) //Збірник наукових праць НУК. Обробка матеріалів у машинобудуванні. №3 2017 С.11-18

УДК 621.78

В. Лебедєв[1], д.т.н. проф., С. Лой, Г. Єрмолаєв[2], к.т.н.
[1]Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ, Україна
[2]Херсонський навчально-науковий інститут національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ

V. Lebedev[1], Dr. Prof., S.A.Loi, G. Ermolaev[2], Ph.D.
[1]E.O. Paton Electric Welding Institute, Ukraine
[2]Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding

DIRECTIONS OF EQUIPMENT IMPROVEMENT FOR PLASMA SPRAYING

Abstract. Some technical and technological problems of plasma spraying equipment operation are considered. Attention is paid to the most important components. New more effective designs of plasma torch, powder dosing systems, powder compositions for spraying with new qualities are proposed. Methods for determining the results of spraying, in particular, the stress state of the coating, etc.

Плазмове напилення є одним з найбільш дійових засобів якісного відновлення вузлів та деталей в різних сферах, зокрема двигуни, турбіни, будівельна та сільськогосподарська техніка тощо.

Вирішення нагальних задач найбільш раціональним шляхом є отримання покриттів виконаних плазмовим напиленням, яке потребує постійного вдосконалення відповідного обладнання, залучення більш доцільніших технологій з розробкою методик прогнозування результатів та їх оцінки.

З аналізу розробок щодо плазмового напилення витікають наступні напрямки пошукових робіт, які забезпечують більш ефективний процес формування шару покриттів при відновленні та забезпеченні стійкості для певних умов:

1. вдосконалення існуючих чи розробка нових вузлів установок для напилення;
2. нововведення в технологічному процесі та пошук і впровадження застосування більш цілеспрямованих на конкретні завдання складів порошків;
3. розробка нових методик дослідження властивостей плазмових покриттів.

Основними діючими вузлами обладнання для плазмового напилення є вузол підготовки та дозування порошку, конструкція плазмотрону, джерело живлення. Окремо можна розглядати системи забезпечення контрольованого середовища та особливо механізми

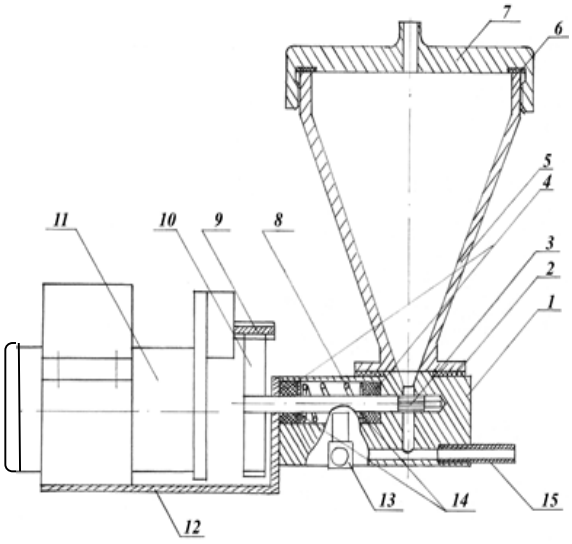


Рис. 1.Конструкція порошкоживильника: 1 - корпус; 2 - ротор; 3 - гумова прокладка; 4 - сальник; 5 - бункер; 6 - гумова прокладка; 7 - кришка; 8 - пружина; 9 - вал-шестерня; 10 - шестерня; 11 - електродвигун; 12 - кронштейн; 13 - трійник; 14 - шайба; 15 - штуцер

переміщення деталей які напилюються.

Приладом нашої розробки в цьому направленні є нова розробка порошкоживильника з використанням вентильного швидкодіючого безредукторного електроприводу, яка представлена на рис. 1 і є досить досконалою конструкцією як щодо ефективності дозування, так і керованості цим процесом в повній мірі. Детально нова конструкція порошкоживильника описана в роботі [1]. Також є певні напрацювання та конструктивні вирішення по плазмотронах, які сприяють подовженню його ресурсу та інше [2].

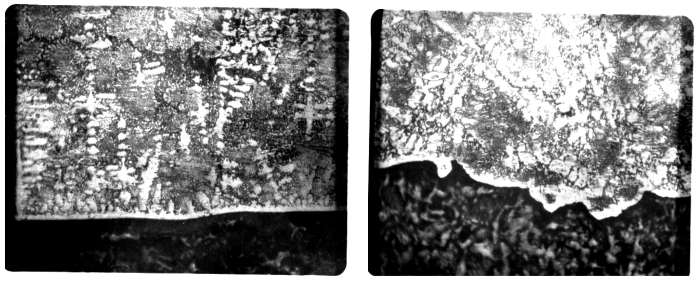
Табл. 1.Міцність напилення з новим складом порошку

№	Склад зразка	Матеріали напилюваної суміші, мас%		Міцність $\sigma_в$ МПа
		ПГ-10Н-01	Борний шлак	
1	З підготовкою поверхні	100,00	-	361,4
2	Без підготовки поверхні	99,50	0,50	311,2
3	Без підготовки поверхні	99,00	1,00	328,2
4	Без підготовки поверхні	98,50	1,50	360,4
5	Без підготовки поверхні	98,50	3,00	401,0
6	Без підготовки поверхні	98,50	5,00	350,7

Щодо нововведень в технології напилення, то тут в якості прикладів слід представити нашу розробку складу порошку який складається з самофлюсуючого флюсу та борного шлаку в певному співвідношенні. Основу порошку склав самофлюсуючий флюс типу ПГ-10Н-01. Певні добавки борного шлаку, вплив яких на покриття вивчено на основі експериментальних досліджень з математичним плануванням і розробкою математичної моделі. Враховано залежності впливу составу порошку на міцність шару з врахуванням енергетичних параметрів процесу напилення та стану підготовки поверхні. Результати експериментів дані в табл. 1. Показовими є порівняльні мікрошліфи з'єднання напиленого шару з основою, які дані на рис. 2 і фіксують збільшення площини зчеплення при використанні добавки - борного шлаку, що, в тому числі, зумовлює міцність покриття.

Розглянемо для прикладу використання плазмового покриття для якісного відновлення однієї з деталей двигуна внутрішнього згорання яка працює в режимі тертя ковзання – вкладишів.

Чавунну обойму підшипників ковзання перед заливкою бабітом піддають попередньому лудінню. Ця операція не дозволяє забезпечити необхідне зчеплення бабітового вкладиша, що заливається, з чавунною основою. Запропоновано нове рішення: на чавунну основу перед лудінням напилювати бронзове покриття яке має хороше зчеплення з чавунною основою, чудово лудиться і, тим самим, забезпечує високу якість при заливці підшипників бабітом. При експлуатації підшипників спостерігається значний знос

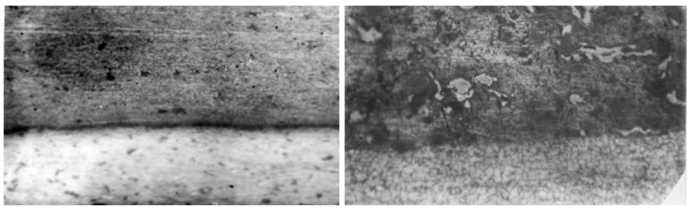


а б

Рис. 2. Структура напиленного покриття: а – без додавання борного шлаку х200; б –і з введенням до складу порошку борного шлаку

бабітового вкладишу. Для ремонту підшипників потрібна виплавка бабіту, що залишився, і наступна заливка нового. Розроблена технологія відновлення геометричних розмірів бабітового вкладиша шляхом напилення порошкової суміші, що складається з порошку бабіту і твердого мастила. Товщина напиленого шару варіюється від 0,1 до 3,0 мм. Покриття з такої суміші дозволяє знизити коефіцієнт тертя вузла і тим самим збільшити час міжремонтного періоду.

Проведений цикл експериментальних досліджень властивостей запропонованого способу отримання плазмових покриттів підтвердив високі експлуатаційні якості напилення, як щодо міцності зчеплення так і відносно зниження коефіцієнту тертя, що дає змогу при мінімальних витратах забезпечити якісне відновлення деталей двигуна. Такий метод зі своїм підходом був застосований і для інших деталей.



а б

Рис. 3. Мікроструктура поверхні ковзання вкладишів: а – стандартне; б - плазмове напилення(75%Al+25%БрА10)- основа +5%Pb

Робота по вибору матеріалу покриттів постійно триває. Так на рис. 3 представлені для порівняння мікроструктури заводського покриття а також покриття запропонованого нами яке має суттєво має суттєво менший коефіцієнт тертя.

Дуже важливим напрямком вдосконалення процесу плазмового напилення є теоретичні дослідження, результат яких впливає на запровадження технологій, які поліпшують стан шару покриття. Більшість таких досліджень є прогностичними і практично не можуть бути отримані експериментально із-за необхідності проведення дуже великої кількості дослідів і аналізу їх результатів. Одним з таких досліджень є розроблені математичні методи визначення характеристик напруженого стану[3]. Результатами такої роботи є прогнозування стійкості покриття виконаного для різних умов експлуатації деталей з напиленим шаром і з урахуванням параметрів процесу. Це дає змогу суттєво заощадити на розробці технології з отриманням бажаних результатів без додаткових пошукових випробувань.

Всі вищезгадані технічні розробки є основою для розробки нових способів одержання шару покриття плазмовим методом. Це, насамперед, здійснення модульованих та імпульсних методів впливу на процес, що може забезпечити суттєве підвищення результатів роботи плазмового обладнання. Це частково зазначено в матеріалі [4] та підтверджується нашими пошуковими дослідженнями і є основою для ствердження, що вони є перспективними.

Література

1. Патент № 140757 (кор. модель) Роторний живильник порошку. Дубовой О.М., Лой С.А., Лебедєв В.О., Драган С.В. Опубл. 10.03. 20, бюл. №5;

2. Лебедев В.А., Лой С.А. Модернизация плазмотрона для напыления на воздухе и в контролируемой атмосфере (в вакууме). //Вісник Національного технічного університету “ХІІІ”. Серія: Новірішення в сучасних технологіях. – 2019,№10- С. 21-29.

3. Лебедев В.А., Лой С.А., Ермолаев Г.В., Матвиенко М.В. Напряжённое состояние плоских образцов с напылённым слоем при испытаниях на изгиб //Авиационно-космическая техника. – 2019, № 4 (156). - С. 63-72.

4. Сухочев Г.А., Кадырметов А.М. Экспериментальные исследования параметров управляемости процесса воздушно – плазменного нанесения и упрочнения покрытий //Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. №11 (47). С.53-56.

УДК 621.791.03
В. Лебедєв, д.т.н. проф.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ, Україна

МЕХАНІЗОВАНЕ ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОЛИСТОВИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНОЇ РОЗРОБКИ МЕХАНІЗМУ ПОДАЧІ

V. Lebedev, Dr, Prof
E.O. Paton Electric Welding Institute, Ukraine

MECHANIZED WELDING OF THIN-SHEET ALUMINUM ALLOYS USING MODERN DEVELOPMENT FEEDING MECHANISM

Abstract. The article deals with the problem of obtaining a quality welded joint of metal structures from aluminum alloys using semiautomatic equipment. Preliminary analysis of two methods of welding MIG and TIG with the selection of the most effective of them. It is shown that the process with controllable impulse feed of the electrode wire is much more productive than the TIG process. It is proposed to apply a new process with a dosed supply of electrode wire, which provides mechanized welding without burns and significant buckling of structures.

Зварювання механізованим або автоматичним обладнанням алюмінію з імпульсними впливами віл джерела зварювального струму відоме [1], і використовується з різними видами формуваннями імпульсів, що впливають на перенесення крапель електродного металу.

Зварювання алюмінію з імпульсною подачею електродного дроту менш відоме, але є позитивні результати, отримані при цілеспрямованому імпульсному русі дроту, зокрема кероване перенесення електродного металу, що дозволяє знизити мінімальну товщину зварюваних металоконструкцій, підвищити якість металу шва, тощо.

В даний час є комплекс розробок, з застосуванням електроприводів, на основі вентильних електродвигунів з комп'ютеризованим управлінням [2]. Це дозволяє отримати керований за всіма параметрами (частота, форма, амплітуда, шпаруватість, реверсування) імпульсний рух дроту з частотами до 50 ... 60 Гц. Застосування при зварюванні MIG нових типів механізмів подачі електродного дроту дозволяє істотно розширити технічні та технологічні можливості цього процесу.

Економічну ефективності зварювання MIG в порівнянні з TIG, тонколистових металоконструкцій, наприклад, коробчасті конструкції зі складною траєкторією зварювання, які можуть тиражуватися у значних обсягах. механізоване обладнання MIG зумовлює високу продуктивність та якість. Зазвичай при зварюванні тонколистових металоконструкцій зі сплавів алюмінію (мінімальні товщини близько 1,0 мм і менше) використовують TIG зварювання, але з-за нижчої продуктивності необхідний пошук нових більш продуктивних сучасних процесів MIG зварювання. Має значення та необхідність більш ретельної підготовки поверхонь, що зварюються при TIG зварюванні.

Теплова потужність TIG і MIG процесів може бути визначена приблизно у вигляді

$$Q_э = 0{,}24 U_д I_д \eta\,, \qquad (1)$$

де $Q_э$ - ефективна теплова потужність; $U_д, I_д$ - падіння напруги на дузі та струм процесу відповідно; η - ефективний ККД процесу нагрівання металу зварювальною дугою.

Для будь-якого дугового процесу ефективність теплового ефекту залежатиме від характеристик $U_д, I_д$, але для кожного з них відрізняється величиною η [2].

Для TIG процесу

$$\eta_{TIG} = 0{,}05(2{,}59 - 0{,}9191\lg I_д)(1{,}04 - 0{,}012h_э), \qquad (2)$$

де η_{TIG} визначено у відсотках, - $h_э$ величина заглиблення вольфрамового електрода в насадку, мм.

Для MIG процесу

$$\eta_{MIG} = \frac{1}{U_д}(U_a + U_k + \frac{\pi r_э^2}{I_д} v_э c\rho T_э + L_д \; grad U_д \frac{r_д^2}{2r_д^2 + L_д^2}), \quad (3)$$

де U_a, U_k - анодне і катодне падіння напруги відповідно; $r_э$ і $v_э$ - радіус і швидкість подачі електроду відповідно; , $c\rho$ - питома теплоємність і $T_э$ -температура підігріву вильоту відповідно; $L_д$ - довжина зварювальної дуги;

Для експериментального визначення кількості енергії, яка нагрівала зразок при обох видах зварювання, було застосовано спосіб сухого калориметрування. виконувалася низка наплавлень на зразок з обчисленням середнього результату η_{TIG} і η_{MIG} .

Табл. 1. Порівняння для розрахунків та експерименту

ККД процесса	Розрах унок	Експері мент	Літературні джерела
η_{TIG}	42-44	-	30-48
η_{MIG} конвенційна подача	76-78	66-72	65-80
η_{MIG} імпульсная подача	-	70-80	-

Зварювання MIG проводили для двох варіантів подачі електроду - конвенційний та імпульсний з частотою 40 Гц, і шпаруватістю імпульсів 0,5. Використовували електродний дріт АМГ5 діаметром 1,0 мм. Наплавлення велося на пластини товщиною 2,0 мм.

Результати розрахунків і експериментів наведені для порівняння у табл.1

З табл.1 можна заключити, що обрані методики розрахунку ККД добре корелюються з даними експериментів; значення η_{TIG} , η_{MIG} може досягати практично дворазового співвідношення.

Можна вважати що MIG більш продуктивне, а якість результату можна отримати використовуючи імпульсне подавання електродного дроту при застосуванні самих простих та дешевих джерел живлення дуги, зокрема це

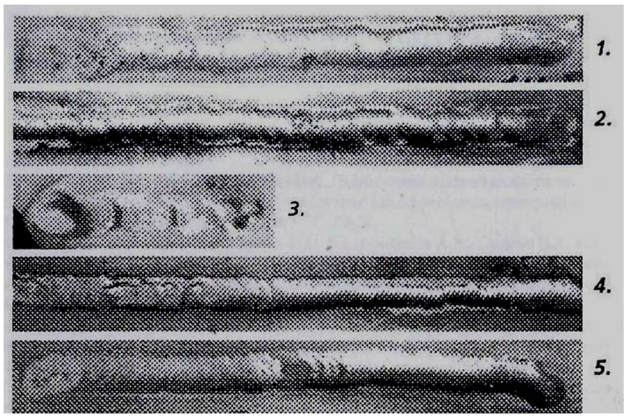


Рис.1. Фрагменти валиків на тонколистових металоконструкціях: 1 – валик, отриманий при зварюванні з керованою імпульсною подачею електрода; 2, 4 (стиковий шов) 5 (автоматичний режим) – валики, отримані при дозованій подачі електрода; 3 – початок шва без застосування спеціального алгоритму, що забезпечує якісне початкове формування

стосується зварювання тонколистових металоконструкцій зі сплавів алюмінію.

Усе вищенаведене зумовило вибір способу зварювання тонколистових металоконструкцій зі сплавів алюмінію в вигляді MIG-процесу з системами імпульсної подачі електродного дроту на базі вентильного швидкодіючого електроприводу. процес зварювання відбувався в аргоні напівавтоматом з такою системою подачі та електродним дротом АМГ5 діаметром 1,0 мм. При цьому можна отримати наплавлений валик або стикове з'єднання без пропалів з мінімальним викривленням металу товщиною ≥ 1,2 мм. Зварювання проводилося на режимі, що характеризується інтегральними значеннями ≥ 28 А 18 В. Результати наплавлення представлені на фрагменті 1 рис.1.

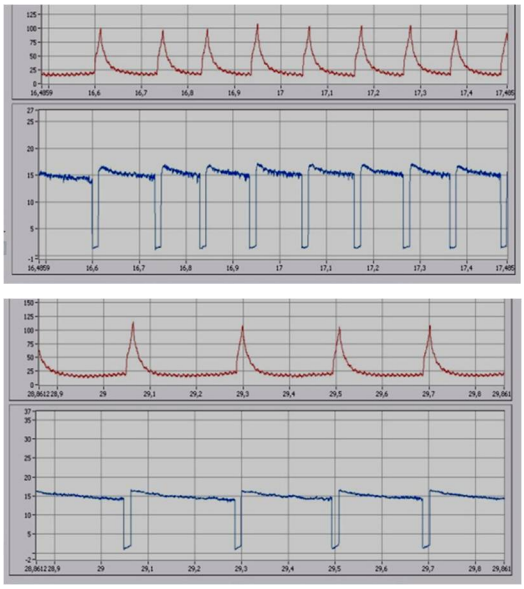


Рис.2. Осцилограми процесу механізованого зварювання конструкцій з тонколистового алюмінію з різними в рівнями (1, 2) включення зворотного зв'язку: I, U струм і напруга відповідно

Перехід на менші товщини алюмінієвих металоконструкцій при механізованому зварюванні супроводжується пропалами, зокрема при мимовільних від зварника коливаннях держака.

Розроблений новий спосіб зварювання з дозованим подачею електродного дроту базується на такому ж вентильному комп'ютеризованому приводі [2], однак має суттєві відмінності від імпульсної керованої подачі, що полягають у введенні на комп'ютеризований електропривод зворотних зв'язків за параметрами зварювального процесу. Рівень дії зворотних зв'язків регулюється. Також регулюється швидкість в імпульсному русі електродного дроту. Все це дозволяє отримати добре керований процес переносу електродного металу з можливістю регулювання тепловкладень у виріб, що зварюється. При застосуванні зворотного зв'язку струму виявилося можливим знизити режим зварювання струмом до інтегрального значення 20...25 А. При цьому можна отримати різний характер перенесення (дозування) електродного металу, що можна бачити на осцилограмах рис.2. Осцилограми, крім цього, свідчать про високий ступінь стійкості (періодичності) зварювального процесу. Все це дозволяє здійснити зварювання - наплавлення електродним дротом діаметром 1,0 мм алюмінієвих металоконструкцій товщиною 0,9 мм без пропалів і суттєвого короблення. У процесі використовується максимально просте по конструкції, і, отже, дешеве джерело зварювального струму серійного виробництва.

Література.

1. Алёшин Н.П., Гладков Э.А., Бродягин В.Н., Кузнецов П.С., Копотева Е.Н., Шолохов М.А. Импульсные технологии управления каплепереносом при MlG/MAGсварке // Сварка и диагностика - 2014 -№3.

2. Лебедев В.А., Гулый М В. Быстродействующий вентильный электропривод для оборудования механизированной дуговой сварки //Мехатроника. Автоматизация, Управление. 2014. №6. С.47-51.

3. В. А. Лебедев, Г. В.Жук. Управления переносом электродного металла на основе импульсных алгоритмов функционирования систем с дозированием подачи электродной проволоки при механизированной дуговой сварке //Тяжелое машиностроение. 2017. №6. С.27-32.

УДК 621.791.927.5

В. Лебедєв[1], д.т.н., проф., М. Бриков[2], д.т.н., проф., Н. Макаренко[3], д.т.н., проф.
[1]Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
[2]Національний університет, "Запорізька політехніка"
[3]Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ

СУМІЩЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТА КОМБІНОВАНІ РІШЕННЯ ПРИ ВДОСКОНАЛЕННІ ТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЇ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА НАПЛАВЛЕННЯ

V. Lebedev[1], Dr., Prof., M. Brykov[2], Dr., Prof., N. Makarenko[3], Dr., Prof.
[1]E.O. Paton Electric Welding Institute, Ukraine,
[2]National University "Zaporizhzhia Polytechnic" Ukraine,
[3] Donbass State Engineering Academy , Kramatorsk, Ukraine

COMBINATION OF PROCESSES AND COMBINED SOLUTIONS IN IMPROVING THE TECHNIQUE AND TECHNOLOGY OF ARC WELDING AND FUSION

Abstract. In work systematized and considered on the row of examples basic types of combinations of influences and combination of processes which are developed for the use in the arc welding and naplavke a fluxible electrode.

It is shown that new technical and technological effects at welding and naplavke can be got only at purposeful introduction to the technological process of additional influences.

Дугові механізовані процеси зварювання та наплавлення, які реалізуються за допомогою механізованого обладнання, є найбільш поширені засобів з'єднання, відновлення та зміцнення металів. Це ставить завдання вдосконалення як самих процесів, так і обладнання . В цьому ж ряді вирішуються задачі покращення технологічних показників електродних матеріалів та засобів захисту зварювальної ванни.

Одним з головних напрямків вдосконалення техніки та технології електродугового зварювання та наплавлення в теперішній час, коли з'являються нові техніко-технологічні рішення, є можливість застосувати різні види впливів на дуговий процес одночасно. В цьому матеріалі ми будемо розглядати використання тільки технічних засобів впливу на процеси зварювання та наплавлення.

Суміщення або комбінація застосування технічних засобів може відбуватися як з використання систем самого зварювального апарату та і з залученням допоміжного обладнання.

Яскравими прикладами такого поєднання можуть бути системи: живлення дуги, подачі електродного дроту, подачі захисного газу. Наведемо приклади.

В матеріалах ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України [1] є дані на використання джерела живлення та системи подачі, які функціонують з імпульсними алгоритмами на одній вибраній частоті в певній залежності один от одного при формуванні. Така залежність загалом обумовлена інерційними властивостями задіяних систем. Якісне представлення сумісної дії такого способу керування процесом з використанням сучасних швидкодіючих конструкцій механізму подачі з вентильним електроприводом та

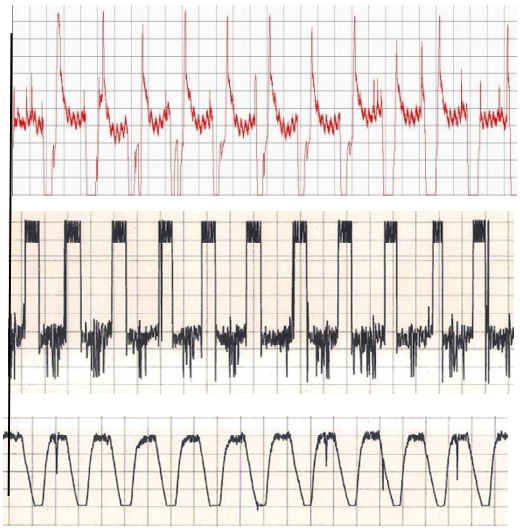


Рис. 1. Осцилограми суміщенного впливу зверху до низу: струм; імпульси джерела; імпульси швидкості подачі

джерела живлення дуги інверторного типу представлені осцилограмами на рис. 1. Перевагами такого суміщення впливу є ефективне керування переносом електродного металу для сталей та алюмінію без формування імпульсів подачі з надмірними амплітудами, розширює зону обслуговування напівавтомату – нема необхідності компенсувати затухання амплітуди механічних імпульсів.

Використовується достатньо проста в технічному виконанні розробка з комбінованим впливом на дуговий процес – поєднання імпульсної подачі електродного дроту з модульованим режимом роботи джерела зварювального струму. Частоти генерування імпульсів різні. На рис. 2 приведена конструкція напівавтомата для здійснення такої технології, яка з успіхом використовується при веденні зварювальних робіт в положеннях відмінних від нижнього (вертикаль та стеля). Обидві розробки були здійснені в ІЕЗ ім. Є.О Патона.

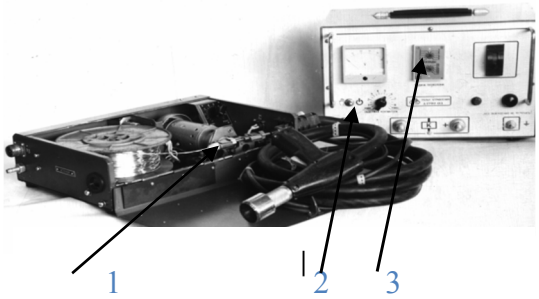


Рис. 2. Напівавтомат с комбінацією імпульсної подачі та модулювання режимів зварювання: 1-механізм імпульсної подачі; 2- блок управління: 3 -модулятор режимів

Приведені вище алгоритми сумісного функціонування джерела живлення дуги та системи подачі електрода найбільш прості і дієві.

В розробках зварювального обладнання багатьох закордонних виробників (KEMPPY, FRONIUS та інші) є рішення з використанням інших способів сумісної роботи джерела та системи подачі, пов'язані певними структурами зворотних зв'язків і направлених на ефективний вплив в процесі формування та переносу електродного металу і це достатньо широко відзначено в роботі [2].

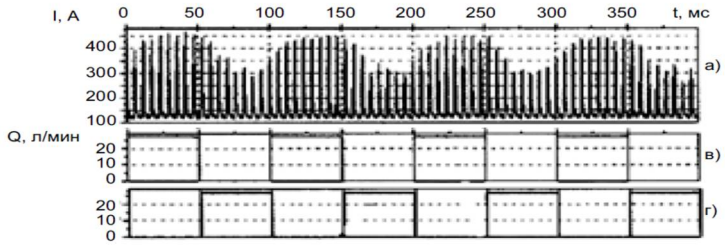


Рис.3 Осцилограми імпульсно – дугового процесу зварювання плавким електродом з імпульсним чередуванням захисних газів: а) струм зварювання; в) подача аргону; г) подача гелію

Слід згадати роботи ІЕЗ ім. Є.О Патона [3] в яких здійснюється суміжна робота системи керування подачею захисного газу та джерела зварювального струму. Розглядаються два варіанти реалізації цього виду зварювання. Це використання одного типу газу та більш цікаве чередування подачі двох видів газів. На рис. 3 представлені осцилограми процесу зварювання сплавів алюмінію з залученням комбінованої дії. Результати у вигляді швів показані на рис. 4. Цей спосіб досить ефективний, але є проблеми з формуванням імпульсів подачі газу.

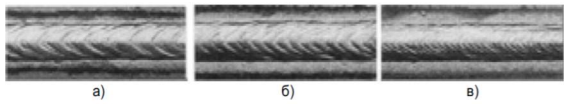


Рис.4 Вид швов при наплавке алюминиевого сплава при различной частоте попеременной импульсной подачи защитных газов аргона и гелия: а) 5 Гц; б) 10 Гц; в 20 Гц

Важливу роль відіграють різні по конструкції та напрямку дії засоби генерування електромагнітних полів як суміжні дії, що сприяють покращенню процесу переносу електродного металу, перемішуванню ванни розплавленого металу з ефектом подрібнення кристалітів і поліпшенню якості наплавленого металу.

Цікавими для розробників та користувачів є розробки які для досягнення нового рівня результатів використовують різні допоміжні механічні, електромеханічні системи що здійснюють коливання зварювального інструменту та коливання ванни. Так нами

запропонований і практично реалізований спосіб та комплекс обладнання для наплавлення та зварювання з механічним керованим поперечними щодо направлення руху електрода коливанням ванни розплавленого металу. Експериментальні дослідження цієї розробки довели її ефективність по ряду показників в тому числі підвищенню механічних якостей наплавленого шару та продуктивності роботи.

Дуже цікавою є розробка системи комбінованого впливу на дуговий процес високочастотних коливань (кГц) електродного дроту з вираженими результатами щодо зменшення втрат електродного металу на розбризкування і покращенню якості металу шва.

Особливу категорію здійснення комбінованого впливу на дуговий процес є рішення з використанням декількох різних джерел нагріву. Це насамперед рішення які пов'язані з стороннім додатковим нагрівом електродного дроту та виробу, який зварюється чи наплавляється.

Слід особливо виділити ті технологічні процеси дугового зварювання та наплавлення, в яких використовуються різні комбінації джерел допоміжного тепла, яке вводиться в металеву ванну.

Можна привести декілька важливих прикладів. Є техніко - технологічні варіанти з певними особливостями реалізації способу наплавлення плазма-МІГ з застосуванням плазмової дуги та електроду який плавиться. В одному з рішень цього процесу плазмова дуга очищає поверхню деталі від оксиді, іонізований газ стабілізує характер плавлення електроду, яке протікає при меншій густині струму, а, відповідно, при меншому тиску дуги. При цьому знижується проплавлення, зменшується перегрів крапель та випар компонентів електродного металу, який наплавляється.

Але серед всіх розробок в цьому напрямку виділяється іі отримує розповсюдження в певних галузях ефективний спосіб зварювання, який використовує гібридний лазерно – дуговий процес [4] з різними варіантами виконання. Лазерно – дугове зварювання може за один прохід зварювати деталі товщиною 15 мм і більше без підготовки кромок, при цьому забезпечується якісне проплавлення. Швидкість цього способу в 3 – 4 рази вища ніж при використанні звичайного дугового зварювання. Процес може забезпечити регулювання термічного циклу. Всі вказані можливості є основними перевагами лазерно – дугового зварювання та являються одним з найбільш перспективних технологій зварювання товстостінних конструкцій

Розглянуто тільки частина обладнання та процеси які вже відомі і частково набули розповсюдження, але є таки про яких тут не згадано. У всякому разі можна констату- вати, що використання в сфері зварювання та наплавлення суміщених рішень можуть забезпечити досить суттєві результати. Проблема тут є і в створенні та ефективному використанню відповідного обладнання.

Важливо відмітити, що введення в технологічні процеси зварювання та наплавлення допоміжних впливів та суміщення операцій завжди потребує підвищення витрат. Крім цього слід мати на увазі, що згадані нововведення пов'язані з новими поглядами на системи керування та регулювання тому, розширюється число керованих параметрів.

Література

1. Патон Б.Е., Лебедев В.А., Пичак В.Г., Полосков С.И., Щавелев Л.Н. Анализ технических и технологических возможностей импульсной подачи электродной проволоки в процессах дуговой сварки и наплавки // Сварочное производство -2002 .-№ 2.– С.24-31.

2. Лебедев В.А. Тенденции развития механизированной сварки с управляемым переносом электродного металла (Обзор) //Автомат. Сварка.-2010. №10. С45-53.

3. Жерносеков А. М., Сидорец В. Н., Шевчук С. А. — Комбинированное импульсное воздействие защитных газов и сварочного тока при сварке плавящимся электродом //Сварочное производство. - 2013. - № 12. – С. 9 - 13.

4. Шелягин В. Д. Тенденции развития лазерно-дуговой сварки / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин // Автоматическая сварка. – 2002. – № 6. – С. 28–32.

УДК 621.791.
В. Лебедєв, д.т.н., проф.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона ім. Є.О. Патона НАН України

ЕЛЕКТРОДУГОВЕ МЕХАНІЗОВАНЕ ЗВАРЮВАННЯ В ПОЛОЖЕННЯХ ВІДМІННИХ ВІД НИЖНЬОГО

V. Lebedev, Dr., Prof.
E.O. Paton Electric Welding Institute, Ukraine

ELECTRIC ARC MECHANIZED IN THE POSITION OF THE VIEW OF THE LOWER

Abstract. In the material, the need to improve the results of welding and welding in the positions of the lower windings is indicated, and when there are problems with the shaping of the seams. It is shown that the electric arc process with varying pulsed modes of spraying allows for a complete molding of seams. Reinforced, molding of seams and welded balls with a used new system of dosed supply, which is effective for solving the tasks of yoke molding of seams.

Механізоване електродугове зварювання та наплавлення електродним дротом який плавиться є одним з поширених при виконанні з'єднання металів, забезпечення відновлення та зміцнення робочих поверхонь машин та механізмів.

Необхідність застосування механізованого зварювання в положеннях відмінних від нижнього зустрічається досить часто при виконанні робіт по створенню нових об'єктів та при ремонтних роботах. Але на відміну від зварювання в нижньому положенні цей вид зварювання має деякі особливості в формуванні шву та наплавленого шару. Це насамперед стосується процесів зварювання та наплавлення горизонтальних швів та валиків на вертикальній площині. При звичайному зварюванні на продуктивних режимах, які обґрунтовані економічно, дуже часто спостерігається погане формування швів з стіканням розплавленого металу. При виконанні вертикальних швів на вертикальній площині запобігти цього явища частково можна маніпулюючи держаком.

а б
Рис.1. Валики, наплавлені на вертикалі: а- з імпульсом; б - без імпульсу

Найбільш вагомий результат можна отримати застосовуючи при зваренні та наплавленні модульовані та імпульсні режими роботи обладнання з керуванням параметрів процесу. На рис. 1 для порівняння показані валики, наплавлені вертикально на вертикальній площини з використанням імпульсної подачі суцільного електрода і без імпульсної подачі при застосуванні однакових по інтегральному значенні режимів. Результат може бути отриманий при застосуванні суцільного та порошкового електродних дротів.

1 2 3
Рис. 2. Наплавка на вертикальну площину під водою 1 – без модуляции; 2, 3 з модуляцією в різних напрямках ведення

Вплив на процес зварювання під водою модульованого режиму демонструє рис. 2. Тут треба

зазначити важливість направлення ведення процесу зварювання при виконанні робіт на вертикальній площині.

Слід відзначити застосування імпульсної подачі спеціального порошкового електродного дроту при зварюванні сталей в водному середовищі мокрим способом в положеннях відмінних від нижнього з досить хорошим формуванням [1].

Суттєвого ефекту в напрямку керування формуванням швів в різних просторових положеннях можна досягнути при використанні нової системи управління з дозованою подачею електродного дроту, яка детально описана в роботі [2] і є суттєво вдосконаленим варіантом імпульсної подачі.

Проводився цикл експериментальних досліджень з метою вивчення впливу процесу с дозованою подачею порошкового дроту спеціального складу на формування швів в положеннях відмінних від нижнього. Фрагмент цих порівняльних досліджень у вигляді валиків наплавлених в автоматичному режимі горизонтально на вертикальній площини представлено на рис. 3. При цьому був використаний порошковий дріт діаметром 1,6 мм на режимах: струм 200…220 А, напруга 28 В. Тут треба особливо підкреслити що на цьому продуктивному режимі можна забезпечити якісне формування валиків без стікань та скидання крапель рідкого металу на відміну с цим явищем при використанні звичайного режиму. Збільшення параметрів режиму може привести до стікання металу ванни. Очевидно існує деяке граничне значення струму при якому ванна утримується на вертикальній площині і для процесу с дозованим імпульсним подаванням електроду. Цей аспект зварювання та наплавлення потребує подальшого вивчення для подальшого вдосконалення обладнання та технології зварювання та наплавлення в звичайних умовах та в водному середовищі.

1

2

Рис.3. Горизонтальні валики, наплавлені на вертикальну площину самозахистним електродним дротом: 1- звичайним способом; з дозованою подачею електродного дроту

Слід додатково підкреслити важливість застосування модульованих та імпульсних режимів функціонування сучасного механізованого обладнання для підвищення ефективності зварювання та наплавлення і не тільки при управлінні формуванням швів та наплавлених шарів в різних просторових положеннях, але і для покращення структури металу шва та інше.

Здійснення керування параметрами подачі електродного дроту в тому числі з урахуванням режиму процесу зварювання за рахунок зворотних зв’язків як це вирішенр в обладнанні з дозованою подачею, а також можливість організації сумісної роботи з джерелом живлення дуги це перспективне рішення яке має широкий спектр застосування і подальший розвиток.

Література.

1. В.А. Лебедев Решение проблем подводной механизированной и автоматической дуговой сварки различных металлоконструкций мокрым способом. // Підводні технології 2021 №11. С.46 – 55.

2. Лебедев, В.А., Жук Г.В. Система управления дозированной подачей электродной проволоки при механизированной электродуговой сварке // Електротехнічні та комп’ютерні системи. 2018. №28. С. 79-87.

УДК 621.791.92.03.-52
В. Лебедєв, д.т.н., проф.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона ім. Є.О. Патона НАН України

ЕЛЕКТРОДУГОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ ПОРОШКОВОЮ ЕЛЕКТРОДНОЮ СТРІЧКОЮ З ІМПУЛЬСНОЮ ПОДАЧЕЮ

V. Lebedev, Dr., Prof.
E.O. Paton Electric Welding Institute, Ukraine

ELECTRIC ARC SURFACING WITH POWDER ELECTRODE TAPE WITH PULSE FEED

Abstract. In the modern conditions of operation of machines and mechanisms, it is of great importance not only to ensure their certain mechanical characteristics during welding and surfacing to restore surface strengthening, but also to ensure minimum consumption of active materials and electricity at high performance indicators. In a number of cases, this can ensure the use of electrode powder tape processes. A new mechanism for feeding the tape in pulse mode has been developed; in the experiments, some features of electric arc welding with the pulse character of the motion of the tape electrode have been determined

Процеси відновлення та зміцнення вузлів та деталей різних машин та механізмів в різних галузях їх застосування з використанням електродугових методів наплавки є достатньо поширеними. Все це дає певні підстави для удосконалення цього процесу як з метою економії матеріалів та і енергетичних ресурсів та використання все більш досконалої техніки, яка крім усього забезпечує потрібні умови праці.

В залежності від того який результат треба отримати і в яких умовах відбувається процес застосовують різні способи електродугового наплавлення з використанням різних електродних матеріалів. Це може бути спеціальні марки суцільних та порошкових електродних дротів та стрічкові електроди. Крім цього. запропоновано та використовуються ряд допоміжних впливів на процес наплавлення [1] з метою здійснення керування переносом електродного металу та впливу на формування ванни. Це керована зміна алгоритмів роботи систем відповідного обладнання для зварювання та наплавлення з отриманням імпульсних та модульованих режимів дугового процесу. Використання допоміжних способів впливу є також перспективним напрямком в удосконаленні техніки та технології наплавлення.з одержанням бажаного результату. У цьому напрямку можна згадати використання магнітних полів, коливання ванни розплавленого металу, тощо.

Використання для електродугового наплавлення стрічкового електроду забезпечує підвищений рівень продуктивності особливо при наплавленні достатньо великих по площі поверхонь. Основні напрямки покращення результатів використання цього процесу це розробка більш ефективних електродних матеріалів та все більш ефективне використання дії магнітних полів [2].

Існуючий досвід використання імпульсних впливів на процеси зварювання та наплавлення від систем відповідного обладнання (джерело живлення дуги, система подачі електродного дроту) та при застосуванні магнітних полів при процесах з суцільними та порошковими дротами з отриманням високих результатів в формуванні швів та валиків, покращенні структури металу дав підстави для пошукової роботи, пов’язаної з застосуванням імпульсної подачі порошкової стрічки, як способу покращення результатів процесу наплавлення.

Наскільки нам відомо, електродуговий процес з застосуванням електродної стрічки з керованою імпульсною подачею раніше іншими дослідниками не вивчався на системній основі.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України було розроблено декілька варіантів безредукторних механізмів подачі стрічкового електрода з можливістю роботи в комплекті з комп'ютерізованим вентильним електроприводом з можливістю забезпечити любий алгоритм руху електрода. Один з найбільш простих і вдалих механізмів представлений на рис.1. Він може працювати у складі автоматичного

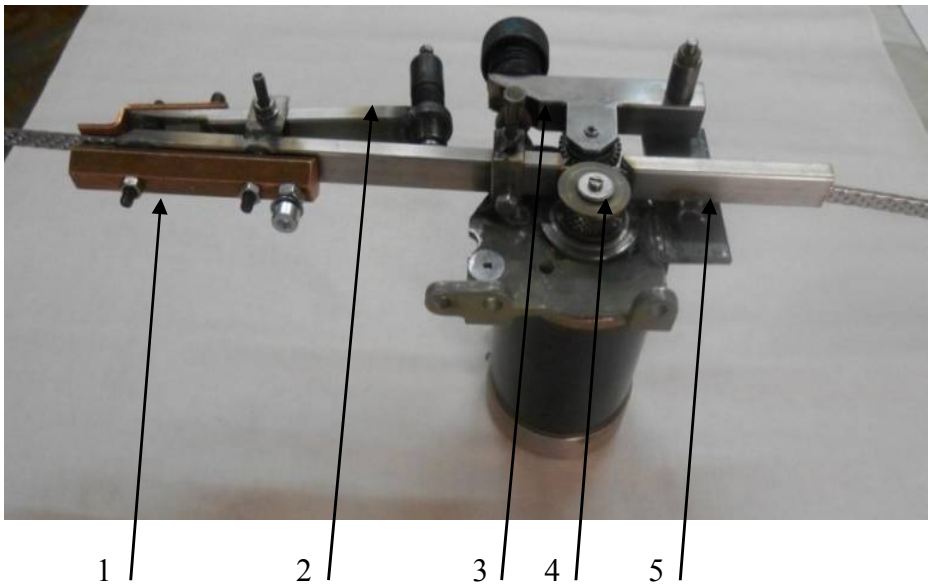


Рис. 1 Механізм імпульснї подачі порошкової електродної стрічки: 1- вузол струмопідводу; 2 – вузол притискання стрічки до струмопідводу; 3- вузол притискання ролика до стрічки; 4 - ролик. який подає; 5 – вузол для направлення стрічки

обладнання для зварювання та наплавлення.

Ролики для такого комплекту також мають відмінність від звичайної роликів. Їх ефективність і ефективність всього механізму подачі при імпульсній подачі з досить значними прискореннями в русі підтверджена при випробуваннях і пробній експлуатації при наплавленні вузлів бил розмольного обладнання. На рис. 2 представлений ролик для подачі стрічкового електроду в імпульсному режимі.

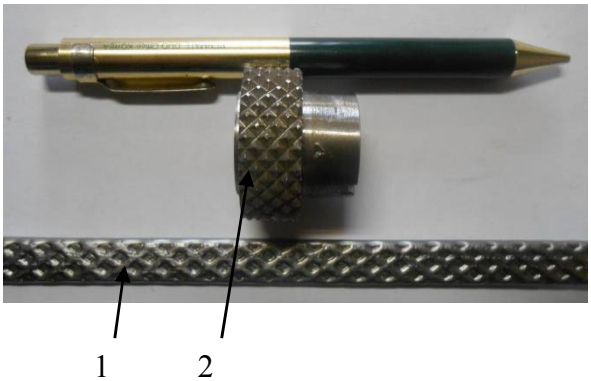


Рис. 2 Ролик механізму подачі стрічки: 1- порошкова стрічка; 2 – ролик з спеціальною поверхнею

Звичайно таким механізмом можна подавати електродну стрічку обмежених розмірів.

В експериментальних дослідженнях застосовувався стрічковий порошковий електрод шириною в діапазоні 10…16 мм.

При наплавленні встановлювалися частоти подачі до 20 Гц. При цьому був отриманий стабільний дуговий процес з хорошим періодичнім формуванням наплавленого валика. На рис. 3 показанні в якісному вигляді осцилограми процесу наплавлення стрічкою

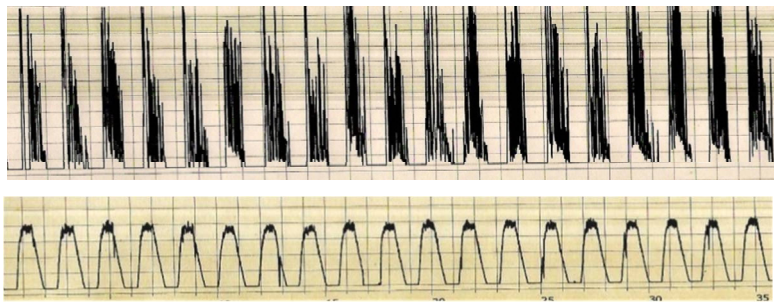


Рис. 3. Осцилограми струму (вверху) та швидкості імпульсної подачі (внизу) при дуговому процесі з стрічковим електродом.

По осцилограмах можна зазначити, що процес в цілому стабільний і відповідає дії імпульсів подачі.
Хаотичний характер струму в імпульсі подачі є наслідком особливостей горіння дуги при застосуванні стрічкового електроду – дуга переміщується по всьому торцю електрода, що зокрема. позначено в роботі [3]. В підсумку ми вважаємо що в при дії імпульсу перенесення електродного металу відбувається крапельним шляхом, а розмір каплі можна регулювати вибором параметрів імпульсного впливу: частота, шпаруватість, струм.

Результати вивчення макроструктур наплавленого шару з використанням імпульсної подачі в порівнянні з звичайним режимом подачі дозволяє встановити суттєву знижку в глибини проплавлення в (1.2 – 1.5 рази) в першому випадку при однакових інтегральних значеннях енергетичних характеристик дугового процесу. Це дуже важливий висновок, що дозволяє отримати міцний захисний шар без змішування металів електроду та деталі яка наплавляється.

Зроблені попередні висновки щодо підвищення продуктивності наплавки з імпульсною подачею стрічкового електрода.

Можна зазначити, що використання керованої імпульсної подачі стрічкового електрода має по тенденції такі ж самі характеристики як інші типи електродів, зокрема порошкових, які використовуються при механізованих процесах електродугового зварювання та наплавлення, але зі своєю специфікою щодо впливу параметрів імпульсного руху електродної стрічки.

Література.

1. Лебедев В.А. Обеспечение качества сварных соединений и наплавленных слоёв при механизированных дуговых процессах //Наукоёмкие технологи в машиностроении. 2015. №8. С.11-16.

2. Размышляев А. Д. Магнитное управление формированием швов при дуговой сварке / А. Д. Размышляев – Мариуполь: ПГТУ, 2000. – 245 с.

3. Гулаков С.В., Бурлака В.В., Псарева И.С., Кулябина А.Н. Совершенствование технологи дуговой наплавки ленточным электродом //ВІСНИК ПРИАЗОВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ, 2010, Вип. №20, С.176-180

УДК 621.326
М. Яворська, к.т.н., доц., Т. Дубиняк, к.т.н., доц., В. Невожай, М. Пошивак
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ТЕСТУВАННЯ РОЗРАХОВАНОГО КАСКАДУ МОСТОВОГО ВИПРЯМЛЯЧА В СИСТЕМІ MICROCAP-8

M. Yavorska Ph.D, Assoc.Prof., T. Dubyniak Ph.D, Assoc.Prof., V. Nevogay, M. Poshyvak
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

TESTING THE CALCULATED BRIDGE RECTIFIER CASCADE IN THE MICROCAP-8 SYSTEM

Підбір параметрів електричної схеми заданого призначення за безпосередніми розрахунками носить наближений характер, оскільки отримані значення номінальних параметрів заокруглюються до найближчого стандартного номінального значення за рядом Е6 ГОСТ 28884-90. Альтернативою подальшого налаштовування схеми, реалізованої за розрахованими компонентами, є попереднє дослідження процесу, що в ній відбувається, на математичній моделі. Система проектування електронних кіл MicroCap дозволяє створювати і аналізувати математичну модель електронної схеми у вигляді рівнянь стану на основі її графічного представлення. Так на рис. 1 показано відтворену в графічному редакторі системи схему двопівперіодного мостового випрямляча.

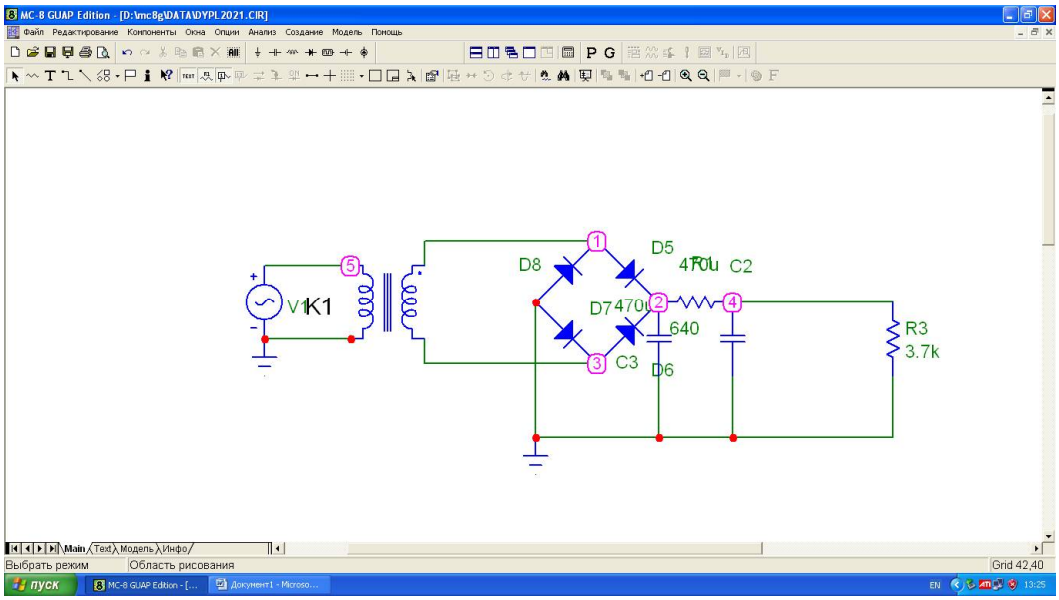


Рис.1 Схема двопівперіодного мостового випрямляча, відтворена в графічному редакторі системи MicroCap-8

Орієнтовні номінали елементів схеми задаються в процесі набору. Параметри заступної схеми напівпровідникових діодів знаходимо в бібліотеці компонент системи. Основою для аналізу схеми по змінному струму є її математична модель у вигляді системи диференційних рівнянь шостого порядку, а результати моделювання отримують із чисельного інтегрування цієї системи. На рис.2 приведено отримані в

результаті моделювання напругу живлення, напругу на виході двопівперіодного діодного моста та вихідну напруга каскаду, а на рис. 3 –його вихідну потужність.

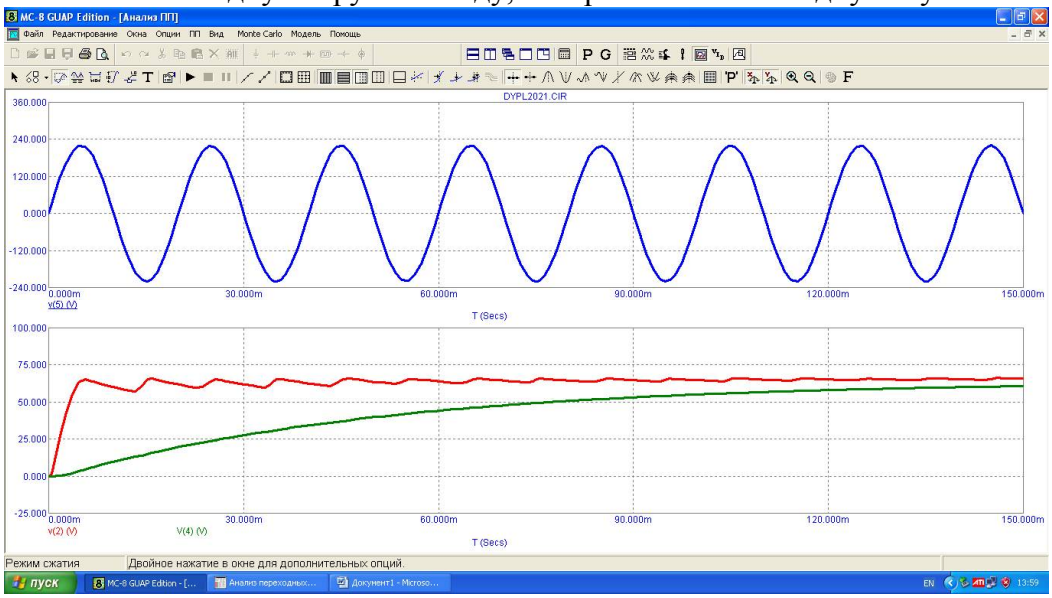


Рис. 2 Напруга живлення (синім), напруга на виході двопівперіодного діодного моста (червоним) і вихідна напруга (зеленим)

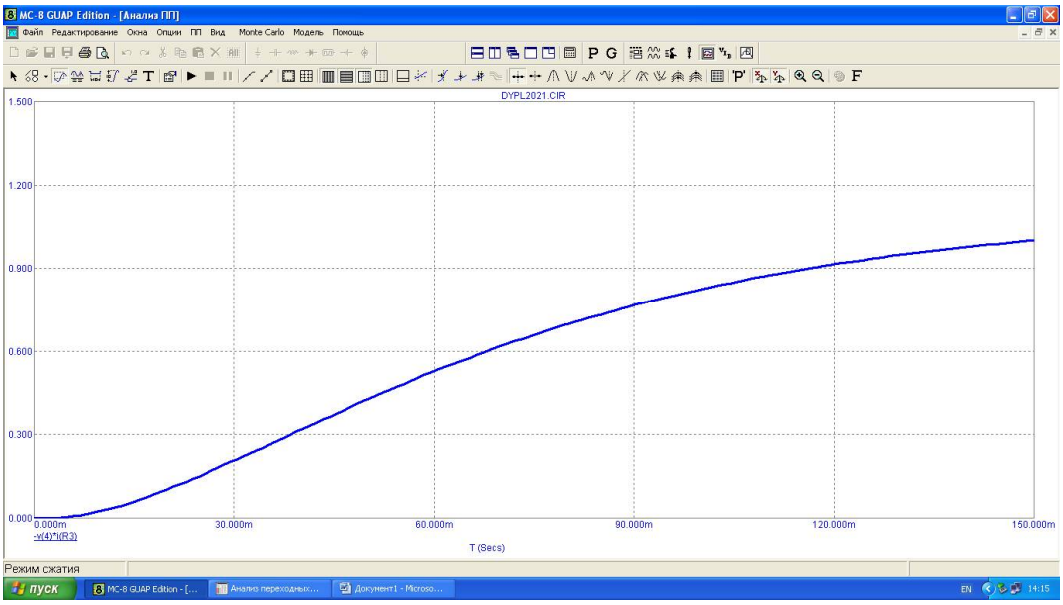


Рис. 3 Вихідна потужність каскаду

Для покращення якості випрямлення (див. на рис. 4 отримані в системі в результаті Фур'є – розкладу спектральні характеристики сигналу на виході двопівперіодного моста) проведено налаштування параметрів згладжуючої ланки в режимі багато варіантного аналізу.

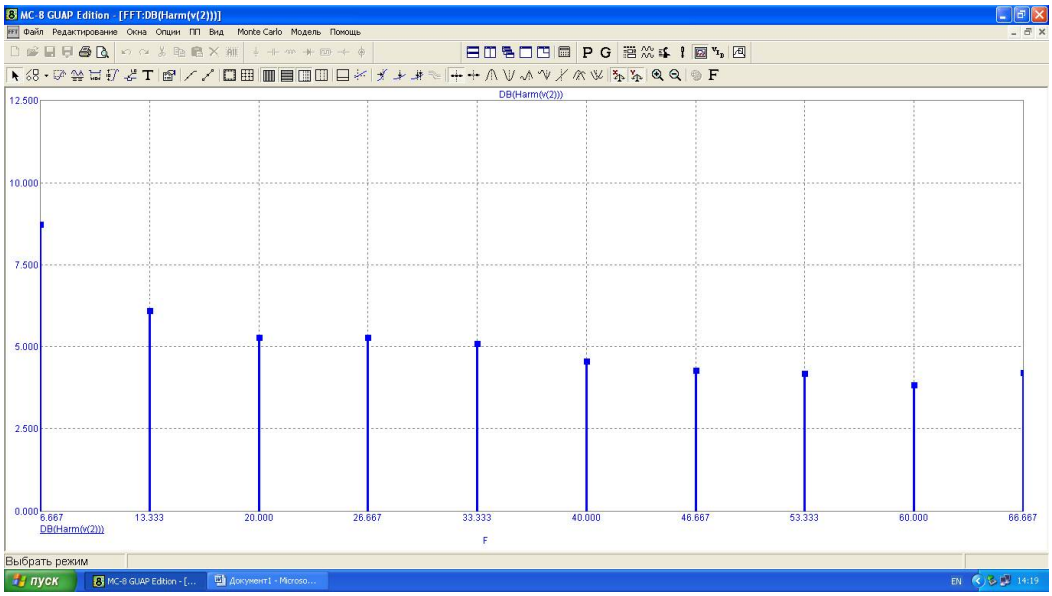


Рис. 4 Спектральні характеристики сигналу на виході діодного моста

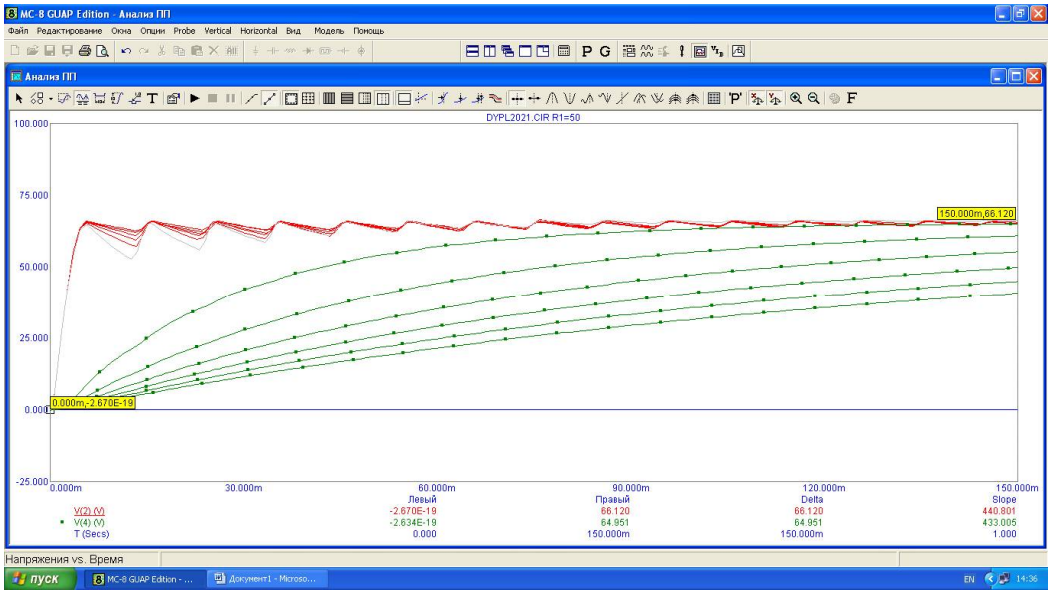


Рис. 4 Зміна напруги на виході діодного моста і на виході каскаду при різних параметрах згладжуючої ланки

Отже система MicroCap є дієвим інструментом як для дослідження впливу окремих компонент, так і для вибору оптимального режиму роботи електронної схеми в цілому.

Література

1 Колкер Я.Д. Математический анализ точности механической обработки деталей. - Киев: Техніка, 1976. - 200 с.

2. Електричні вимірювання електричних та неелектричних величин / Під ред. Е.С. Поліщука.-К.:Вища школа,1978.-352 с.

3. Зайцев Д.А. Математичні моделі дискретних систем: Навчальний посібник // Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2004. – 40 с.

4. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / Підручник за загальною редакцію В.В. Поповського. – Харків, ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 564 с.

УДК 621.762.3

М. Прокопів[1]к.т.н., с.н.с., О. Харченко[1], к.т.н., Г. Крамар[2], к.т.н., доц., Л. Бодрова[2], к.т.н., доц., Ю. Ущаповський[1], заст. директора, Г. Кисла[3], к.т.н.
[1]Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Україна
[2]Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна
[3]ПрАТ "ПлазмаТек", Україна

ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ПРИРОСТУ ТИСКУ ГАЗУ ПРИ ВАКУУМНО-КОМПРЕСІЙНОМУ СПІКАННІ НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДОГО СПЛАВУ ВК6М

M.M. Prokopiv Ph.D., Sen.Sc. O.V. Kharchenko, Ph.D., H.M.Kramar, Ph.D., Assoc.Prof., L.G.Bodrova Ph.D., Assoc.Prof., Yu.P. Ushchapovskii, Dep.Director, H.P.Kysla, Ph.D.
[1] V. Bakul Institute for Superhard Materials, Ukraine,
[2] Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine,
[3] Private joint-stock company " PlasmaTec", Ukraine

THE EFFECT OF THE GAS PRESSURE INCREASE RATE DURING VACUUM-COMPRESSION SINTERING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF FINE GRAIN WC-6Co HARD ALLOY

Abstract. The effect of 0.08, 0.2, and 0.5 MPa/min gas pressure increase rates up to 5.0 MPa during vacuum-compression sintering on the structure and properties of fine grain WC-6Co hard alloy was studied. A positive effect of the gas pressure increase rate increase on the transverse rupture strength and service stability during turning of Steel SAE 1045 due to the reduction of residual microporosity and the intensity of gas desorption was determined.

Вступ. Технологія спікання під тиском газу до 10 МПа дозволяє одержувати висококонкурентні за критерієм «якість-ціна» вироби із вольфрамокобальтових твердих сплавів, особливо з дрібним зерном і низьким вмістом металевої зв'язки [1, 2]. Так, спікання твердого сплаву марки ВК6 під тиском газу 2, 5 і 8 МПа дозволило за рахунок зниження рівня залишкової мікропористості підвищити границю міцності на вигин з 2000 МПа до 2400, 2790 та 2850 МПа відповідно порівняно з вільним спіканням [1].

Технологічний режим спікання в сучасних промислових печах, незалежно від виробника, ідентичний режиму спікання сплаву марки ВК10 в печі фірми "ALD Vacuum Technologies GmBH" (Німеччина) (рис. 1.) [3].

Рис. 1. Режим вакуумно-компресійного спікання під тиском газу до 10 МПа в печі фірми "ALD Vacuum Technologies GmBH" (Німеччина) [3].

Автори докладно описують стадію вакуумного спікання, а також температуру і тривалість ізотермічного витримування кінцевої стадії спікання під тиском аргону 5 МПа (лінія 1). Натомість, параметри стадій напускання газу (лінія 2) та охолодження (лінія 3)

показано схематично вертикальними лініями. Тому різні значення фізико-механічних властивостей твердих сплавів однієї і тієї ж групи, одержані різними дослідниками [1-4], можуть бути наслідком неоднакових значень параметрів на цих стадіях, зокрема, швидкості збільшення тиску газу під час його напускання.

Позитивний вплив тиску газу до 3,0 МПа на властивості різних груп твердих сплавів було встановлено також в [5-7]. При цьому показано [6], що при підвищенні тиску до 5,0 МПа їх міцність зменшилася майже до рівня міцності сплавів після вакуумному спіканні, хоча залишкова мікропористість зменшилася з А2-02 до А1-02, а середній розмір зерен WC збільшився в 1,5 разів. Як відомо, такі зміни у структурі твердих сплавів під час спікання повинні позитивно впливати на міцність. Особливо суттєво (в 1,7 рази) зменшилася експлуатаційна стійкість при чорновому точінні Сталі 45 в умовах ударних навантажень.

Одержані результати автори пояснюють довготривалим (90 хв) ізотермічним витримуванням при температурі спікання внаслідок повільної швидкості приросту тиску газу під час його напускання (0,08 МПа/хв), а також збільшенням кількості абсорбованих в об'ємі зразка газів при підвищенні тиску під час спікання.

Таким чином, суперечлива інформація щодо впливу швидкості приросту тиску газу на структуру і властивості твердих сплавів унеможливлює його ефективне застосування для одержання сплавів високої якості.

Метою роботи є встановлення закономірностей впливу швидкості приросту тиску газу при вакуумно-компресійному спіканні на структуру і властивості дрібнозернистого твердого сплаву ВК6М.

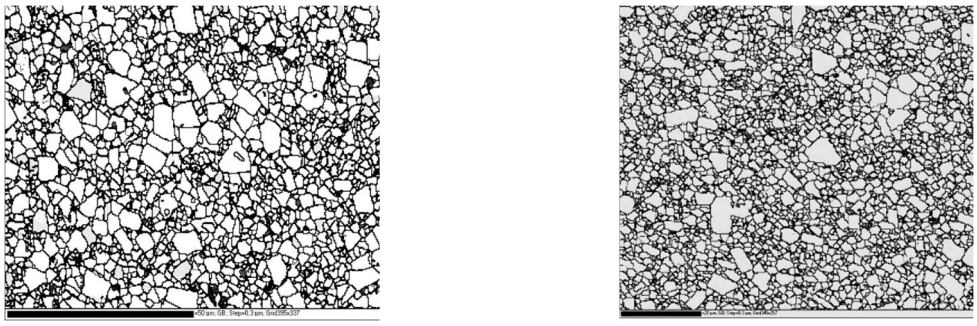
Матеріали і методи.

Зразки для дослідження виготовляли із стандартної дрібнозернистої суміші ВК6М. Спікання проводили на удосконаленій в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля НАН України установці, яка забезпечує робочий тиск 5,0 МПа і швидкість його приросту до 0,5 МПа/хв. Зразки спікали при швидкостях приросту тиску газу 0,08, 0,2 і 0,5 МПа/хв. В якості робочого газу використовували аргон.

Мас-спектри газової фази досліджували на мас-спектрометрі МХ 7304А виробництва фірми "Селмі" (м. Суми, Україна) за співвідношенням маси до заряду (m/z) в інтервалі 10 – 60 за методикою [8]. Мікроструктуру і залишкову мікропористість сплавів досліджували методом металографічного аналізу. Гранулометричний склад визначали за допомогою РЕМ методом Кікучі. Границю міцності на вигин визначали методом трьохточкового вигину за стандартною методикою. Експлуатаційну стійкість досліджували при чорновому точінні Сталі 45.

Результати дослідження.

На рис. 2 подано мікроструктури сплаву ВК6М з виділеними границями WC-WC і WC-Co, отримані при різних швидкостях приросту тиску газу.



а) б)

Рис. 2. Мікроструктури сплаву ВК6М, одержані під тиском аргону 5,0 МПа швидкістю його приросту 0,08 (а) і 0,5 МПа/хв (б).

Встановлено, що із зростанням швидкості приросту газу розмір карбідних зерен суттєво зменшується – з 1,81 мкм до 1,24 мкм. Також зменшується залишкова мікропористість – з А2-02 до А1-02.

На рис. 3 подано термодесорбційні спектри іонів однієї із п'яти груп газів із співвідношенням m/z 18, які спікалися з різними швидкостями приросту тиску газу.

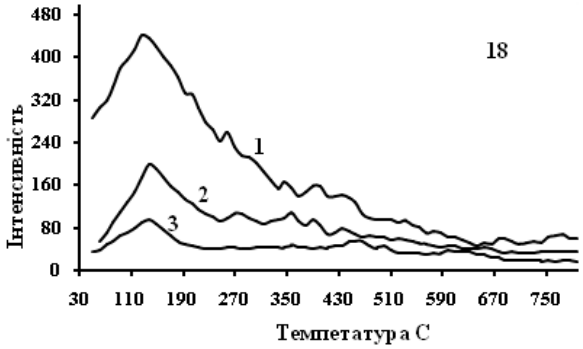


Рис. 3. Термодесорбційні спектри іонів із співвідношенням 18 m/z. Зразки спечених під тиском газу 5,0 МПа із швидкістю приросту тиску газу 0,08 (1), 0,2 (2), 0,5 (МПа/хв) (3).

Як видно з рис. 3, із збільшенням приросту тиску газу в інтервалі 0,08–0,5 МПа/хв максимальна інтенсивність десорбції приведеної групи зменшується в понад 5 разів. Різницю інтенсивності десорбції залежно від швидкості приросту тиску спостерігали і для інших чотирьох груп газів.

Таким чином, у процесі стікання твердого сплаву під тиском аргону до 5 МПа кількість газу, що проникає в об'єм зразка, суттєво залежить від швидкості його приросту. Встановлено, що при спіканні під тиском до 5,0 МПа аргону сплаву ВК6М мінімальний середній розмір карбідного зерна складає 1,24 мкм, мінімальний рівень залишкової мікропористості структури – А1 01, максимальна границя міцності при вигині R_{bm}= 2490 МПа і максимальна стійкість при точінні Сталі 45 в умовах ударних навантажень досягається за умови максимального в інтервалі 0,08 – 0,5 МПа/хв приросту тиску газу після стадії вакуумного спікання.

Література.

1.Kolaska H., Dreyer K., Schaaf G. Use of the combined sintering HIP process in the production of hard metals and ceramic // pmi. – 1989. – V. 21, № 1. – P. 22 – 28.

2. Bauer R., Schulten R. Retrospection on the development of Sbmter HIP furnaces. // Modern Hardmetals Proc.:.– K.: V.N. Bakul ISM NAS Ukraine, 2008.– P. 133 – 141.

3. Chen H., Zwang D., Li Y., Chen J. High performance sinter – HIP for hard metals // Proc. of the 15 Plansee seminar, Reutte, Austria. - Plansee, 2001, Reutte.– V.2. - P. 180 – 188.

4. Missol W., Karwata T., Krajzel J., Bujok J. Comparison of the properties of ultrafine and conventional hardmetals // Proc. of the 1998 PM World Congress, V 4, Spain, October 18 – 22, 1998. - P. 152 – 157.

5. Прокопів М.М., Харченко О.В., Сердюк Ю.Д. Структура твердих сплавів групи WC–Co після спікання у газовому середовищі // Сверхтвердые материалы. – 2010. – № 2 – С. 96–98.

6. Прокопів М.М., Бондаренко В.П., Харченко О.В., Цап И.В. Вплив умов спікання сплаву ВК10 ОМ на кінетику й механізми зносу його в умовах чистового й ударного точіння // Матер. Наук.-техн. конф. «Інтерпартнер 2008». – 2008. – С. 312–327.

7. Kramar H. Thermal compression treatment of WC-Co and TiC-VC-NbC-WC-Ni-Cr Hard alloys /H. M. Kramar, L. H. Bodrova, M. M. Prokopiv, S. Yu. Marynenko // Proc. of the 18 Plansee seminar, Reutte, Austria. - Plansee, 2013, Reutte. - P. 146-152.

8. Loed K. B. The kinetic theory of gases. Dover Publications, NewYork, 1961.

УДК 539.3

О. Ясній [1,2], д.т.н., проф., В. Ясній [1], д.т.н., доц., Г. Сулим [3], д.ф.-м.н., проф., Я. Пастернак [4], д.ф.-м.н., проф., В. Демчик[1]

[1] Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, Україна

[2] Краківський технологічний університет, Польща

[3] Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України

[4] Волинський національний університет імені Лесі Українки, Україна

МОДЕЛІ ГІСТЕРЕЗИСНОЇ ПОВЕДІНКИ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ

O. Yasniy[1,2], D.Sc, Prof.; V. Iasnii[1], D.Sc, Assoc. Prof.; H. Sulym[3], D.Sc, Prof., Ia. Pasternak[4], D.Sc, Prof., V. Demchyk[1]

[1] Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

[2] Cracow University of Technology, Poland

[3] Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics of NAS of Ukraine

[4] Lesya Ukrainka Volyn National University, Ukraine

MODELS OF HYSTERETIC BEHAVIOR OF SHAPE-MEMORY MATERIALS

Abstract. Shape memory alloys (SMA) are metallic alloys that can retain their initial form by memorising it between two transformation phases. Whilst loading such materials, the hysteresis loops are observed. There was proposed the model to describe the hysteresis loops of SMA wires, based on experimental stress strain diagram. The proposed model uses the least squares method. The applied approach shows good agreement with the empirical data.

Сплави з пам'яттю форми (СПФ) користуються великою популярністю з огляду на їхній унікальний ефект пам'яті форми і псевдопружність, спричинені аустенітно-мартенситним перетворенням [1]. Відомо багато видів СПФ, проте NiTi сплав найбільш розповсюджений через його стабільні властивості [2]. СПФ широко застосовують у медицині, [3], аерокосмічній галузі [4], виробництві двигунів [5], цивільному будівництві [6], та ін.

Для прогнозування поведінки сучасних функціональних матеріалів та зменшення кількості експериментальних досліджень, зазвичай, будують їхні описові математичні моделі, що дають можливість подальшого розрахунку зразків при різних умовах їхньої роботи, зокрема і за повторюваних навантажень. Проте без експериментальних даних вже ж у жодному разі не можна обійтися, адже будь-яка математична модель містить певні сталі, що характеризують фізико-механічні властивості матеріалу за конкретних зовнішніх умов.

У процесі експериментальних досліджень кривих деформування зразків при однократному навантажуванні з'ясовано, що вони мають характер, властивий для пружно-пластичного деформування матеріалу зі зміцненням. Візуально встановлено, що криву деформування можна апроксимувати двома прямими відрізками за формулою

$$\sigma = \begin{cases} E_1\varepsilon, & \sigma < \sigma_{pl} \\ E_2\varepsilon + \left(1 - E_2/E_1\right)\sigma_{pl}, & \sigma \geq \sigma_{pl}. \end{cases} \qquad (1)$$

тут E_1, E_2 – сталі модулі матеріалу; σ_{pl} – напруження, за яких відбувається зміна характеру кривої навантажування.

Математично очевидно, що параметри E_1, E_2 можна визначити із (1) як похідну

$$E_i = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}, \tag{2}$$

але у випадку набору експериментальних даних числове обчислення (2) має дуже малу точність унаслідок похибки визначення контрольованих величин у кожній із експериментальних точок кривої деформування. Тому у цьому дослідженні для обчислення параметрів залежності (1) запропоновано підхід, що полягає в апроксимації експериментальних даних залежністю (1) за допомогою методу найменших квадратів.

Для цього складемо функціонал квадратів відхилень у вигляді

$$F = \sum_{i=1}^{m} \left(E_1 \varepsilon_i - \sigma_i \right)^2 + \sum_{i=m+1}^{N} \left(E_2 \left(\varepsilon_i - \varepsilon_m \right) + E_1 \varepsilon_m - \sigma_i \right)^2. \tag{3}$$

Тут N – кількість екпериментально визначених точок кривої навантажування; $1 < m < N$ – проміжна точка, у якій $\sigma \approx \sigma_{pl}$.

Мінімізувавши функціонал (3) за величинами E_1, E_2 отримаємо таку систему лінійних алгебричних рівнянь:

$$\begin{aligned} &E_1 \left(\sum_{i=1}^{m} \varepsilon_i^2 + \left(N - m \right) \varepsilon_m^2 \right) + E_2 \varepsilon_m \sum_{i=m+1}^{N} \left(\varepsilon_i - \varepsilon_m \right) = \sum_{i=1}^{m} \sigma_i \varepsilon_i - \varepsilon_m \sum_{i=m+1}^{N} \sigma_i, \\ &E_1 \varepsilon_m \sum_{i=m+1}^{N} \left(\varepsilon_i - \varepsilon_m \right) + E_2 \sum_{i=m+1}^{N} \left(\varepsilon_i - \varepsilon_m \right)^2 = \sum_{i=m+1}^{N} \sigma_i \left(\varepsilon_i - \varepsilon_m \right). \end{aligned} \tag{4}$$

Систему (4) розв’язуємо для кожного зі значень $1 < m < N$, обчислюючи при цьому функціонал (3). Розв’язком вважаємо таке m, для якого (3) приймає найменше значення. Аналогічно можна визначити і відповідні параметри відрізків, що апроксимують криву розвантаження зразка (модуль E_1'). Як виявилося під час експериментальних досліджень, вони є дещо відмінними.

Отриманими параметрами скористалися у моделі гістерезисної поведінки матеріалу, у якій враховано пружно-пластичну модель матеріалу з лінійним зміцненням, а також пам’ять про деформації та криву навантажування на попередньому кроці.

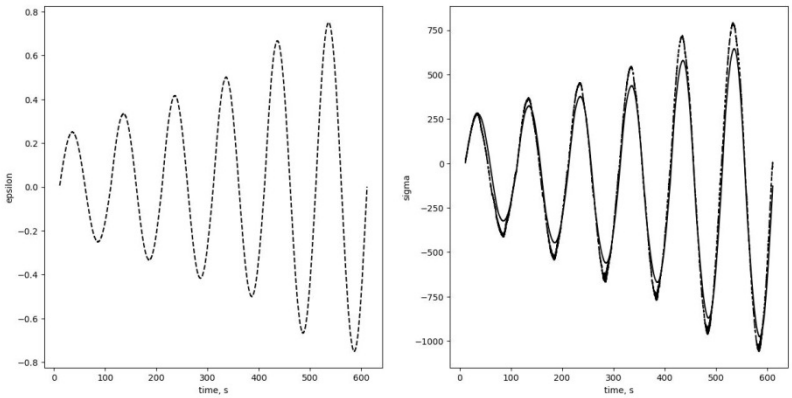


Рис. 1. Залежність експериментально (штрихові криві) та обчислених за отриманою моделлю деформацій та напружень у зразку

Підхід (1)–(4) разом із моделлю гістерезисної поведінки матеріалу закодовано у комп’ютерну програму мовою Python. Результати розрахунків, здійснених на основі експериментальних значень залежності деформацій від часу, у порівнянні із експериментально обчисленими значеннями напружень, зображено на рис. 1. У розрахунках характер навантажування вважався квазістатичним, тобто, інерційні ефекти не враховувалися унаслідок їхньої надзвичайно малої величини.

Із рис. 1 видно досить добру узгодженість побудованих за отриманою гістерезисною моделлю напружень із експериментальними даними, хоча створена модель і дає дещо занижені значення при пікових значеннях деформацій. Це можна пояснити застосованою кусково-лінійною моделлю опису поводження матеріалу.

Експериментально (штрихові криві) та теоретично (суцільні лінії) отримані залежності напружень від деформацій із явним відображенням гістерезисного характеру процесів повторюваного деформування зображено на рис. 2.

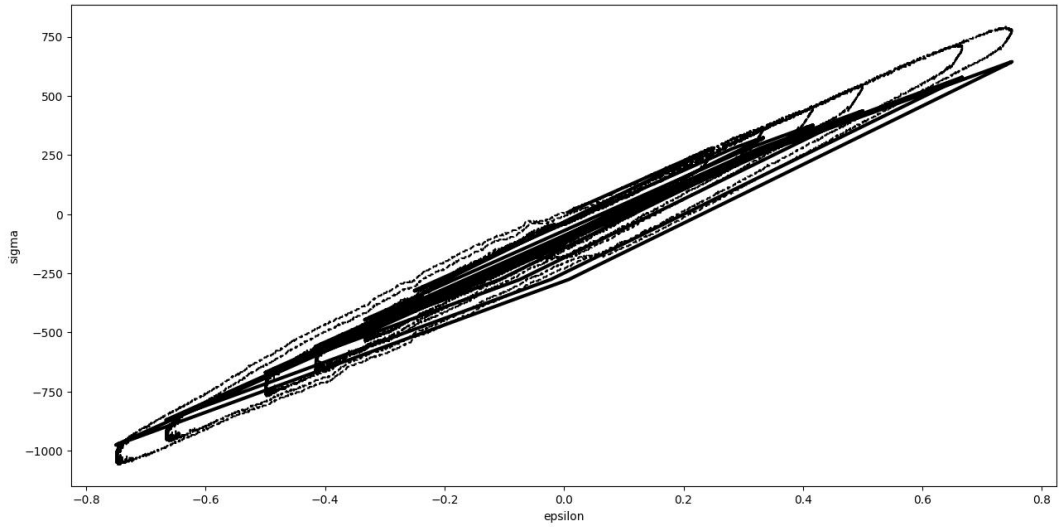


Рис. 2. Гістерезисний характер кривих повторюваного деформування

Із рис. 2 також видно досить добру узгодженість отриманих кривих, хоча експериментальні дані дещо більш витягнуті уздовж вертикальної осі, що можна пояснити нелінійною залежністю напружень від деформацій для реального матеріалу.

Висновки. У роботі побудовано математичну модель опису петель гістерезису сплаву із пам’яттю форми, яка ґрунтується на методі найменших квадратів. Запропонований підхід дозволяє отримати залежності гістерезисної поведінки матеріалу на основі експериментальних даних. Модель досить добре описує діаграми деформування сплавів із пам’яттю форми.

Література.

[1]Otsuka K, Ren X. Recent developments in the research of shape memory alloys. Intermetallics 1999;7:511–28.

[2]Zhang XP, Liu HY, Yuan B, Zhang YP. Superelasticity decay of porous NiTi shape memory alloys under cyclic strain-controlled fatigue conditions. Mater Sci Eng A 2008;481–482:170–3.

[3]Petrini L, Migliavacca F. Biomedical Applications of Shape Memory Alloys. J Metall 2011;2011:1–15.

[4]Hartl DJ, Lagoudas DC. Aerospace applications of shape memory alloys. Proc Inst Mech Eng Part G J Aerosp Eng 2007;221:535–52.

[5]Abubakar RA, Wang F, Wang L. A review on Nitinol shape memory alloy heat engines. Smart Mater Struct 2020;30:013001.

[6]Zareie S, Issa AS, Seethaler RJ, Zabihollah A. Recent advances in the applications of shape memory alloys in civil infrastructures: A review. Structures 2020;27:1535–50.

УДК 624.073
М. Гудь, к.т.н., М. Лановик
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ВПЛИВ ХАОТИЧНО РОЗМІЩЕНИХ СТАЛЕВИХ ВОЛОКОН НА ВЛАСТИВОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОНУ

M. Hud, Ph.D., M. Lanovyk
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

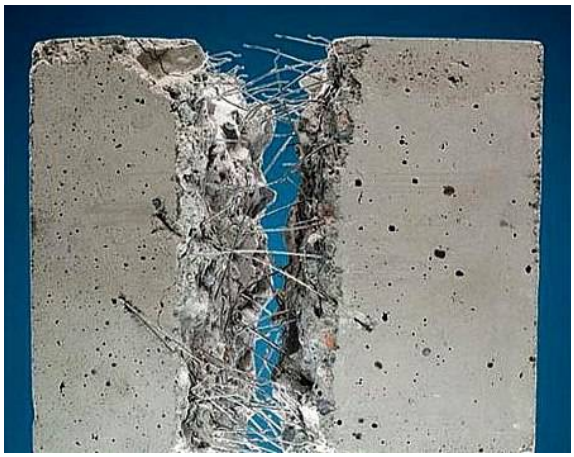
THE INFLUENCE OF CHAOTLY ARRANGEMENT STEEL FIBERS ON THE PROPERTIES OF REINFORCED CONCRETE

Abstract. Fibers are effective in reducing plastic and shrinkage cracking. Steel in the form of short discrete fibers are added to concrete such that they are uniformly distributed and randomly oriented. Steel fibers do not significantly alter free shrinkage of concrete, but at high enough dosages they can increase the resistance to cracking and can reduce the crack widths. Fibre composites possess increased extensibility and tensile strength.

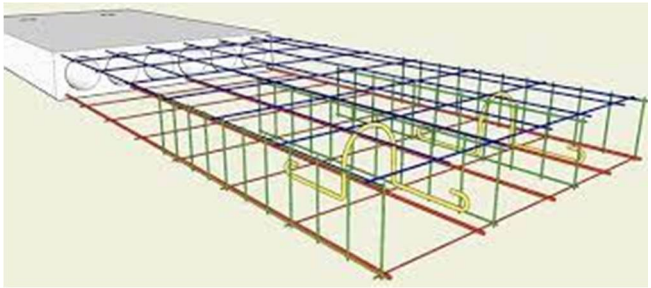
Актуальність теми полягає у тому що волокна ефективно зменшують пластичні та усадочні тріщини. Сталь у формі коротких дискретних волокон додається до бетону таким чином, щоб вони були рівномірно розподілені та хаотично орієнтовані. Сталеві волокна суттєво не змінюють вільну усадку бетону, але при достатньо високих дозах вони можуть підвищити стійкість до розтріскування та зменшити ширину тріщини.

Метою роботи

Простий, неармований бетон є крихким матеріалом; при низькій міцності на розрив і низькій здатності до деформації роль випадково розподілених розривних волокон полягає в тому, щоб подолати тріщини та забезпечити деяку «пластичність» після розтріскування. Якщо волокна достатньо міцні та належним чином з'єднані з матеріалом, це дозволить бетону витримувати значні напруги при відносно великій деформаційній здатності на стадії після розтріскування. Звичайний бетон раптово руйнується, коли перевищено прогин, що відповідає граничній міцності на вигин; з іншого боку, фібробетон продовжує витримувати значні навантаження навіть при прогинах, що значно перевищують прогин руйнування простого бетону.



А) Хаотичне армування залізобетону



Б) Направлене армування залізобетону

Рис. 1. Типи армування залізобетону

Армований волокном бетон (FRC) – це бетон, виготовлений з гідравлічних цементів, що містять дрібні та грубі заповнювачі та дискретні дискретні волокна. До волокон належать сталеві волокна, скловолокна, синтетичні волокна та природні

волокна. які надають бетону різні властивості. Крім того, характер армованого волокнами бетону змінюється в залежності від бетону, волокнистих матеріалів, геометрії, розподілу, орієнтації та щільності.

Волокна зазвичай використовуються в бетоні для контролю розтріскування внаслідок пластичної усадки та усадки при висиханні. Вони також зменшують водопроникність бетону і таким чином зменшують виділення води. Деякі типи волокон створюють більшу стійкість до ударів, стирання та розбиття бетону. Дрібні мікроволокна стабілізують мікротріщини і підвищують міцність, зменшуючи пористість цементного тіста.

Сталефібробетон – композиційний матеріал, складається з матриці – дрібнозернистого бетону, і хаотично розташованих в просторі фібр – сталевих волокон.

Встановлено, що однією з важливих властивостей сталефібробетону (SFRC) є його підвищена стійкість до розтріскування та розповсюдження тріщини. Завдяки цій здатності блокувати тріщини, волокнисті композити мають підвищену розтяжність і міцність на розтяг, як при першій тріщині, так і при остаточному, особливо під навантаженням на згин; і волокна здатні утримувати матрицю разом навіть після значного розтріскування. Кінцевим результатом усього цього є надання волокнистому композиту вираженої пластичності після розтріскування, яка нечувана для звичайного бетону. Перехід від крихкого до пластичного типу матеріалу суттєво підвищить характеристики поглинання енергії волокнистим композитом і його здатність протистояти багаторазово прикладеним, ударним або ударним навантаженням.

Сталеве волокно звичайно представлене відрізками дроту, у тому числі з відпрацьованих канатів. Фібри можуть мати різний поперечний переріз – круглий, овальний й ін. розмірами від 0,2 до 1,6 мм і довжину від 10 до 160 мм. Поверхня фібр може бути профільована, оброблена травленням і, як виключення, гладкою. Кількість фібр, що вводяться в бетон, у більшості випадків коливається від 0,5 до 2% по об'єму. Введення в бетон сталевих фібр у кількості 1...1,5% по об'єму збільшує його міцність на розтяг до 100%, міцність на вигин на 150...200%, міцність на стиск підвищується на 10...25%.

Найважливішою властивістю бетону, армованого сталевим волокном (SFRC), є його чудова стійкість до розтріскування та поширення тріщини. Також об’ємна частка сталевого волокна для оптимальних властивостей міцності та довговічності становить від 0,5% до 2%, а коефіцієнти розмірів, які в основному розглядаються, становлять від 50 до 100.

Оскільки суміші SFRC містять більш високий вміст цементу та вищі співвідношення дрібного та крупного заповнювачів, ніж звичайний бетон, процедури розробки суміші, які застосовуються до звичайного бетону, можуть не повністю застосовуватися до SFRC. Як правило, щоб зменшити кількість цементу, частина цементу може бути замінена мінеральними добавками. Крім того, для покращення оброблюваності сумішей з великим об’ємом волокна часто використовують домішки, що зменшують воду, і, зокрема, суперпластифікатори.

Література

1. Дворкін Л.Й. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони: монографія / Є.М. Бабич, В.В. Житковський, О.М. Бордюженко, С.В. Філіпчук, Д.В. Кочкарьов, І.В. Ковалик, Т.В. Ковальчук, М.М. Скрипник // Рівне: НУВГП. – 2017. – 331 с.

2. Дворкін Л.Й. Ефективність дисперсного армування високоміцного дрібнозернистого бетону / Л.Й. Дворкін, О.М. Бордюженко, Т.В. Ковальчук // Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції "Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті". – Харків, 2017. – С. 81-83.

3. Гудь М. Фактори впливу на міцність та ефективність бетону / М. Гудь М., Г.М. Крамар, І. Гудь // Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: матеріали Міжнар. науково-техн. конф. до 100 річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам’яті Івана Пулюя (100 річчя з дня смерті), 2018. - С. 44-45.

УДК 69.05
М. Гудь, к.т.н., С. Єсін
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ВИКОРИСТАННЯ 3D-ДРУКУ В БУДІВНИЦТВІ

M. Hud, Ph.D., S. Yesin
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

FACTORS AFFECTING ACCEPTANCE OF 3D PRINTING IN CONSTRUCTION

Abstract. The use of 3D printing technology offers several advantages over the traditional methods. However, additional challenges and risks are faced due to the introduction of this new technology in construction projects. A literature review was performed to identify the benefits of 3D printing. Five key benefits were identified: faster construction, cost reduction, more geometric freedom, sustainability and safety benefits.

3D-друк вважається технологією найближчого майбутнього. Це інноваційний метод, який пропонує зниження витрат, економію часу та обмежені викиди порівняно зі звичайними методами.

Перспективи 3D-друк будівель має значні можливості для розвитку будівельної галузі України. Для більшості забудовників дана технологія є революційно новим методом швидкого та дешевого зведення будівель.

Однак, незважаючи на наявні переваги технології 3D-друку в будівництві, його широке використання стримує низка факторів, таких як:

– відносно висока вартість сучасних моделей будівельних 3D-принтерів;

– проблематичність впровадження 3D-технологій у комплексний процес будівництва, ремонту та реконструкції;

– відсутність нормативно-правових актів та стандартів для 3D-друку будівель та елементів інфраструктури.

Найбільш суттєвою перешкодою на шляху до повноцінного впровадження 3D-друку у будівництві є відсутність нормативної бази його використання.

Створення опалубки для бетону є відносно трудомістким заходом, і чим складніший відливок, тим більше часу потрібно для виготовлення форми. Сучасні методи лиття для форм вільної форми та складних індивідуальних форм включають використання меленого полістиролу або литих поліуретанових/силіконових форм. Форми з полістиролу, які використовуються для одноразових відливок, зазвичай фрезерують за допомогою фрезера з ЧПК або робота. Після вилучення з литого бетону поліуретанова форма відправляється на звалище. Литі поліуретанові та силіконові форми, які переважно використовуються для серійного виробництва, є дорогими, а також вимагають виготовлення вторинної форми для лиття силіконових або поліуретанових форм, утворюючи більше відходів, які потрапляють на звалище.

Усі ці переваги можуть зробити технологію 3D-друку потенційною зміною правил для будівельної галузі в найближчому майбутньому. Однак у майбутньому 3D-друку постають деякі проблеми. Стійкість друкованих будівель невідома, а тестування матеріалів, а також закупівля обладнання є дорогою справою. Державні правила безпеки для будівель, надрукованих на 3D, не існують. Нарешті, вплив на робочу силу

та економіку досі невідомий. Важливо дослідити ці питання, щоб визначити загальний вплив 3D-принтерів на будівельну галузь.

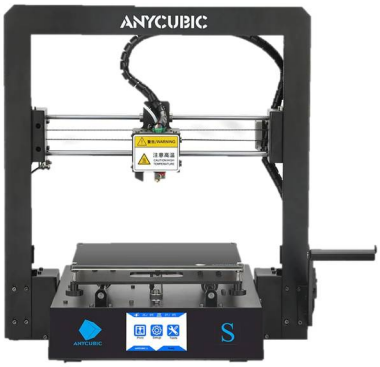


Рис. 1. Установка для 3D друку дрібноштучної опалубки

Щоб вирішити такі проблеми, необхідні дослідження, щоб зрозуміти вплив 3D-друку на будівельну галузь. Завдяки широкому огляду літератури, що охоплює 3D-друк у виробництві, будівництві, енергетиці та інших, ця робота визначає фінансові, економічні, соціальні та ризикові фактори, які можуть вплинути на прийняття 3D-друку в будівництві. Буде представлено детальний якісний аналіз, який дозволив ранжувати критичні фактори, що впливають на сприйняття промисловістю та кінцевим споживачем.

Раніше подібна швидкість будівництва могла досягатися лише завдяки збільшенню чисельності працюючих робітників на об'єкті, що в свою чергу призводило до збільшення вартості будинку. За нашими підрахунками питомі витрати на 1м^2 3D-будівництва в умовах економіки України складуть близько 4 тис. грн. В перспективі, з розвитком технології 3D-друку, витрати на 3D-друк в будівельній галузі будуть знижуватися, а швидкість і якість будівництва – зростати.

Технологія 3D-друку для використання в будівництві збільшить стійкість. Будинки можна будувати з підтримкою життєвого циклу тканини, що буде використовуватися для оцінки екологічної стійкості будівельних матеріалів. Створення будівель складної форми може стати однією з найбільших переваг для багатьох архітекторів.

Література.

1. В. С. Дорошенко і О. Б. Янченко, «Застосування методу армування пінополістирольних моделей до 3d-друку стін з полістиролбетону та приклади металевих литих деталей будівельної опалубки», СучТехнБудів, вип. 31, вип. 2, с. 16–21, Чер 2022.

2. Огляд застосування 3d друку в будівництві Посилання: https://www.researchgate.net/publication/344433943_a_review_of_applications_of_3d_printing_in_construction_industry

3. Розробка роботизованого 3D-принтера для опалубки будівельного масштабу Посилання: https://www.researchgate.net/publication/300721097_FreeFab_-_Development_of_a_Construction-Scale_Robotic_Formwork_3D_Printer

4. Заяць, Є., Богданов, І., Невгомонний, Г., Мерилова, І., & Речиц, О. (2021). Особливості використання технологій 3d-друку в будівництві.

5. Ясній, П.В., Пиндус, Ю.І. і Гудь, М.І. (2020) «Аналіз напружено-деформованого стану підсиленої циліндричної оболонки при вільних поперечних коливаннях», *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, (4(77), с. 41–49. doi: 10.31471/1993-9973-2020-4(77)-41-49.

УДК 693.542
С. Йолтухівський, магістр, М. Гудь, к.т.н.
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ВАРІАНТНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ВИСОТНИХ БУДІВЕЛЬ

S. Yoltuhivskii, master, M. Hud, Ph.D.
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

OPTION DESIGN OF HIGH-RISE BUILDINGS

Abstract. On the basis of variant design with minimal linear movements and internal efforts, the optimal structural solution of the multi-story office center was selected. The designed building includes a core of rigidity, columns of heavy concrete behind a trapezoidal corrugated board and three outriggers. The simulation of the schemes was carried out in PC LIRA 10.12 showed that the calculation scheme was chosen correctly.

Проектування, зведення та експлуатація висотних будівель мають свої особливості, зумовлені геометричним фактором, оскільки їх висота значно перевищує опорну площу. На етапі розроблення конструктивних та об'ємно-планувальних рішень важливим завданням є забезпечення необхідної міцності, жорсткості та стійкості будівлі, які залежать від її форми [1, 2]. Відомо [3], що для забезпечення виконання умов обох граничних станів у висотних будівлях використовують сумісну роботу вертикальних і горизонтальних конструкцій. Тому актуальним є обґрунтований вибір конструктивних рішень для конкретних розмірів і форми таких будівель за допомогою варіантного проектування.

Метою даної роботи є визначення оптимального конструктивного рішення багатоповерхового офісного центру з врахуванням статичних та динамічних навантажень, роботи елементів із залізобетону та сталезалізобетону (колон по периметру будівлі та перекриттів) та наявності аутригерних поверхів.

У ході варіантного проектування для порівняння прийнято 4 конструктивних рішення. Як критерії ефективності використання залізобетонних або сталезалізобетонних конструкцій прийнято лінійні переміщення та внутрішні зусилля. Для оцінювання наявності та кількості поверхів із підвищеною просторовою жорсткістю прийнято характеристики загальної стійкості каркасу, прискорення верхнього поверху від дії динамічної складової вітрового навантаження, характер форм та спектр частот власних коливань**.**

У всіх конструктивних рішеннях використовували схему, що включає ядро жорсткості завтовшки 700 мм. Матеріали усіх елементів – важкі бетони. Окрім того, перший різновид включає залізобетонні колони перерізом 550х550 мм, перекриття товщиною 200 мм, покладені по металевих балках. У другому варіанті використано сталезалізобетонні колони перерізом 550х550 мм з жорсткою арматурою з 2 двотаврів № 40, зварених у вигляді хреста (матеріал – сталь С345), основний матеріал колони важкий бетон загальною товщиною 200 мм, покладених по металевих балках. У третьому різновиді, на відміну від другого, використано також 2 аутригери на останньому та середньому поверхах. У четвертій схемі запроектовано 3 аутригери. Саме останній варіант виявився оптимальним з точки зору мінімальних лінійних переміщень та зусиль, що виникають у конструкції, і його прийнято в якості моделі (рис.1).

Моделювання схеми виконано у ПК ЛІРА 10.12. Загальна кількість скінченних елементів становила 23142. Основні елементи конструкцій на всіх рівнях задані

архітектурними пластинчастими елементами. Тріангуляція плит відбувається лише у процесі розрахунку. Крок розбиття 1 м. Балки та колони задані стрижневими елементами. Стіна аутригера замодельована без урахування жорсткості сталевого осердя. Всі інші конструкції враховані у розрахунковій схемі відповідними навантаженнями. Жорстке з'єднання будівлі здійснено у місцях сполучення колон нижнього поверху з фундаментною плитою.

У розрахунках прийнято постійні, короткочасні і тривалі навантаження.

Вигляд розрахункової моделі подано на рисунку 1.

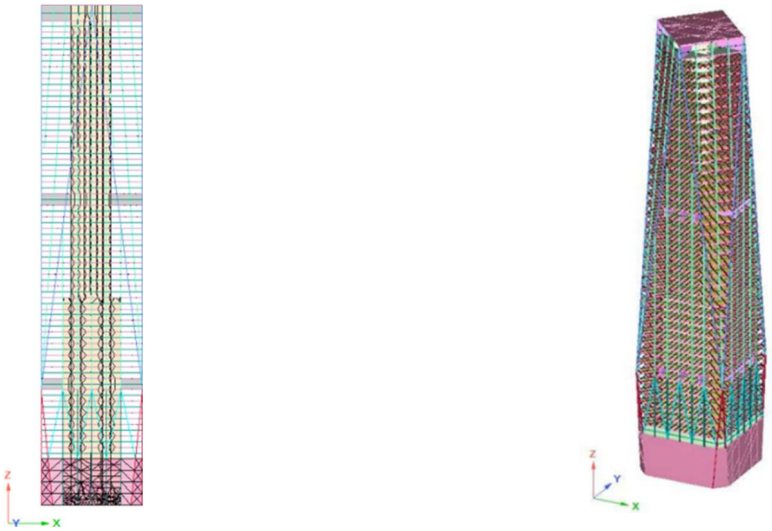
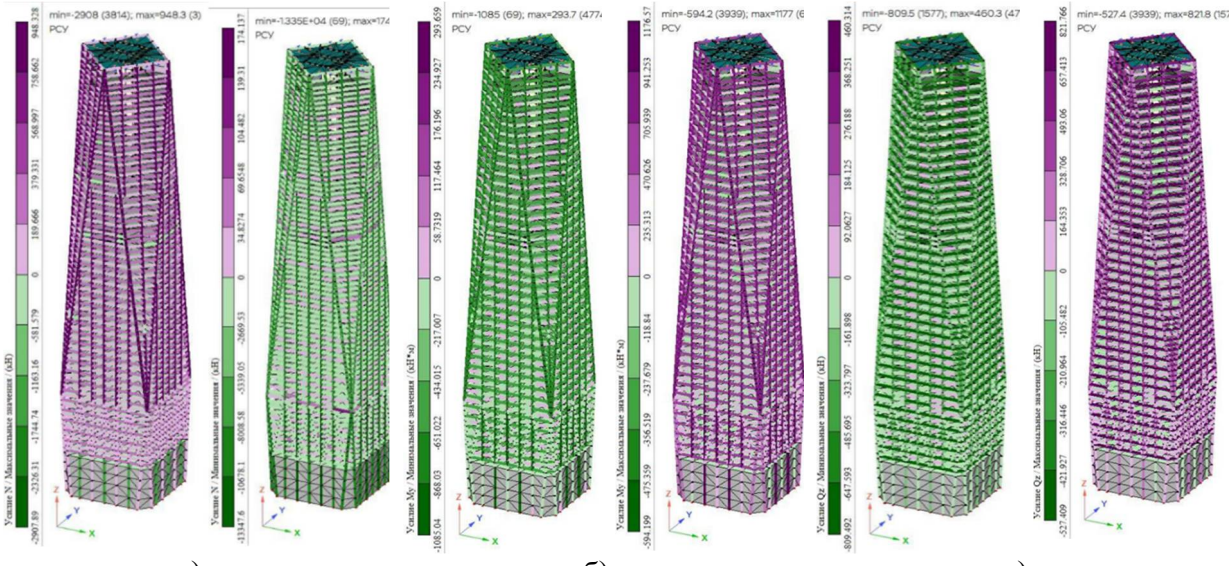


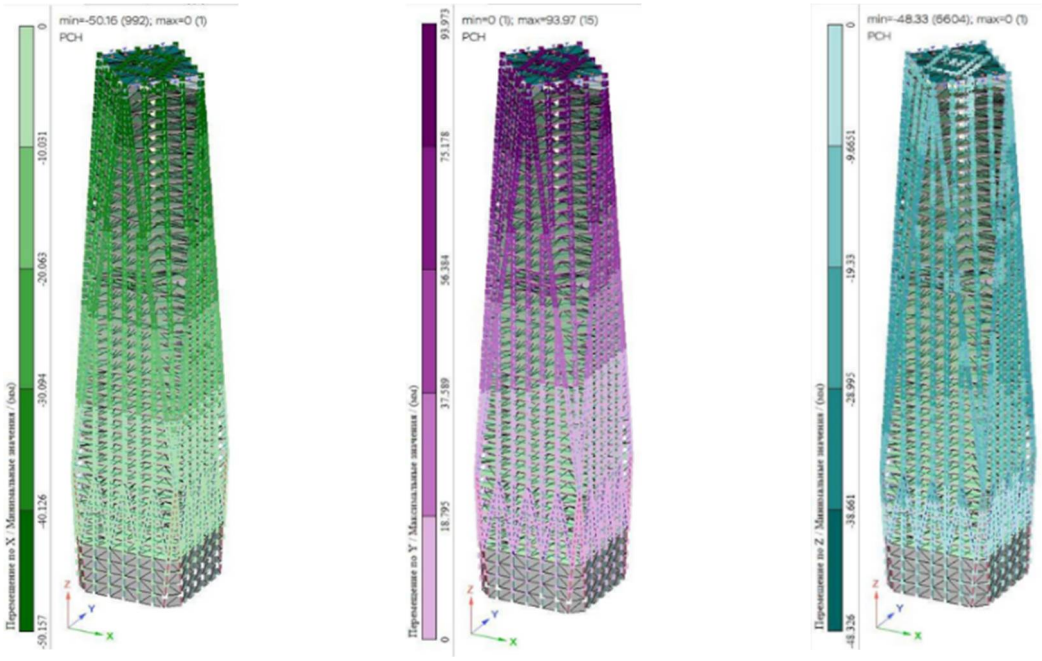
Рис. 1. Загальний вигляд розрахункової моделі офісного центру.

Результати розрахунку подано на рис.2-5. На рисунку 2 подано значення максимальних та мінімальних значень N (кН) (а), M (кНм) (б) та Q (кН) (в), на рисунку 3 подано лінійні переміщення X, Y, Z (мм) , на рисунку 4 – вид деформованої схеми,.



а) б) в)

Рис. 2. Максимальні та мінімальні значення N (кН) (а), M (кНм) (б) та Q (кН) (в).



а) б) в)

Рис. 3. Лінійні переміщення по осях X (а), Y(б), Z (в) (мм).

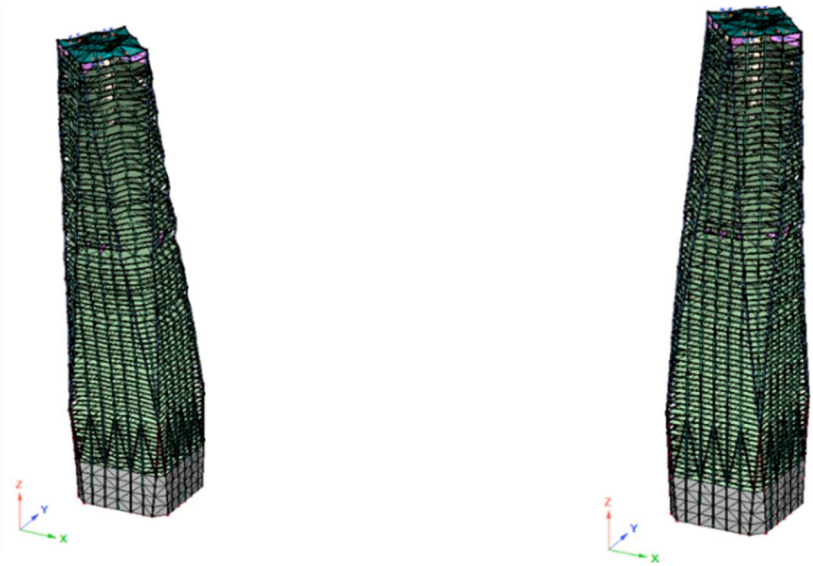


Рис.4. Деформована схема будівлі.

Отримані розрахункові значення задовольняють вимогам нормативних документів, що свідчить про те, що розрахункова схема обрана правильно.

Література.

1. Ясній, П. В., Пиндус, Ю. І. і Гудь, М. І. (2020) «Аналіз напружено-деформованого стану підсиленої циліндричної оболонки при вільних поперечних коливаннях», *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, (4(77), с. 41–49. doi: 10.31471/1993-9973-2020-4(77)-41-49.

2. Ковальчук Я. О. Комп'ютерне моделювання деформації зварної ферми з косинками у вузлах / Ярослав Олексійович Ковальчук, Наталія Ярославівна Шингера // Вісник ТНТУ, — Т. : ТНТУ, 2016 — Том 83. — № 3. — С. 73-78. — (Механіка та матеріалознавство).

3. ДБН В.2.2-41:2019 Висотні будівлі. Основні положення.

УДК 621.791.927.7

Ч. Пулька[1], д.т.н., проф., М. Михайлишин[1], к.ф-м.н., доц., В. Сенчишин[1], к.т.н., О. Прохоренко[2], к.т.н., доц., Віт. Сенчишин[1]
[1]Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна
[2]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ, ДЕФОРМАЦІЙ ТА ПЕРЕМІЩЕНЬ ПРИ ІНДУКЦІЙНОМУ НАПЛАВЛЕННІ ТОНКИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ

Ch. Pulka[1], Dr., Prof., M. Mykhailyshyn[1], Ph.D., Assoc. Prof., V. Senchyshyn[1], Ph.D., O. Prokhorenko[2], Ph.D., Assoc. Prof., Vit. Senchyshyn[1]
[1]Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine
[2]National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF RESIDUAL STRESSES, DEFORMATIONS AND DISPLACEMENTS DURING INDUCTION CLADDING OF THIN STRUCTURAL ELEMENTS

Abstract. The paper proposes a mathematical model for determining the fields of residual stresses, deformations and displacements that occur in the process of induction cladding, taking into account the fact that the product of the modulus of elasticity and the coefficient of thermal expansion of base metal and deposited metal is $E \cdot \alpha_{\mathrm{T}} \cong const$. Simplified calculation formulas were obtained and corresponding algorithms were built, which allow determining residual stresses and displacements. Based on this, it is necessary to use low-gradient temperature fields, which allow to avoid the operation of preheating or tempering.

При наплавленні деталей машин із використанням різних методів виникають залишкові напруження та деформації які призводять до появи тріщин, що в свою чергу призводять до зниження експлуатаційних характеристик наплавленого металу та геометричної форми наплавлених деталей. Особливо це стосується індукційного наплавлення тонких елементів конструкцій товщиною 2..6 мм і 0.5…2 мм відповідно основного і наплавленого металу, при якому відбувається отримання біметалу без розплавлення основного металу. В даному випадку розплавляється тільки порошкоподібний твердий сплав, а з’єднання його з основним металом здійснюється шляхом термодифузії за допомогою тонкого перехідного шару, а далі здійснюється спільне деформування системи «основний і наплавлений метал».

Виникнення залишкових напружень і деформацій зумовлені різними причинами. Найважливішою є та, що матеріал основного і наплавленого металів мають різні механічні і теплофізичні властивості. Одним із таких показників є коефіцієнт температурного розширення α_{T}. При наплавленні необхідно враховувати те, щоб даний коефіцієнт був як найбільш наближений основного і наплавленого металу. Крім того виникнення в процесі наплавлення незворотних, зокрема пластичних деформацій які також спричиняють утворенню залишкових полів напружень і деформацій, що призводить до появи тріщин в наплавленому шарі металу. Авторами розроблена математична модель з урахуванням факту, що для багатьох матеріалів в досить широкому діапазоні зміни температур добуток модуля пружності і коефіцієнта температурного розширення основного і наплавленого металу $E \cdot \alpha_{\mathrm{T}} \cong const$. Отримано спрощені розрахункові формули і побудовані відповідні алгоритми

визначення залишкових напружень та переміщень. На рис.1 наведено залишкові напруження σ_2 по товщині ненаплавленої (в точках 1,2,3,4) та наплавленої (в точках 5,6,7) частини диска при товщині наплавленого шару δ = 1 мм, а при δ = 1,5 мм на рис.2. Як бачимо з рисунків кільцеве напруження змінює знак при переході з основного металу в наплавлений шар. В зоні наплавлення основний метал в кільцевому напрямку перебуває в стані розтягу і стиску, а в наплавленому шарі діють кільцеві напруження розтягу. Максимальне кільцеве напруження σ_2 виникає в наплавленому шарі безпосередньо біля границі з'єднання його з основним металом і рівне $\sigma_2 = 0{,}54\sigma_{\text{в}}^{\text{н}}$ при товщині наплавленого шару δ = 1 мм та $0{,}517\sigma_{в}^{н}$ при δ = 1,5 мм, де $\sigma_{\text{в}}^{\text{н}}$ границя міцності наплавленого матеріалу, яка для твердого сплаву ПГ-С1 (сормайту) становить $\sigma_{в}^{н} \cong 150$ МПа. При цьому виконуються умови міцності по критерію найбільших нормальних напружень та по енергетичному критерію Губера, як для наплавленого, так і основного металу, а це означає, що виникнення тріщин неможливе. Дані результати підтверджуються експериментально.

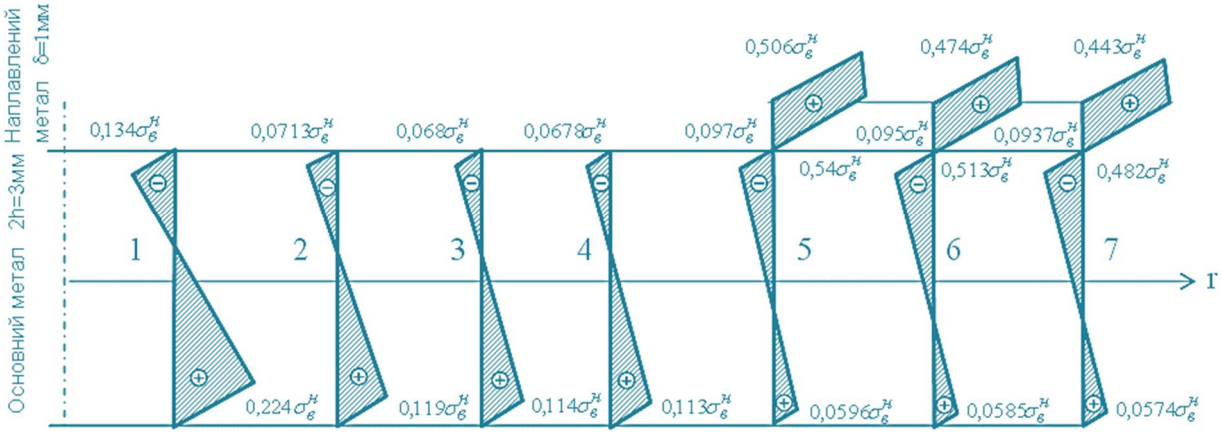


Рис. 1. Розподіл залишкових напружень σ_2 по товщині ненаплавленої (у точках 1, 2, 3, 4) та наплавленої (в точках 5, 6, 7) частин диска при δ = 0,001 м, β = 0,35

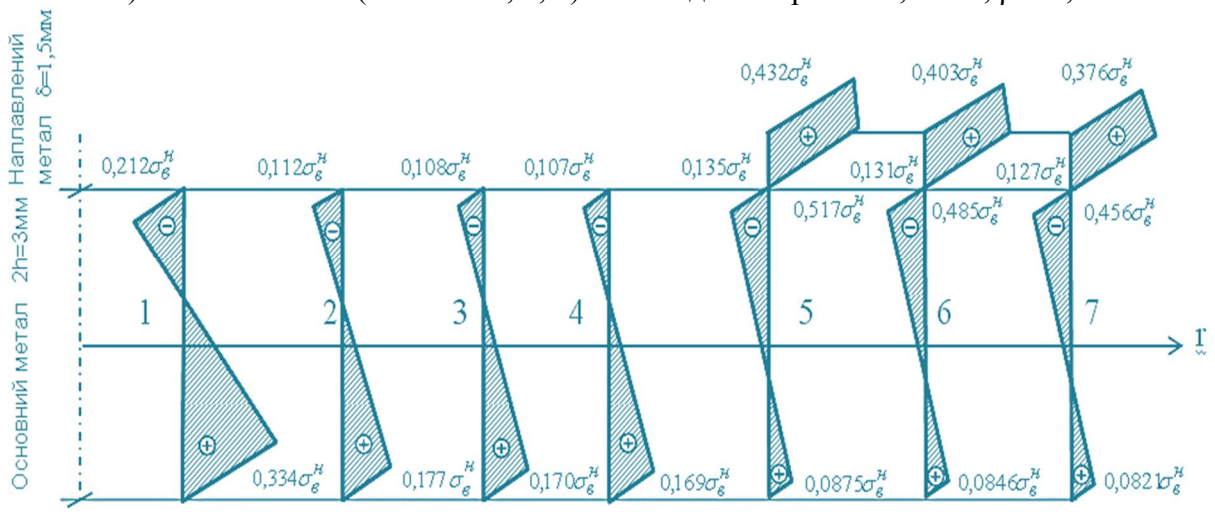


Рис. 2. Розподіл залишкових напружень σ_2 по товщині ненаплавленої (у точках 1, 2, 3, 4) та наплавленої (в точках 5, 6, 7) частин диска при δ = 0,0015 м, β = 0,35

Аналізуючи результати досліджень, які наведені в роботі авторів, приходимо до висновку, що для здійснення наплавлення тонких деталей, створюючи при цьому низький рівень залишкових напружень, необхідно використовувати температурне поле з низьким рівнем градієнтності по радіусу диска, які наведено на рис. 3. Це дає

можливість уникнути операцій попереднього підігріву або операції відпалу, що пов'язано з значними матеріальними та трудовими затратами при реалізації технологічного процесу індукційного наплавлення тонких деталей.

На рис.4 показано залежність максимальних кільцевих напружень σ2 від товщини наплавленого шару. Як видно з рисунку, із збільшенням товщини наплавленого шару максимальні кільцеві напруження зменшуються.

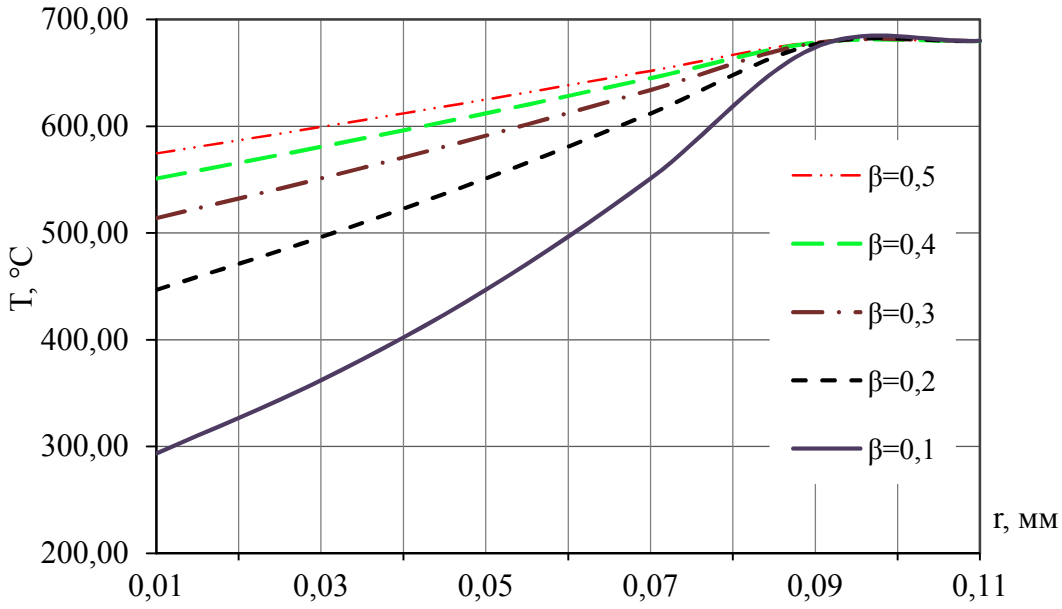


Рис. 3 Розподіл температури по радіусу диска в момент початку деформування системи основний і наплавлений метали як пружного тіла при різних значеннях β

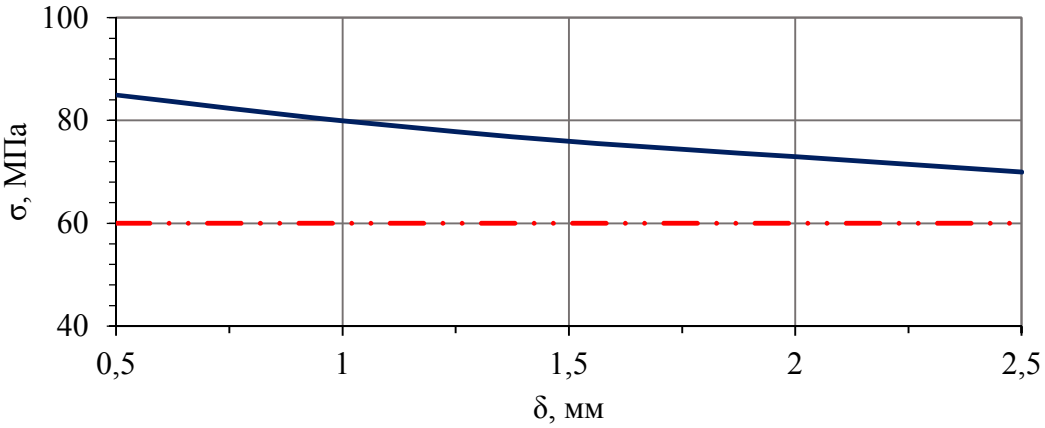


Рис. 4. Залежність максимальних кільцевих напружень в зоні наплавлення від товщини наплавленого шару при коефіцієнті градієнтності β = 0,35

Література.

1. Шаблій О. М. Дослідження залишкових напружень, деформацій та переміщень при індукційному наплавленні тонких елементів конструкцій з урахуванням комбінованого екранування теплових та електромагнітних полів / О. Шаблій, Ч. Пулька, М. Михайлишин // Вісник ТДТУ. — Т. : ТДТУ, 2007. — Том 12. — № 2. — С. 101–117.

УДК 693.542
Т. Кедик, магістр, М. Гудь, к.т.н.
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ КАРКАСУ БУДІВЛІ СКЛАДНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ ПРИ СУКУПНІЙ ДІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

T. Kedyk, master, M. Hud, Ph.D.
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

SIMULATION OF THE WORK OF A BUILDING FRAME OF A COMPLEX GEOMETRIC FORM UNDER THE AGGREGATE EFFECT OF OPERATIONAL LOADS

Abstract. As a result of the development of the project, it was decided to make the supporting frame of the designed house from metal structures, in contrast to the traditional frame from reinforced concrete. The expediency of choosing metal structures increases proportionally to the height of the building: the higher the building, the more obvious the advantages: speed of construction, higher quality - factory-made elements are used; freedom and variability of architectural plans, lower weight of structures.

Метою даної роботи є визначення переміщень сталевого каркас із сталевим ядром жорсткості та залізобетонними монолітними перекриттями при комплексній дії експлуатаційних навантажень.

Конструктивна система будівлі – сталевий каркас у вигляді рамно-зв'язкової системи зі сталевим ядром жорсткості та залізобетонними монолітними перекриттями. Загальна поверховість будівлі 22 поверхи (включно із підвальним).

Проектоване приміщення запроектовано Г-подібної форми в плані з габаритними розмірами 120,8х120,8 м. Форма башень в плані – квадратна з габаритними розмірами 56,8х48,8 м. Форма будівлі на рівні консоль також Г-подібна. Висотна відмітка покрівлі консолі +101,27 м, поверховість консолі – 4 поверхи. Зовнішній контур має кут нахилу по відношенню до вертикалі - 5^0. Усього горизонтальне зміщення будівлі склало 8,82 м, в напрямку осі х або у залежності від розташування зовнішньої межі будівлі. Загальний вигляд будівлі показано на рис 1.

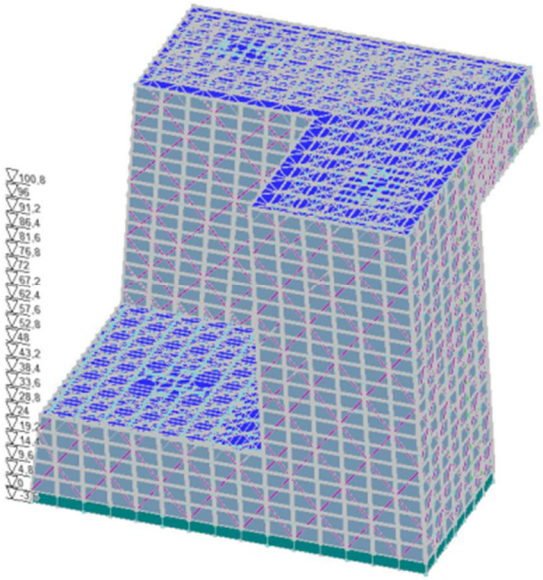


Рис. 1. 3-D модель будівлі

Розрахунок несучих конструкцій будівлі виконаний в обчислювальному комплексі SCAD з використанням методу скінченних елементів.

Обчислення виконаний комплексно, з урахуванням сумісної роботи конструктивних елементів будівлі. При розрахунку розглядалася просторова система системи будівлі із 6 ступенями свободи.

Просторова скінченно-елементна модель складається з несучих елементів будівлі: стін, колон, плит, балок, зв'язків, прогонів. Схема металевого каркасу наведено на рис 2.

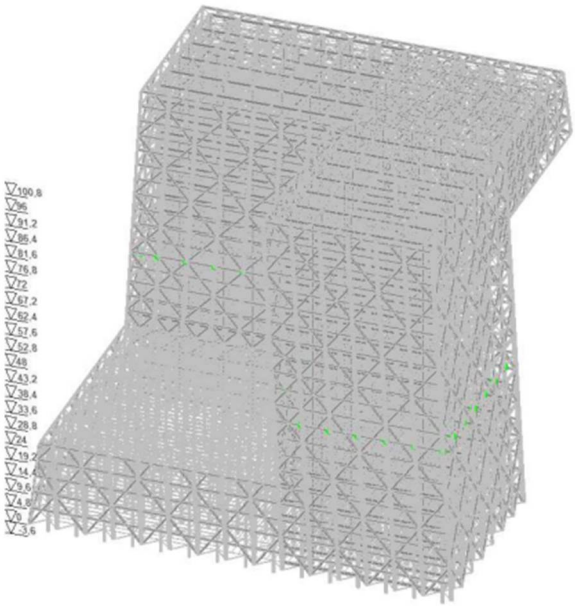


Рис. 2. 3-D модель несучого металевого каркасу будівлі

У ході розрахунку отримано значення переміщень каркасу будівлі (Рис.3).

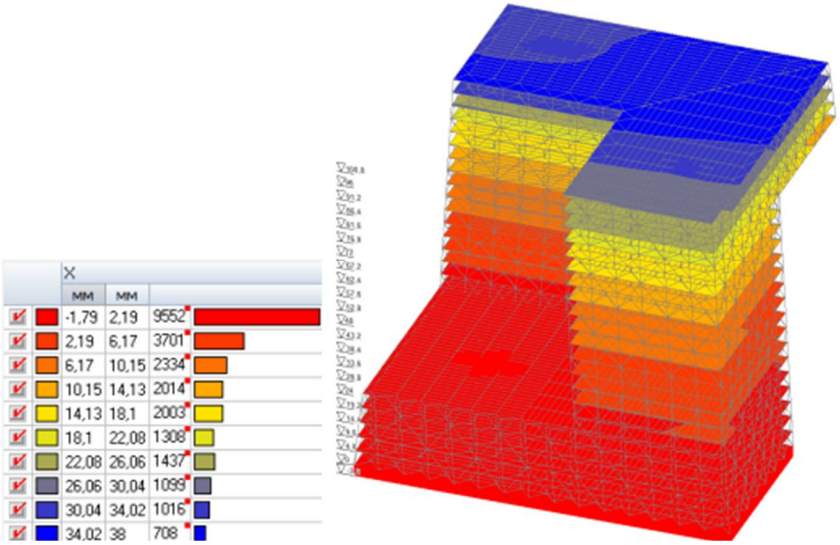


Рис. 3 а. Переміщення каркасу по осі OX, мм

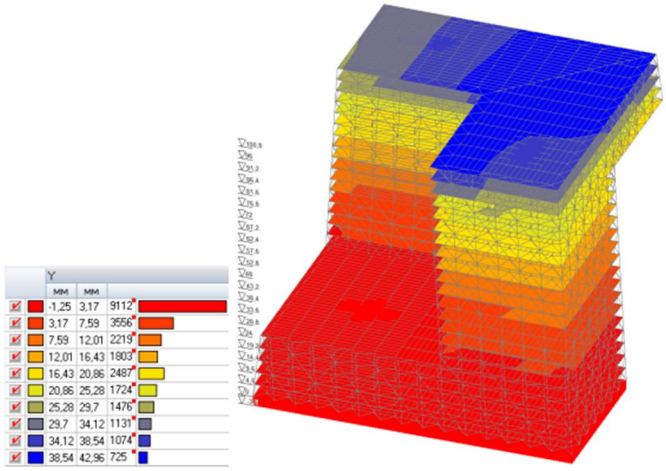


Рис. 3 б. Переміщення каркасу по осі ОУ, мм

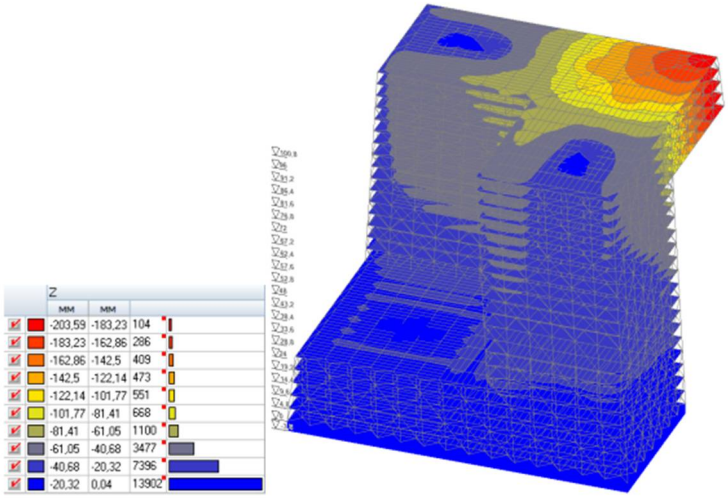


Рис. 3 в. Переміщення каркасу по осі OZ, мм

Обчисленні переміщення мають наступні максимальні:

- горизонтальні по осі X: 38,00 мм;
- горизонтальні по осі У: 42,96мм;
- вертикальних по осі Z: 203,59 мм.

Значення вертикальних і горизонтальних переміщень розраховуваної схеми менші, ніж допустимі, відповідно вимоги [1] задовольняються.

Література.

1. ДБН В.2.2-41:2019 Висотні будівлі. Основні положення.

2. Ясній, П. В., Пиндус, Ю. І. і Гудь, М. І. (2020) «Аналіз напружено-деформованого стану підсиленої циліндричної оболонки при вільних поперечних коливаннях», *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, (4(77), с. 41–49. doi: 10.31471/1993-9973-2020-4(77)-41-49.

3. Ковальчук Я. О. Комп’ютерне моделювання деформації зварної ферми з косинками у вузлах / Ярослав Олексійович Ковальчук, Наталія Ярославівна Шингера // Вісник ТНТУ, — Т. : ТНТУ, 2016 — Том 83. — № 3. — С. 73-78. — (Механіка та матеріалознавство).

УДК 693.542

В. Абаче, студент, В. Френдій, магістр, П. Вівчар, магістр, Л. Мельник, д.е.н.
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВЛАШТУВАННЯ МІЖПОВЕРХОВОГО ПЕРЕКРИТТЯ ВИСОТНИХ БУДІВЕЛЬ

Victor Eshiomat Abache, student, V.Frendiy, master, P. Vivchar, master, L. Melnyk, Doctor of Economic Sciences.
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

RESEARCH OF THE ECONOMIC EFFICIENCY OF INTERFLOOR FLOORS IN HIGH-RISE BUILDINGS

Abstract. It is difficult to imagine a modern city without high-rise buildings and structures. High-rise buildings provide versatility, expand their purpose, giving cities a different shape, dividing them into functional zones. Also, high-rise buildings and structures help to use land plots as efficiently as possible, increasing capacity, operational efficiency and intensity. When designing high-rise buildings, it is important to first of all take into account the entire structure, simplicity and ease of installation.

Актуальність теми дослідження полягає в тому, що висотні будівлі та споруди не можуть існувати без міжповерхових перекриттів, які забезпечують їх функціональність, надійність та довговічність. Вибір оптимальної конструкції перекриття впливає на загальну вартість будівництва, експлуатаційні витрати та архітектурну виразність споруди. Тому дослідження економічної ефективності різних типів перекриттів є важливим для забезпечення раціонального використання ресурсів та підвищення рентабельності проектів.

Мета дослідження – визначити найбільш економічно ефективний тип перекриття для висотних будівель, порівнявши різні конструктивні рішення за критеріями вартості, ваги та експлуатаційних характеристик.

Для досягнення мети було розглянуто три типи перекриттів: монолітне залізобетонне перекриття, збірне залізобетонне перекриття та металевий настил з бетонним заповненням. Монолітне перекриття товщиною 200 мм забезпечує високу жорсткість і надійність, але має значну вагу та потребує тривалого часу на будівництво. Збірне перекриття з плит розміром 400x600 мм дозволяє скоротити терміни будівництва, але потребує ретельного контролю якості стиків. Металевий настил з бетонним заповненням товщиною 500 мм є найлегшим, але вимагає антикорозійного захисту та вогнезахисного покриття.

Економічний аналіз включав розрахунок:

- початкових інвестицій (вартість матеріалів, робіт, монтажу);
- експлуатаційних витрат (ремонт, обслуговування, енергоспоживання);
- загальної вартості життєвого циклу (LCC) протягом 50 років.

Також було враховано:

- вплив ваги перекриття на фундаменти та несучі конструкції;
- можливість швидкого монтажу та зменшення термінів будівництва;
- екологічні аспекти (викиди CO₂ при виробництві матеріалів).

Результати розрахунків показали, що:

- монолітне перекриття має найвищі початкові інвестиції, але найнижчі експлуатаційні витрати;
- збірне перекриття дозволяє скоротити терміни будівництва на 20–30%, але потребує додаткових витрат на герметизацію стиків;
- металевий настил з бетонним заповненням є найлегшим, що зменшує навантаження на фундаменти, але його вартість життєвого циклу на 15–20% вища через необхідність антикорозійного захисту.

Висновки:

- монолітне перекриття доцільне для будівель з високими вимогами до надійності та довговічності;
- збірне перекриття ефективне для швидкого будівництва та масового житлового будівництва;
- металевий настил з бетонним заповненням виправданий у випадках, коли важливо зменшити навантаження на фундаменти, наприклад, при реконструкції старих будівель.

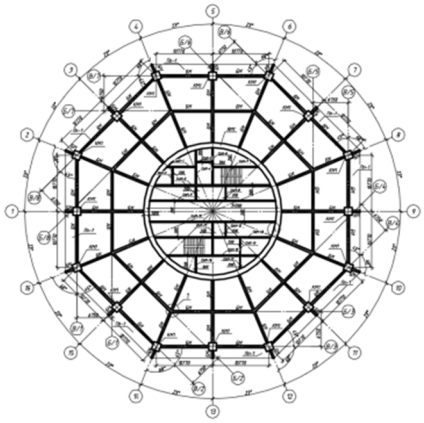
Рекомендації:

- для висотних житлових будівель використовувати збірне перекриття з плит 400x600 мм;
- для офісних та громадських будівель з великими прольотами – монолітне перекриття товщиною 200 мм;
- для реконструкції старих будівель – металевий настил з бетонним заповненням товщиною 500 мм.

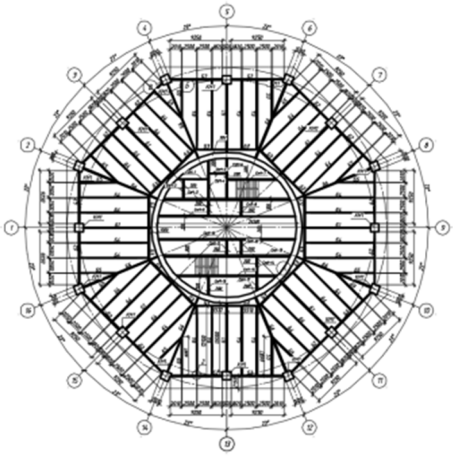
Подальші дослідження доцільно спрямувати на:

- оптимізацію товщини перекриттів для різних типів будівель;
- розробку нових енергоефективних матеріалів для перекриттів;
- дослідження впливу вібрацій на комфортність мешканців у висотних будівлях.

Таким чином, вибір типу перекриття для висотної будівлі повинен базуватися на комплексному аналізі економічних, технічних та експлуатаційних факторів. Запропоновані рекомендації допоможуть інженерам та архітекторам приймати обґрунтовані рішення, що забезпечать ефективність та надійність будівель.



а)



б)

Рис. 1. Схема влаштування перекриття із балочними плитами(а) по профільованому настилу (б)

Порівнюючи два варіанти перекриттів встановлено що вартість поверху за першим варіантом становить 4 200 459 грн, по другому 6 980 250 грн. Очевидно що випливає наступний висновок, варіант №1 конструктивної схеми(з балочними плитами) є найвигіднішим з економічної точки зору. У подальшому виконуємо проектування є монолітного залізобетонного перекриття з обпиранням по контуру на монолітні балки.

Література.

1. ДБН В.2.2-41:2019 Висотні будівлі. Основні положення.
2. Ясній, П. В., Пиндус, Ю. І. і Гудь, М. І. (2020) «Аналіз напружено-деформованого стану підсиленої циліндричної оболонки при вільних поперечних коливаннях», *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, (4(77), с. 41–49. doi: 10.31471/1993-9973-2020-4(77)-41-49.
3. Ковальчук Я. О. Комп’ютерне моделювання деформації зварної ферми з косинками у вузлах / Ярослав Олексійович Ковальчук, Наталія Ярославівна Шингера // Вісник ТНТУ, — Т. : ТНТУ, 2016 — Том 83. — № 3. — С. 73-78. — (Механіка та матеріалознавство).

УДК 621.791
І. Рибалко[1], д.т.н., О. Марков[2], к.т.н., доц.
[1] Державний біотехнологічний університет, Україна,
[2] Національна академія Національної гвардії України, Україна

МОДИФІКУВАННЯ ВІДНОВЛЕНОГО ШАРУ ЗНОШЕНИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ НАПЛАВЛЕННІ

I. Rybalko[1], Dr., O. Markov[2], Ph.D., Assoc. Prof.
[1] State Biotechnological University, Ukraine,
[2] National Academy of the National Guard of Ukraine, Ukraine

MODIFICATION OF THE RESTORED LAYER OF WEAR PARTS DURING SURFACING

Abstract. An energy-saving method of modification during electric arc surfacing has been developed, which allows introducing powder impurities into the melt and ensuring their uniform solution.

Розроблено енергозберігаючий спосіб модифікування при електродуговому наплавленні, який дозволяє вводити порошкові домішки, в розплав і забезпечувати їх рівномірний розчин. Він полягає в нанесенні на зварювальний дріт спеціальних чарунок, які заповнюються нанодомішками перед наплавленням. Метод був висвітлений в роботах [1, 2] і знайшов відображення в патентах [3, 4]. Чарунки формували під час подачі дроту експериментальної наплавлювальною головкою, шляхом обтиску роликами з виступами. Для забезпечення зчеплення модифікуючого порошку з дротом в сформованих чарунках, попередньо валиками наносили клей.

Таку технологію використовували і при модифікуванні відновлюваного шару виробів введенням подрібненої детонаційної шихти, яка складається з алмазів різних фракцій (нано- та дисперсних), заліза і міді. Шихту отримували після утилізації детонацією боєприпасів і спеціально розподіляли по фракціям (магнітна, немагнітна, дисперсна).

В цьому випадку для модифікування використовували немагнітну, дисперсну фракцію [5]. Дослідженнями даного способу модифікування показано, що це забезпечує підвищення рівня мікротвердості і зносостійкості за рахунок подрібнення зерен, формування міцної перехідної зони хвилястої будови. Конструкція розроблена і використовується для легування відновлюваних деталей сільськогосподарської техніки в умовах малих підприємств.

Застосування такого способу модифікування є економічно доцільним, оскільки не вимагає істотних капітальних вкладень і його використання можливе різними підприємствами, які мають просте наплавлювальне обладнання. Даним методом, на основі проведених досліджень, пропонується відновлювати деталі, які виготовлені з вуглецевих і низьколегованої марок сталей і працюють в умовах зношування.

Відносну зносостійкість різних способів відновлення поверхонь деталей проводили і оцінювали за шістьма варіантами: наплавлення дротом Св-08Г2С з використанням наноалмазів; наплавлення дротом Св-08Г2С з використанням дисперсних алмазів; наплавлення дротом Св-08Г2С без введення модифікуючих домішок; наплавлення дротом Св-08Г2С з використанням порошку шунгиту; наплавлення дротом ER-321 без введення модифікуючи домішок; наплавлення дротом ER-321 з модифікуванням немагнітної детонаційної шихти від утилізації боєприпасів.

Вибір різних дротів для наплавлення був здійснений у зв'язку з необхідністю перевірки впливу модифікування для різних типів покриттів.

При відновнювальному наплавленні дротом Св-08Г2С і модифікуванні вуглецевмісними домішками в переважній більшості випадків відзначається зниження середнього значення коефіцієнта тертя на 5-10% в випробуваннях на знос в середовищі моторного мастила.

Дещо по-іншому поводяться покриття при випробуваннях в абразивному середовищі без змащення. У цьому випадку найбільший ефект підвищення зносостійкості відзначається тільки при модифікуванні покриття з введенням наноалмазів (середній коефіцієнт тертя знижується на 5%.)

Спостережуване можливо пояснити тим, що більші включення вуглецьвмісних модифікуючи домішок, які викришуються в певному періоді процесу тертя, на першому етапі є абразивом, а потім, руйнуючись, працюють, як мастило. При руйнуванні вуглецьвмісних модифікаторів (наноалмазів) вони стають мастилом, що знижують знос. Інакше поводиться модифікатор немагнітної шихти. Оскільки крім наноалмазов шихта містить графіт, невелику частку міді та інші компоненти, які невілірують вплив викришуваних окремих більших за розмірів фракцій алмазів.

Випробування показали, що коефіцієнт зносу в середовищі моторного мастила є найменшим для колодки (більш ніж в 2 рази), яка наплавлена дротом Св-08Г2С з модифікуванням наноалмазами. При цьому, знос диска (контртіла) не відрізняється від вихідного без введення вуглецевмісних домішок. Більші фракції алмазів і шунгиту знижують знос сполучених зразків на 6-39%.

Наплавлення легованої дротом ER-321 при модифікуванні покриття немагнітної шихтою знижує знос сполучених зразків ще більш істотно на 39-56%.

Незалежно від основного матеріалу покриття в початкових зразках вже на четвертому (покриття основи дротом ER-321) і п’ятому (покриття основи дротом Св-08Г2С) етапах випробувань зазначалося схоплювання. Схоплювання характерно для періоду експлуатації, коли повністю зруйнувалися домішки, які містять вуглець і різко зменшувалася частка кисню в осередку тертя.

Незалежно від типу вуглецьвмісних домішок кожна з досліджуваних модифікаторів підвищує зносостійкість. Так, при наплавленні дротом ER321 з введенням детонаційної шихти вона зростає на 28%, а при використанні покриття при наплавленні дротом - Св-08Г2С з домішками шунгіту і дисперсного алмазу до 74%. Кращі результати досягнуті при модифікуванні наноалмазами. При цьому, зносостійкість зростає в 1,83 раз.

Література.

1. Марков А.В., Мальцев Т.В. Использование вторичного сырья для модифицирования при восстановлении деталей наплавкой. *Зварювання та споріднені технології*: матеріали VIII Міжнародної конференції молодих учених та спеціалістів 20-22 травня 2015 р. Київ, 2015. С. 112.

2. Новая технология модифицирования при восстановлении изделия / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, А.А. Гончаренко, А.В. Марков, А.С. Михайличенко. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. 2015. Вип. 158. С.3-8.

3. Спосіб відновлення та підвищення властивостей робочого шару деталей: пат. 92472 Україна: МПК (2014.01) B23K 26/00. №a2014 03324; заявл. 01.04.14.; опубл. 26.08.14., Бюл. № 16.

4. Спосіб використання детонаційної шихти для зміцнення відновлювального шару деталей: пат. 98213 Україна: МПК (2006.01) B32B 5/14. №a2014 10552. заявл. 26.09.14.; опубл. 27.04.15., Бюл. № 8.

5. A new way of getting the charge with diamond fraction / T. Skoblo, I. Rybalko, A. Markov and other. *Nanosistemi, nanomateriali, nanotehnologii*. 2021. v. 19, № 1. P. 23–33. https://doi.org/10.15407/nnn.19.01.023.

УДК 669.018.25 (621.762)

Л. Бодрова[1], к.т.н.,доц., Г. Крамар[1], к.т.н., доц., С. Мариненко[1], к.т.н., доц., І. Коваль[1], к.т.н., доц., О. Муль[1], к.ф.-м.н., доц., Я. Ковальчук[1], к.т.н., доц., М. Прокопів[2] , к.т.н.,с.н.с.
[1]Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна
[2]Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Україна

ЖАРОСТІЙКІСТЬ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ НА ПОДВІЙНІЙ КАРБІДНІЙ ОСНОВІ

L. Bodrova[1], Ph.D., Assoc.Prof., H. Kramar[1], Ph.D., Assoc.Prof., S. Marynenko[1], Ph.D., Assoc.Prof., I. Koval[1], Ph.D., Assoc.Prof., O. Mul[1], Ph.D., Assoc.Prof., Ya. Kovalchuk[1], Ph.D., Assoc.Prof., M. Prokopiv[2] Ph.D.,Sn.Sc.
[1]Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine,
[2]V. Bakul Institute for Superhard Materials, Ukraine

HEAT RESISTANCE OF DOUBLE CARBIDE-BASED SOLID ALLOYS

Abstract. The relationship between the oxidation' kinetics in air of hard alloys based on titanium and vanadium carbide with a nickel-chromium binder in the temperature range of 800–1100℃ and the structure, phase and chemical composition of the formed scale was established. The regularities of the oxidation process were determined by the weight method, the main kinetic characteristics were calculated.

Вступ. Незважаючи на нижчі міцність та в'язкість, порівняно з вольфрамокобальтовими твердими сплавами, сплави на основі карбіду титану ефективно використовують як інструментальні матеріали, як конструкційні деталі, що працюють в умовах тертя та високих температур [1, 2]. Підвищити жаростійкість сплавів на основі карбіду титану можна легуванням карбідної основи, введенням до складу металевої зв'язки компонентів, що утворюють захисні оксидні шари [3].

Питання окиснення твердих сплавів залишається в центрі уваги дослідників [4], однак, поведінка твердих сплавів на подвійній / багатокарбідній основі в умовах дії високих температур є недостатньо дослідженою. Крім того, більщість робіт стосуються вивчення процесу високотемпературного окиснення твердих сплавів протягом тривалого часу, проте, розуміння кінетики і механізму окиснення сплавів саме на ранніх стадіях дозволяє прогнозувати їх поведінку протягом тривалого часу.

Таким чином, задача розроблення твердих сплавів з підвищеними фізико-механічними та експлуатаційними властивостями для роботи в умовах дії високих температур є актуальною.

Метою даної роботи є встановлення закономірностей впливу хімічного складу на кінетику високотемпературного окиснення твердих сплавів TiC-VC-Ni-Cr-AlN, морфологію, фазовий та хімічний склад окалини.

Матеріали і методи дослідження. Для отримання сплавів використовували порошки карбідів марки «хч» нестехіометричного складу $TiC_{0,96}$, $VC_{0,88}$, металів зв'язки з вмістом основного компоненту не менше 99,8%, нітрид алюмінію $AlN_{0,97.}$ Готували сплави без карбіду ванадію, з 2 і 5% VC, з 10, 18, 24 % Ni-Cr зв'язки і 2% AlN. Для дослідження використовували циліндричні зразки діаметром 8 мм і висотою 10 мм з відносною густиною 0,98-0,99, що виключає наявність наскрізної пористості і її вплив на швидкість окислення.

Дослідження жаростійкості проводили ваговим методом за питомим приростом маси в ізотермічних умовах на повітрі. Вплив карбіду ванадію на жаростійкість сплавів вивчали при температурах 800 і 1050℃ протягом 24 годин, а вплив нікель-хромової

зв'язки – при температурах 900, 950, 1000 і 1100℃ протягом 3 годин. Кінетичні криві окиснення аналізували з використанням програмного пакету STATISTICA 10.

З допомогою електронного мікроскопа "Camscan 4-DV" досліджували мікроструктуру окалини та проводили мікрорентгеноспектральний аналіз. Морфологію сплавів вивчали з використанням мікроскопу МИМ-10. Рентгенівський фазовий аналіз продуктів окиснення проводили на дифрактометрі ДРОН-4 в CuKα випромінюванні.

Результати дослідження та обговорення. Для порівняння стійкості сплавів до окиснення аналізували кінетичні криві. Кількісне оцінювання жаростійкості здійснювали за величиною питомого приросту маси g (мг/см^2) залежно від часу і температури окиснення.

При температурах 800 і 1050℃ сплав на основі карбіду титану мав більший питомий приріст маси порівняно із сплавами на подвійній основі з карбідом ванадію – при температурі 800 ℃ в 1,38, а при 1050℃ – в 1,43 рази . Сплав з 5 (мас.)% VC за 24 години при температурі 800 ℃ мав питомий приріст маси 1,97 мг/см^2, а при температурі 1050℃ – 26,62 мг/см^2.

Для опису кінетичних кривих використовували лінійне, параболічне і логарифмічне рівняння. Саме останнє найбільш точно описує процес окислення досліджуваних сплавів.

Розраховані значення константи швидкості окиснення свідчать про те, що із зростанням вмісту металевої зв'язки і, відповідно, вмісту хрому у ній, константа швидкості окиснення зменшується при всіх температурах. Для всіх сплавів спостерігали інтенсифікацію процесу окиснення, починаючи з температури 1000 ℃.

Встановлено, що окиснення відбувається шляхом зустрічної дифузії – з одного боку дифузія кисню, з другого – катіонів титану (Ti^{+4}) та елементів зв'язки. Спочатку кисень проникає у кристалічну гратку карбідів з утворенням оксикарбідних твердих розчинів титану та ванадію. Ці фази мають дефекти як в металоїдній, так і в металічній підгратках, тому можливе як виділення вільного металу, так і вуглецю.

Ефективна енергія активації у температурному інтервалі 900 – 1000℃ не залежить від хімічного складу і для сплавів з різним вмістом металевої зв'ки вона практично однакова – 157, 155 і 166 кДж/моль відповідно. Для всіх сплавів ефективна енергія активації більш, ніж в 1,5 рази менша, ніж для чистого карбіду титану (250 кДж/моль), що пов'язано з впливом карбіду ванадію, нікелю, хрому, алюмінію та заліза.

Оскільки під час окиснення відбуваються два протилежних процеси – приріст маси, зумовлений утворенням оксидних шарів, і випаровування окремих елементів та утворення газоподібних продуктів окиснення, то для оцінювання жаростійкості сплавів враховували також товщину окалини, її морфологію та хімічний склад.

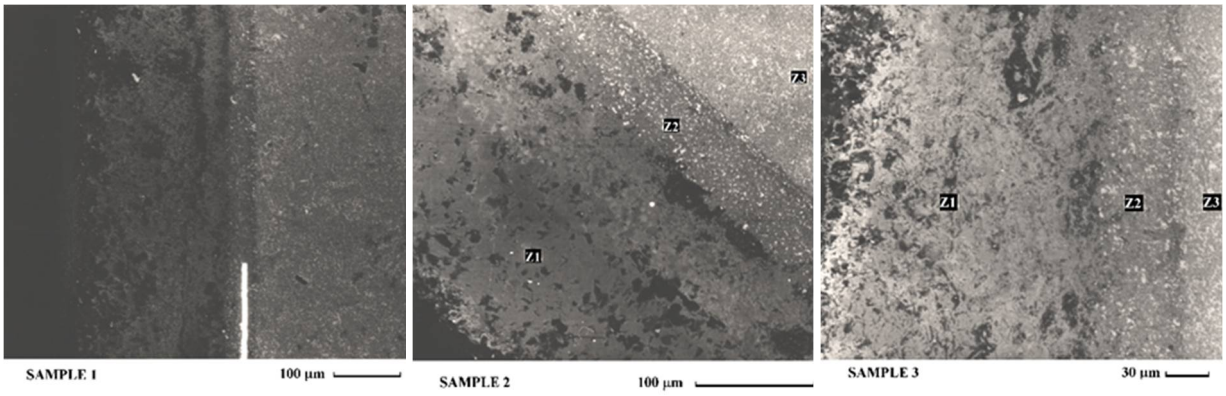
При температурі 800 ℃ питомий приріст маси невеликий, на їх поверхні спостерігали синьо-фіолетові кольори побіглості, які характерні для нижчих оксидів титану – TiO, Ti_2O_3. Рентгенівським аналізом окалини виявлено ці оксиди, а також сліди нижчих оксидів ванадію VO. Окалина щільно прилягає до основи зразків. З підвищенням температури до 1050℃ окалина набуває коричневого кольору, вона менщ щільна і має більшу товщину, однак відшарування її від основи зразка не спостерігали.

Окалина двошарова – внутрішній шар містить нижчі оксиди титану і ванадію, а зовнішній шар – рутил TiO_2, вищий оксид ванадію V_2O_5, . Краплевидні утворення – це рутил з розміром частинок 1-3 мкм. У сплавах з меншим вмістом металевої зв'язки виявлено проміжний рихлий шар невеликої щільності. Шари окалини відрізняється розмірами і зернистістю. Для всіх сплавів внутрішній шар щільний, дрібнозернистий, товщиною 44…60 мкм, тоді як загальна товщина окалини у сплаві з 24 (мас.) % NiCr складає приблизно 260 мкм, а у сплавах з 10 і 18 (мас.) % NiCr – 280 мкм (рис.). При цьому, порівняно з температурою 1000℃, товщина окалини зросла в 2,4, 3,5 і 4,4 рази

для сплавів з 10, 18 і 24 (мас.) % NiCr відповідно. З підвищенням вмісту металевої зв'язки загальна товщина окалини зменшується за рахунок зменшення зовнішнього шару і зникнення проміжного шару.

Рентгенівським фазовим аналізом встановлено, що, крім основної фази рутилу (TiO_2) з граткою типу P4/mnm (C4), в зовнішньому шарі виявили шпінель типу $NiTiO_3$, а також окремі рефлекси від граней карбідів TiC, Cr_3C_2 .

Зовнішній шар утворюється шляхом дифузії металу до зовнішньої фазової границі, а внутрішній шар формується через зовнішній шляхом дифузії кисню через нього. Склад зв'язки змінюється за рахунок переважного окиснення титану і різної швидкості дифузії компонентів зв'язки у зовнішні шари окалини. В цьому ж шарі виявлено темну фазу, у якій поряд з титаном є значна кількість ванадію, алюмінію та заліза.



а) б) в)

Рис. Поперечні перерізи окалини сплавів з 10 (а), 18 (б) і 24 (мас.) % NiCr зв'язки (в), отримані при температурі окиснення 1100℃ протягом 3 годин.

Структура внутрішнього шару окалини має вигляд оксикарбідного каркасу і схожа на вихідну структуру карбідної основи сплавів. На межі окалини і основи сплаву спостерігали окислені карбідні зерна (Ti,V)C та їх конгломерати, а також оксиди компонентів сплаву.

Таким чином, всі досліджувані сплави є жаростійкими до температури 1100 ℃. Найбільш жаростійким є сплав з 5 (мас.)% VC і 24 (мас.)% NiCr, оскільки у цьому випадку кількості хрому достатньо для формування захисного шару окалини.

Література.

1. Impact resistance of TiC-based cermets / B. C. Compton and F. W. Zok // International Journal of Impact Engineering, Vol. 62, (2013), pp. 75-87.

2. Wear resistant hard alloys for agricultural machines elements / Lyudmyla Bodrova, Halyna Kramar, Sergiy Marynenko, Ihor Koval, Yaroslav Kovalchuk, Nazariy Kondzelko // Scientific Journal of the TNTU. (2020), Vol. 2(98), pp. 33-39.

3. Effect of VC additions on the microstructure and mechanical properties of TiC-based cermets /Min Chen, Xuefeng Zhang, Xuan Xiao and Haiquan Zhao/ Mater. Res. Express Vol. 7 (2020), Number 10, 106527

4. Lee Y H, Ko S, Park H, et al. Effect of TiC particle size on high temperature oxidation behavior of TiC reinforced stainless steel. Appl Surf Sci, 2019, 480: 951doi: 10.1016/j.apsusc.2019.02.138

УДК 004.9

О. Заїка, асп., В. Рудь, д.т.н., проф., Л. Самчук, к.т.н. доц.
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк

СТВОРЕННЯ СКЛАДНИХ КОНСТРУКЦІЙ МЕТОДОМ 3Д МОДЕЛЮВАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ 3Д ДРУКУ В УМОВАХ ДІЮЧОГО ПІДПРИЄМСТВА

O. Zaika, postgraduate, V. Rud Dr. Prof., L. Samchuk Ph.D. Assoc. Prof.
Lutsk National Technical University, Lutsk

CREATION OF COMPLEX STRUCTURES BY THE METHOD OF 3D MODELING WITH USING 3D PRINTING IN THE CONDITIONS OF AN OPERATING ENTERPRISE

Abstract. And in our time, there are still companies that are not ready to introduce 3D printing into production processes. They use traditional technologies for obtaining parts and complex structures when it is necessary to replace the malfunctioning elements of production equipment. Using the example of an operating enterprise, it is shown that the use of 3D printing technology allows saving money and time for the production of necessary parts and spare parts.

При виготовленні різнотипних деталей маємо підібрати ряд характеристик для повноцінного функціонування їх у виробництві. При теперішній дестабілізації економіки кожне підприємство шукає здешевлення технологій для виготовлення кінцевого продукту.

Підприємство Kromberg&Schubert спеціалізується на виготовленні автомобільної проводки для великої кількості сучасних марок автомобілів BMW, Mersedes, MAN, Volkswagen. На підприємстві застосовується багато різнотипного обладнання та допоміжного устаткування, яке потребує заміни, або розробки нових прототипів для впровадження технічних змін. Для прикладу тримач KSAB-48-011-20-b має утримувати штекер при набиванні проводів. При завершені процесу набивки штекер повинен легко зніматися із тримача. В процесі експлуатації тримач і штекер зношуються і потребують заміни. Дану технічну зміну потрібно виконувати в короткі терміни і за мінімальні кошти. Традиційно заміна здійснювалася тримачем, що виготовлявся із алюмінію чи алюмінієвих сплавів. Розробка тримача із алюмінію, це довготривалий процес від затвердження самого креслення тримача, замовлення і виготовлення тестового зразка. Від замовлення до доставки готової необхідної партії проходить декілька тижнів, а у сучасних реаліях епідемій і війни це є декілька місяців.

Тому було прийнято рішення виготовити даний тримач за допомогою 3д друку. При створенні моделей для друку на 3д принтері потрібно враховувати специфіку друку і необхідні якості друкованих деталей. Моделі мають виконувати необхідні

експлуатаційні властивості і при цьому мати поверхні які буде можливо надрукувати на 3д принтері. Ми стикнулися із проблемою - деякі частини тримача мають бути рухомими, щоб виконувати задані функції. Деякі деталі надруковані на 3д принтері можуть відразу складатися із складових частин, які мають рухомі елементи. Після друку необхідно зняти шар підтримки і деталь буде готова до використання. Але для друку більш функціональних деталей із якісною поверхнею складових частин, необхідно друкувати складові частини роздільно. Після друку складати виготовлені частини деталі і перевіряти функціональність моделі деталі чи майбутнього прототипу.

Також необхідно враховувати матеріал для друку, якщо хочемо забезпечити необхідні властивості наших деталей, поверхню на якій здійснюється друк і тип 3д принтера. Деталі із пластика часто армують іншими матеріалами. Для цього деталі укріплюють металевими частинами для збільшення жорсткості конструкції і заміна зносостійких частин конструкції, для цього у 3д моделях продумані впадини і кріпильні отвори для закріплення армуючих частинок в середині конструкції. Також можливе застосування еластичних частин надрукованих також на 3д принтері, для збільшення функціональності збірної конструкції і виконання специфічних властивостей. Звісно 3д друк частіше використовується для прототипування, але із розвитком аддативних технологій збільшується кількість серійних деталей. При виготовленні тримача KSAB-48-011-20-b було застосовано матеріал ХТ, який має хороші параметри осадження матеріалу, щоб максимально зберегти розмірові параметри під час друку, має невелику пружну деформацію для рухомих частин зборки 3д конструкції. Дану конструкцію армувати не потрібно, через те що вона виконує задані функцію із наявного матеріалу. Мінусом є те що, заміна металевих деталей на пластикові призводить до нижчих експлуатаційних властивостей, але за рахунок збільшення кількості пластикових тримачів цілком можливо збільшити ефективність заміни металевих тримачів на пластикові. Під час розробки моделі даного тримача був врахований фактор пошкодження рухомих частин моделі і розроблені спеціальні демонтажні отвори для заміни пошкоджених на нові.

Після виготовлення деталей їх потрібно маркувати. Для металевих деталей необхідно виконувати маркування, фарбою або гравіювання. Дане маркування є дорого вартісним і має велику затрату часу, що в свою чергу збільшує вартість деталі. При виготовленні пластикових деталей нам необхідно визначити площину для маркування і вказати маркування в 3д моделі деталі, а при друці дане гравіювання збільшить час друку на декілька хвилин, від заданого часу для друку, але зекономить колосальні кошти на гравіювання кожної друкованої деталі, приклад збірного тримача із 3Д деталей(рис.1.).

Рис.1. Гравіювання на збірній конструкції 3д деталей.

Розробка даного тримача із використанням 3д принтера дозволила вчасно впровадити зміну на виробництві, при цьому дані тримачі вийшли в 6 разів дешевші за металеві аналоги. Аналогічні зміни нам приходили раніше для інших типів штекерів і ми розробляли мет**а**левий тримач, який не змогли вчасно впровадити на виробництві через браковані запчастини від постачальника, і отримали прострочення термінів відправки продукції до клієнта. Було вирішено застосовувати дану технологію 3д друку для подальшого впровадження технічних змін на підприємстві. Перевагою є низька вартість деталей, швидке виготовлення деталей, швидка розробка тестових зразків.

Висновок.

Технології 3д друку в рази зменшують собівартість виготовлення деталей, час на їх виготовлення і транспортні послуги. 3д друк став більш доступнішим в наш час і тому використання на підприємствах є більш розповсюдженим і необхідним рішенням. Дана технологія не може цілком покрити виробничі потреби підприємства , але зменшує час на розробку нових прототипів, здешевлює виготовлення деталей, дозволяє впроваджувати термінові зміни на підприємстві. При використанні даної технології із методом скінченних елементів, ми швидко можемо підбирати необхідний матеріал для друку деталей чи прототипів. За декілька годин може розробитися прототип, надрукуватись кінцева деталь і запустити власний завод по виготовленню деталей в один клік.

УДК 699.814
В. Барський, Я. Бабій
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ОБГРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ПІДВИЩЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТОРГІВЕЛЬНОГО ЦЕНТРУ

V. Barskii, Ya. Babii
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

JUSTIFICATION OF THE METHOD OF INCREASING THE FIRE RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE BUILDING STRUCTURES OF A TRADING CENTER

Abstract. Reinforced concrete structures are widely used in buildings and structures of various purposes, including public ones. According to fire safety requirements, they need effective fire protection. The paper analyzes the main methods of passive and constructive fire protection of load-bearing structures. Based on the operating conditions and the required fire resistance class, protection based on the usage of fire-resistant plaster was chosen.

Залізобетонні конструкції широко використовуються у будівлях і спорудах різного призначення, в тому числі громадського. За вимогами протипожежної безпеки вони потребують ефективного вогнезахисту.

Завдяки дотриманню вимог бетонні стіни, перекриття, елементи каркасу довше чинять опір термічному впливу, не деформуючись і, відповідно, не перетворюючись на джерело загрози для людей. Під впливом високих температур конструкції стають крихкими, від них відколюються шматки, що може призвести до повного руйнування об'єкта. Це пояснюється властивостями бетону.

При температурі вище 250-300 °С руйнується цементна структура, а коли вона досягає 550°С, зерна кварцу, що містяться в піску і щебені, переходять в іншу модифікацію, і їх об’єм збільшується. Термічний вплив змінює розміри арматури всередині бетону; волога, яка міститься в матеріалі, під дією вогню закипає і провокує вибухові відколювання окремих шматків. При гасінні пожежі водою утворюються великі тріщини, викликані різницею в тепловій деформації того чи іншого елемента. Негативних наслідків можна уникнути користуючись вогнезахисними покриттями.

Виділяють два різновиди вогнезахисту: пасивний та конструктивний. Пасивний захист передбачає використання тонкошарових захисних складів (водні, органорозчинні та епоксидні фарби). При нагріванні тонкошарові покриття спучуються і збільшуються в об’ємі, в результаті утворюється щільний пористий захисний шар, який має дуже низьку теплопровідність. Такі покриття не обтяжують конструкцію, легко наносяться, не виділяють токсичних речовин під дією високих температур. Кращі суміші здатні забезпечити захист бетону від впливу відкритого полум'я протягом 150 хвилин. Вони ефективно перешкоджають поширенню вогню і диму та допомагають локалізувати загоряння.

Під конструктивним вогнезахистом розуміють підвищення вогнестійкості конструкцій, виготовлених з бетону, за допомогою облицювання вогнетривкими панелями, спеціальною штукатуркою та бетонуванням.

Облицювання вогнезахисними плитами — ефективний метод вогнезахисту з/б конструкцій. Межа вогнестійкості підвищується до 360 хвилин. Плити виготовляють із

застосуванням наповнювачів: речовин, що спучуються (вермикуліту і перліту), вогнестійких матеріалів та мінеральних волокон.

Виштукатурювання забезпечує ефективний вогнезахист залізобетону (до 240 хвилин). Головний недолік методу — знижена вологостійкість матеріалу. Цю технологію вогнезахисту припустимо застосовувати тільки всередині сухих приміщень.

Бетонування передбачає нанесення додаткового шару бетону. Це призводить до збільшення ваги, розмірів і міцності елементів, що захищаються. Цей спосіб вогнезахисту залізобетону зазвичай застосовують під час реконструкції при необхідності зміцнити старі, частково зруйновані конструкції.

Виходячи із міркувань про економічну ефективність і експлуатаційні можливості вогнезахисних матеріалів, можна сформулювати наступні рекомендації (табл. 1):

- для забезпечення класу вогнестійкості R30, R45 найбільш доцільно використовувати тонкошарові покриття з вогнезахисних фарб;
- клас вогнестійкості R60, R90 можливо забезпечити фарбами, штукатурками і плитами. Пріоритет використання того чи іншого матеріалу може бути продиктований додатковими умовами – вартість вогнезахисту, конфігурація елементів, умови експлуатації і режим вогневого впливу, який передбачається;
- починаючи з класу вогнестійкості R120, найнадійнішими для забезпечення вогнезахисної ефективності і експлуатаційних характеристик є плити і штукатурки.

Табл. 1. Застосування вогнезахисних матеріалів для забезпечення відповідних меж вогнестійкості

КЛАС ВОГНЕСТІЙКОСТІ R, хв						
30	45	60	90	120	150	180
Фарби						
	Штукатурки					
	Плити					

Крім того, при виборі засобів вогнезахисту конструкцій потрібно враховувати умови експлуатації, оскільки деякі з них мають певні обмеження по застосуванню (табл. 2).

Табл. 2. Застосування вогнезахисних матеріалів залежно від умов експлуатації

Умови експлуатації			
всередині приміщень без впливу підвищеної вологості повітря	всередині приміщень з підвищеною вологістю повітря	в напівзакритих приміщеннях	будь-які умови
Вогнезахисні фарби	Епоксидні фарби; інші – з захисним покриттям		
Вогнезахисні штукатурки		Вогнезахисні штукатурки на цементній основі	
Вогнезахисні плити			

Виходячи з аналізу наведених особливостей, для вогнезахисту тримких конструкцій торгівельного центру з монолітного залізобетону приймаємо вогнезахисну штукатурку Ammokote GP-240, яка здатна забезпечити клас вогнестійкості не нижче R120.

УДК 728
Р. Грицеляк
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

КОНЦЕПЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БУДІВЕЛЬ - "BIM"

R. Grytseliak
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

THE CONCEPTION OF BUILDING INFORMATION MODELING - "BIM"

Abstract. BIM is an acronym for Building Information Modeling or Building Information Management. It is a highly collaborative process that allows architects, engineers, real estate developers, contractors, manufacturers, and other construction professionals to plan, design, and construct a structure or building within one 3D model. It can also span into the operation and management of buildings using data that building or structure owners have access to.

Від креслень до CAD та BIM. У минулому креслення та рисунки використовувалися для вираження інформації про певний прокєт будівлі. Цей двовимірний підхід дуже ускладнив візуалізацію розмірів і вимог. Потім з'явилося CAD (комп'ютерне проєктування), яке допомогло розробникам побачити переваги проєктів у цифровому середовищі. Пізніше CAD перетворився на 3D, що додало кресленням більшої реалістичності та візуальні ефекти. Зараз BIM (інформаційне моделювання будівель) є стандартом, але це набагато більше, ніж просто 3D-модель.

BIM об'єкти. Об'єкти BIM, компоненти, з яких складається модель BIM, є інтелектуальними, мають геометрію та зберігають дані. Якщо будь-який елемент змінюється, програмне забезпечення BIM оновлює модель, щоб відобразити цю зміну. Це дозволяє моделі залишатися узгодженою та скоординованою протягом усього процесу, щоб інженери-конструктори, архітектори, інженери MEP, дизайнери, менеджери проектів і підрядники могли працювати в об'єднаному середовищі, у більшій співпраці.

«I» в BIM. BIM, як ціле, відноситься до процесу всіх сторін, залучених до будівництва та управління життєвим циклом побудованих активів, які працюють разом і обмінюються даними. Однак справжня сила BIM живе в «I» (інформація). Уся зібрана інформація — від задуму до завершення — не просто зберігається, вона придатна для виконання. Дані можна використовувати для підвищення точності, покращення передачі необхідної інформації між зацікавленими сторонами, зменшення кількості замовлень на зміни та проблем координації на місцях, а також надання інформації про існуючі будівлі для проектів реконструкції в майбутньому.

Як відбувається обмін інформацією в BIM? Ця інформація в моделі BIM передається через взаємо-доступний онлайн-простір або "хмарні" сервіси, відомі як загальне середовище даних (CDE), а зібрані дані називаються «інформаційною моделлю». Інформаційні моделі можна використовувати на всіх етапах життя будівлі; від початку експлуатації — і до реконструкції та оновлення, чи навіть для демонтажу.

Тепер, коли ми розглянули, що таке BIM і як його можна використовувати, давайте перейдемо до рівнів BIM.

Що таке рівні BIM? Для різних типів проектів можна досягти різних рівнів BIM. Кожна група представляє окремий набір критеріїв, який демонструє певний рівень «зрілості». Рівні BIM починаються з 0 і переходять до 4D, 5D і навіть 6D BIM. Ці рівні мають на меті оцінити, наскільки ефективно або скільки інформації передається та управляється протягом усього процесу.

Отже, що включає кожен рівень і як ви можете визначити, на якому рівні ви працюєте? Нижче наведено короткий опис перших трьох рівнів і пояснення критеріїв, які застосовуються на кожному етапі.

Рівень 0D BIM: паперові креслення + нульова співпраця. Рівень 0D BIM означає відсутність спільної роботи взагалі. Якщо ви використовуєте 2D CAD і працюєте з кресленнями та/або цифровими відбитками, ви можете сміливо сказати, що перебуваєте на рівні 0D. Сьогодні більшість галузей працює вище цього рівня, хоча не кожен професіонал у цій галузі має достатньо BIM навчання та деякі проекти не включають використання BIM у специфікаціях контракту.

Рівень 1D BIM: 2D будівельні креслення + трішки 3D моделювання. Використання 3D CAD для концептуальної роботи, але 2D для складання виробничої інформації та іншої документації, ймовірно, означає, що ви працюєте на рівні 1D BIM. На цьому рівні стандарти САПР керуються стандартом ISO 1192:2007, а електронний обмін даними здійснюється із загального середовища даних (CDE), яким зазвичай керує підрядник. Багато компаній працюють на рівні 1D BIM, що не передбачає особливої співпраці, і кожна зацікавлена сторона публікує власні дані та керує ними.

Рівень 2D BIM: команди працюють над своїми 3D-моделями. Рівень 2D BIM починає додавати середовище для співпраці. У квітні 2016 року рівень 2D BIM став обов'язковою вимогою для всіх проектів у Великій Британії. Незабаром після цього Франція отримала свій мандат у 2017 році.

На рівні 2D BIM усі члени команди використовують 3D-моделі CAD, але іноді не в одній моделі. Однак спосіб, у який зацікавлені сторони обмінюються інформацією, відрізняє його від інших рівнів. Інформація про дизайн вбудованого середовища передається через загальний формат файлу.

Коли фірми поєднують це зі своїми власними даними, вони економлять час, зменшують витрати та усувають потребу в переробці. Оскільки дані обмінюються таким чином, програмне забезпечення САПР має мати можливість експорту в загальний формат файлу, наприклад IFC (Industry Foundation Class) або COBie (Construction Operations Building Information Exchange).

Рівень 3D BIM: команди працюють із спільною 3D-моделлю. Рівень 3D BIM ще більше сприяє співпраці. Замість того, щоб кожен член команди працював над своєю власною 3D-моделлю, усі учасники використовують єдину спільну модель проекту. Модель існує в «центральному» середовищі, і до неї може отримати доступ і внести зміни кожен. Це називається Open BIM, що означає, що додається ще один рівень захисту від конфліктів та колізій, додаючи ще більшої цінності проекту на кожному етапі.

Переваги 3D BIM рівня:

- Краща 3D візуалізація всього проекту;
- Легка співпраця між кількома командами та професіоналами;
- Спрощене спілкування та розуміння задуму дизайну;
- Скорочення доопрацювання та редагування на кожному етапі проекту.

Рівні 4D, 5D і 6D BIM: Додавання інформації про організацію робіт, вартість і екологічність. Рівень 4D BIM вносить новий елемент в інформаційну модель: ***час***. Ця інформація включає дані планування, які допомагають визначити, скільки часу займе кожен етап проекту або послідовність різних компонентів.

Рівень 5D BIM додає до інформаційної моделі оцінки витрат та аналіз бюджету. Працюючи на цьому рівні BIM, власники проекту можуть відстежувати та визначати, які витрати будуть протягом усього "життя" будівлі.

Інформація рівня 6D BIM корисна для розрахунку енергоспоживання будівлі до початку її будівництва. Це гарантує, що дизайнери враховують не лише початкові

енерговитрати. Рівень 6D BIM забезпечує точне прогнозування потреб у споживанні енергії та дає можливість зацікавленим сторонам будувати енергоефективні та стійкі будівлі.

Переваги рівнів 4D, 5D і 6D BIM:

- Більш ефективне планування ділянки та самої будівлі;
- Більш ефективну передачу інформації між етапами будівництва;
- Візуалізація витрат у реальному часі;
- Спрощений аналіз витрат;
- Зменшення споживання енергії в довгостроковій перспективі;
- Краще оперативне управління будівлею або спорудою після передачі в експлуатацію.

Майбутнє BIM. Завдяки очевидним перевагам, BIM постає найкращим підходом для проектування будівель і споруд.

У цьому підході визначені цілі та завдання, які, очевидно, будуть корисними для всіх, хто працює в галузі будівництва та суміжних галузях. Безсумнівно, майбутнє будівництва буде ще більш цифровим і спиратися на поглиблення кооперації. Оскільки BIM стає дедалі складнішим, 4D, 5D і навіть 6D BIM почнуть відігравати певну роль у цьому процесі.

Крім того, в усьому світі робляться спроби зменшити кількість відходів у будівництві. Значною мірою ця проблема пов’язана з неефективністю ланцюжка забезпечення та організацію процесів. Завдяки спільній роботі в середовищі BIM все це стає набагато менш імовірним, закладаючи основу для кращого майбутнього.

Передовий край галузі продовжуватиме інновації. Щорічні цифрові опитування показують, що хмарні обчислення, блокчейн, штучний інтелект і сучасні методи будівництва постійно розвиваються.

Однак для більшості галузей майбутнє полягає в тому, щоб зробити існуючі інформаційні структури та процеси "звичайними". В основному це виклики для розвитку освіти, підготовки все більш багатогранних спеціалістів, але і технології також можуть в цьому допомогти. У міру зрілості платформ штучного інтелкету, ручні завдання зі структурування та класифікації даних і файлів будуть автоматизовані. Це і допоможе прискорити та посилити структуру та процеси BIM.

У майбутньому з’явиться "неперервна" нитка інформації про кожну будівлю, яка спільно розроблятиметься усіма учасниками проектування і будівництва, для усіх побудованих споруд. Це буде повна історія про те, що було побудовано, про те, як воно працює. Згодом це допоможе особам, які приймають рішення, постійно вдосконалювати створення безпечнішого та стійкішого архітектурного середовища.

УДК: 669-15, 39.376, 539.377, 539.431.2
А. Левенець, М. Тихоновський, к.ф.-м.н.
Національний Науковий центр «ННЦ ХФТІ», Україна

НОВІ ВИСОКОЕНТРОПІЙНІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ НАНОСТРУКТУРИЗАЦІЇ

A. Levenets, M. Tikhonovsky, Ph.D.
National Science Center «NSC KIPT», Ukraine

NOVEL HIGH-ENTROPY MATERIALS AND WAYS OF THEIR NANOSTRUCTURIZATION

Abstract. A new class of metallic materials, so-called “high-entropy alloys” (HEAs), was under review. Various definitions of these alloys are given, their main differences from the conventional alloys are indicated. The dynamics of publications in recent years in various databases indicates that there is an inexhaustible interest in these alloys. The unique set of properties makes these alloys suitable for any application (low temperature applications, aerosphere, nuclear power etc.).

Багатокомпонентні концентровані чи високоентропійні сплави (ВЕС) – це сплави, що містять 4-5 та більше елементів у рівному чи майже рівному співвідношенні. Головною особливістю ВЕС є наявність чотирьох ефектів, що впливають на структуру та властивості цих сплавів: висока ентропія змішування, сильне спотворення решітки, сповільнена дифузія та «коктейльний» ефект [1]. Завдяки структурним особливостям ВЕС мають набір унікальних властивостей: висока міцність, висока в’язкість руйнування при низьких температурах, висока термічна стабільність, корозійна стійкість. Такі сплави можуть стати перспективними матеріалами для різних областей застосування – аерокосмічна область, атомна енергетика, кріогеніка, біомедицина, тощо. Важливість цього класу матеріалів можна оцінити за зростаючим числом публікацій. Більше 5000 робіт було опубліковано з 2004 року до 2020 (див. рис. 1) [2].

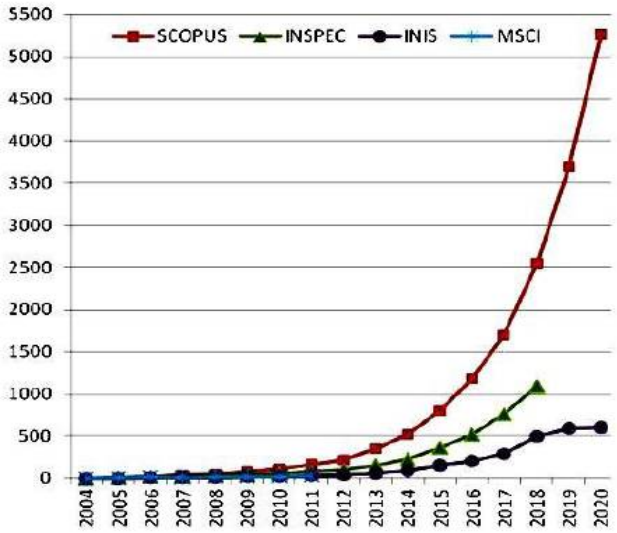


Рис. 2. Кумулятивне збільшення кількості публікацій, відображених у різних базах даних.

По мірі розвитку ВЕС їх можна розділити на декілька поколінь. Перше покоління ВЕС має однофазну структуру з ГЦК граткою. Такі сплави можуть конкурувати з традиційними аустенітними сталями, що, зазвичай, легуються подібними елементами (див. рис.2) [3].

Друге покоління ВЕС відрізняється наявністю другої фази (чи комплексу фаз) та складаються з 4х та більше елементів у не еквімолярному відношенні. Третє покоління ВЕС відносять до формування в сплавах за допомогою термомеханічної обробки та інтенсивної пластичної деформації наноструктурного стану, що призводить до появи унікальних механічних властивостей.

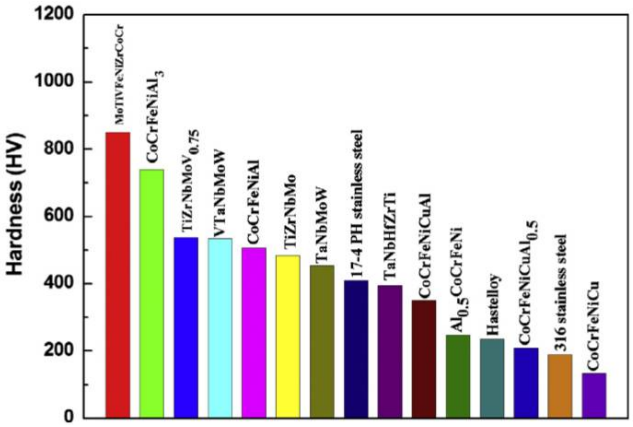


Рис. 3. Порівняння твердості деяких ВЕС із нержавіючими сталями та Hastelloy.

Одним із способів отримання наноструктурного стану в ВЕС є метод кручення під високим тиском (КпВТ). Метод КпВТ дозволяє здійснювати великі деформації зсуву та є одним з найбільш ефективних методів для досягнення наноструктурного стану. Наприклад, КпВТ сплава $Co_{20}Cr_{26}Fe_{20}Mn_{20}Ni_{14}$ при кімнатній температурі призводить до зростання межі міцності в 3 рази (з 700 до 2100 МПа) [4]. Для сплава CoCrFeMnNi КпВТ при 300 К призводить до зростання мікротвердості з 1,4 ГПа до 4,75 ГПа. Пониження температури КпВТ призводить до ще більшого зростання мікротвердості (див. рис. 3).

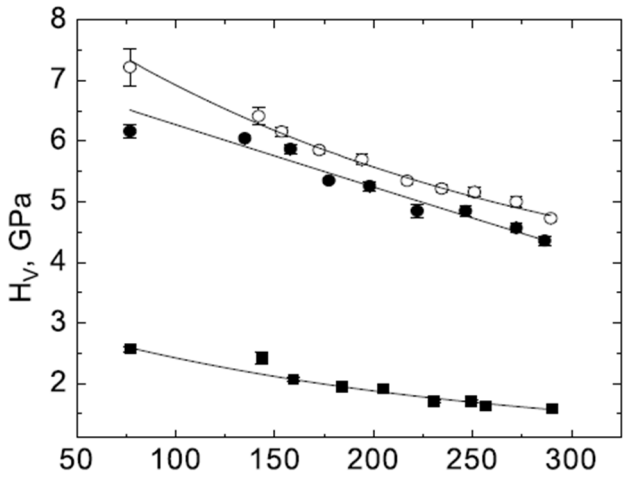


Рис. 4. Температурна залежність мікротвердості сплава: ■ – без КпВТ, ○ – КпВТ при 300 К, ● – КпВТ при 77 К.

Висновки:

1. Концепція ВЕС відкриває нове широке поле сплавів, які мають унікальні властивості.

2. Досягнення нанокристалічного стану в ВЕС призводить до значного зростання їх механічних характеристик

Література.

1. B.S. Murty, J.W. Yeh, S. Ranganathan, P.P.Bhattacharjee. High-entropy alloys:basic concepts. Elsevier, High-Entropy Alloys, (2019), 13-30.

2. A.V. Levenets, M.A. Tikhonovsky, V.N. Voyevodin, A.G. Shepelev, O.V. Nemaskalo. High-entropy alloys as a prospective class of new radiation-tolerant materials. Research development analysis based on the information databases. PAST, 2021.

3. Y. Zhang, T.T. Zuo, Z. Tang, M.C. Gao, K.A. Dahmen, P.K. Liaw, Z.P. Lu. Microstructures and properties of high-entropy alloys // Prog. Mat. Sci. 2014, N 61, p. 1-93.

4. J. Moon, Y.Qi, E. Tabachnikova, Y. Estrin, W.-M. Choi, S.-H. Joo, B.-J. Lee, A. Podolskiy, M. Tikhonovsky, H.S. Kim, Microstructure and mechanical properties of high-entropy alloy $Co_{20}Cr_{26}Fe_{20}Mn_{20}Ni_{14}$ processed by high-pressure torsion at 77 K and 300 K, Sci. Rep. 8 (2018) 11074.

УДК 539.42, 004.032.26,
О. Ясній[1, 2], д.т.н., проф., В. Ясній[1], д.т.н., доц., О. Малишевська[3], д.б.н., доц., І.Дідич[1]
[1]Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна.
[2]Краківський технологічний університет, Польща
[3]Івано-Франківський національний медичний університет, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПСЕВДОПРУЖНИХ СПЛАВІВ З ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ МЕТОДАМИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

O. Yasniy[1,2], Dr. Science, Prof., V. Yasniy[1], Dr. Science, Assoc. Prof., O. Malyshevska[2], Dr. Science, Assoc. Prof., I. Didych[1]
[1]Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine,
[2]Cracow University of Technology, Poland,
[3]Ivano-Frankivsk National Medical University, Ukraine

MODELING OF FUNCTIONAL PROPERTIES OF PSEUDOELASTIC SHAPE MEMORY ALLOYS BY METHODS OF MACHINE LEARNING

Abstract. There were predicted the functional properties of pseudoelastic alloy by machine learning methods, namely, the dependence of the dissipated energy and the strain range of NiTi alloy on the number of loading cycles. The obtained results are in good agreement with the experimental data. It was found that the random forests method gives the lowest prediction error of 3,9% and 7% in the test set of W_d-N and $\Delta\varepsilon$-N dependences, respectively.

Сплави з пам'яттю форми (СПФ) - функціональні матеріали, яким властиві ефекти пам'яті форми та надпружність [1-3].Завдяки цим властивостям застовування таких матеріалів є надзвичайно важливим у таких галузях науки і техніки як медицина, біоінженерія, машинобудування, будівництво тощо.

Під час експлуатації відповідальні елементи конструкцій піддаються циклічному навантаженню, часто зі змінною амплітудою, що призводить до передчасної втрати функціональних властивостей та їх руйнуванню. В свою чергу, для оцінки міцності та довговічності елементів конструкцій важливо вміти моделювати функціональні властивості матеріалу. Таку задачу можна ефективно розв'язувати методами машинного навчання, зокрема, застосовуючи нейронні мережі та випадкові ліси [4-6].

Мета дослідження – змоделювати залежності розсіяної енергії та розмаху деформації NiTi сплаву від кількості циклів навантаження.

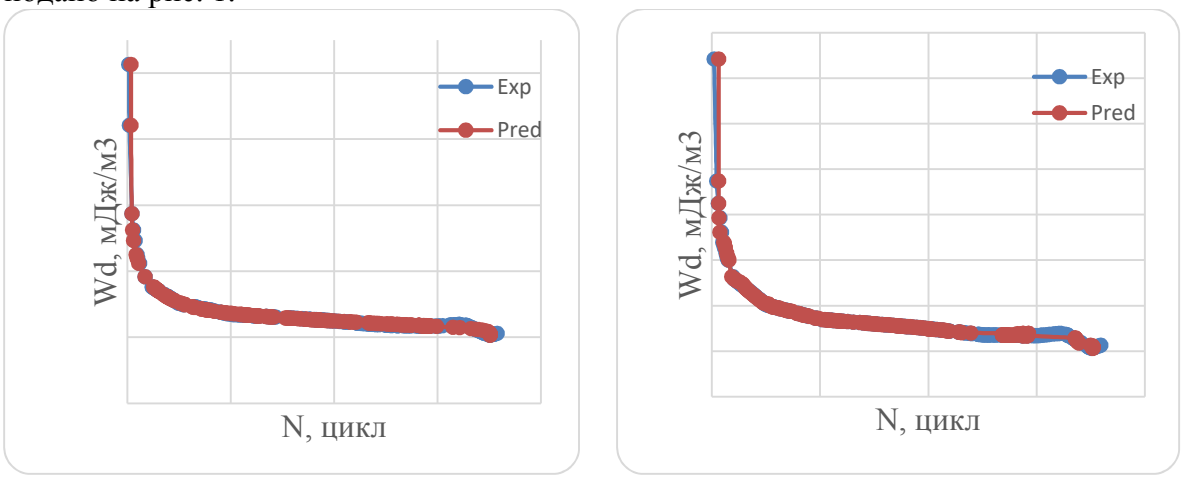
Одним із методів машинного навчання, котрим моделюють дані, є нейронні мережі. Зокрема, структура нейронних мереж тісно пов'язана із застосуванням алгоритмів навчання. Тому для досягнення гарної продуктивності досить часто застосовують навчання з учителем, під яким розуміють цільовий вихід, який відповідає певним вхідним сигналам.

Метод випадкових лісів здатний ефективно обробляти дані. Він складається з довільної кількості простих дерев. Зокрема, алгоритм будує множину дерев прийняття рішень, і потім усереднює результати їх передбачень.

Функціональні властивості моделювали за експериментальними даними, отриманими для NiTi сплаву у статті [7]. У процесі навчання масив даних розділили на дві нерівні частини – навчальну та тестову вибірки. Вибірка містила 719 елементів, з яких 70% вибрали випадково для навчальної вибірки, а 30% залишили, щоб оцінити якість прогнозування. Для моделювання залежності розсіяної енергії від кількості

циклів навантаження вхідним параметром слугувала розсіяна енергія W_d, тоді як кількість циклів N розглядали як вихідний параметр. Зокрема, вибірка для прогнозування розмаху деформації NiTi сплаву від кількості циклів навантаження містила 760 елементів. Тут, вхідним параметром обрали розмах деформації $\Delta\varepsilon$, а кількість циклів N - як вихідний параметр.

Залежності розсіяної енергії за цикл від кількості циклів навантаження подано на рис. 1.

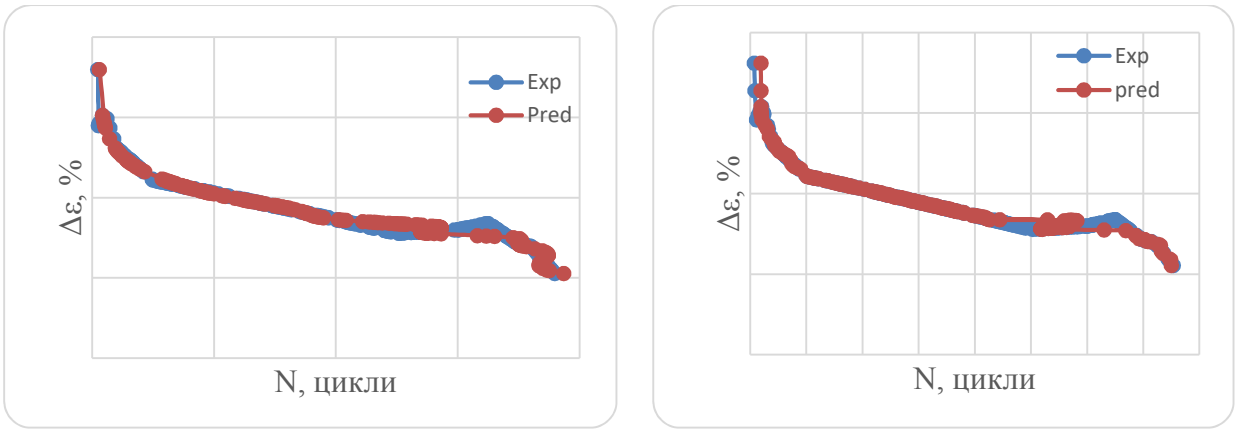


а) б)

Рис. 1. Прогнозовані та експериментальні залежності розсіяної енергії NiTi сплаву від кількості циклів навантаження, одержані методом нейронних мереж (а) та випадкових лісів (б)

Похибка методу випадкових лісів для тестової вибірки становить 3,9%, тоді як похибка методу нейронних мереж 5,5%.

Залежності розмаху деформації нітинолу від кількості циклів навантаження показано на рис. 2.



а) б)

Рис. 2. Прогнозовані та експериментальні залежності розмаху деформації NiTi сплаву від кількості циклів навантаження, одержані методом нейронних мереж (а) та випадкових лісів (б)

Похибка методу випадкових лісів для тестової вибірки становить 7%, а для нейронних мереж − 7,5%. Параметри моделей машинного навчання наведено у табл. 1-2.

Табл. 1. Параметри нейронних мереж

Залежності	Ім'я мережі	Алгоритм навчання	Функція помилки	Функція прихованої активації	Функція вихідної активації
W_d -N	MLP 1-4-1	BFGS	SOS	Тангенціальна	Експоненційна
$\Delta\varepsilon$-N	MLP 1-8-1	BFGS	SOS	Тангенціальна	Тангенціальна

Табл. 2. Параметри випадкових лісів

Залежності	Кількість дерев
W_d -N	520
$\Delta\varepsilon$-N	1000

Отримані результати добре узгоджуються з експериментальними даними. Методи машинного навчання, зокрема, нейронні мережі та випадкові ліси є потужним інструментом, котрим можна оцінити фундаментальні властивості NiTi сплаву. Найменшу похибку (3,9 і 7%) отримано методом випадкових лісів у всіх тестових вибірках.

Література.

1. Онишко О. С. Моделювання фізико-хімічної поведінки тіл, виготовлених зі сплавів з пам'яттю форми, за наявності електричного поля // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – **53**, № 4. – С. 107–111.

(Onyshko O. S. Modeling of the physicomechanical behavior of bodies made of alloys with shape memory in the presence of electric fields // Materials Science. – 2018. – **53**, № 4. – P. 541–547.)

2. Ma H. and Cho C. Feasibility study on a superelastic SMA damper with re-centring capability // Mater. Sci. Eng. A. Elsevier. – 2008. – 473, № 1–2. – P. 290–296.

3. Calculation of constructive parameters of SMA damper / P. Yasniy, M. Kolisnyk, O. Kononchuk, and V. Iasnii // Sci. J. TNTU. – 2017. – **88**, № 4. – P. 7–15.

4. Прогнозування діаграм втомного руйнування алюмінієвого сплаву Д16Т методами машинного навчання / О. П. Ясній, О. А. Пастух, Ю. І. Пиндус, Н. С. Луцик, І. С. Дідич // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 3. - С. 43–48.

O. P. Yasnii, O. A. Pastukh, Yu. I. Pyndus, N. S. Lutsyk, I. S. Didych: Prediction of the Diagrams of Fatigue Fracture of D16T Aluminum Alloy by the Methods of Machine Learning, Materials Science, 3(**54**), 2018, 333 – 338.

5. O. Yasniy, I. Didych, Yu. Lapusta: Prediction of fatigue crack growth diagrams by methods of machine learning under constant amplitude loading, Acta Metallurgica Slovaca, **26**(1), 2020, 31 –33.

6. Oleh Yasniy, Iryna Didych, Sergiy Fedak, Yuri Lapusta. Modeling of AMg6 aluminum alloy jump-like deformation properties by machine learning methods, Procedia Structural Integrity, **28**, 2020, 1392–1398.

7. Volodymyr Iasnii, Petro Yasniy. Degradation of functional properties of pseudoelastic NiTi alloy under cyclic loading: an experimental study, Acta mechanica et automatica, **13**(2), 2019, 95-100.

UDC 621.791.927.5
O. Ivanov[1], PhD, P. Prysyazhnyuk[2], PhD, Assoc. Prof., H. Kramar[3], PhD, Assoc. Prof., S. Marynenko[3], PhD, Assoc. Prof., I. Koval[3], PhD, Assoc. Prof., O. Huryk[3], PhD, Assoc. Prof.
[1] Professional College of Electronic Devices, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 76006, Ivano-Frankivsk, Ukraine
[2] Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 76019, Ivano-Frankivsk, Ukraine
[3] Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 46001, Ternopil, Ukraine

USING OF 3D MODELING FOR INVESTIGATION OF THE STRUCTURE OF HARDFACING MATERIALS DEVELOPED WITH FCAW USING OF POWDER ELECTRODES WITH REACTION MIXTURE FE-MO-B-C

Abstract. The main aim of the research is to investigate the structure of the hardfacing based on the perspective tungsten-free Fe-Ti-Mo-B-C system deposited with flux-cored arc welding FCAW. Investigation includes developing the methodology for the 3D modeling of the $Fe(Mo, B)_2$ grain. Obtained result in the form of 3D model show that in the hardfacing based on the Fe-Ti-Mo-B-C system main strengthening phase $Fe(Mo, B)_2$ is formed around grains of TiC, which act as a modifier.

Flux-cored arc welding (FCAW) [1] alongside with gas metal arc welding (GMAW) and Shielded Metal Arc Welding (SMAW) are widespread methods for hardfacing and, in some cases, restoring of machine parts. Wear resistance is one of the most important aspects of the durability not only of the parts but of machines itself. The advantages of the above mentioned is that the hardfacing could be provided without using of expensive equipment, at the complex geometry surface and could be used for restoring of machine parts as they could provide high volume of the deposited material. Also, using flux-cored electrodes as a material for hardfacing opens the possibility of an easy changing a ration of materials for the requirements both for mechanical properties and chemical composition of the hardfaced layer. Based on the modern trends in the material science and engineering, materials for hardfacing can be roughly divided into two groups: systems based on tungsten and tungsten-free materials. Classic tungsten-free systems are usually based on the Fe-Cr-C and Fe-Ti-C [2] and similar systems [3], but it is reasonable to point the perspective Fe-Ti-Mo-B-C system [4], using of which can increase the wear resistance of machine parts and overall durability of the machines that work under conditions of intensive abrasion wear.

Flux-cored arc welding (FCAW) was choose as a hardfacing method mainly because of the providing of the high volume of deposited material and its simplicity. As a hardfacing system the Fe-Ti-Mo-B-C system was choose.

FCAW electrodes were manufactured with placing mixture of initial components into 08 kp low carbon steel (DSTU EN 10139:2018) sheet. Width and high of cross-section of the electrode wire was 8 × 2.5 mm, electrode length – 420 mm. Chemical composition of electrode shown in Table 1.

Table 1. Chemical composition of experimental electrode.

Compositions, at.%				
Ti	Mo	B	C	Fe
8.26	8.26	22.01	5.51	bal

Welding parameters, based on the research [5] were as follows: direct current 150 A with a reverse polarity, arc-voltage 30-32 V. Cooling was carried out on an air at 20° C.

VDU-506 rectifier was used for hardfacing. Hardfacing was made in three layers in order to ensure higher amount of deposited material during structure investigation.

Microstructure was investigated with a SEM using ZeiSS EVO 40XVP electron microscope. The hardness measurement was tested by Rockwell method, scale "C". Also, PMT-3 hardness meter with a camera added to the lens was used for additional structure observing.

Blender software was used for 3D modeling and Image Pro Plus software was used for images analysis and measurements.

Microstructure (Figure 1) of the sample is characterized with presence of the large (~ 8 μm) grains of $Fe(Mo, B)_2$, surrounded with homogeneous phase alongside with eutectic-like areas. Also, small (~ 1 μm) grains of TiC that are centered in $Fe(Mo, B)_2$ can be spotted.

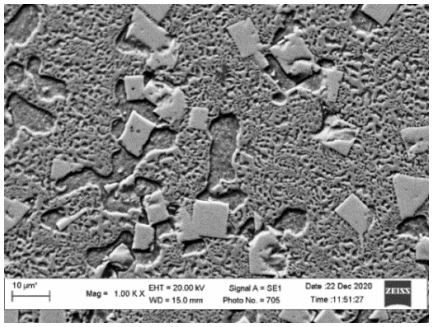


Fig. 1. SEM analysis of the microstructure of hardfaced layer

Special methodology that consist of four steps was developed and used for the 3D modeling of the grain. Blender and Image Pro Plus software as well as mathematical calculating were used for modeling of the $Fe(Mo, B)_2$ grain. Also, the research area was selected by the observation of the structure, carried out with the DCM510 camera attached to the PMT-3 hardness tester.

Such method of structure investigation has significant advantages as using of it can ensure full 3D researching of the microstructure of the material as well as the external and internal geometry of single grain.

Using the developed methodology 23 images (Figure 2) of the structure were taken with constant amount of removed material as well as the depth of material removed between taking images was calculated.

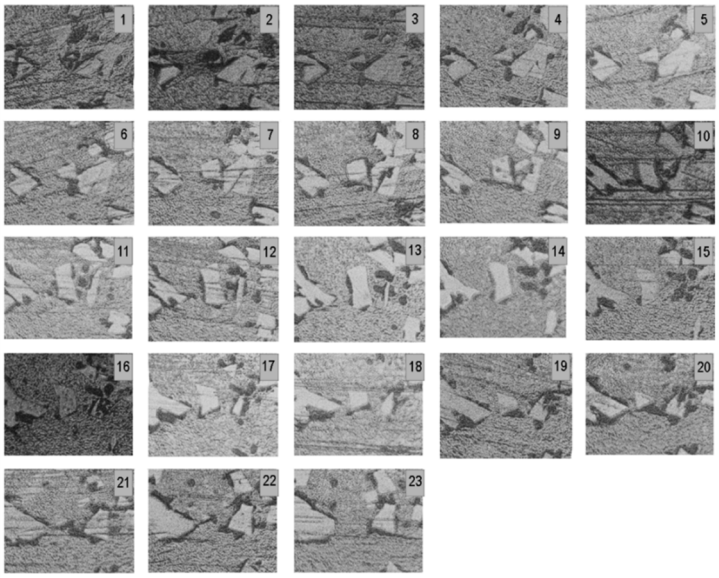
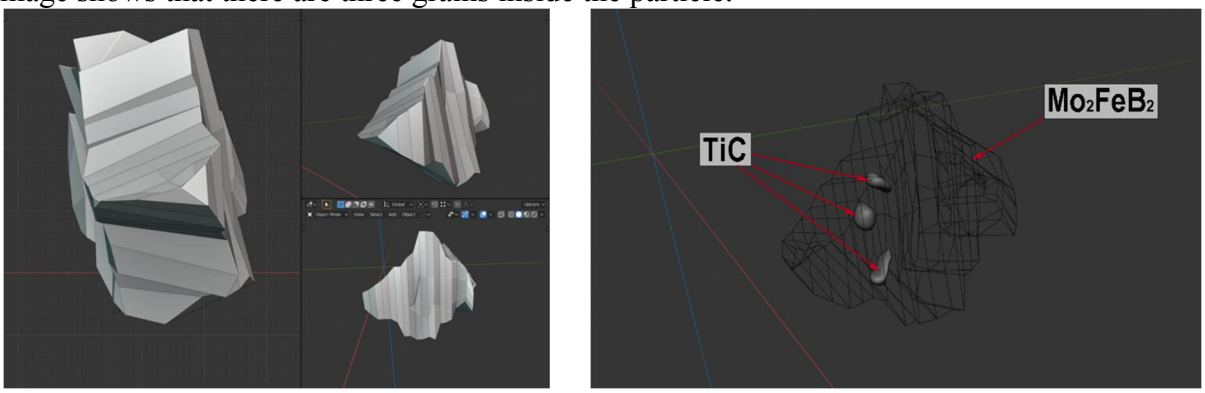


Fig. 2. Images of the sample structure, taken with a constant material removed between images

Using the 3D modeling software Blender and built-in tools of the software a particle consisting of 23 sections was modeled (Figure 3, a). Also, the internal structure of the particle, which is presented in Figure 3, b, was taken into account during modeling. The image shows that there are three grains inside the particle.



a b

Fig. 3. 3D model of a 23-section particle modeled according to the data of Figure 2 (a) and the internal structure of a particle, that confirms the presence the TiC grains inside of it

Hardfacing using FCAW with Fe-Ti-Mo-B-C as a hardfacing system shows hardness of 65 HRC in the top layer. Microstructure observation shows that the small TiC grains presented in the Fe(Mo, B)$_2$ grains. Modeled internal structure of the grain (Figure 3, b) confirms the presence of small inclusions of titanium carbide TiC, around which the main strengthening phase Fe(Mo, B)$_2$ is formed in the form of rectangular prisms, which corresponds to its tetragonal crystal system. Such results of the experimental observation and 3D modeling can be described as a confirmation that TiC grains acts as a modifier for the formation of the other phase. And the developed methodology could be used for further research of the materials to establish the geometry of the grains of different phases as well as usage of 3D models for precisely simulation of material behavior.

Literature.

1. Trembach B., Sukov M., Vynar V., Trembach I., Subbotina V., Rebrov O., Rebrova O., Zakiev V. Effect of Incomplete Replacement of Cr for Cu in the Deposited Alloy of Fe–C–Cr–B–Ti Alloying System with a Medium Boron Content (0.5% wt.) on its Corrosion Resistance. Metallofiz. Noveishie Tekhnol. 2022. 44, No. 4. https://doi.org/10.15407/mfint.44.04.0493

2. Trembach, B., Vynar, V., Trembach, I., Knyazev, S. Comparison of two-body abrasive wear resistance of high chromium boron-containing Fe–C B–13wt.%Cr Ti alloy with incomplete replacement of Cr for Cu the Fe C B 4wt.%Cr 7wt.%Cu–Ti alloy. Problems of Tribology. 2022. 27(3/105). https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-105-3-34-40

3. Kocaman E., Kılınç B., Şen S., Şen U. In-situ TiB2 and Fe2Ti intermetallic assisted hard coatings by Fe-Ti-B based hardfacing electrodes. Journal of Alloys and Compounds. 2022. Volume 900, 163478. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163478

4. Bembenek M, Prysyazhnyuk P, Shihab T, Machnik R, Ivanov O, Ropyak L. Microstructure and Wear Characterization of the Fe-Mo-B-C—Based Hardfacing Alloys Deposited by Flux-Cored Arc Welding. Materials. 2022. 15(14):5074. https://doi.org/10.3390/ma15145074

5. Ivanov O., Prysyazhnyuk O., Shlapak L., Marynenko S., Bodrova L., Kramar H. Researching of the structure and properties of FCAW hardfacing based on Fe-Ti-Mo-B-C welded under low current. Procedia Structural Integrity. 2022. Volume 36. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.028

УДК 621.793

В. Коржик[1,2], д.т.н, член-кор. НАНУ, В. Квасницький[2,3], д.т.н, проф., А. Гринюк[1,4], к.т.н, О. Бабіч[1,4], к.т.н, О. Сливінський[3], к.т.н, доц., С. Пелешенко[3], аспірант, І. Лагодзінський[3], аспірант.

[1] Китайсько-Український інститут зварювання ім. Є.О. Патона Академії наук провінції Гуандун, Гуандунська ключова лабораторія передових технологій зварювання, Гуанчжоу, Китай

[2] Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, Україна

[3] Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

[4] Науково-дослідний інститут імені Є.О. Патона в провінції Чжецзян, Чжецзян, Китай

РОЗРОБКА ПЛАЗМОТРОНУ ДЛЯ ГІБРИДНОГО ПЛАЗМОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ З ОСЬОВОЮ ПОДАЧЕЮ ЕЛЕКТРОДНОГО ДРОТУ

V. Korzhyk[1,2], Dr., Corresponding Member of the NAS of Ukraine, V. Kvasnytskyi[2,3], Dr., Prof., A. Grynyuk[1,4], Ph.D., O. Babych[1,4]Ph.D., O. Slyvinskyy[3], Ph.D., Assoc. Prof., S. Peleshenko[3], Ph.D. student, I. Lahodzinskyi, Ph.D. student.

[1]China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding of the Guangdong Academy of Sciences. Guandong Key Laboratory of Advanced Welding Technologies, Guangzhou, China

[2]E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. Kyiv, Ukraine.

[3]NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine.

[4] E.O. Paton Scientific Research Institute in Zhejiang Province, Zhejiang, China

DESIGNET OF PLASMA TORCH DESIGN FOR HYBRID PLASMA WELDING WITH FUSED ELECTRODE WITH AXIAL ELECTRODE WIRE FEEDING

Abstract. The thesis discusses the development of specialized plasmatrons for hybrid plasma-arc welding with a melting electrode. The ways of technological solutions for the organization of filler wire feeding in combination with the use of a compressed arc of a non-consumable electrode are reviewed. The development of a new, serial plasmatron with coaxial feeding of the filler electrode for welding aluminum alloys is presented.

Гібридні технології зварювання дозволяють об’єднати переваги зварювання при застосуванні енергій стисненої дуги неплавкого та дуги плавкого електроду, що особливо доцільно при зварюванні алюмінієвих сплавів. Такий гібридний процес називають гібридним плазмо-дуговим зварюванням плавким електродом або Plasma-MIG процесом. Використання Plasma-MIG процесу теоретично дозволяє значно зменшити необхідну погонну енергію зварювання та витрати присадного матеріалу для отримання зварних з'єднань з високоміцних алюмінієвих сплавів.

Перші спеціалізовані плазмотрони для Plasma-MIG процесу відомі ще з 1970-х років. Так, в запропонованій в [1] конструкції анодом виступав вольфрамовий електрод, розташовувався з боку від центру осі плазмоутворювального сопла крізь яке здійснювалось подавання електродного дроту. Подальший розвиток плазмотронів для гібридного плазмо-дугового процесу був сфокусований на підвищені зносостійкості самих частин плазмотронів та варіюванні конструкцій гібридних пальників [2-4]. Розглядалося питання використання стисненої дуги не тільки прямої, але і непрямої дії. Пропонувалися різні варіанти збудження стисненої дуги непрямої дії, та використання її не тільки для стисненої дуги, а й для дуги плавкого електрода [5]. Однак, через

технологічні складнощі виготовлення та наладгодження процесу зварювання, такі плазмотрони не набули широкого поширення.

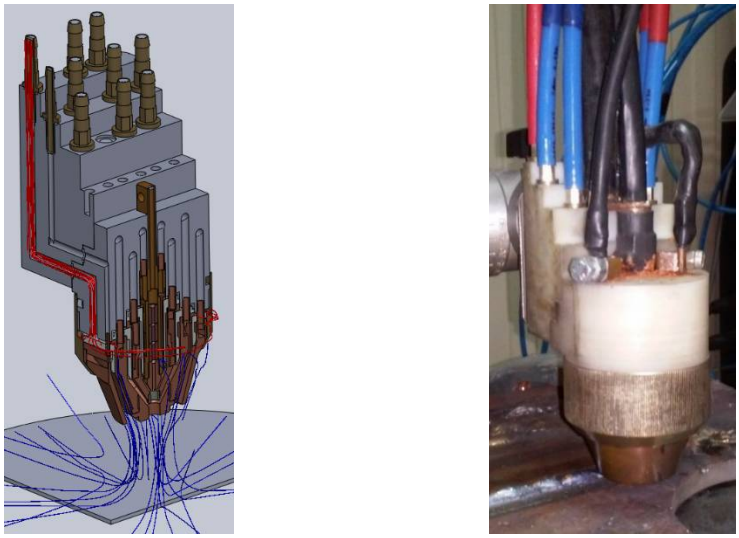
Актуальний розвиток гібридних пальників для Plasma-MIG зварювання іде шляхом застосування порожнинного аноду [6], у якості якого виступала вставка з тугоплавкого матеріалу [7] з коаксіальним подаванням електродного дроту.

На даний час дослідження гібридного Plasma-MIG процесу проводяться у багатьох країнах, але лише одиниці фірм виготовляють обладнання для плазмо-дугового процесу зварювання на струмах до 250-400 А.

Враховуючи даний фактор, задля високопродуктивного зварювання товстих (до 12 мм) листів з алюмінієвого сплаву 1561, розроблено спеціалізований гібридний плазмотрон, з вимогами до загального струмового навантаження у 500 А постійного струму оберненої полярності.

Для отримання оптимальних характеристик при розробці гібридного пальника використано комп'ютерне моделювання та симуляцію протікання технологічних газів з урахуванням загальної газодинаміки пальника (рис. 1-а).

В результаті моделювання та розрахунків, виготовлено прототип гібридного плазмотрона (рис. 1-б). У ході експериментальних випробувань виявлені недоліки газодинаміки та контуру охолодження плазмоутворювального сопла. Спостерігалися часті замикання та «приплавлення» до мундштука електродного дроту.



а) б)

Рис. 1. а) – моделювання газодинаміки захисного та плазмоутворювального газів; б) – робочий прототип гібридного плазмотрона

Для вирішення вищезазначених проблем, запропонована удосконалена конструкція плазмотрону з використанням елементів серійних пальників для зварювання плавким електродом (рис. 2). Для виконання досліджень з гібридного плазмо-дугового зварювання плавким електродом з коаксіальною подачею електродного дроту було розроблено спеціалізований лабораторний комплекс (рис. 3).

Рис. 2. Серійний зразок гібридного плазмотрону

Комплекс включає в себе модифіковане зварювальне інверторне джерело живлення для аргонодугового зварювання неплавким електродом, удосконалений плазмовий модуль, модифіковане джерело живлення для зварювання плавким електродом, блок автономного охолодження, плазмотрон для гібридного плазмо-дугового зварювання плавким електродом з коаксіальною подачею дроту «Plasma-MIG», багатопозиційний лабораторний зварювальний стіл-маніпулятор, загальну систему керування процесом гібридного зварювання «Plasma-MIG», яка забезпечує керування усіма одиницями комплексу обладнання. Закріплення зразків перед зварюванням здійснюється в універсальній складально-зварювальній плиті (рис. 3).

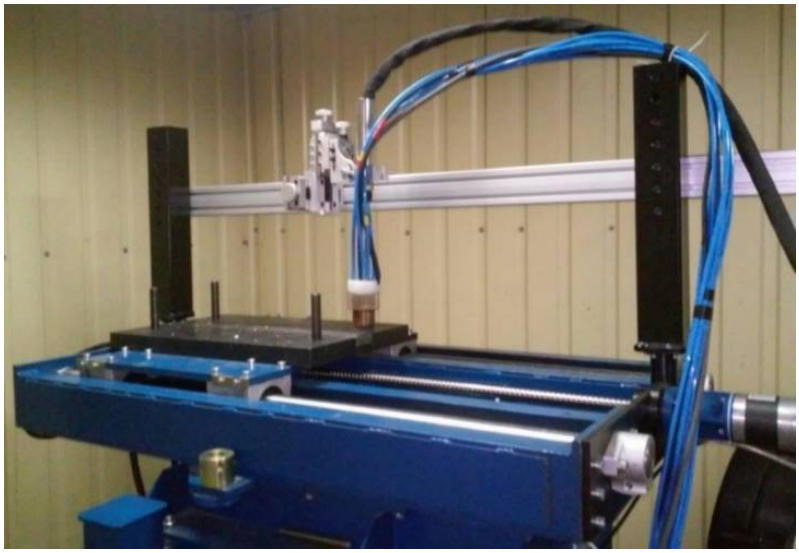


Рис. 3. Експериментальний зварювальний стенд

За результатами порівняльних досліджень зварних зразків зі сплаву 1561 встановлено, що використання Plasma-MIG процесу у порівнянні з традиційним MIG зварюванням, при однаковій швидкості зварювання, дозволяє зменшити ширину шва на 22%, зменшити на 13% кількість використовуваного для формування шва дроту. При цьому на 39% зменшується величина погонного енергії.

Література.

1. Pat. 3,612,807 US, B23k9/00. Method of and device for plasma arc welding/ Adrianus Christinus Henricus Jozef Liei'kens, Wilhelmus Gerardus Essers // U.S. Philips Corporation – 1971
2. Pat. 3,891,824 US, B23k9/00. Method of Plasma-MIG-Welding/, Wilhelmus Gerardus Essers, Gerardus Jelmorini // U.S. Philips Corporation - 1975
3. Pat. 4,039,800 US, B23k9/00. Method of and device for arc welding/, Wilhelmus Gerardus Essers // U.S. Philips Corporation – 1977
4. Pat. 4,122,328 US, B23k9/00. Device and welding torch for Plasma-MIG-Welding/, Wilhelmus Gerardus Essers, Gerardus Jelmorini, Gerrit Willem Tichelaar // U.S. Philips Corporation – 1978
5. Pat. 4,039,800 US, B23k9/00. Method of and device for arc welding/, Wilhelmus Gerardus Essers // U.S. Philips Corporation – 1977
6. Pat. 0168810A1 EP, B23k28/00. Schweissbrenner zum Plasma-MIG-Schweissen/ Peter Blechert // Suddeutsche Kuhlerfabrik Julius Behr GmbH & Co – 1985
7. Гринюк А.А. Основные тенденции развития плазменно-дуговой сварки алюмниевых сплавов. / А.А. Гринюк, В.Н. Коржик, В.Е. Шевченко и др.// Автоматическая сварка – 2015. - №11. – с. 39 – 50.

УДК 539.3
Н. Биків[1], В. Ясній[1], д.т.н., доц., Ю. Лапуста[2], д.т.н., проф., В. Будз[1]
[1]Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, Україна
[2]University Clermont Auvergne, CNRS, Institute Pascal, Clermont-Ferrand F-63000, France

ВПЛИВ ЧАСТОТИ НАВАНТАЖЕННЯ НА ФУНКЦІОНАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ПСЕВДОПРУЖНОГО СПФ

N. Bykiv[1]; V. Iasnii[1], Dr., Assoc. Prof.; Y. Lapusta[2], Dr., Prof.; V. Budz[1];
[1]Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine
[2]University Clermont Auvergne, CNRS, Institute Pascal, Clermont-Ferrand F-63000, France

INFLUENCE OF FREQUENCY ON FUNCTIONAL PROPERTIES OF PSEUDOELASTIC SMA

Abstract. This article describes the study of the effect of frequency on the functional properties of a pseudoelastic SMA. A wire with a diameter of 1.5 mm and a length of 210 mm was subjected to a tensile test at frequencies of 0.1 Hz and 10 Hz. The research was carried out under controlled stresses in the sample. The difference in frequency greatly affected the functional properties of the SMA and durability.

Складні умови експлуатації будівель та споруд потребують широкого спектру досліджень перед застосуванням нових матеріалів у будівництві. Так, для проєктування демпфуючих пристроїв (demping device) із СПФ проводять комплексні експереминтально-розрахункові дослідження змін властивостей компонентів та пристрою в цілому [1], [2].

Багато праць присвячено вивченню поведінки СПФ під дією циклічних навантажень за різних частот [3], [4], [5]. У досліджені сендвіч-плит із попередньо натягнутими дротинами СПФ [6] зафіксовано погіршення функціональних властивостей псевдопружних елементів. Це пов’язано із накопиченням тепла у дротинах під дією циклічного навантаження.

Експерименти із конічною пружною шайбою із СПФ демонструють зміни жорсткості та кількості розсіяної енергії зі збільшенням частоти навантаження від 0,5 Гц до 10 Гц.

Більшість праць опирається на дослідження із жорстким режимом циклічного навантаження (контрольована деформація зразка). Постає потреба у розумінні поведінки СПФ за м’якого режиму циклічного навантаження (контрольоване напруження зразка).

Досліджено зміни функціональних властивостей дротини зі сплаву із пам’яттю форми (Табл. 1.).

Табл. 1. Характеристики сплаву із пам’яттю форми

Сплав	Тип зразка	Діаметр	Робоча довжина	E_A	σ^{AM}
$Ni_{55,8}Ti_{44,2}$	дротина	1,5 мм	210 мм	52,7 ГПа	338 МПа

Дослідження проведено на сервогідравлічній машині STM-100 за кімнатної температури. Випробування дротини одновісним розтягом проведено у частотах 0,1 Гц та 10 Гц синусоїдальної форми циклу.

Напружено-деформований стан визначено із значень зусиль та переміщень, записаних програмою Test Builder. Розсіяну енергію визначено із петель гістерезису (Рис. 5) за формулою (1).

$$W_{dis\,i} = W_{dis\,i-1} + \frac{1}{2}(\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})(\sigma_i + \sigma_{i-1}) \quad (1)$$

де W_{dis} – розсіяна енергія, МДж/м^3; ε – відносна деформація, м/м; σ – напруження, МПа.

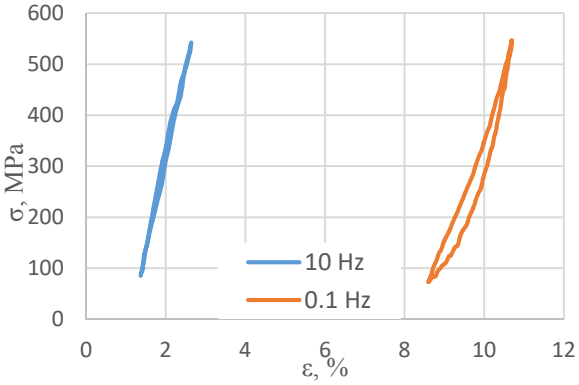


Рис. 5. Залежності напруження від деформації NiTi сплаву 1000-го циклу навантаження за частоти у 0,1 Гц та 10 Гц

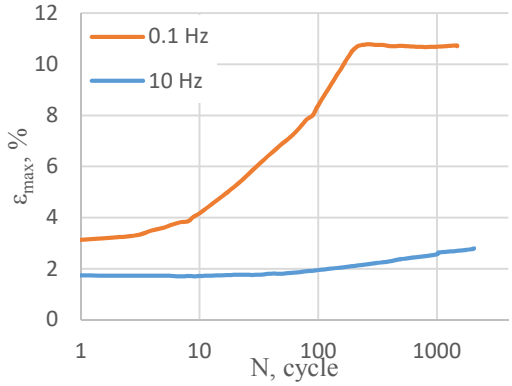


Рис. 6. Залежності максимальних деформацій NiTi сплаву від кількості циклів навантаження

Помічено зменшення площі гістерезису із збільшенням частоти навантаження (Рис. 5). Різниця у кількості розсіяної енергії змінювалась із кількістю циклів (Табл. 1).

Табл. 1. Зміна кількості розсіяної енергії

Частота, Гц	Кількість розсіяної енергії за цикл, МДж/м^3							
	1-ий	10-ий	50-ий	100-ий	500-ий	1000-ий	1477-ий	2052-ий
0,1	2,82	4,16	5,30	5,11	1,37	1,02	0,96	-
10	0	0,03	0,09	0,11	0,15	0,17	0,31	0,31

Спостерігається збільшення довговічності дротини приблизно на 30% при збільшенні частоти у 100 разів. Паралельно із цим, збільшення частоти навантаження призвело до зменшення максимальних деформацій. У першому циклі деформації за частоти 0,1 Гц у 2 рази більші, ніж за 10 Гц. Після 200-го циклу різниця деформацій п'ятикратна (Рис. 6).

Із проаналізованих даних випливає, що частота навантаження значно впливає на поведінку дротини із СПФ та її властивості. Це формує підґрунтя для подальших досліджень псевдопружного елементу за м'якого режиму навантаження.

Література.

1. Yasniy P. et al. Calculation of constructive parameters of SMA damper // Sci J TNTU. 2017. Vol. 88, № 4. P. 7–15.
2. Iasnii V., Sobaszek L., Yasniy P. Study of cyclic response of SMA based damping device // Procedia Struct Integr. Elsevier BV, 2022. Vol. 36. P. 284–289.
3. Teh Y.H., Featherstone R. Frequency response analysis of shape memory alloy actuators // Int Conf Smart Mater Nanotechnol Eng. 2007. Vol. 6423, № July. P. 64232J.
4. Bernardini D., Rega G. Evaluation of different SMA models performances in the nonlinear dynamics of pseudoelastic oscillators via a comprehensive modeling framework // Int J Mech Sci. Pergamon, 2017. Vol. 130. P. 458–475.
5. Huang Y. et al. Modal Performance of Two-Fiber Orthogonal Gradient Composite Laminates Embedded with SMA // Materials (Basel). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2020. Vol. 13, № 5.
6. Botshekanan Dehkordi M., Khalili S.M.R. Frequency analysis of sandwich plate with active SMA hybrid composite face-sheets and temperature dependent flexible core // Compos Struct. Elsevier, 2015. Vol. 123. P. 408–419.

UDK 614.846

S. Guzii[1], Ph.D., Senior Researcher, T. Kurska[2], Ph.D., Assoc. Prof., N. Grygorenko[3], Ph.D. in Public Administration, Assoc. Prof., V. Pokaliuk[4], Ph.D. of Pedagogical Sciences, Assoc. Prof., O. Kostyrkin[5], Ph.D., Assoc. Prof., O. Petrova[6], Ph.D. in Agricultural Sciences, Assoc. Prof.

[1]Institute of superhard materials named after V.M. Bakulya of the National Academy of Sciences, Ukraine

[2]Odessa Polytechnic National University, Ukraine

[3]National University of Civil Defense, Ukraine

[4]Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defence, Ukraine

[5]Ukrainian State University of Railway Transport, Ukraine

[6]Mykolaiv National Agrarian University, Ukraine

DETERMINATION OF THE FIRE-RETARDANT EFFICIENCY OF HEAT-INSULATING MIXTURES ON GEOCEMENT-BASED FOR THE PROTECTION OF METAL STRUCTURES FROM FIRE

С. Гузій[1], к.т.н., с.н.с., Т. Курська[2], к.т.н., доц., Н. Григоренко[3], к.н.держ.упр., доц., В. Покалюк[4], к.пед.н., доц., О. Кострикін[5], к.т.н., доц., О. Петрова[6], канд. с.-г.н., доц.

[1]Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Україна,

[2]Національний університет «Одеська політехніка», Україна,

[3]Національний університет цивільного захисту України, Україна,

[4]Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України,Україна,

[5]Український державний університет залізничного транспорту, Україна,

[6]Миколаївський національний аграрний університет, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ СУМІШЕЙ НА ГЕОЦЕМЕНТНІЙ ОСНОВІ ДЛЯ ЗАХИСТУ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ВІД ВОГНЮ

Abstract. The paper presents the results of determining the fire-retardant efficiency of heat-insulating mixtures based on geocement to protect metal structures from fire. After fire tests, it was found that with a coating thickness of 25 mm, the metal surface of an I-beam is heated to a critical temperature of 500 °C in 113 minutes of testing, which ensures the fire resistance class of metal structures P90-P120 and group III of fire retardant efficiency.

Introduction. Fire protection of building structures is always relevant. For this, both the fire-retardant materials themselves and design solutions based on them we created. The presented work is a continuation of the cycle of works in the field of fire protection of metal structures [1]. Recently, consumers are interested in environmentally friendly fire-retardant materials based on geocement (aluminosilicate) binders [2-4], modified with carbonate additives [5, 6], as well as organo-mineral binders of intumescent type [7-10]. To improve the thermal insulation properties of such materials, it is advisable to introduce fillers in the form of perlite and vermiculite sand, microspheres, etc. [11–13].

The purpose of the work is to determine the fire-retardant efficiency of heat-insulating mixtures based on geocement to protect metal structures from fire.

To achieve this goal, it is necessary to solve the following problems:

- to test the protected metal structure for fire resistance at standard temperature conditions;

- calculate the fire resistance limit of steel structures according to Eurocode 3.

- to compare the results obtained by the experimental and calculation methods.

Materials and Test methods. A two-component heat-insulating mixture we used as a fire-retardant material. The liquid component we represented by a geocement suspension with an average density of 1.427 g/cm^3, a dynamic viscosity of 1987 cP at 25 rpm, and a surface tension of 46.9 mN/m. A rationally selected mixture of aluminosilicate granules, expanded perlite and technological additives represents the dry component. The bulk density of the mixture is 0.560 g/cm^3, the thermal conductivity coefficient is within 0.0958 W/m·K. Before use, the liquid and dry components of the heat-insulating mixture they mixed in a container with a construction mixer for 3 minutes. Fire tests they carried out on I-beam hot-rolled steel No. 20 GOST 8239-89.

Results and Discussion. In **Fig.** shows a graph of the temperature distribution on the side flanges and the I-beam wall.

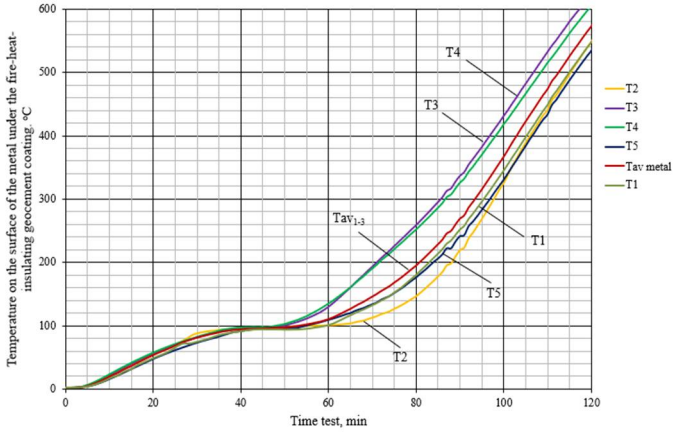


Fig. Evolution of temperature on the metal surfaces of the I-beam: T1-T3 – the main thermocouples adapted on the I-beam; Tav1-3 – average values of thermocouples T1-T3; T4-T5 – additional thermocouples. The appearance of the magnesite composite during testing we provided as inset.

After the completion of the firing tests, a comparison we made between the experimental and calculated data given in the **Table** and for the given parameters of the mixture. Experiment data: reaching the critical temperature of heating the I-beam up to 500 °C with a fireproof coating thickness of 25 mm they carried out for 113 minutes of fire tests; the fire resistance class of the steel column ranges from R90 to R120.

Table. Comparison of the minimum thicknesses of geocement perlite containing thermal insulation mixture (d_ρ, mm)[1]

Geocement perlite containing thermal insulation mixture, ρ=0.560 [g/cm^3], $\lambda_\rho(\lambda_c)$=0.1 [W/m·°C][2], Cp=1130 [J/kg·K]						
Profile section coefficient, A_m/V, [m^{-1}]	Calculation method	Fire resistance class				
		R60	R90	R120	R150	R180
345-140	Eurocode 3					
	Equation 3					
2 According to Equation 1, the thermal conductivity of a fire-retardant system is temperature dependent. The calculation took into account the data obtained during tests according to DSTU B V1.1.-17: 2007						

Estimated data for Eurocode 3 and Equation 3: reaching the critical temperature of heating the I-beam up to 538 °C with a fire-retardant coating thickness of 25 mm they carried out for 116 minutes; the fire resistance class of the steel column ranges from R90 to R120.

To ensure the fire resistance class R120, in the future, it is necessary to increase the thickness of the geocement-perlite thermal insulation mixture to 30 mm, which will increase the fire efficiency of the proposed fire-retardant material.

Summary. According to the results of fire tests, it they found that with a coating thickness of 25 mm, the metal surface of the I-beam heats up to a critical temperature of 500 °C for 113 minutes of the test. This indicator provides the fire resistance class of metal structures R90-R120 and the III group of fire-retardant efficiency of steel structures. Based on the calculated data according to Eurocode 3, it we established that the critical heating temperature of the I-beam up to 538 ° C with a fireproof coating thickness of 25 mm we achieved for 116 minutes. This ensures the fire resistance class of the steel column R90 - R120 and the III group of fire-retardant efficiency.

References.

[1] S. Guzii, Y. Otrosh, O. Guzii, A. Kovalov, K. Sotiriadis, Determination of the Fire-Retardant Efficiency of Magnesite Thermal Insulating Materials to Protect Metal Structures from Fire, Materials Science Forum. 1038, (2021), pp. 524-530.

[2] J. Sarazin, C. A. Davy, et al. Flame resistance of geopolymer foam coatings for the fire protection of steel, Composites Part B: Engineering. 222, (2021), p. 109045.

[3] M.-B. Watolla, G.J.G. Gluth, et al. Intumescent geopolymer-bound coatings for fire protection of steel, Journal of Ceramic Science and Technology. 8(3), (2017), pp. 351-364.

[4] M. Sukhanevich, S. Guzii, The effect of technological factors on properties of alkali aluminosilicate systems used for preparation of fireproof coatings. Refractories and Industrial Ceramics. 45, (2004), pp. 217–219.

[5] L. Bodnarova, S. Guzii, et al. Nano-structured alkaline aluminosilicate binder by carbonate mineral addition. Solid State Phenomena. 276, (2018), pp. 192-197.

[6] V. Kyrychok, P. Kryvenko, S. Guzii. Influence of the CaO-containing modifiers on the properties of alkaline alumosilicate binders. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2(6-98), (2019), pp. 36-42.

[7] J.W. Gu, G.C. Zhang, et al., Study on preparation and fire-retardant mechanism analysis of intumescent flame-retardant coatings, Surface and Coatings Technology. 201, (2007), pp. 7835–7841.

[8] S. Duquesne, S. Magnet, C. Jama, R. Delobel, Intumescent paints: Fire protective coatings for metallic substrates, Surface and Coatings Technology. 180, (2004), pp. 302–307.

[9] T. Mariappan, Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review, Journal of Fire Sciences. 34, (2016), pp. 120–163.

[10] S. Guzii, T. Kurska, et al. Features of the organic-mineral intumescent paints structure formation for wooden constructions fire protection. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1162, (2021), pp. 012003.

[11] S. Duquesne, P. Bachelet, et al., Influence of inorganic fillers on the fire protection of intumescent coatings, Journal of Fire Sciences. 31, (2013), pp. 258–275.

[12] P. Kryvenko, Y. Tsapko, S. Guzii, A. Kravchenko. Determination of the effect of fillers on the intumescent ability of the organic-inorganic coatings of building constructions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 5(10-83), (2016), pp. 26-31.

[13] Š. Hýsek, M. Frydrych, et al., Fire-Resistant Sandwich-Structured Composite Material Based on Alternative Materials and Its Physical and Mechanical Properties. Materials, 12, (2019), p. 1432.

УДК 678.549

П. Савчук[1], д.т.н., проф., В. Кашицький[2], к.т.н., проф., О. Садова[2], к.т.н., доц., В. Мазурок[2]
[1]Волинська державна сільськогосподарська дослідна станція Інституту картоплярства Національної академії аграрних наук України, Україна
[2]Луцький національний технічний університет, Україна

МОДИФІКУВАННЯ БІОПОЛІМЕРНОЇ МАТРИЦІ ПОЛІВІНІЛАЦЕТАТОМ

P. Savchuk[1], Dr., Prof., V. Kashytskyi[2], Ph.D., Prof., O. Sadova[2], Ph.D., Assoc. Prof., V. Mazurok[2]
[1] The Volynska state agricultural research station of the Institute for Potato Research of the National academy of agrarian sciences of Ukraine, Ukraine
[2]Lutsk National Technical University, Ukraine

MODIFICATION OF THE BIOPOLYMER MATRIX WITH POLYVINYL ACETATE

Abstract. The influence of the modifying additive of the gluten matrix on the mechanical characteristics of biocomposite materials investigated. Optimization of heat treatment regimes of biocomposite materials at the first and main stages of product formation carried out. The effectiveness of additional heat treatment of biocomposites determined.

Сучасний розвиток матеріалознавства в галузі розробки полімеркомпозитів повинен враховувати виклики та загрози, що пов'язані з екологічним станом навколишнього середовища та вичерпністю нафтових ресурсів. Використання компонентів природного походження дозволяє частково або повністю відмовитися від синтетичних полімерів, як в'яжучого компонента полімеркомпозитів, а також активно використовувати відходи сільськогосподарського виробництва та харчової галузі для отримання сировини, після переробки якої можна отримати відповідні порошкові наповнювачі.

Закордонні науковці у своїх науково-інноваційних розробках часто використовують волокнисті наповнювачі або тканини на основі волокон рослинного походження [1, 2]. Такі наповнювачі є в достатній кількості та мають високі показники механічних характеристик, що дозволяє ефективно їх застосовувати як армуючі добавки. Функцію матриці в більшості випадків виконує біополімер – полімолочна кислота, яка забезпечує зміну в'язкості під впливом теплового поля та формування біокомпозитних виробів шляхом пресування за оптимального тиску [3]. Однак, експериментальні дослідження відрізняються від теоретичних розрахунків, оскільки така матриця не забезпечує високу адгезію до органічного волокна.

В більшості випадків біополімерні матриці у чистому вигляді значно поступаються за фізико-механічними та експлуатаційними властивостями матрицям на основі синтетичних полімерів, що визначається меншою міцністю хімічних зв'язків між групами молекул амінокислот. Використання модифікуючих добавок дозволяє покращити механічні властивості, однак потребує проведення експериментальних досліджень для визначення особливостей взаємодії компонентів між собою.

Перспективним матеріалом для отримання біополімерного в'яжучого є розчин глютину, який має високу технологічність та належить до відновних джерел сировини тваринного походження. Приготування в'яжучого полягає у розчиненні дозованої кількості гранул глютину у воді за температури 50-60 ºС з наступним введенням полівінілацетату та механічного змішуванням розчину до отримання однорідної

консистенції. В результаті змішування в'яжучого та деревного борошна отримано композицію, вологість якої перевищує оптимальні показники, що потребує проведення термічної обробки композиції на початковій стадії за температури 5-70 ºС протягом 10-15 хв. Підготовлену композицію поміщають у порожнину прес-форми і стискають, що дозволяє отримати конфігурацію виробу заданої форми. Отриманий матеріал являє собою брикет, компоненти якого перебувають у механічному зачепленні між собою. В процесі основної термічної обробки відбувається зниження в'язкості в'яжучого за рахунок переходу з гелеподібного стану у рідкотекучий, що забезпечує високий ступінь змочування частинок деревного борошна, заповнення пустот та утворення міцних фізико-хімічних зв'язків між компонентами біокомпозитного матеріалу. Отриманий виріб містить надлишкову вологу, тому існує потреба у проведенні додаткової термічної обробки, яка призводить до видалення молекул води та підвищення механічних характеристик матеріалу.

Експериментально встановлено, що додаткова термічна обробка за температури 50-60 ºС біокомпозитів, які містять глютинову матрицю без полівінілацетату є недоцільною, оскільки відбувається підвищення міцності при стисненні та ударної в'язкості лише на 5-8 %. Це пов'язано з невисокою температурою термічної обробки, яка не забезпечує повного видалення води з об'єму біокомпозитів. Застосування вищої температури 80-100 ºС призводить до переходу води у газоподібний стан та інтенсивного її видалення, що зумовлює утворення глибоких тріщин та руйнування виробу.

Введення до складу глютинового розчину полівінілацетату в кількості 8 мас.ч. на 100 мас.ч. розчину глютину призводить до формування біокомпозитного матеріалу з аналогічними характеристиками, які мають біокомпозити без введення модифікуючої добавки на етапі формування після проведення основної термічної обробки виробів. Застосування додаткової термічної обробки за температури 120-130 ºС дозволяє підвищити міцність при стисненні на 20-25 % та ударну в'язкість на 45-50 %. Це пов'язано з тим, що за такої температури відбувається взаємне розчинення модифікуючої добавки в розчині глютину, в результаті чого утворюються додаткові фізико-хімічні зв'язки з поверхнею частинок деревного борошна. Збільшення вмісту модифікуючої добавки забезпечує одночасне зменшення вмісту глютинового розчину, макромолекули якого за високих температур руйнуються, що знижує механічні характеристики біокомпозиту.

Таким чином, введення до складу біополімерного в'яжучого полівінілацетату в оптимальній кількості 8 мас.ч. забезпечує підвищення ударної міцності біокомпозитного матеріалу на 45-55 %, що пов'язано з видаленням надлишкового вмісту вологи в результаті проведення додаткової термічної обробки за оптимальної температури 120-130 ºС. Така термічна обробка забезпечує ущільнення біополімерної матриці за рахунок зменшення відстані між фрагментами макромолекул та утворення додаткових фізичних зв'язків між макромолекулами глютину та полівінілацетату.

Література.

1. Salman D, Leman Z, Mohamed T, Sultan H, Mohamad R, Cardona F. Kenaf/Synthetic and Kevlar/Cellulosic Fiber-Reinforced Hybrid Composites: Suhad et al. (2015). "Hybrid composites," BioResources 10(4), 8580-8603.

2. Kozlowski R, Wladyka-Przybylak M. Uses of natural fiber reinforced plastics. In Natural Fibers, Plastics and Composites, Wallenberger FT, Weston NE (eds). Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, 2004.

3. Fazita N, Rawi M, Jayaraman K, Bhattacharyya D. A performance study on composites made from bamboo fabric and poly(lactic acid). Journal of Reinforced Plastics and Composites 32(20), 1513-1525.

УДК 621.86
О. Ляшук, д.т.н., проф., І. Гевко, д.т.н., проф., Ю. Пиндус, к.т.н., доц., О. Третьяков, к.т.н., О. Лах
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ОПТИМІЗАЦІЯ ГЕОМЕТРІЇ ШПОНОЧНОГО ПАЗУ ВАЛА ЕКСТРУДЕРА

O. Lyashyk, Dr., Prof., I. Gevko, Dr., Prof., Yu. Pyndus, PhD., Assoc. Prof., O. Tretyakov, PhD., O. Lah
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

OPTIMIZATION OF THE GEOMETRY OF THE EXTRUDER SHAFT KEY GROOVE

Abstract. The work is devoted to increasing of the durability of technological equipment elements, forecasting of the resource and diagnostics of failures of the technical system. The basic regularities are analyzed and causes of the failure of the extruder's working body shaft are determined. For torque values M = 40.74 - 64.37 N·m and of the extruder's working body shaft, the stress-strain state of the contact surfaces of the keyhole of the extruder's shaft is calculated by the method of three-dimensional finite element modelling.

Вступ. Підвищення довговічності вузлів технологічного обладнання, прогнозування ресурсу та діагностування відмов технічної системи є важливими науковими та інженерними завданнями [1]. Такі заходи є особливо важливими для екструдерів, які працюють за умов значних технологічних навантажень, що спричиняє зношення їх робочих органів та можливість втомного руйнування окремих деталей.

Також відомі випадки руйнування валів робочого органу екструдера, які зумовлені дефектами, що виникають під час експлуатації і слугують джерелом зародження і поширення тріщин до критичних розмірів [2-5]. Це вимагає підвищеної уваги та проведення додаткових досліджень і достовірнішого оцінювання втомної довговічності валів.

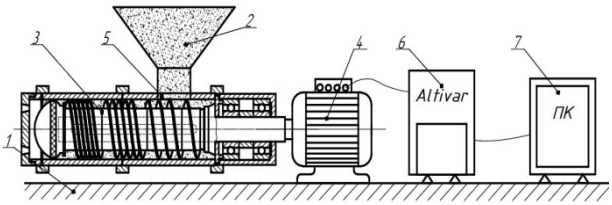
Обчислення міцності та ресурсу валів привода використовують підходи лінійної механіки руйнування [6, 7]. Вони дозволяють створити розрахункові моделі для інженерного аналізу вузлів «вал робочий орган» екструдера та оптимізувати їх параметри [8].

Дана робота стосується визначення напружено-деформований стан (НДС) контактних поверхонь шпоночної канавки вала екструдера методом тривимірного скінченноелементного моделювання.

Метою роботи є дослідження напружено-деформований стан (НДС) контактних поверхонь шпоночної канавки навантаженого вала екструдера та запропонувати спосіб їх зменшення шляхом змін конструкції вала екструдера.

Умови експлуатації екструдерів та їх несучих деталей. Отримання виробів високої якості (кормова суміш) можливе за стабільної роботи екструдера у рівноважному режимі. Проте, на практиці існує ряд факторів, які впливають на продуктивність екструдера та кількість виготовленого екструдату. Тому, більшість екструзійних установок має коефіцієнт корисної дії 45-75% за задовільної якості екструдату.

В роботі досліджено установку для приготування кормової суміші [9] (рис. 1 а, б) у вигляді рами на якій знизу жорстко закріплено електродвигун з приводом, а у верхній частині приводу встановлено маховик з шківом і валом робочого органу.



а)

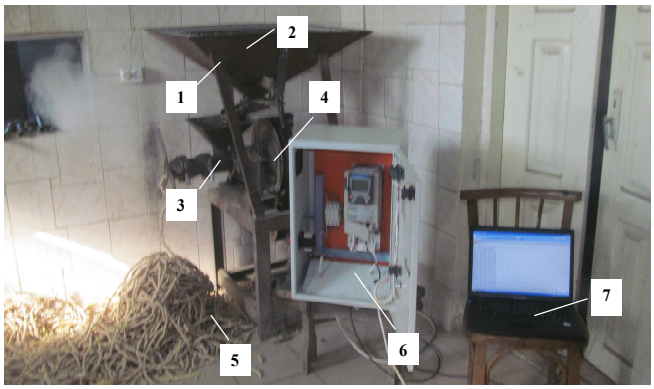


Рис. 1. Конструктивна схема для виготовлення кормової суміші а) загальний вигляд експериментальної установки гвинтового пружного екструдера б) 1 - рама; 2 - бункер; 3 - секції шнеків; 4 - привід маховика; 5 - сипучий матеріал; 6 – Altivar 71; 7 – персональний комп'ютер

Якість готового виробу знаходиться у тісному взаємозв'язку з продуктивністю і залежить від конструктивних особливостей робочих органів екструдера, рис. 2 а, б.

а)

б)

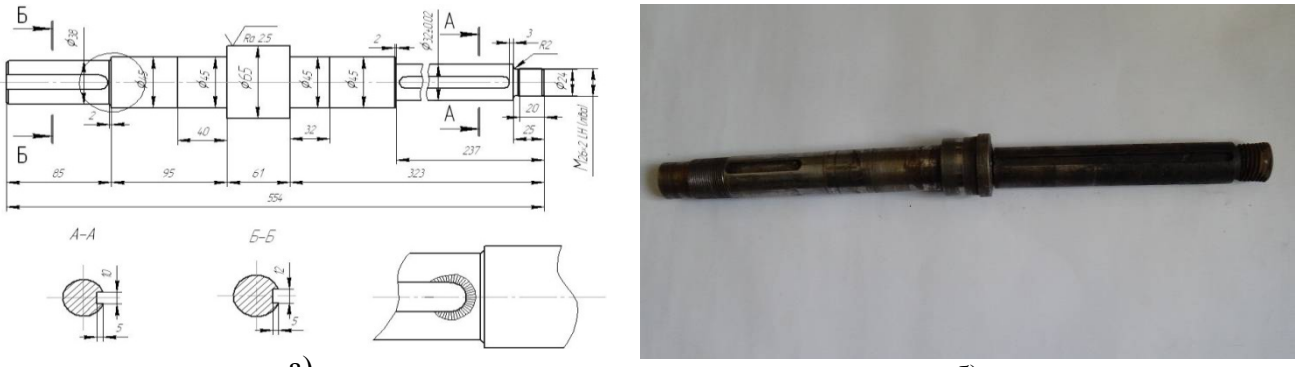
в)

Рис. 2. Робочий орган екструдера – а, вал – б та поверхня зламу валу – в; А - місце зародження тріщини

Механізми руйнування валу. За аналізом поверхні зламу зруйнованого валу виявлено що тріщина має втомну природу та зародилась зі шпоночного пазу. Слід зазначити, що тріщина має достатньо гладку поверхню не типову для циклічного навантаження за достатньо великого крутного моменту. Це свідчить про те що руйнування відбулося за досягнення тріщиною граничної довжини [10]. Сучасний рівень знань про природу накопичення пошкоджень тривало експлуатованих конструкцій дозволяє встановити кілька причин руйнування конструкції.

Результати досліджень. Одним з найбільш ефективних сучасних підходів, що стосуються оцінки НДС елементів конструкцій робочого органу екструдера (рис. 2 б, в) є використання методу скінченних елементів (МСЕ). Зміст даного методу полягає в описі досліджуваного тіла деякою моделлю, котра представляє собою сукупність елементів зі скінченною кількістю ступенів свободи [2]. НДС контактних поверхонь шпоночної канавки навантаженого вала обчислювали методом скінченних елементів з використанням програмного комплексу ANSYS у пружній постановці. Матеріал

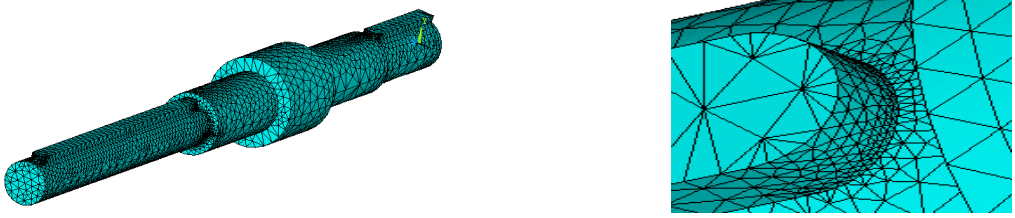
вважали ізотропним. Модуль пружності сталі приймали рівним E = 2×105 МПа, коефіцієнт Пуасона ν = 0,3.



а) б)

Рис. 3. Ескіз вала робочого органу екструдера: а) та загальний вигляд вала робочого органу екструдера б)

Для дискретизації твердотільної моделі вала використовували тривимірний скінченний елемент SOLID186 з двадцятьма вузлами (у тому числі проміжними), який може трансформуватися і набувати призматичної, пірамідальної та тетраедральної форм, що підходить для моделювання твердотільних моделей складних форм. Вказаний елемент має три степеня вільності і володіє властивостями пружності, пластичності, повзучості, гіперпружності. Дискретизовану скінченними елементами SOLID186 модель вала із шпонками подано на рис. 4а. На поверхнях контакту шпонки та канавки скінчено елементну сітку згущували до розмірів 0,24 мм яка представлена на рис. 4 b).



а) b)

Рис. 4. Скінченноелементна модель валу: а) модель з суміщеними з канавками шпонками; b) згущення скінченноелементної сітки на поверхні контакту шпоночної канавки

На рис. 5 представлено розрахунок поля інтенсивності напружень на ребрі шпонкової канавки навантаженого вала. Інтенсивність напружень оцінювали вздовж вказаної на рис. 6 лінії *l*.

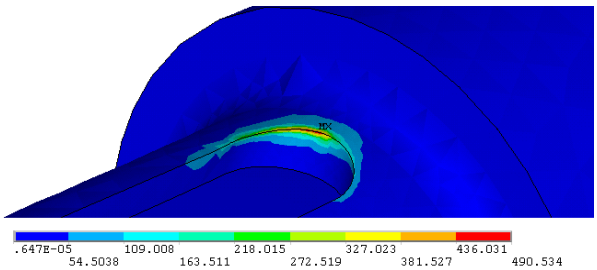


Рис. 5. Поле інтенсивності напружень на ребрі шпонкової канавки навантаженого вала

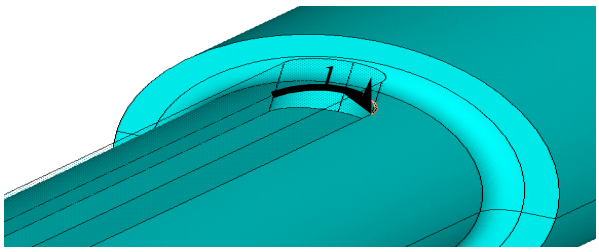


Рис. 6. Лінія *l* уздовж ребра шпонкової канавки, де виникають найбільші експлуатаційні напруження

Значення крутних моментів знаходяться $M = 40.742.....64.372$ (кН·М) та відповідних тисків на поверхню шпонки $\sigma = 6.86.....10.84$ (МПа)

Результати розрахунків та їх обговорення. Виявлено, що радіус заокруглення шпоночного пазу зумовлює концентрацію напружень для галтелей 3.0 та 5.0 мм. При цьому слід враховувати, що зменшення радіусу концентратора зменшує об'єм навантаженого металу. Це важливо для експлуатаційних умов оцінювання технічного стану конструкції. Відомо що окрихчуюча дія концентраторів напружень зумовлена не лише перенапруженнями які вони створюють в локальних зонах, але й деформаційним зміцненням, як наслідком силового впливу.

Слід зазначити, що у даному випадку значення параметрів напружено-деформованого стану були визначені МСЕ. Перевагою використаного МСЕ полягає насамперед у тому, що він дозволяє одержати та візуалізувати розподіли напружень. Нижче подані криві відповідно крутних моментів (тисків на шпонку робочого органа екструдера) рис. 7.

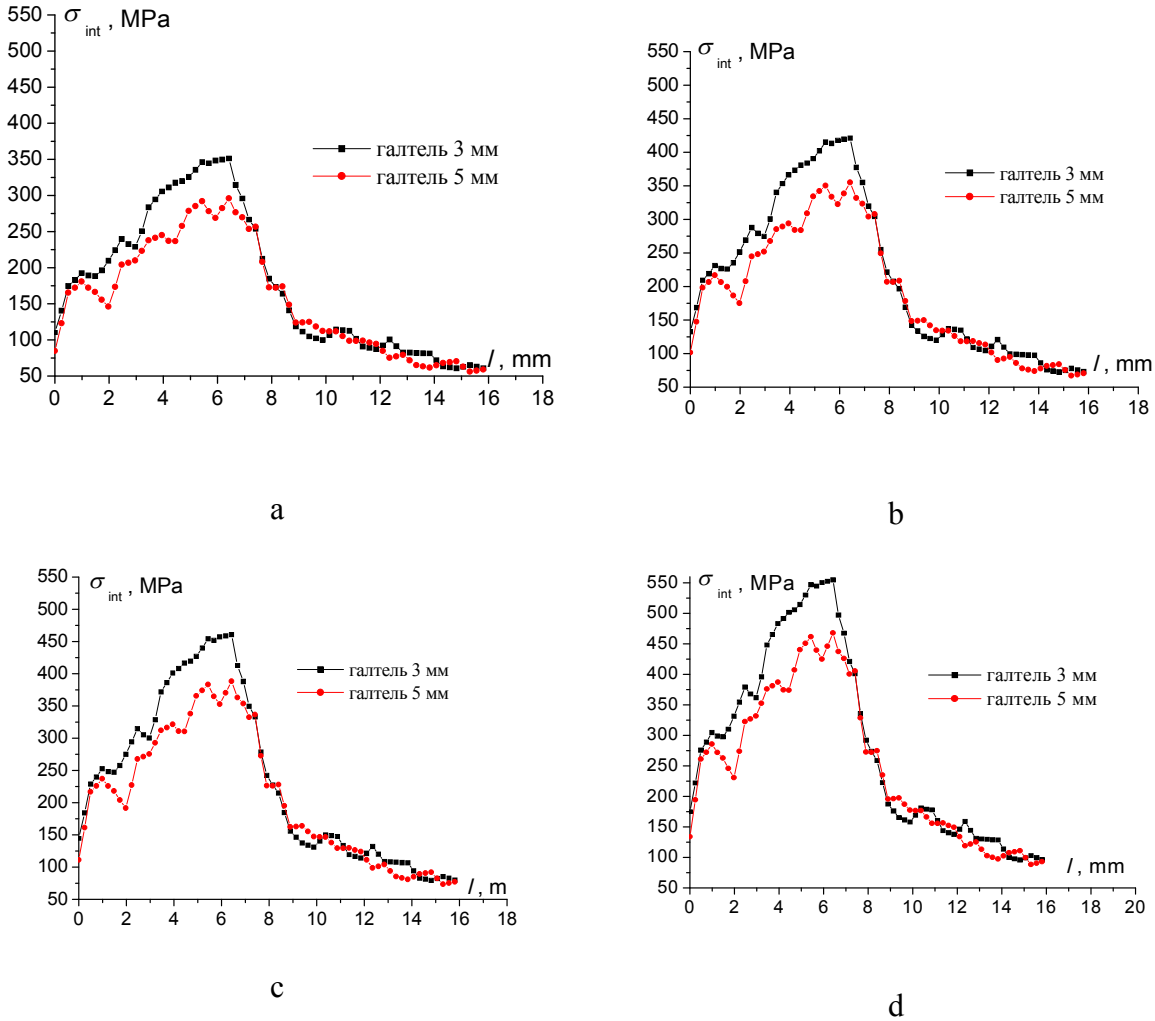


Рис. 7. Розподіл інтенсивності напружень σ_{int} уздовж лінії l за крутного моменту: 40,74 (6,86 МПа) – a; 48,89 (8,23 МПа) – b; 57,04 (9,61 МПа) –c; 64,37 (10,84 МПа) - d

Проаналізовано основні закономірності та встановлено причини руйнування вала робочого органу екструдера. Це дозволило виконати скінченно-елементне моделювання його навантажування та оцінити вплив крутного моменту двигуна на концентрацію напружень в шпоночному пазу вала.

Збільшення крутного моменту вала робочого органу екструдера спричиняє лінійне збільшення максимального значення інтенсивності напружень $\sigma_{int(max)}$ на ребрі шпоночної канавки. Збільшення віддалі від галтелі до шпонкової канавки на 2 мм призводить до зменшення максимальних напружень на ребрі шпонкової канавки на 15,72 %. У переспективі варто оцінити період зародження втомної тріщини у місці виникнення максимальних напружень з використанням кривої втоми Веллера.

Література.

1. S. Cicero, R. Cicero, R. Lacalle, G. Diaz, D. Ferreño Failure analysis of a lift gear shaft: Application of the FITNET FFS procedure fatigue module // Engineering Failure Analysis, 2008, Vol. 15, Issue 7, P. 970-980.

2. Giuseppe P. The finite–element method, Part I. / Giuseppe P. // Antennas and Propagation Magazine, IEEE. – 2007. – P. 180–182.

3. Zerbst U., Maedler K., Hintze H. Fracture mechanics in railway applications – an overview. Fract. Mech.-2005.-72.- P.163-194.

4. Smith R. A. and Hillniansen S. A brief historical overview of the fatigue of railway axles// Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. - Professional Engineering Publishing Proc. – 2004. - Vol.218, No4. – P.267-277.

5. Gravier N., Viet J-J., Leluan A. Predicting the life of railway vehicle axles// Proceedings of the 12th International Wheelset Congress, 1998, Quigdao, China, 1998. - P. 133-146.

6. Zerbst U., Vormvald M., Andersch C. et al. The development of a damage tolerance concept for railway components and its demonstration for a railway axle// Eng. Fract. Mech.-2005.-72.- P.209-239.

7. Jian Ping J., Guang M. Investigation on the failure of the gear shaft connected to extruder // Engineering Failure Analysis, (2008) 15 (4) , pp. 420-429.

8. ANSYS, SAS IP, Inc., Ansys Help System, Mechanical APDL, Theory reference.

9. Патент на корисну модель № 109801. Україна, B30B 11/00, A23K 40/20 (2016.01). Установка для формування кормових брикетів / Ляшук О. Л.; Дячун А. Є.; Бадищук В. І.; Дмитренко В.П.. (Україна). – u201601809. Заявл. 25.02.2016.; Опубл. 12.09.2016р., Бюл.№17.- 5с.

10. S. S. Pelaseyed, F. Mashayekhi, A. Movahedi-Rad Investigation of the Shaft Failure Connected to Extruder, Journal of Failure Analysis and Prevention, 2015, Volume 15, Issue 6, pp 775–781.

УДК 539.42, 004.032.26,
О. Ясній, д.т.н., проф., О. Пастух, д.т.н., проф., Л. Цимбалюк, к.ф.-м.н., доц., В. Яцишин, к.т.н., доц., І. Дідич
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна.

МОДЕЛЮВАННЯ ДІАГРАМИ ДЕФОРМУВАННЯ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ 6060-Т651 МЕТОДАМИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

O. Yasniy, Dr. Science, Prof., O. Pastukh, Dr. Science, Prof., L. Tsymbaliuk, Ph.D. Science, Assoc. Prof., V. Yatsyshyn, Ph.D, Assoc. Prof., I. Didych

MODELING OF 6061-T651 ALUMINUN ALLOY STRESS STRAIN DIAGRAM BY METHODS OF MACHINE LEARNING

Abstract. There was predicted the stress strain diagram by machine learning methods. In this study there were applied the method of k – nearest neighbors and random forest method to obtain the best model for predicting the stress strain diagram of 6061-T651 aluminum alloy at 6 various temperatures (20, 100, 150, 200, 250, 300ºC). The obtained results are in good agreement with the experimental data.

Машинне навчання є галуззю штучного інтелекту [1]. Його застосовують для вивчення вхідних даних та побудови моделі шляхом постійного оцінювання, оптимізації та налаштування параметрів. Зокрема, завдяки здатності інтерпретувати нелінійні зв'язки між вхідними та вихідними даними, методи машинного навчання з великою точністю розв'язують задачі механіки руйнування [2-3]. Тому такими методами можна моделювати і діаграми деформування алюмінієвого сплаву 6061-Т651 за різних температур.

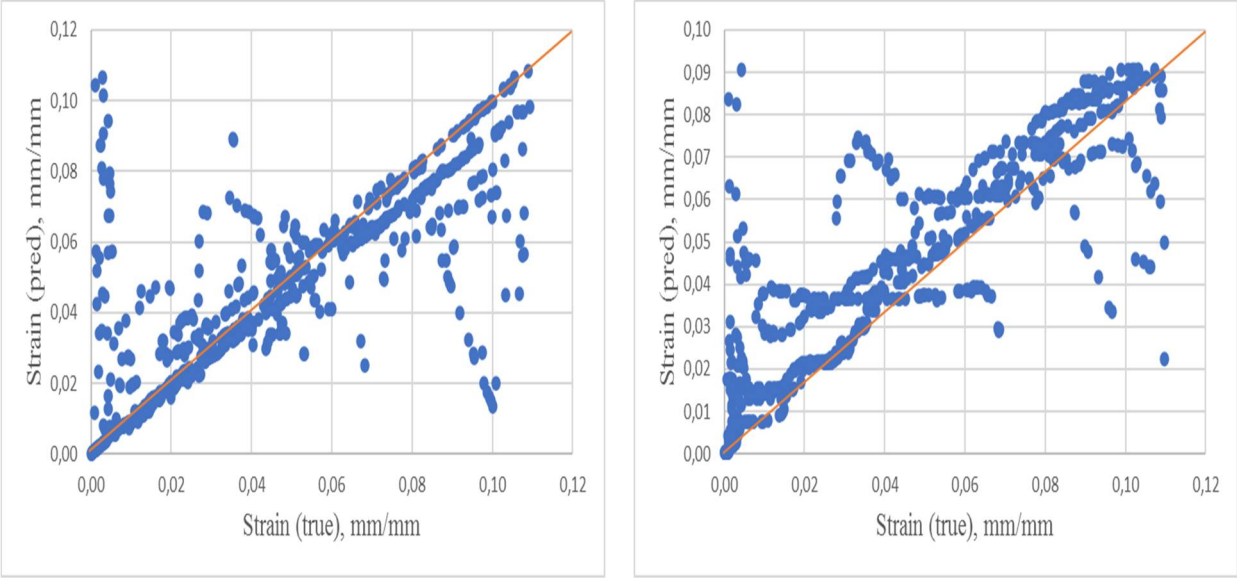
Мета роботи – спрогнозувати діаграму деформування алюмінієвого сплаву 6061-Т651 за 6 температур (20, 100, 150, 200, 250, 300ºC) методами машинного навчання, зокрема, методом k – найближчих сусідів та випадковими лісами, а також порівняти отримані результати.

Існує декілька основних підходів, котрі широко застосовують в області прогнозування даних: навчання з учителем, навчання без вчителя та змішане навчання. Загалом, алгоритм методу k – найближчих сусідів базується на порівнянні відомих елементами з новими. Зокрема, основним його принципом є те, що новий об'єкт, котрий необхідно спрогнозувати, відносять до класу, який є найбільш поширений серед k – найближчих сусідів навчальної вибірки. Відстань поміж k – найближчих сусідів, зазвичай, є евклідовою. Даний метод машинного навчання є алгоритмом навчання з учителем, тому для його роботи потрібно мати розмічений набір даних.

Одним із потужних методів машинного навчання є випадкові ліси. Зокрема, алгоритм будує множину дерев прийняття рішень, і, в результаті, усереднює їх значення передбачень.

Діаграму деформування алюмінієвого сплаву 6061-Т651 за 6 температур (20, 100, 150, 200, 250, 300ºC) моделювали за експериментальними даними, отриманими у статті [4]. У процесі навчання масив даних розділили на дві нерівні частини – навчальну та тестову вибірки. Вибірка містила 3312 елементів, з яких 80% вибрали випадково для навчальної вибірки, а 20% залишили, щоб оцінити якість прогнозування.

Залежності експериментальних та прогнозованих деформацій показано на рис. 1.



а) б)

Рис. 1. Експериментальні та прогнозовані залежності деформації, одержані методом *k* – найближчих сусідів (а) та випадкових лісів (б)

Похибка методу *k* – найближчих сусідів для тестової вибірки становить 22,2%, а для випадкових лісів − 22,7%. Параметри моделей машинного навчання наведено у табл. 1-2.

Табл. 1. Параметри *k* – найближчих сусідів

Кількість найближчих сусідів	Відстань
10	Евклідова

Табл. 2. Параметри випадкових лісів

Кількість дерев	200

Отримані результати добре узгоджуються з експериментальними даними. Загалом, найкращу модель для прогнозування діаграми деформування алюмінієвого сплаву 6061-T651 за 6 температур (20, 100, 150, 200, 250, 300ºC) отримано методом *k* – найближчих сусідів.

Література.

1. Smola, A., Vishwanathan, S.V.N. Introduction to Machine Learning, Cambridge University Press, 2010, pp. 234.

2. Iryna Didych, Oleh Yasniy, Sergiy Fedak, Yuri Lapusta. Prediction of jump-like creep using preliminary plastic strain, Procedia Structural Integrity, 36, 2022, 166–170.

3. Прогнозування діаграм втомного руйнування алюмінієвого сплаву Д16Т методами машинного навчання / О. П. Ясній, О. А. Пастух, Ю. І. Пиндус, Н. С. Луцик, І. С. Дідич // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 3. - С. 43–48.

4. B.S. Aakash, John Patrick Connors, Michael D. Shields. Stress-strain data for aluminum 6061-T651 from 9 lots at 6 temperatures under uniaxial and plane strain tension, Data in brief, 25, 2019.

UDC
R. Kosturek, Ph.D., Asst. Prof.
Military University of Technology, Poland

THE CONCEPT OF IMPROVEMENT HIGH-STRENGTH ALUMINUM ALLOYS FSW JOINT PROPERTIES VIA POST-WELD EXPLOSIVE TREATMENT

Abstract. Although FSW allows to effective join high-strength aluminum alloys, the heat generated during the process causes undesirable changes in the strengthening phase, giving a joint efficiency of about 80%. The potential solution that can limit this problem is post-weld explosive treatment. The main idea is to affect the welded joint by a shock wave generated during the detonation of explosive material, which will increase the hardness of the HAZ.

In recent years, friction stir welding (FSW) has become the subject of many research works due to a number of advantages of this joining technique, including the high quality of obtained joints, the possibility of joining aluminum alloys difficult to weld using conventional methods, low energy consumption and neutrality for the natural environment. Although in the case of pure aluminum and its non-precipitation hardened alloys, deformation and grain refinement in the thermo-mechanically affected zone (TMAZ) and in the stir zone (SZ) increases the strength in these areas, FSW of precipitation-hardened aluminum alloys is characterized by dissolution of strengthening phases resulting in a decrease in strength in each zone: SZ, TMAZ, heat-affected zone (HAZ) [1,2]. These phenomena find their reflection in the distribution of microhardness on the welded joint cross-section (Fig. 1).

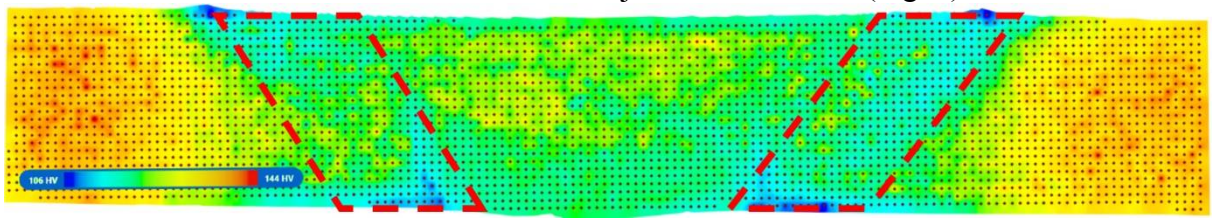


Fig. 1. Microhardness contour map of AA2519-T62 FSW joint [3] with the marked low-hardness zone (red dashed lines).

The zone, which determines the strength of a joint is the low hardness zone (LHZ), often localized on the boundary between the HAZ and TMAZ [1]. FSW joints of precipitation-hardened alloys tend to fail in this zone, which is characterized by low participation of the strengthening phase and coarse grains [4]. In conventional welded joints, the possible solution of this problem is post-weld heat treatment (PWHT) allowing for re-precipitation of the strengthening phases [5]. When it comes to the PWHT of FSW joints there are some problems e.g. in the form of abnormal grain growth, giving relatively poor fatigue properties [6].

In the 70s of the last century, a number of research works showed a significant increase in the strength of welded joints subjected to explosive treatment, especially in terms of fatigue strength [7]. The use of a post-weld explosive treatment may improve the strength of precipitation-hardened aluminum alloy joints as a result of introducing additional defects into the structure by the affection of shock wave. Considering the impact of the shock wave on the HAZ, an assumption can be made that the worst possible case is a complete overage of the precipitates after the FSW process, hence the HAZ would be in the annealed condition. Some works on the explosive welding of high-strength aluminum alloys can be useful to estimate the potential hardening of these alloys during explosive treatment. As an example the explosive welding of AA2519 in the annealed condition can be given, which causes the

increase in microhardness from about 75 HV0.1 up to 95 HV0.1 in the area affected by high-velocity collision [8]. For the hardness of LHZ in friction stir welded AA2519-T62 is about 115 HV0.1, potentially it can be increased by a shock wave. It has to be noticed that a shock wave can be generated also by laser shock peening, but it affects only the near-surface area of the joint improving only the fatigue properties without affecting tensile properties noticeably. The generation of the high-amplitude shock wave can be achieved by the use of high-explosive material in the appropriate technological system.

Two factors determine the effect of explosive hardening: the detonation parameters of the explosive material and the used technological system used [9]. From the technological point of view, the post-weld explosive treatment is easiest to perform by "oblique wave", what can be achieved in two systems (Fig. 2a,b).

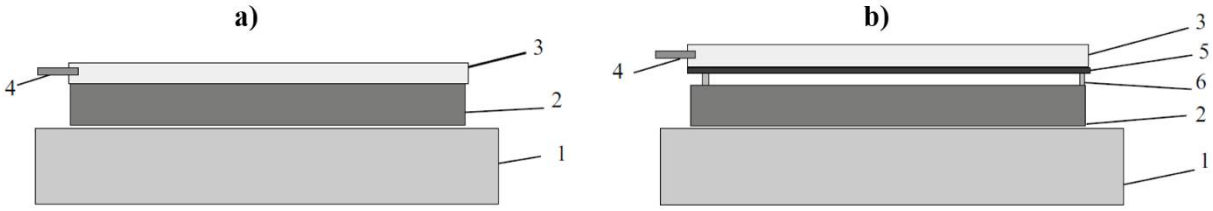


Fig. 2. Explosive hardening systems: direct (a), and with intermediate plate driven by the detonation (b). 1 – base plate (anvil), 2 – hardened plate, 3 – explosive material, 4 – electric igniter, 5 – intermediate (driven) plate, 6 – distance.

In the first case, the shock wave is generated by the direct impact of detonation products (Fig. 2a). The basic parameter of explosive material is the value of detonation velocity. The common industrial explosives used in mining and metal treatment are ammonals, ANFO, emulsion explosives, and plastic explosives, covering the values of detonation velocity from about 1800 to 8300 m/s [10]. It provides wide possibilities for selecting material that gives the highest value of hardening. An additional factor is the thickness of the explosive material layer, which can be optimized in terms of the highest hardening. From the technological point of view, the most suitable form of explosive for the post-weld explosive treatment would be a plastic explosive due to its easy forming and sticking to a welded construction. Nevertheless, plastic explosives are often characterized by a high value of detonation velocity, what can damage
a treated element or lead to the generation high amount of heat during the treatment resulting in the overaging of aluminum alloy. The plastic explosives can be modified to severely decreased their detonation velocity by e.g. the addition of ZnO [11], what can be a compromise between accessible form and appropriate detonation parameters for post-weld explosive treatment.

In the second explosive hardening system, the wave is generated by the impact of the intermediate plate which is driven by the detonation products (Fig. 2b). As a driven plate, a simple steel sheet can be used with a thickness of 1-2 mm. Generally, the most efficient hardening is obtained in this system, but there are problems that can limit its application in the post-weld explosive treatment of FSW joints. The system is relatively difficult to construct on the spatial welded structure and there is a risk of explosive welding of the hardened and driven plate. The explosive welding issue can be eliminated by the use of an additional, thin, protective layer (machine oil, plastic), what further complicates the construction. In both systems
(Fig. 2a,b), the appropriate base plate (anvil) should be used to limit the deformation of hardened welded plates, what is easy to achieve only in the case of flat, simple welded structures
(e.g. butt-welded plate). In more complex welded structures the base plates should be temporarily installed as a part of post-weld explosive treatment or it can be skipped in the

case when the welded plates have high enough thickness (e.g. 50 mm), the layer of explosive material is low and some deformations of construction are acceptable.
This work was financially supported by the National Science Centre (NCN) in Poland, Miniatura 5 no. 2021/05/X/ST8/01480.

References.

1. Çam G., Mistikoglu S.: *Recent Developments in Friction Stir Welding of Al-Alloys*, Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23, 1936–1953.
2. Kosturek R., Torzewski J., Wachowski M., Śnieżek L.: *Effect of Welding Parameters on Mechanical Properties and Microstructure of Friction Stir Welded AA7075-T651 Aluminum Alloy Butt Joints*, Materials, 2022, 15, 5950.
3. Kosturek R., Torzewski J., Joska Z., Wachowski M., Śnieżek L.: *The influence of tool rotation speed on the low-cycle fatigue behavior of AA2519-T62 friction stir welded butt joints*, Engineering Failure Analysis, 2022, 142, 106756.
4. Xu W., Liu J.H., Chen D.L., Luan G.H.: *Low-cycle fatigue of a friction stir welded 2219-T62 aluminum alloy at different welding parameters and cooling conditions*, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2014, 74, 209–218.
5. Suckow T., Völkers S., Bütev Öcal E., Grass M., Böhm S., Groche P.: *Effect of Shortened Post Weld Heat Treatment on the Laser Welded AA7075 Alloy*, Metals, 2022,12, 393.
6. Kosturek R., Śnieżek L., Wachowski M., Torzewski J.: *The Influence of Post-Weld Heat Treatment on the Microstructure and Fatigue Properties of Sc-Modified AA2519 Friction Stir-Welded Joint*, Materials, 12, 4, 2019, 1-17.
7. Babul W.: *Odkształcanie metali wybuchem, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*, Warszawa 1980.
8. Najwer M., Niesłony P.: *Ocena mikrotwardości oraz własności wytrzymałościowych trimetalu AA2519-AA1050-TI6AL4V po różnych obróbkach cieplnych*, Przegląd Spawalnictwa, 2016, 88, 4, 16-18.
9. Nowaczewski J., Kita M., Świeczak J., Rudnicki J.: *Obróbka wybuchowa i cieplno-chemiczna wielowarstwowych kompozytów metalicznych*, Materiały Wysokoenergetyczne, 2011, 3, 84-89.
10. Maranda A.: *Przemysłowe materiały wybuchowe*, Wyd. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2010.
11. Chavez D. E., Harry H. H., W. Olinger B. W.: *An Environmentally Friendly Baratol Replacement for Plane Wave Generator Applications*, Journal of Energetic Materials, 2014, 32:2, 128-13.

УДК 621.791

В. Коржик[1,2], д.т.н, член-кор. НАНУ, В. Квасницький[2,3], д.т.н, проф., А. Гринюк[1,4], к.т.н, А. Перепічай[3], к.т.н, Є. Іляшенко[2], асп., І. Лагодзінський[3], асп., С. Пелешенко [3], асп., В. Буріка[3], пров. інж.

[1] Китайсько-Український інститут зварювання ім. Є.О. Патона Академії наук провінції Гуандун, Гуандунська ключова лабораторія передових технологій зварювання, Гуанчжоу, Китай

[2] Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, Україна

[3] Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

[4] Науково-дослідний інститут імені Є.О. Патона в провінції Чжецзян, Чжецзян, Китай

ВПЛИВ СПОСОБІВ ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ НА ФОРМУВАННЯ ШАРІВ ТА СТРУКТУРУ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ ПРИ АДИТИВНОМУ СИНТЕЗІ ВИРОБІВ ЗІ СТАЛЕЙ ТА СПЛАВІВ

V. Korzhyk[1,2], Dr., Corresponding Member of the NAS of Ukraine, V. Kvasnytskyi[2,3], Dr., Prof., A. Grynyuk[1,4], Ph.D., A. Perepichay[3], Ph.D, Y. Illiashenko[2], Ph.D. student, S. Peleshenko[3], Ph.D. student, I. Lahodzinskyi, Ph.D. student, V. Burika[3], lead.eng.

[1]China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding of the Guangdong Academy of Sciences. Guandong Key Laboratory of Advanced Welding Technologies, Guangzhou, China

[2]E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. Kyiv, Ukraine.

[3]NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine.

[4] E.O. Paton Scientific Research Institute in Zhejiang Province, Zhejiang, China

INFLUENCE OF ARC CLADDING METHODS ON THE FORMATION OF LAYERS AND STRUCTURE OF THE DEPOSITED METAL IN THE ADDITIVE SYNTHESIS OF PRODUCTS FROM STEELS AND ALLOYS

Abstract. The results of studies on the influence of methods and conditions of layer-by-layer cladding with a fusible electrode in a protective gas environment on the geometric characteristics and structure of the metal in the additive synthesis of spatial products from ferrous and non-ferrous metals are considered. On the basis of metallographic studies and computer simulation results, the influence of surfacing methods on the tendency to crack formation during surfacing of copper-based alloys was established.

З розвитком адитивних WAAM технологій виникає проблема забезпечення стабільності якості просторових виробів. Застосування методів дугового зварювання, зокрема з короткими замиканнями (Cold Metal Transfer – CMT) та імпульснодугового зварювання (Pulse процес) дозволяє суттєво розширити номенклатуру використовуваних матеріалів за рахунок мінімізації тепловкладення та регулювання термічного циклу наплавлення. При цьому забезпечується значна продуктивність процесу наплавлення завдяки зменшенню частки матеріалу, що йде на угар та розбризкування.

Важливим питанням при використанні дугових способів адитивного виробництва є зменшення ділових відходів після механічної обробки виготовленої деталі чи виробу, на що безпосередньо впливає геометрична нерівномірність отриманої поверхні синтезованого об’ємного тіла. Тому дослідження закономірностей впливу способу та режимів наплавлення, складу захисного газового середовища на геометричні характеристики сформованих шарів, їх структуру та схильність до утворення дефектів є актуальним.

Дослідження щодо формоутворення наплавлених шарів виконані із застосуванням в якості присадкових матеріалів дротів сталі ER70S-6 (Св-08Г2С) та кремнієвої бронзи ERCuSi-A (БрКМц3) діаметром 1,2 мм. В якості захисного газового середовища використовували суміші газів двох марок: М21 (82 %Ar + 18 %CO_2) і М11 (98 %Ar + 2 %CO_2) для сталі та чистого аргону для наплавлення кольорових сплавів. В якості зварювального джерела живлення використане джерело зварювального струму FroniusTransPuls Synergic 2700 з підтримкою CMT та Pulse наплавлення. Для зіставлення фактичних результатів та визначення основних залежностей швидкості зварювання та подачі присадних дротів встановлені на рівні Vн = 600 мм/хв та Vпод = 3,5 м/хв відповідно.

Аналіз результатів експериментальних досліджень свідчить про вплив складу газових сумішей на формоутворення швів при багатопрохідному наплавленні. Зокрема застосування газової суміші з 2% вуглекислого газу призводить до збільшення висоти кожного наплавленого шару, що можна чітко спостерігати у вигляді збільшення загальної висоти готового зразка (рис. 1). При цьому ширина валиків суттєво не змінювалась. При використанні методу Pulse досягнуті практично ідентичні результати, окрім помітної особливості у вигляді значно меншого розбризкування металу у процесі наплавлення з використанням захисної суміші М11 (2% вуглекислого газу).

Встановлено, що ширина наплавлених CMT способом шарів менша порівняно з Pulse (рис. 2). Суттєвого впливу складу захисного газового середовища на ширину шарів не виявлено. Висота шарів залежить від складу захисного газу, що обумовлено збільшеними втратами металу на розбризкування при використанні сумішей з високим вмістом CO_2.

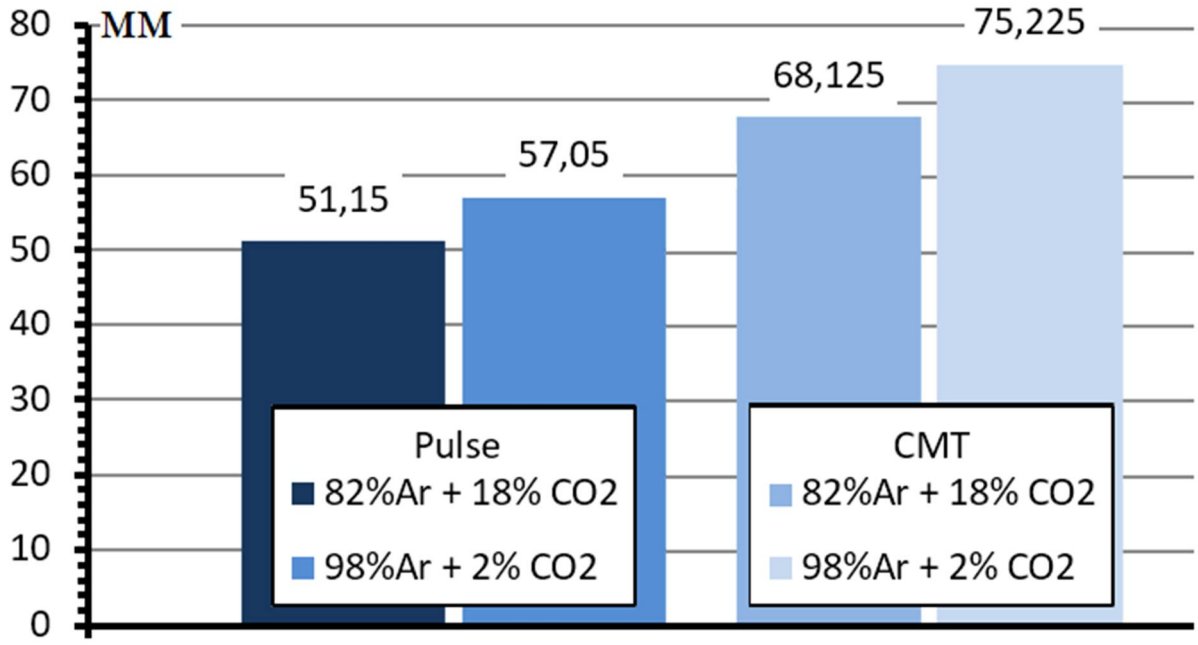


Рис. 1. Загальна висота отриманих зразків (Св-08Г2С)

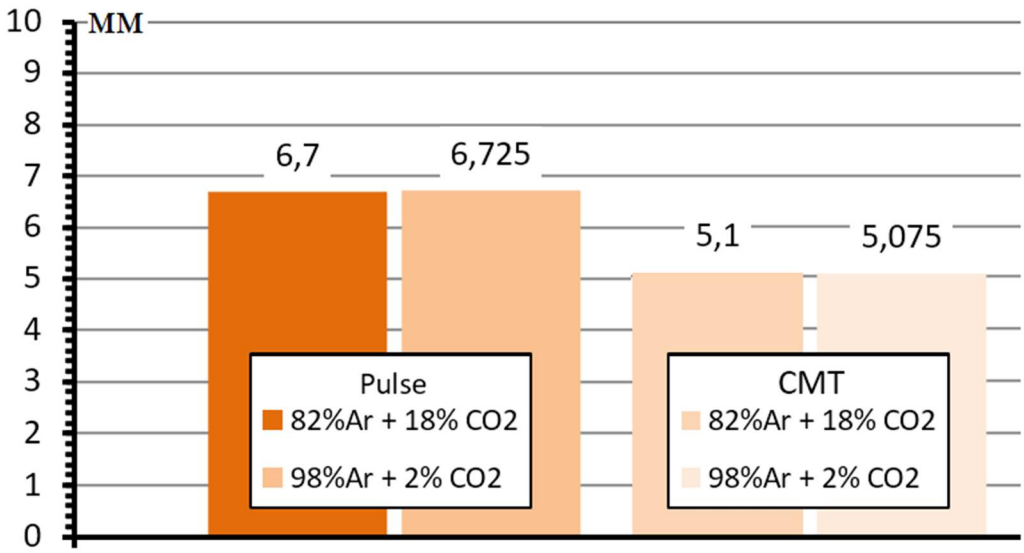


Рис. 2. Загальна ширина отриманих зразків (Св-08Г2С)

Результати металографічних досліджень наплавленого металу свідчать про наявність у металі шва дрібних неметалевих включень округлої форми. Встановлено, що дані включення є оксидами та силікатами, які досить рівномірно розподілені по всьому перерізу. Структура металу є типовою для багатошарового наплавлення. Лише в останньому наплавленому шарі спостерігається стовпчаста структура литого металу, яка вказує на напрямок кристалізації з рідкого стану.

Перехідна зона складається з металу зі зміненою структурою (зона перекриття) з фрагментарними залишками орієнтованої стовпчастої структури, яка виникла в результаті впливу термічного циклу від наплавлення наступних шарів. Таким чином, стовпчаста структура наплавленого металу порушується, утворюючи дезорієнтовану дрібнозернисту структуру. Чіткі межі між шарами відсутні у всіх варіантах наплавлення. Така структура може мати підвищену стійкість до руйнування.

Найбільше значення твердості металу характерне для отриманих наплавленням CMT методом зразків при застосуванні захисної газової суміші М11 (98 % Ar + 2 % CO_2).

Результати досліджень по наплавленню кремнієвої бронзи свідчать про аналогічний до сталі вплив способу наплавлення (CMT/Pulse) на геометричні розміри наплавлених шарів. При наплавленні з використанням методу CMT висота шарів майже на 25% більша у порівнянні з методом Pulse. При цьому прослідковується зменшення ширини валика на 12%.

У пошарово наплавленому методом Pulse металі зразка після досягнення 20-го шару спостерігається виникнення тріщин, що перетинають зразок перпендикулярно напрямку наплавлення. Подальше наплавлення шарів відзначалось повторним виникненням нових тріщин.

Скінченно-елементне моделювання напружено-деформованого стану при пошаровому наплавленні кремнієвої бронзи показало, що причиною виникнення та росту поперечних тріщин у наплавленому металі під час формування кінцевих шарів є високий рівень поздовжніх напружень розтягу. Встановлено, що у процесі багаторазового нагріву, рівень поздовжніх напружень розтягу досягає межі міцності бронзи (CuSi3).

УДК 620.194.3

В. Винар, д.т.н., М. Чучман, к.т.н., В. Івашків, к.т.н., Х. Василів, к.т.н.
Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, Україна

ФРАКТОГРАФІЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ КОРОЗІЙНИХ ПОШКОДЖЕНЬ ТРУБНОЇ СТАЛІ З КОРОЗІЙНО-АКТИВНИМИ НЕМЕТАЛЕВИМИ ВКЛЮЧЕННЯМИ

V. Vynar, Dr., M. Chuchman, Ph.D., V. Ivashkiv, Ph.D., Ch. Vasyliv, Ph.D.
Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Ukraine

FRACTOGRAPHIC DIAGNOSTIC OF CORROSION DAMAGE OF PIPE STEEL WITH CORROSION-ACTIVE NON-METALLIC INCLUSIONS

Abstract. Fractographic diagnostic of pipe steel 20 corrosion damage have been made. Corrosion-active non-metallic inclusions of the second type are the main cause of corrosion in the environment of model brine water. The accumulation of inclusions with a size of 10...200 μm in steel intensifies the development of local corrosion and the formation of through holes, which leads to a decrease in the service life of pipelines.

Надійність і довговічність експлуатації трубопроводів енергетичної, нафтогазовидобувної та атомної промисловості суттєво залежить від корозійно-механічних властивостей сталей. Однак за однакових умов експлуатації ресурс тотожних за хімічним складом, структурою і механічними властивостями сталей може відрізнятися на порядок. Основною причиною аномально високих швидкостей корозії нафтопромислових трубопроводів є забрудненість сталей корозійно-активними неметалевими включеннями (КАНВ), що потрапляють до сталей за неоптимальних технологічних умов. До складу цих включень входить кальцій у вигляді оксидної або сульфідної складової. Їх поділяють на два типи: КАНВ1 – оксидні включення на основі алюмінатів кальцію (m $CaO{\cdot}nAl_2O_3$) та КАНВ2 – включення з оксидним ядром на основі алюмінату кальцію та оболонкою із сульфіду кальцію, часом разом із сульфідом марганцю. Сульфідні включення найнебезпечніші з точки зору стійкості до дії корозивних середовищ, оскільки термодинамічно найменш стійкі і можуть спричиняти зародження пітінгів на поверхні металу [1].

Мета роботи – встановити причину підвищеної чутливості трубопроводу зі сталі 20 до локальної корозії у середовищі модельної супутньо-пластової води з нафтопромислових трубопроводів.

Методика досліджень.

Дослідження структури сталі та її хімічного складу виконували за допомогою скануючого електронного мікроскопа (ЕМ) ZEISS EVO 40XVP з системою рентгеноспектрального мікроаналізу INCA Energy та оптичного мікроскопа ZEISS Stemi-2000. Корозійно-електрохімічні дослідження виконували за допомогою потенціостата ПІ-2МК-10А. Присутність КАНВ визначали на поверхнях зламів зразків, отриманих на універсальній розривній машині FP-100. Такі включення важко ідентифікувати за допомогою металографічного аналізу, вони не впливають на загальний хімічний склад сталі, характеристики міцності та ударну в’язкість. Запропоновано новий підхід для визначення КАНВ у сталях, який полягає у

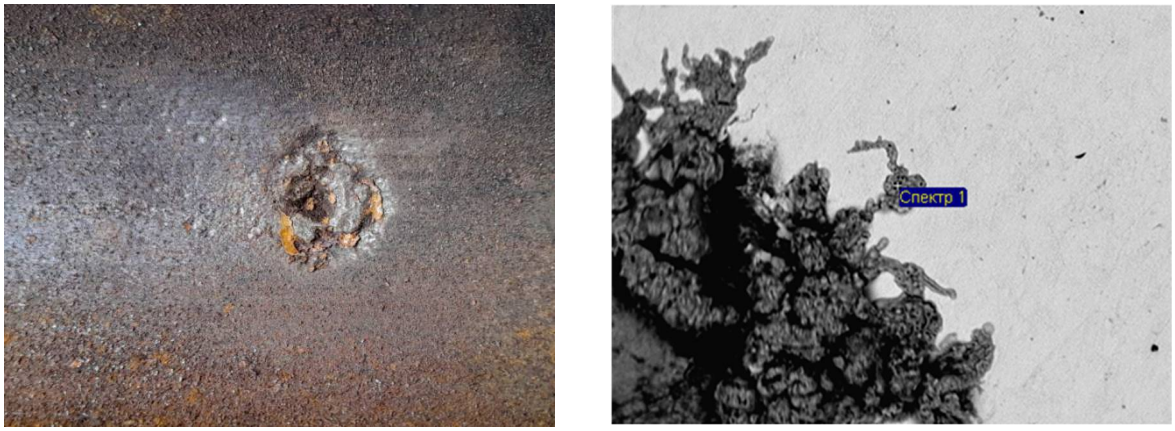
досліджені зламів, а не шліфів зразків [1,2]. Він дає можливість візуальної їх виявити, оцінити хімічний склад та форму.

Результати досліджень.

Хімічний склад сталі 20 за основними легуючими елементами відповідає стандарту ДСТУ 7809:2015. Її структура – ферито-перлітна.

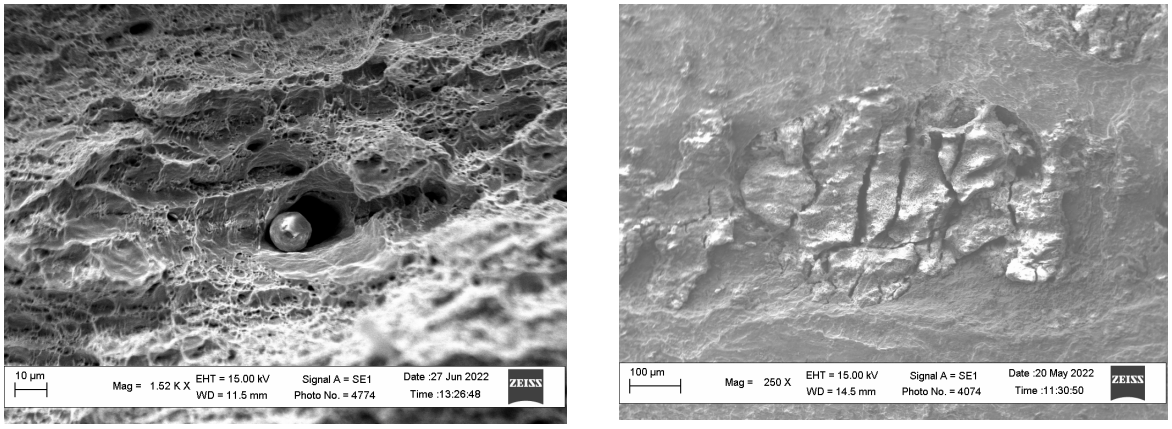
Після транспортування супутньої пластової води трубопроводом зі сталі 20 протягом року на його внутрішніх стінках труби виявлено відкладення продуктів корозії, а також локальні наскрізні руйнування розміром до 4 мм (рис.1, *а*). Корозійні пошкодження виникають в локальних ділянках і з часом поширюються в ширину і вглиб металу (рис.1, *б*). Продукти корозії складаються з крупних агломератів з дрібнодисперсною аморфною структурою. Вони містять компоненти середовища (Na, Cl, S), значну концентрацію O (37,88 %), Al (22,66 %), Si і Ca, що вказує на наявність КАНВ у кількостях, що перевищують допустимі.

У результаті вивчення фрактограм зламів виявлено в'язкий характер їх руйнування і корозійно-активні неметалеві включення, які містять (мас.%): 43,44 % O; 3,08 % Mg; 25.11 % Al; 1.52% S; 23.54% Ca. Їх ідентифіковано як КАНВ2, що є причиною локальної корозії та зародження пітінгів на поверхні металу (рис.2). Вони розміщені хаотично, мають розміри 10…300 мкм, що може негативно впливати на довготривалу експлуатацію обладнання.



а) б)

Рис.1. Поверхня внутрішньої ділянки труби з наскрізним локальним руйнуванням (а) та її поперечного перерізу (б).



а) б)

Рис.2. КАНВ різного розміру на фрактограмі зламу.

Електрохімічні показники корозії у середовищі модельної супутньо-пластової води визначали на ділянках сталі однакової площ без КАНВ, та з їх кількістю понад 2 вкл/см^2. За присутності КАНВ у сталі інтенсифікуються корозійні процеси, що ілюструє зміщення значення потенціалу корозії в катодну ділянку на 90 мВ та підвищення густини струму корозії у ~ 2,5 рази. Під час тривалої витримки у середовищі МПВ на поверхні сталі формується поверхневий шар продуктів корозії, що сприяє деякому сповільненню корозії. Незважаючи на відносно невисокий рівень загальної корозії сталі (0,0637 мм/рік), основною причиною аномально швидкого пошкодження труб є локальна корозія у місцях скупчення КАНВ, що має критичний вплив на надійність роботи обладнання.

Табл. Типові електрохімічні показники корозії зразків зі сталі 20 у середовищі модельної супутньо-пластової води

Сталь 20	$E_{кор}$, В	$i_{кор}$, мА/см^2	контроль
кількість КАНВ < допустимої	-0,56	0,00032	анодний
кількість КАНВ > допустимої	-0,64	0,00077	анодний

Висновок.

Незважаючи на відносно невисокий рівень загальної корозії сталі 20 у середовищі супутньо-пластової води (0,0637 мм/рік), основною причиною корозійного пошкодження сталі 20 у середовищі супутньо-пластової води є корозійно-активні неметалеві включення другого типу розміром 10…200 мкм, кількість яких в локальних ділянках перевищує 4 вкл/мм^2. Навіть за низької середньої густини КАНВ, їх скупчення у певних ділянках сталі інтенсифікує розвиток локальної корозії та утворення наскрізних отворів, що призводить до зниження терміну експлуатації трубопроводів.

Література.

1. М.С.Хома, В.А.Винар, О.В.Чорний, Ю.Я.Максішко, В.Р.Івашків, Н.Б.Рацька Новий тип корозійно активних неметалевих включень та їх вплив на корозію сталі 38ХН3МВА. - Фізико-хімічна механіка матеріалів.-55.-№5.-2019.-С.7-13.

2. Спосіб фрактографічного діагностування забруднення сталей сучасного металопрокату корозійно-активними неметалевими включеннями: Патент 135837 Україна / Кречковська Г.В., Винар В.А., Студент О.З., Хома М.С., Никифорчин Г.М. / № u2019 00243; заявл. 19.01.2019 р.; опубл. 25.07.2019, Бюл.№14 – 8 стор.

УДК 622.32:691.32:620.193
Й. Лучко[1], д.т.н., проф., Т. Гембара[2], к.т.н., доц.
[1]Львівський національний університет природокористування, Україна
[2]Львівський національний університет безпеки життєдіяльності, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЛЬТРАЦІЙНОЇ КОРОЗІЙНОЇ ТРИВКОСТІ НА СТАДІЇ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ БЕТОНУ

J. Luchko[1], Dr., Prof., T. Hembara[2], Ph.D., Assoc. Prof.
[1] Lviv National Agrarian University, Ukraine,
[2] Lviv State University of Life Safety, Ukraine

MATHEMATICAL MODELING OF FILTRATION CORROSION RESISTANCE AT THE STAGE OF CONCRETE STRUCTURE FORMATION

Abstract. The problem of the durability of concrete and reinforced concrete structures during corrosion of concrete due to the filtration of aqueous solutions is considered. The main values that determine the state of the liquid in concrete, such as density, pressure, filtration speed and the ratio of the total volume of channels or pores located in a certain volume, are considered. emi of a porous medium, to the entire volume of this medium.

Поширеною проблемою довговічності бетонних та залізобетонних конструкцій є корозія бетону першого виду, до якої належать процеси, що виникають при фільтрації через елемент бетонної конструкції води чи водних розчинів [1-4]. Процес корозії обумовлений розчинністю продуктів гідратації портландцементу у воді. Найбільш розчинним компонентом є гідроксид кальцію ($Ca(OH)_2$), який присутній у поровій структурі. Тому цей вид корозії отримав назву «корозія вилуговування». Інтенсивність корозії визначається проникністю (щільністю) бетону та мінералогічним складом цементу. Інтенсивність корозії зростає за наявності у фільтруючій воді сульфат іонів, іонів хлору, натрію та калію. Основними величинами, що визначають стан рідини в бетоні, є густина ρ, тиск p і швидкість фільтрації, а характеристикою бетону є відношення загального об'єму каналів або пор, що знаходяться в деякому об'ємі пористого середовища, до всього об'єму цього середовища пористість - m.

При виведенні рівняння фільтрації рідини або газу в пористому середовищі необхідно використати рівняння руху в'язкої рідини Нав'є – Стокса, а також рівняння нерозривності та стану [5,6]. Їх використання обумовлене тим, що на відміну від теплопровідності й дифузії, процес фільтрації визначається густиною ρ, тиском p і швидкістю фільтрації $\bar{v} = (u, v, w)$. Безпосереднє інтегрування рівнянь Нав'є – Стокса у випадку обтікання нескінченно великого числа частинок (при фільтрації) не можна виконати. Тому застосовують штучний підхід, що базується на використанні рівнянь руху Ейлера:

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} = X_1 + X_2 - \frac{\partial u}{\partial t} - u\frac{\partial u}{\partial x} - v\frac{\partial u}{\partial y} - w\frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} = Y_1 + Y_2 - \frac{\partial v}{\partial t} - u\frac{\partial v}{\partial x} - v\frac{\partial v}{\partial y} - w\frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} = Z_1 + Z_2 - \frac{\partial w}{\partial t} - u\frac{\partial w}{\partial x} - v\frac{\partial w}{\partial y} - w\frac{\partial w}{\partial z} \end{cases}, \qquad (1)$$

де $(X_1; Y_1; Z_1)$ – вектор масових сил, $(X_2; Y_2; Z_2)$ – вектор сил опору, $(u; v; w)$ – вектор швидкості, де $X_1 = 0, Y_1 = 0, Z_1 = -g$, де g – прискорення сили ваги. Знак "-" вибрано відповідно до вибору напрямку осі OZ.

Сили опору $(X_2;Y_2;Z_2)$, що виникають при обтіканні рідиною частинок пористого середовища, визначаються за допомогою закону Дарсі:

$$u=-k\frac{\partial p}{\partial x},\ v=-k\frac{\partial p}{\partial y},\ w=-k\frac{\partial p}{\partial z}. \tag{2}$$

Використовуючи закон Дарсі, отримуємо

$$X_2=-\frac{u}{k\rho},\ Y_2=-\frac{v}{k\rho},\ Z_2=-\frac{w}{k\rho}. \tag{3}$$

Якщо підставити в рівняння (1) знайдені компоненти сил, то отримуємо

$$\begin{aligned}\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}&=-\frac{u}{k\rho}-\frac{du}{dt},\\ \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}&=-\frac{v}{k\rho}-\frac{dv}{dt},\\ \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}&=-g-\frac{w}{k\rho}-\frac{dw}{dt}.\end{aligned} \tag{4}$$

До цих рівнянь необхідно в систему включити рівняння стану рідини чи газу (вони пов'язують густину ρ і тиск p)

$$\rho=f(p) \tag{5}$$

і рівняння нерозривності

$$m\frac{\partial\rho}{\partial t}+div(\rho\bar{v})=0. \tag{6}$$

Однак така система рівнянь є занадто ускладненою. Як правило, сили інерції $\left(\frac{du}{dt};\frac{dv}{dt};\frac{dw}{dt}\right)$ досить малі, тому ними можна знехтувати в рівняннях (4). Тоді ця система рівнянь спрощується:

$$\frac{\partial p}{\partial x}=-\frac{u}{k};\ \frac{\partial p}{\partial y}=-\frac{v}{k};\ \frac{\partial p}{\partial z}=-\frac{w}{k}-\rho g. \tag{7}$$

Звідси отримуємо рівняння фільтрації:

$$u=-k\frac{\partial p}{\partial x},\ v=-k\frac{\partial p}{\partial y},\ w=-k\frac{\partial p}{\partial z}-k\rho g. \tag{8}$$

Підставляючи знайдені u,v,w у рівняння нерозривності й ураховуючи рівняння стану, отримаємо розрахункове рівняння фільтрації відносно тиску p:

$$m\frac{\partial f(p)}{\partial t}-div\big(kf(p)gradp\big)=\frac{\partial}{\partial z}\big(kgf(p)\big). \tag{9}$$

Вважаємо, що рідина нестислива (її густина – стала). Рівняння стану (5) тоді не використовується, а рівняння нерозривності набуває вигляду

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0,\ (div\ \bar{v}=0). \tag{10}$$

Якщо ввести функцію напору (п'єзометричного напору, який характеризує питому потенційну енергію потоку в точці або перерізі)

$$p=g\varphi-gz \qquad \varphi=z+\frac{p}{g}, \tag{11}$$

то рівняння фільтрації (8) запишуться

$$u=-kg\frac{\partial\varphi}{\partial x},\ v=-kg\frac{\partial\varphi}{\partial y},\ w=-kg\frac{\partial\varphi}{\partial z}. \tag{12}$$

Підставляючи (12) у (10), запишемо рівняння для знаходження напору φ:

$$div(kggrad\,\varphi)=0. \tag{13}$$

Якщо g і $k=\text{const}$, то воно зводиться до рівняння Лапласа:

$$\Delta\varphi = 0\,. \qquad (14)$$

Тут частинки нестисливої рідини рухаються лініями, що ортогональні до поверхонь сталого напору, де $\varphi(x, y, z) = \text{const}$. Аналіз фільтрації найпростіше розглянути на прикладі одновимірного рівняння (14) з граничними умовами першого роду $\varphi(\text{o}) = \varphi_1$, $\varphi(l) = \varphi_2$, тобто для стінки товщиною *l*. Знайдена функція φ є лінійною залежністю від координати та граничних умов, що дозволяє оцінити кількісно вплив пористості на фільтрацію. Таким чином ми отримуємо вираз швидкості фільтрації *и* з формули (12).

Вільна (хімічно незв'язана) вода утворює в бетоні в початковий період формування його структури систему взаємозалежних капілярів, які на пізнішій стадії твердіння бетону роз'єднуються продуктами гідратації цементу. Додаткова пористість у бетоні утворюється внаслідок залучення повітря, а також деструкції при формуванні початкової структури, що зумовлює порушення суцільності, найчастіше по межі розділу «цементний камінь – зерна заповнювачів». Загальна пористість бетону на щільних заповнювачах, як відношення обсягу пор до обсягу матеріалу (бетону), описується формулою:

$$k = \frac{(\text{В} - 0{,}23\alpha\text{Ц}) + (1 - \delta)}{10} \qquad (15)$$

Тут В і Ц – витрати відповідно води та цементу, у кг на ущільненій бетонній суміші; α-ступінь гідратації цементу; δ - ступінь ущільнення бетонної суміші під час укладання (структурна щільність). Перше доданок в чисельнику дробу описує обсяг пор в цементному камені, а другий - обсяг пор, що утворюються при недоущільненні бетонної суміші, тобто коли $\delta < 1$. З формули (15) випливає, що загальна пористість бетону тим вища, чим більша витрата води на кубометр бетону, тобто чим вища потреба у воді бетонної суміші і чим менше δ. Загальна пористість бетону зменшується в часі зі збільшенням ступеня гідратації цементу α і тим інтенсивніше, чим більша витрата цементу на кубометр бетону. Таким чином, ще на стадії формування бетонних елементів конструкцій можна підвищувати їх антикорозійну стійкість, передбачаючи інтенсивність фільтрації.

Література.

1. Лучко Й. Й. Методи підвищення корозійної стійкості та довговічності бетонних та залізобетонних конструкцій і споруд: [Монографія] / Й. Й. Лучко, І. І. Глагола, Б. Л. Назаревич // НАН України, ФМІ ім. Г. В. Карпенка. Львів: Каменяр, 1999. 229 с. ISBN 5-7745-0761-0.

2. Лучко Й. Й. Методи захисту від корозії залізобетонних конструкцій і споруд: [Монографія] / Й. Й. Лучко, Б. З. Парнета, Б. Л. Назаревич // МОН України, Дніпропетровський нац. ун-т ім. акад. В. Лазаряна. Львів. Каменяр, 2016. 415 с. ISBN 978-966-607-371-3.

3. Лучко Й.Й., Гембара Т.В. Методи визначення навантаження тріщиноутворення для оцінки корозійної тривкості залізобетонних конструкцій //Діагностика,довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. Вип 6. - Львів: Фіз.-мех. інст. ім. Г.В. Карпенка, 2004.- с. 59-65.

4. Лучко Й.Й., Гембара Т.В. Корозійна тривкість залізобетонних балкових елементів конструкцій за тріщиноутворенням залежно від агресивності середовища // Автомобільні дороги та дорожнє будівництво. Вип 69. –Київ, 2004. –с. 139-143.

5. Дослідження основних рівнянь руху рідини в пористому середовищі / Й.Й.Лучко, Б.З. Парнета, Б.Л. Назаревич // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. — Львів: Каменяр. — 2005. — Вип. 6. — С. 512 — 522.

6. Теоретичні аспекти дослідження корозії залізобетонних конструкцій /Й.Й. Лучко, Б.З. Парнета // Дороги і мости. — К.: ДерждорНДІ. — 2005. — Вип. 3.— С. 25 — 39.

УДК 519.004:621.833
О. Паздрій, Н. Бурау, д.т.н, проф.
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, Україна

ВДОСКОНАЛЕННЯ БОРТОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ І КОНТРОЛЮ ДЛЯ БАГАТОКЛАСОВОЇ ДІАГНОСТИКИ АВІАЦІЙНОГО ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

Pazdrii O.Ya., Bouraou N.I., Dr.of Sc., Prof.
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine.

IMPROVEMENT OF ON-BOARD CONTROL AND MONITORING SYSTEM FOR MULTI-CLASS DIAGNOSTICS OF AIRCRAFT GAS TURBINE ENGINE

Abstract. The work is devoted to the improvement of the on-board system of control of the aviation gas turbine engine by including a subsystem of multi-class diagnostics. Methodical, algorithmic and software was developed for the implementation of software components for subsystem of multi-class diagnostics. The defined methods of analysis of diagnostic information make it possible to determine features that reflect the initial processes of the development damages of various classes.

Авіаційний газотурбінний двигун (ГТД) є об'єктом, що характеризується складністю як конструкції, так і режимів та умов експлуатації. Основними силовими елементами конструкції ГТД є ротори (вали і диски з лопатками), пошкодження яких під час польоту створюють передумови льотної події та можуть призвести до нелокалізованих руйнувань двигуна і, за звичай, катастрофічних наслідків[1].

Забезпечення надійної та безаварійної експлуатації ГТД вимагає проведення моніторингу поточного технічного стану (ТС) двигуна та його роторних елементів на стаціонарних та нестаціонарних режимах експлуатації. Для останніх десятиліть в області розробки, доведення і експлуатації систем діагностики і контролю ГТД характерним є побудова комплексних автоматизованих систем контролю і діагностики двигуна які реалізуються за принципом структурного моніторингу (Structural Health Monitoring) [2,3]. Побудова та функціонування таких систем передбачає використання різних діагностичних методів, які у сукупності забезпечують багатокласову діагностику об'єкта з високою точністю. Також однією з головних вимог, що висуваються до засобів діагностики і контролю ГТД, є раннє виявлення пошкоджень і дефектів його найбільш вразливих конструктивних елементів, таких як вал ротора двигуна та лопатки робочих коліс (компресорів, турбін).

Вібраційні процеси що протікають в двигуні під час експлуатації містять в собі інформацію, що відображає його ТС. Висока інформативність вібраційних та акустичних сигналів, простота їх перетворення в електричні сигнали, можливість їх вимірювання та аналізу в умовах експлуатації обумовили застосування методів вібраційної та віброакустичної діагностики у комплексному підході до моніторингу та діагностики ГТД.

Початкові пошкодження двигуна майже не призводять до підвищення загального рівню виміряного нестаціонарного та майже хаотичного процесу. Застосування класичних методів спектрального та спектрально-кореляційного аналізу не забезпечує виділення інформативних складових з шумоподібних вібраційних сигналів. Тому постає необхідність застосування комплексу методів для реалізації багаторівневої обробки діагностичної інформації, що потребує обґрунтування і вдосконалення методів та алгоритмів аналізу складних шумоподібних вібраційних сигналів з метою визначення діагностичних ознак для ідентифікації ТС двигуна під час експлуатації.

Застосування різних комбінацій методів на основі статистичних та спектральних характеристик вищих порядків, частотно-часових перетворень, масштабно-часових

перетворень, фрактального аналізу показало свою ефективність для вирішення конкретних завдань багатокласової діагностики [4-7], тому саме на їх основі пропонується здійснювати багаторівневу обробку діагностичної інформації для багатокласової діагностики двигуна.

У роботі запропоновано та обґрунтовано вдосконалення бортової системи контролю вібрації (БСКВ) шляхом включення до її складу підсистеми багатокласової діагностики на основі багаторівневої обробки вібраційних та віброакустичних сигналів, що забезпечить розширення функціональних можливостей БСКВ та сприятиме ранньому виявленню небезпечних пошкоджень роторних елементів двигуна та небезпечних режимів експлуатації.

На рис.1. представлено функціональну схему вдосконаленої БСКВ двигуна. Підсистема багатокласової діагностики забезпечує додаткові рівні обробки діагностичної інформації за допомогою програмних алгоритмів, реалізованих на базі апаратних можливостей пристрою центрального обчислювача (ПЦО), в свою чергу пристрій контролю вібрації (ПКВ) забезпечує виділення критичних параметрів про ТС двигуна для запобігання передумов виникнення аварійних ситуацій.

Кожен окремий блок підсистеми багатокласової діагностики призначений для виявлення певного виду експлуатаційного пошкодження конструктивних елементів двигуна (валу ротора чи лопаток робочого колеса), чи відхилення від штатного режиму функціонування. Програмний алгоритм поєднує застосування різних методів обробки вібраційних сигналів для вирішення таких діагностичних завдань, як: діагностика тріщини валу ротора двигуна; діагностика тріщини в лопатках; ідентифікація дисбалансу лопатки робочого колеса; ідентифікація потрапляння в компресор силової турбіни (СТ) мілких та середнього розміру предметів; задирання лопаток компресора СТ двигуна.

Результати досліджень показали ефективність запропонованих підходів та методів, їх високу чутливість до зміни ТС об’єкта контролю. Отримані результати є новими і можуть бути використані для вдосконалення бортових систем керування і контролю ГТД.

Література.

1. Методи цифрової обробки сигналів для вібраційної діагностики авіаційних двигунів [Текст]: монографія / Н.І. Бурау, Л.Л. Яцко, О.М. Павловський, Ю.В. Сопілка. – К. : НАУ, 2012. – 152 с.

2. Adams D. Health Monitoring of Structural Materials and Components. Methods with Applications/ D. Adams. – John Wiley & Sons Ltd., 2007. – 475 p.

3.Adamowicz M. Advanced gas turbines health monitoring systems/ M. Adamowicz, G. Żywica// *Diagnostyka*. – 2018. – Vol.19,2. – pp. 77-87.

4. Pavlovskyi O. Multilevel vibration control system of aviation gas-turbine engines / O. Pavlovskyi, N. Bouraou, L. Iatsko//*Vibrations in Physical Systems*. – 2012. – Vol.25. – C. 323-328.

5. Pazdrii O. Vibroacoustic Condition Monitoring of the Complex Rotation System Based on Multilevel Signal Processing/ O. Pazdrii, N. Bouraou// *Vibrations in Physical Systems*. – 2020. – Vol.31. – No 2, 2020224. – pages: 7.

6. Bouraou N. Improvement of the vibration diagnostics of rotation shaft damage based on fractal analysis/ O. Pavlovskyi, O. Pazdrii.// *Vibrations in Physical Systems. – 2016.* – Vol. 27. – pp. 61-66.

7. Бурау Н.І. Фізичне моделювання та діагностика попадання сторонніх предметів в обертову систему/Н.І. Бурау, О. Паздрій// *Авіаційно-космічна техніка і технологія.* – 2021. – №4/173 – спецвипуск 1 – С. 62-67.

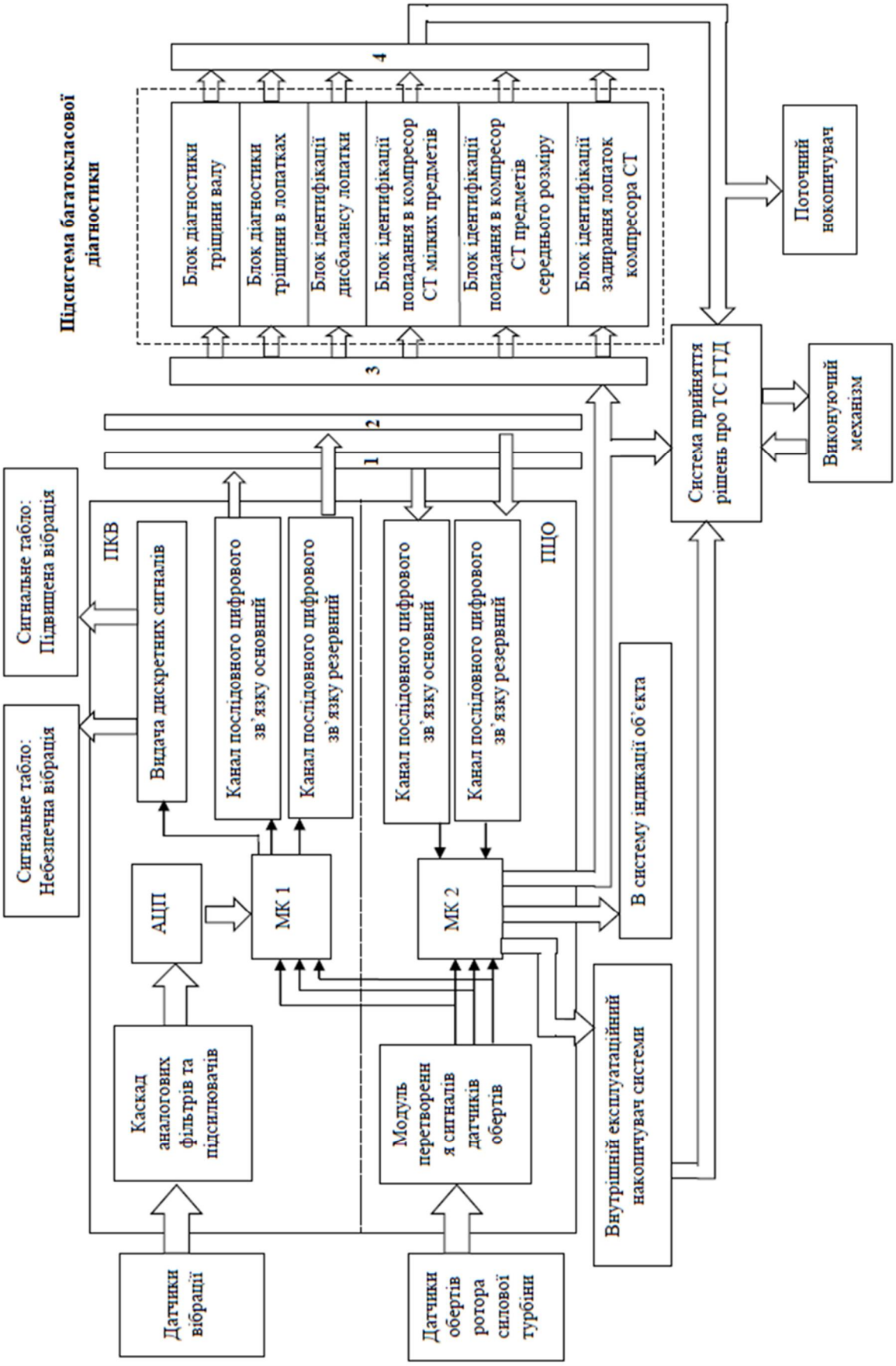


Рис.1. Функціональна схема вдосконаленої бортової системи контролю вібрації двигуна

УДК 621.314:621.393.66

І. Яворський[1,2], д.ф.-м.н., проф., Р. Юзефович[1-3], д.т.н., доц., О. Личак[1], к.т.н., ст. досл., Г. Трохим[1], к.т.н., І. Мацько[1], к.т.н.
[1] Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна
[2] Бидгощська політехніка, Бидгощ, Польща
[3] Національний університет "Львівська політехніка", Львів, Україна

ОБРОБКА ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ МЕТОДАМИ ПЕРІОДИЧНИХ НЕСТАЦІОНАРНИХ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ПІДШИПНИКІВ

I. Javorskyj[1,2], Dr.Sci., Prof., R. Yuzefovych[1,3], Dr.Sci., Assoc. Prof., O. Lychak[1], Ph.D., Senior Researcher, G. Trokhym[1], Ph.D., I. Matsko[1], Ph.D.
[1] Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine
[2] UTP University of Sciences and Technology, Bydgoszcz, Poland
[3] Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

VIBRATION SIGNALS PROCESSING BY THE METHODS OF PERIODIC NON-STATIONARY RANDOM PROCESSES FOR THE DETECTION OF BEARING DEFECTS

Abstract. The dependence of the spectral composition of deterministic periodic oscillations and the correlation-spectral structure of the stochastic component in vibration signal on the existing shocks in the bearing was analyzed. Defects that occur in bearings during operation cause non-linear effects in the part's response to load and non-linear effects in vibrations. Obtained results can be used for early detection of mechanism defects and establishment of their types.

Дефекти, що виникають у підшипниках під час експлуатації, викликають нелінійні ефекти у реакції деталі на навантаження і, відповідно, появу нелінійних ефектів у властивостях вібраційних коливань самого підшипника та його елементів. Нелінійності призводять до появи додаткових гармонік у регулярних складових вібраційного сигналу, а також складної взаємодії цих складових з стохастичними коливаннями, зумовленими цілим рядом факторів. До них слід віднести неоднорідність товщини та фізико-хімічних властивостей змазки, варіації коефіцієнтів тертя, зміни робочих навантажень і тому подібні фактори. У результаті такої взаємодії регулярна складова коливань зазнає складної фазової та амплітудної модуляції. Параметри модуляційної взаємодії є індикаторами стану досліджуваного об'єкту. А, оскільки, всі процеси у обертовому механізмі завжди залежать від одного джерела, тобто приводу, що обертається з певною частотою, тому адекватно описати параметри вібраційного сигналу можна математичною моделлю у вигляді модульованих за амплітудою та фазою гармонік з кратними частотами чи періодично корельованим випадковим процесом [1, 2]:

$$\xi(t) = \sum_{k \in Z} \xi_k(t) e^{ik\omega_0 t}, \qquad (1)$$

$\xi_k(t)$ – стаціонарно зв'язані випадкові процеси, P – період нестаціонарності, а $\omega_0 = \dfrac{2\pi}{P}$ базова (основна) частота.

Математичне сподівання процесу (1) має вигляд

$$m(t) = E\xi(t),$$

де E – оператор імовірнісного усереднення.

Кореляційна функція процесу (1):

$$b(t,u) = E\overset{\circ}{\xi}(t)\overset{\circ}{\xi}(t+u),$$

де $\overset{\circ}{\xi}(t) = \xi(t) - m(t)$, періодично змінюється за часом.

Розкладаючи математичне сподівання і кореляційну функцію у ряди Фур'є отримуємо:

$$m(t) = \sum_{k\in Z} m_k e^{ik\omega_0 t} = m_0 + \sum_{k\in N}\left[m_k^c \cos k\omega_0 t + m_k^s \sin k\omega_0 t\right],$$

$$b(t,u) = \sum_{k\in Z} B_k(u) e^{ik\omega_0 t} = B_0(u) + \sum_{k\in N}\left[C_k(u)\cos k\omega_0 t + S_k(u)\sin k\omega_0 t\right],$$

тут $m_k = \frac{1}{2}\left[m_k^c - im_k^s\right]$, $B_k(u) = \frac{1}{2}\left[C_k(u) - iS_k(u)\right]$, $\forall k \neq 0$, а Z і N є відповідно множини цілих та натуральних чисел.

Коефіцієнти m_k є математичними сподіваннями модулюючих процесів $m_k = E\xi_k(t)$, а коефіцієнти $B_k(u)$, тобто кореляційні компоненти [1, 2], визначаються наступним чином

$$B_k(u) = \sum_{l\in Z} R_{l-k,l}(t) e^{il\omega_0 u}, \qquad (2)$$

де $R_{lk}(u) = E\overline{\overset{\circ}{\xi}_l(t)}\overset{\circ}{\xi}_k(t+u)$, $\overset{\circ}{\xi}_l(t) = \xi_l(t) - m_l$, а "$\overline{\ }$" – знак спряження. Нульовий кореляційний компонент $B_0(u)$ визначається автокореляційними функціями модулюючих процесів $\xi_k(t)$, а кореляційні компоненти вищих порядків – взаємокореляційними функціями тих модулюючих процесів, номери яких різняться на номер порядку k.

Залежна від часу спектральна густина

$$f(\omega,t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} b(t,u) e^{-i\omega u} du$$

є періодичною функцією часу. Представимо її у вигляді ряду Фур'є:

$$f(\omega,t) = \sum_{k\in Z} f_k(\omega) e^{ik\omega_0 t}.$$

Тут, очевидно спектральні компоненти $f_k(\omega)$, є перетвореннями Фур'є кореляційних компонентів:

$$f_k(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} B_k(u) e^{-i\omega u} du = \sum_{l\in Z} f_{l-k,l}(\omega - l\omega_0).$$

$B_0(u)$ є кореляційною функцією стаціонарного наближення ПКВП, а спектральний компонент $f_0(\omega)$ представляє залежну від частоти усереднену за часом потужність коливань і є суперпозицією зсунутих по частоті на величину $l\omega_0$ спектральних густин потужності модулюючих процесів.

Математичне сподівання процесу $m(t)$ та її коефіцієнти Фур'є m_k описують властивості детермінованих коливань, тоді як кореляційна функція $b(t,u)$, спектральна густина $f(\omega,t)$, кореляційні компоненти $B_k(u)$ і спектральні компоненти $f_k(\omega)$ – властивості стохастичних коливань.

Дослідження [1, 3–7] показали, що характеристики періодичної нестаціонарності другого порядку, якими є кореляційні та спектральні компоненти вищих порядків, є чутливими до процесів розвитку дефектів у механізмах. Зокрема, спектральні залежності функцій $b(t,u)$ та $f(\omega,t)$, як і залежності кореляційних компонентів від зсуву та спектральних компонентів від частоти є чутливими до розвитку дефектів.

На основі цього підходу був проведений аналіз сигналів вібрації підшипникового вузла декантера методами ПКВП, що дозволило виявити пошкодження, яке проявлялося у вигляді періодичних ударів [4]. Дослідження показали залежність спектрального складу детермінованих періодичних коливань та кореляційно-спектральної структури стохастичної складової від присутності ударів. Зокрема, детерміновані коливання демонстрували підвищену потужність, а їх амплітудний спектр суттєво розширювався аж до 40 гармоніки. Періодичні зміни потужності стохастичної складової також демонстрували суттєве розширення спектру. Показники нестаціонарності першого, і другого порядків підтвердили наявність локального дефекту підшипникового вузла.

Отриманні результати можуть бути використані в подальшому для раннього виявлення дефектів механізмів і встановлення їх типів.

Література

1. Яворський І.М. Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань. – Львів : Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. – 802 с.

2. Javorskyj I., Matsko I., Yuzefovych R., Lychak O., Lys R. Methods of Hidden Periodicity Discovering for Gearbox Fault Detection. // Sensors. – 2021. – 21. – 6138.

3. Javors'kyj I., Kravets I., Matsko I., Yuzefovych R. Periodically correlated random processes: application in early diagnostics of mechanical systems // Mechanical system and signal processing. – 2017. – 83. – P. 406–438.

4. Мацько И.Й. Анализ вибрационного сигнала подшипникового узла с развитым дефектом на основании методов статистики периодически коррелированных случайных процессов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2017. – № 2. – С. 23–32.

5. Юзефович Р.М. Пристрої для виявлення дефектів на ранніх стадіях їх зародження при визначенні технічного стану механізмів / Р.М. Юзефович, І.М. Яворський, І.Й. Мацько, О.В. Личак, Г.Р. Трохим, О.Ю. Дзерин, І.Г. Стецько // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2020. – № 4. – С. 8–16.

6. Javorskyj I., Yuzefovych R., Lychak O., Matsko I. , Semenov P. Evaluation of the mechanism damage using model of vibration signal as a periodically correlated random process // Procedia Structural Integrity. – 2022. – 36. – P. 122–129.

7. Юзефович Р.М. Застосування спеціалізованого пристрою неруйнівного контролю для аналізу вібраційних сигналів підшипникових вузлів методами взаємного нестаціонарного аналізу / Р.М. Юзефович, І.М. Яворський, О.Ю. Дзерин, Г.Р. Трохим, І.Г. Стецько, І.Й. Мацько // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2020. – № 1. – С. 17–27.

УДК 621.314:621.393.66
Р. Юзефович[1,2], д.т.н., доц., О. Личак[1], к.т.н., ст. досл., І. Яворський[1,3], д.ф.-м.н., проф., І. Стецько[1], гол. констр., І. Стецько[1], інж. 1 кат.
[1] Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна
[2] Національний університет "Львівська політехніка", Львів, Україна
[3] Бидгощська політехніка, Бидгощ, Польща

ДІАГНОСТУВАННЯ МЕХАНІЗМІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

R. Yuzefovych[1,2], Dr.Sci., Assoc. Prof., O. Lychak[1], Ph.D., Senior Researcher, I. Javorskyj[1,3], Dr.Sci., Prof., I. Stetsko[1], chief designer, I. Stetsko[1], eng. first category
[1] Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine,
[2] Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,
[3] UTP University of Sciences and Technology, Bydgoszcz, Poland

DIAGNOSTICS OF MECHANISMS BASED ON THE ANALYSIS OF VIBRATION SIGNALS

Abstract. It is shown that the acqusition and analysis of vibration signals is of a big importance in the modern diagnosis of mechanisms, structures and even practical human activities. The development and implementation of vibration signal acqusition and processing tools is based on signal models and methods of their processing. The parameters of the vibration signals, as well as the mechanism status indicators, make it possible to carry out effective diagnostics.

Необхідність точного виміру і аналізу механічних коливань виникла з перших кроків розробки та конструювання машин та механізмів. За останні 15-20 років відбувся швидкий розвиток техніки вимірювання і аналізу механічних коливань (віброметрія) для дослідження і випробування нових, швидкодіючих та потужних машин і обладнання. Використання п'єзоелектричних акселерометрів, що перетворюють механічні коливання в електричні сигнали, відкрило нові можливості для точного вимірювання та аналізу механічних коливань електронними вимірювальними приладами. Уникнути механічних коливань при роботі механізму практично неможливо, оскільки вони зумовлені динамічними явищами, що супроводжують допуски, зазори та поверхневі контакти окремих деталей машин і механізмів та силами, що виникають при обертовому та обертово-поступальному русі усіх неврівноважених елементів деталей та вузлів.

Вібрації, що зустрічаються на практиці, в основному є складними механічними коливаннями з багатьма складовими на різних частотах. Окремі складові складних механічних коливань можна виокремити шляхом дослідження залежностей їх амплітуд від частоти [1].

Для кількісної оцінки величин механічних коливань використовують розмах сигналу, пікове значення, середнє чи середньоквадратичне значення вібраційного сигналу. Середньоквадратичне значення вібрацій, зокрема, безпосередньо відображає величину пов'язану з енергією, а значить, з руйнівною здатністю цих механічних коливань. Амплітуда вібропереміщення, віброшвидкість та віброприскорення коливань синусоїдальної форми взаємопов'язані математичними функціями частоти та часу. Нехтуючи фазовими співвідношеннями, віброшвидкість механічних коливань можна визначити шляхом ділення їх віброприскорення на коефіцієнт пропорційний частоті, а вібропереміщення можна отримати шляхом ділення віброприскорення на коефіцієнт

пропорційний квадрату частоти. Описані операції виконуються автоматично електронними інтеграторами.

До переваги приладів, що працюють в лабораторних умовах, слід віднести високу точність вимірювання, надійність та універсальність, особливо коли це стосується детального аналізу і повної обробки даних. Як правило, вібровимірювальна система має у своєму складі акселерометр, перетворювач заряду та вимірювальний підсилювач з можливістю підключення стаціонарних і зовнішніх фільтрів, а також перетворювачів вібраційного сигналу в цифрову форму та запис на постійний носій персонального комп'ютера.

Практикою підтверджено, що середньоквадратичне значення віброшвидкості в діапазоні частот від 10 Гц до 1000 Гц найбільш повно відображає силу і небезпечність механічних коливань. При вимірюванні віброприскорення увага приділяється високочастотним складовим досліджуваного процесу. До характерних особливостей механічних систем можна віднести явище повільної зміни в сторону наростання сигналу вібропереміщення, оскільки основні його складові як правило знаходяться в області низьких частот. Тому вимірювання та аналіз вібропереміщень не є задачами першочергової ваги при загальному дослідженні механічних коливань механізмів. Однак, вібропереміщення часто служить параметром при балансуванні деталей та елементі вузлів що обертаються, зважаючи на те, що найбільше вібропереміщення спостерігається на частоті обертання. Акселерометри є високоімпедансними вібродавачами, тому наводки і шум з'єднувальних кабелів, що використовуються разом із ними, можуть бути серйозною проблемою. Не зайвим буде звернути увагу на правильне встановлення акселерометра і його деформації, пов'язані з цим процесом, а також підвищену вологість зовнішнього середовища. Найбільш досконалими, особливо з точки зору швидкості реєстрації та обробки даних, зручної експлуатації і великої кількості діагностичних даних є вібродіагностичні системи, що працюють в реальному масштабі часу. Вони забезпечують одночасний відбір необхідної кількості каналів відбору інформації з достатньою кількістю частотних смуг і видачу результатів на екран монітора персонального комп'ютера з можливістю подальшої обробки та архівування.

Широкосмугові вібродіагностичні вимірювання надають важливу інформацію, яку використовують для швидкої оцінки (експрес-аналізу) досліджуваного механізму та оцінки в цілому вібраційного стану машини чи окремих її вузлів. Результати вимірювань, як правило, порівнюються із стандартами та рекомендаціями що стосуються оцінки механічних коливань з обертовим чи обертово-поступальним рухом такими як ISO 2372, ISO2373, ДСТУ ISO 10816-1:2007 [2].

Література.

1. Яворський І. М. Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань. – Львів : Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. – 802 с.

2. ДСТУ 10816-1:2007 Вібрація. Контроль стану машин за наслідками вимірювань вібрації на частинах, що не обертаються. Частина 1. Загальні вимоги.

УДК 621.314:621.393.66
Г. Трохим[1], к.т.н., О. Личак[1], к.т.н., ст. досл., Р. Юзефович[1,2], д.т.н., доц., І. Яворський[1,3], д.ф.-м.н., проф., Р. Слєпко[1], асп.
[1] Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна
[2] Національний університет "Львівська політехніка", Львів, Україна
[3] Бидгощська політехніка, Бидгощ, Польща

МОДЕЛЬ СТОХАСТИЧНОЇ МОДУЛЯЦІЇ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ПІДШИПНИКІВ

G. Trokhym[1], Ph.D., O. Lychak[1], Ph.D., Senior Researcher, R. Yuzefovych[1,2], Dr.Sci., Assoc. Prof., I. Javorskyj[1,3], Dr.Sci., Prof., R. Slyepko[1], Ph.D. student
[1] Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine
[2] Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
[3] UTP University of Sciences and Technology, Bydgoszcz, Poland

MODEL OF STOCHASTIC MODULATION VIBRATIONC SIGNALS FOR BEARING DEFECT DETECTION

Abstract. When studying the amplitude and phase spectra of the deterministic component of vibration signals and their relations with the defects of the investigated mechanisms, the frequency distribution of the modulation features of the defects was observed. The expediency of dividing the frequency range of the signal for the used modulation models of stochastic vibroacoustic oscillations was analyzed.

У процесі розроблення теоретичних основ діагностування механізмів на основі статистичного аналізу стохастичних процесів існує потреба у попередньому аналізі структури вібраційного сигналу для виявлення прихованої періодичності першого і другого порядків, дослідження прояву структури детермінованих коливань в амплітудному і фазовому спектрах та їх зв'язку з дефектами досліджуваних елементів. При цьому використовувались методи аналізу стаціонарних випадкових процесів, а кореляційна структура сигналу досліджувалась когерентним та компонентним методами [1].

Стан об'єкта, зазвичай, описують сукупністю параметрів використовуючи їх залежність від низки процесів. Вібрація, що викликана роботою складного механізму чи окремих його частин, також може бути таким сигналом. Механічні коливання в механізмі породжуються в основному незбалансованістю його рухомих частин. Такі коливання характеризуються низькими частотами, порівняно великими амплітудами переміщення та малими прискореннями. Характерною рисою цього виду коливань є залежність частоти вібрацій від швидкісного режиму об'єкта. Амплітуда таких вібрацій пропорційна квадратові кутової швидкості обертання валу і залежить від маси об'єкта та жорсткості його кріплення до фундаменту [2]. Ще одним джерелом коливань механізму можуть бути взаємні удари його деталей. Вони характеризуються високими частотами, малими амплітудами зміщення та значними прискореннями. Їхні частоти визначаються розмірами, формою та пружними константами матеріалів деталей. Їх амплітуда пропорційна взаємній швидкості ударів деталей.

Внаслідок складності вібраційних процесів, домінуючим підходом до їх аналізу та діагностики механізмів є розбиття спектру вібраційного сигналу на відповідні піддіапазони та окремий аналіз у кожному з них [3]:

–низьких частот (від 0 до 200–300 Гц);

–середніх частот (від 200-300 Гц до 1–2 кГц);

–високих частот (від 1–2 кГц до 10–20 кГц);

–надвисоких частот (від 10–20 кГц до 100–500 кГц).

Такий поділ корисний тим, що кожному піддіапазону властиві певні збуджуючі сили та відповідна фізична модель машини як коливної пружної системи. Таким чином, параметри вібраційного сигналу можна описати моделлю у вигляді суми амплітудно- та фазо- модульованих гармонік з кратними частотами періодично корельованого випадкового процесу [3, 4]:

$$\xi(t) = \sum_{k \in Z} \xi_k(t) e^{ik\omega_0 t},$$

де $\xi_k(t)$ – стаціонарно зв'язані випадкові модулюючі процеси, $\omega_0 = 2\pi/T$ основна частота, T – період нестаціонарності. Кореляційна функція та спектральна густина сигналу є чутливими до розвитку дефектів. При дефекті від періодичних ударів росте потужність детермінованих коливань і розширюється їх амплітудний спектр. Показники нестаціонарності першого і другого порядків дозволяють діагностувати локальні дефекти у підшипниковому вузлі [5, 6].

Література.

1. Яворський І.М. Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань. – Львів : Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. – 802 с.

2. Костюков В.Н. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: учеб. пособие / В.Н. Костюков, А.П. Науменко. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. – 360 с.

3. Костюков В.Н. Обобщенная диагностическая модель виброакустического сигнала объектов периодического действия [Текст] / В.Н. Костюков // Омский науч. вестн. – 1999. – Вып. 6. – С. 37–41.

4. Javorskyj I., Yuzefovych R., Lychak O., Matsko I. , Semenov P. Evaluation of the mechanism damage using model of vibration signal as a periodically correlated random process // Procedia Structural Integrity. – 2022. – 36. – P. 122–129.

5. Юзефович Р.М. Застосування спеціалізованого пристрою неруйнівного контролю для аналізу вібраційних сигналів підшипникових вузлів методами взаємного нестаціонарного аналізу / Р.М. Юзефович, І.М. Яворський, О.Ю. Дзерин, Г.Р. Трохим , І.Г. Стецько, І. Й. Мацько // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2020. – № 1. – С. 17–27.

6. Яворський І.М. Методи та засоби ранньої вібродіагностики підшипникових вузлів обертових механізмів / І.М. Яворський, Р.М. Юзефович, О.В. Личак, М.З. Варивода, І.Г. Стецько // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2021. – № 2. – С. 30–37.

УДК 531
В. Федоров, к.т.н., доц.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕВОЛЮЦІЙНОЇ ПОШКОДЖУВАНОСТІ МАТЕРІАЛІВ

V. Fedorov, Ph.D, Assoc. Prof.
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

MATHEMATICAL MODELING OF THE EVOLUTIONARY DAMAGEABILITY OF MATERIALS

Abstract. The problem of constructing the evolutionary damageability equation is conosidered. It is proved that if the damageability function in the Kachanov model is factorized , then this model gives the same rupture moment as the Palmgren-Miner rule, which is at variance with experiments. To construct a non-factorized damageability function, a method based on its potential representation has been developed.

Еволюційне руйнування матеріалу викликається тривалою дією $L(\xi)$ на нього таких факторів, як, наприклад, напруження (тривале руйнування), амплітуда напруження (багатоциклове втомне руйнування) або амплітуда деформації (малоциклове втомне руйнування). Тривалість ξ дії - це час (тривале руйнування) або кількість циклів навантаження (втомне руйнування). Момент руйнування x_R — це, відповідно, час або кількість циклів, через яку матеріал руйнується. Така уніфікація термінології та позначень допустима й необхідна, оскільки математичні моделі пошкоджуваності різної фізичної природи ідентичні.

Відомо, що при еволюційному руйнуванні момент руйнування є функціоналом протоколу дії:

$$x_R = X[L(\xi)],\ 0 \le \xi \le x_R. \qquad (1)$$

Для прогнозування моменту руйнування при заданому протоколі дії необхідно побудувати цей функціонал, адекватний експериментальним даним. Найпростішими є випробування матеріалів при стаціонарних діях

$$L(\xi) = L = const, \qquad (2)$$

результатом яких є функція, крива еволюційної міцності $x_R = X_R(L)$. У відповідних областях механіки це крива тривалої міцності або крива втомної міцності. Практично значимим є формулювання функціоналу (1), адекватного за умов нестаціонарних дій.

Перший відомий функціонал (1) був представлений Пальмгреном [1] для прогнозування втомного руйнування підшипників, який Майнер [2] застосував для втоми матеріалів. Він увійшов також у практику розрахунку тривалої міцності. У формальному вигляді ця теорія використовує функціонал пошкодженості

$$I[L(\xi), x] = \int_0^x \frac{d\xi}{X_R(L(\xi))},\ 0 \le \xi \le x \le x_R \qquad (3)$$

та умову руйнування

$$I[L(\xi), x_R] = 1. \qquad (4)$$

якими визначається функціонал (1). При заданому протоколі дії $L(\xi)$ може бути знайдений момент руйнування. Експериментальна перевірка правила Пальмгрена-Майнера (ППМ) (3), (4) показала, що реальні значення функціоналу Пальмгрена-Майнера (4) для різних матеріалів можуть суттєво відрізнятись від одиниці в обидві сторони. Тому ППМ не є цілком надійним для оцінки моменту руйнування.

Тому було сподівання на те, що більш складна математична модель Качанова (МК) [3], яка описує еволюцію змінної пошкодженості D рівнянням

$$\frac{dD}{d\xi} = f(L(\xi), D) \quad (5)$$

з початковою умовою $D(\xi = 0) = D_0$ та умовою руйнування $D(\xi = x_R) = D_R$ зможе краще прогнозувати момент руйнування.

Але Odqvist F.K.G. і Hult J. [4] показали, що для функції пошкоджуваності $f(L(\xi), D)$ у степеневому вигляді з $D_0 = 0$ та $D_R = 1$ МК кількісно еквівалентна ПМП. Також Ostergren W. J. і Krempl E. [5] показали, що у разі двоступінчастої дії МК кількісно еквівалентна ПМП якщо функція пошкоджуваності факторизована:

$$f(L, D) = \frac{f_1(L)}{f_2(D)}. \quad (6)$$

Кінец кінцем, Lemaitre, J, і Desmorat, R. [5] стверджують, що тотожність значень момента руйнування, визначених за МК та ППМ є загальною властивістю рівняння (5). Однак, цей висновок є помилковим. Можна довести наступне ствердження.

Теорема. Якщо функція пошкоджуваності факторизована (6), тоді МК дає той же момент руйнування, що и ППМ незалежно від виду функцій в (6) та початкового і кінцевого значень функції пошкодженості.

Виникає питання: якщо дві моделі дають однаковий результат, яку з них треба застосовувати? Бритва (принцип) Оккама відсікає модель Качанова, як набагато складнішу і тому менш ефективну. Вона може проявити свої потенційні можливості тільки у випадку нефакторизованої функції пошкоджуваності. Однак в літературі переважно користуються саме факторизованими функціями, що є непродуктивним. Тільки в роботі Chaboche, JL, Lesne, PM [7] пропонуються нефакторізовані функції пошкоджуваності. Тому актуальною проблемою є створення теоретичних засад для побудови таких функцій, здатних описувати пошкоджуваність будь-яких матеріалів.

Пропонується застосування еволюційного рівняння (5) у потенціальній формі:

$$\frac{dD}{d\xi} = f(L(\xi), D) = \left\{\frac{\partial \Phi(L(\xi), D)}{\partial D}\right\}^{-1}, \quad (7)$$

де $\Phi(L, D)$ є потенціалом. Цим проблема знаходження функції пошкоджуваності замінюється проблемою знаходження потенціалу. Можна показати, що при стаціонарній дії (2) потенціал є тривалістю: $\Phi(L, D) = \xi$. Тому, маючи серію експериментальних залежностей пошкодженості від тривалості

$$D = D(L_i, \xi) = D(L_i, \Phi) \quad (8)$$

при різних постійних значеннях дії L_i та представивши залежність (8) у зворотньому вигляді $\Phi = \Phi(L_i, D)$ після її апроксимації маємо побудований потенціал $\Phi = \Phi(L, D)$. Після підстановки його у (7) отримаємо рівняння пошкоджуваності. Такий підхід є набагато простішим від традиційного, оскільки, на відміну від останнього, не пов'язаний з необхідністю інтегрування функції пошкоджуваності.

Література.

1. Palmgren A. Die lebensdauer von kugellagern. VDI-Z 68 (1924) 14, S. 339–341.
2. Miner M.A. Cumulative damage in fatigue. J Appl Mech 1945,12: A 159-A 164.
3. Kachanov L.M. The Theory of Creep. Boston, MA: Wetherby, 1960.
4. Odqvist F.K.G., Hult J., Some aspects of creep rupture, Arkiv för fysik 1961,19,379–382.
5. Ostergren W. J. and Krempl E. (1979) An uniaxial damage accumulation law for time-varying loading including creep-fatigue interaction. J. Press. Vess. Technol. Trans. ASME 101, 1-18.
6. Lemaitre J,, Desmorat R. Engineering Damage Mechanics: Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005.
7. Chaboche J.L., Lesne P.M. A non-linear continuous fatigue damage model. Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures. 1988, 11(1), 1–17.

УДК 620.179:681.7
Л. Муравський, д.т.н., проф., чл.-кор. НАН України, О. Куць, Г. Гаськевич
Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, Україна

ОПТИКО-АКУСТИЧНИЙ МЕТОД ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ВНУТРІШНІХ ДЕФЕКТІВ У КОМПОЗИТНИХ СТРУКТУРАХ

L. Muravsky, Dr., Prof., Corresponding Member of the NAS of Ukraine, O. Kuts, G. Gaskevych
Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Ukraine

OPTICAL-ACOUSTIC METHOD FOR DETECTING INTERNAL DEFECTS IN COMPOSITE STRUCTURES

Abstract. An optical-acoustic method for detecting internal defects in laminated composite structures is considered. In this method, the detection of such defects is performed by producing an optical response from a thin layer of material located directly above the defect. To implement the method, a hybrid optical-digital system with ultrasonic excitation of composite panels in the frequency sweep mode was created. Results of artificial and real defects detection are shown.

Запропоновано оптико-акустичний метод виявлення внутрішніх дефектів у шаруватих композитних структурах. Метод базується на новому підході до їх виявлення шляхом формування та візуалізації модової структури коливань поверхні тонкого шару матеріалу (області інтересу (ОІ)), розташованого безпосередньо над дефектом. Коливання ОІ відбуваються на її резонансних частотах, які відповідають резонансним частотам тонкої закріпленої по краях мембрани під дією згинальних ультразвукових (УЗ) хвиль. Під дією УЗ-випромінювання у верхньому шарі над дефектом, тобто в ОІ, поширюються згинальні хвилі. Якщо частота хвилі збігається із резонансною частотою ОІ, то ОІ починає вібрувати на цій частоті. Згинальні хвилі під час поширення у матеріалі діють на нього у напрямі, поперечному до напряму поширення УЗ-хвилі. Тому коливання ОІ від площини поверхні композиту відбувається у тому ж напрямі. Якщо ОІ та прилеглу до нього поверхню композиту освітлювати лазерним випромінюванням під час коливання ОІ, то в оптичній системі шорстка поверхня композиту, що містить ОІ, формує спекл-зображення, яке містить локальне спекл-зображення (ЛСЗ) області інтересу, оточене рівномірним фоном. Під час коливань ОІ відбувається нахил її елементів, а під час нахилу оптично шорсткої поверхні відбувається зсув спектра $\Delta\mathbf{v}$ просторових частот ОІ в апертурі А об'єктива О оптичної системи, що призводить до розмиття спеклів і зміни контрасту у ЛСЗ, як це показано на Рис. 1. В результаті виникає оптичний просторовий відгук в межах ЛСЗ, структура якого залежить від кратності резонансної частоти. Оскільки нахил вузлів ОІ, яку розглядаємо як тонку закріплену по краях мембрану, відбувається практично лише у поперечному напрямі, то у ЛСЗ формуються світлі плями від вузлів мембрани, що нахиляються у цьому ж напрямі. Світлі плями в межах ЛСЗ формують просторові відгуки від дефекту. Для отримання відгуку від дефекту накопичують одне спекл-зображення $I_{q,o}(k,l)$ за допомогою цифрової камери під час коливань УЗ хвилі в одному напрямі, а друге $I_{q,e}(k,l)$ – під час коливань УЗ хвилі у протилежному напрямі, а потім віднімають одне від одного, отримуючи мапу дефектів у вигляді різницевого спекл-зображення

$$I_q(k,l) = \left| I_{q,o}(k,l) - I_{q,e}(k,l) \right|. \quad (1)$$

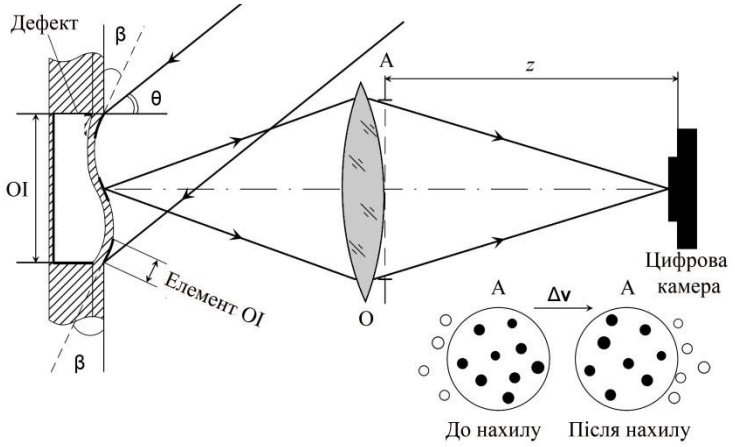
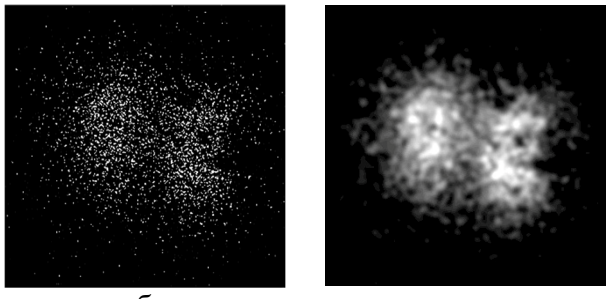


Рис. 1. Оптична схема формування спекл-зображень, що генеруються шорсткою поверхнею композиту, частину якої займає OI: θ – кут падіння лазерного випромінювання; z – відстань між апертурою об'єктива та матричним фотодетектором; β – кут нахилу елемента OI до незбудженої площини композиту; $\Delta\boldsymbol{\nu}$ – зсув спектра від OI в апертурі A об'єктива O.

Для реалізації методу створено макет гібридної оптико-цифрової системи (ГОЦС), у якій УЗ збудження зразка шаруватого композитного матеріалу відбувається в режимі частотної розгортки в діапазоні 5÷150 кГц. Виявляли штучні дефекти на різних глибинах залягання h у шаруватих склопластикових панелях на фундаментальних резонансних частотах (ФРЧ) і кратних резонансних частотах (КРЧ). На Рис. 2,а зображено змодельовані вузли від квадратної тонкої мембрани (квадратної OI) на ФРЧ f_{11} у вигляді світлих плям, де штриховою лінією позначено напрями, перпендикулярні до напряму поширення УЗ-хвилі. На Рис. 2,б,в наведені відгуки від штучного квадратного дефекту (ШКД) розмірами 20×20×1,5 мм^3 на глибині залягання $h = 0{,}41$ мм, які сформовані на ФРЧ $f_{11} = 12{,}2$ кГц. Відгук на Рис. 2,б отримано в реальному часі за допомогою алгоритму формування РСЗ, а відгук на Рис. 2,в – в результаті обробки початкового відгуку за допомогою низькочастотної фільтрації (НЧФ) РСЗ.



а б в

Рис. 2. Просторовий відгук від ШКД на ФРЧ f_{11}: змодельовані вузли від квадратної тонкої мембрани на ФРЧ f_{11} (а); реальний відгук від ШКД розмірами 20×20×1,5 мм^3 на глибині залягання $h = 0{,}41$ мм у склопластиковій композитній панелі на ФРЧ $f_{11} = 12{,}2$ кГц (б); результат обробки реального відгуку за допомогою НЧФ РСЗ (в).

Після реєстрації просторових відгуків від вибраного ШКД будували залежності ФРЧ та КРЧ від глибини залягання дефекту. Для побудови теоретичних залежностей

використовували відому формулу для ФРЧ збудження квадратного дефекту зі стороною a [1], тобто

$$f_{11}^t = \frac{\pi}{3}\frac{h}{a^2}\sqrt{\frac{8}{3}}\sqrt{\frac{E}{\rho\left(1-\mu^2\right)}}, \qquad (2)$$

та формули, що пов'язують КРЧ із ФРЧ [2]. Тут E – модуль згину для матеріалу пластини над дефектом; μ – коефіцієнт Пуассона для матеріалу; ρ – густина матеріалу.

На Рис. 3 зображено експериментальні залежності резонансних частот f_{11}, f_{12}, f_{13}, а також резонансних частот $f_{11}^t, f_{12}^t, f_{13}^t$ від глибини залягання h штучного дефекту розмірами 20×20×1,5 мм^3 у шаруватих склопластикових панелях. Як показують отримані залежності, зі зростанням h монотонно зростають фундаментальна резонансна частота f_{11}, а також кожна кратна резонансна частота f_{12} і f_{13}. Спостерігали також формування просторових відгуків на кратних резонансних частотах f_{14} і f_{15}. Порівняння цих двох груп залежностей свідчить про відхилення експериментальних результатів від теоретичних. Виявлені невідповідності між цими залежностями можна пояснити, зокрема, малими розмірами дефекту, обмеженими розмірами панелей та відхиленнями напряму генерування УЗ хвиль.

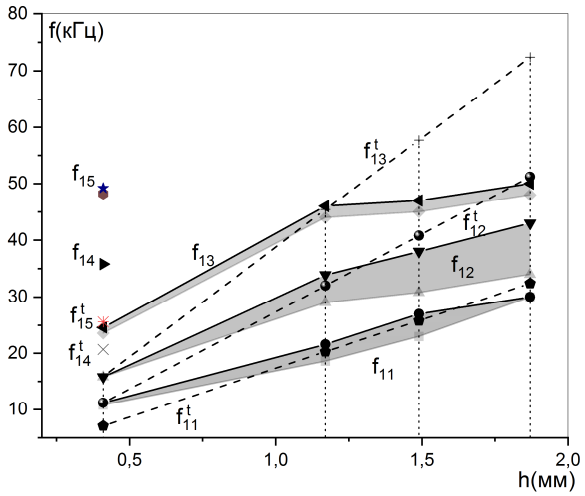


Рис. 3. Залежності резонансних частот f_{11}, f_{12}, f_{13}, одержаних для ШКД 20×20×1,5 мм^3, а також відповідних частот $f_{11}^t, f_{12}^t, f_{13}^t$, обчислених за формулою (2), від глибини залягання h штучного дефекту. Частоти f_{11}: ● – ⬟; f_{12}: ▼ – ▲; f_{13}: ◀ – ◆; f_{14}: ▶; f_{15}

За допомогою створеного макета ГОЦС виявляли внутрішні дефекти у шаруватих композитних елементах конструкцій авіакосмічної техніки, зокрема, внутрішні дефекти у чарункуватих панелях, які прикріпляють до нижньої частини фюзеляжу літака. Виявляли також внутрішній дефект у вуглепластиковому композитному елементі метало-композитного з'єднання. Дефект виник біля правого верхнього отвору внаслідок прикладання статичного навантаження розтягу $44 \cdot 10^3$ Н, що призвело до зсуву і розшарування внутрішніх шарів композиту.

Література.

1. Solodov I, Rahammer M, Kreutzbruck M. Analytical evaluation of resonance frequencies for planar defects: Effect of a defect shape. *NDTE Int.* 2019, 102, 274–280.

2. Араманович И.Г, Левин В.И. Уравнения математической физики, 2-е изд.. М.: Наука, 1969, 288 с.

УДК 620.178, 620.179
Є. Онищенко, к.т.н., ст. досл. О. Деркач, к.т.н., ст. досл. В. Матвєєв, д.ф.-м.н., проф., академік НАН України
Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМУШЕНИХ ЗГИННИХ КОЛИВАНЬ КОМПОЗИТНОГО СТРИЖНЯ З ПОПЕРЕЧНОЮ ТРІЩИНОЮ

Ye. Onyshchenko, Ph.D., Senior Researcher, O. Derkach, Ph.D., Senior Researcher
V. Matveev, Dr.Sci., Prof., Academician of the NAS of Ukraine
G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine, Ukraine

INVESTIGATION OF THE FORCED FLEXURAL VIBRATIONS OF THE COMPOSITE BEAM WITH A TRANSVERSE CRACK

Abstract. Analytical and numerical methods for determining vibrodiagnostic parameters of the presence of closing transverse crack in a carbon fibre reinforced composite beam are presented. The results of calculation investigations aimed at the determination of the influence of a transverse breathing crack on the natural frequency of vibrations and the dominant harmonics amplitudes ratio at the main, super- and subharmonic resonances of composite cantilever beam flexural vibrations are presented.

Розробка простих і надійних методів неруйнівного контролю пошкодження конструктивних елементів виготовлених з композитних матеріалів є задачею багатьох досліджень. Це обумовлено як розширенням області використання композитних матеріалів у відповідальних конструктивних елементах сучасної техніки, так і складністю даної задачі, порівняно з однорідними матеріалами. Найбільш перспективною, внаслідок невисокої собівартості і простоти у використанні, є вібраційна діагностика пошкоджень, яка базується на встановленні взаємозв'язку між параметрами пошкодження і зміною характеристик коливань конструктивних елементів. Однак у більшості робіт розглядається вплив пошкодження на модальні характеристики, які, як показують дослідження, є мало чутливими до незначних пошкоджень. Крім того критерій їх наявності формується на основі даних модального аналізу непошкодженого конструктивного елемента, які для реальних об'єктів завжди характеризуються розкидом, обумовленим допуском на виготовлення конструктивного елемента. Тому мета роботи полягає у розробці методики розрахунку вібродіагностичних показників наявності тріщини в композитному стрижні за характеристиками нелінійних вимушених коливань, обумовлених почерговим відкриттям-закриттям тріщини. У якості вібродіагностичних показників наявності тріщини в стрижні у представленій роботі розглядаються: відносна зміна власної частоти його згинних коливань $\Delta\omega = 1 - \omega_T / \omega_0$, де ω_0, ω_T – власна частота коливань непошкодженого і стрижня з тріщиною, відповідно; та відношення амплітуд домінуючих гармонік другої до першої: $\overline{A}_{2/1} = A_2 / A_1$ при основному та супергармонічному резонансі порядку 1/2 і першої до другої: $\overline{A}_{1/2} = A_1 / A_2$ при субгармонічному резонансі 2-го порядку.

Для визначення зазначених вібродіагностичних показників наявності тріщини в ортотропному стрижні, виготовленого з односпрямованого композитного матеріалу, було застосовано аналітичну методику розрахунку, яка раніше була успішно застосована до однорідних стрижнів [1]. В даному випадку стрижень з тріщиною розглядається як система із зосередженими параметрами. Методика аналітичного

розрахунку полягає у визначенні вібродіагностичних показників наявності тріщини через енергетичну характеристику пошкодження і розсіювання енергії коливальної системи. Енергетична характеристика пошкодження визначається як відношення можливої зміни потенційної енергії деформації стрижня при відкритті тріщини, яка представлена її функціональною залежністю від квадрату коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН), до потенційної енергії деформації стрижня при його вимушених згинних коливаннях на резонансній частоті коливань. Оскільки розглядається композиційний матеріал поставлена задача ускладняється. Так, для отримання КІН було визначено комплексні корені характеристичного рівняння 4-го порядку. Коефіцієнти цього рівняння обчислено за компонентами тензора жорсткості, які залежать від параметрів композитного матеріалу, а саме: об'ємної частки волокон v_f і кута їх вкладання θ (кута армування).

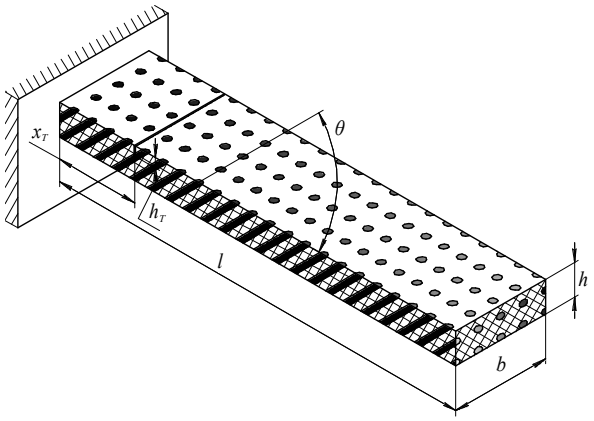


Рис. 1. Ескіз консольного стрижня з поперечною тріщиною, виготовленого з односпрямованого композитного матеріалу.

Для підтвердження достовірності результатів аналітичного розрахунку вібродіагностичних показників наявності тріщини в композитному стрижні (рис. 1), поставлена задача була вирішена методом скінченних елементів. Для цього була побудована його стрижнева скінченноелементна (СЕ) модель. Матрицю жорсткості скінченного елемента з тріщиною отримано з використанням енергетичної характеристики пошкоджуваності, яка враховує наявність тріщини заданих параметрів. Коефіцієнти матриці жорсткості при цьому залежать від параметрів композитної структури матеріалу. Закриття тріщини моделювалося шляхом присвоювання нульового значення енергетичної характеристики пошкоджуваності при відповідному напівциклі коливань балки. Одержану таким чином систему нелінійних рівнянь розв'язано методом Ньюмарка-β. Визначення спектру амплітуд коливань виконувалось за допомогою алгоритму швидкого перетворення Фур'є. Синтез стрижневої СЕ моделі виконано за стандартною процедурою методу скінченних елементів. Оцінка її точності проведена шляхом порівняння основної частоти коливань непошкодженого стрижня з її точним значенням.

Для проведення розрахунків розглядається консольний стрижень розмірами $b\times h\times l = 20\times4\times400$ *мм*, виготовлений з композиту, який складається з м'якої ізотропної епоксидної матриці (m) та жорстких односпрямованих вуглецевих волокон (f) при їх об'ємній концентрації $v_f = 0{,}5$, з такими механічними властивостями: модуль пружності $E_m = 2{,}756$ *ГПа* та $E_f = 275{,}6$ *ГПа*; коефіцієнт Пуассона $\mu_m = 0{,}33$, $\mu_f = 0{,}2$; модуль зсуву $G_m = 1{,}036$ *ГПа*, $G_f = 114{,}8$ *ГПа*; густина $\rho_m = 1600$ *кг/м*^{3}, $\rho_f = 1800$ *кг/м*^{3}.

На рис. 2 представлені залежності вібродіагностичних показників наявності тріщини при основному, супер- і субгармонічному резонансах від відносної глибини тріщини $\gamma = h_T/h$, при її місці знаходженні в перерізі $x_T = 0{,}1l$ від защемлення, для різних кутів θ. Як видно з представлених графіків, результати аналітичного та чисельного розрахунків добре узгоджуються між собою. Кут армування суттєво впливає на згинну жорсткість і як наслідок на вібродіагностичні показники наявності пошкодження. Так, при $\theta = 0°$, виявити тріщину можливо використовуючи лише зміну власної частоти коливань, адже навіть при невеликих глибинах пошкодження

фіксується значна зміна резонансної частоти коливань стрижня. Набагато складніше виявити тріщину в стрижнях з кутами армування $\theta = 45°$ та 90°. Тоді ефективнішим є використання відношення амплітуд домінуючих гармонік при нелінійних супер- і субгармонічному резонансах.

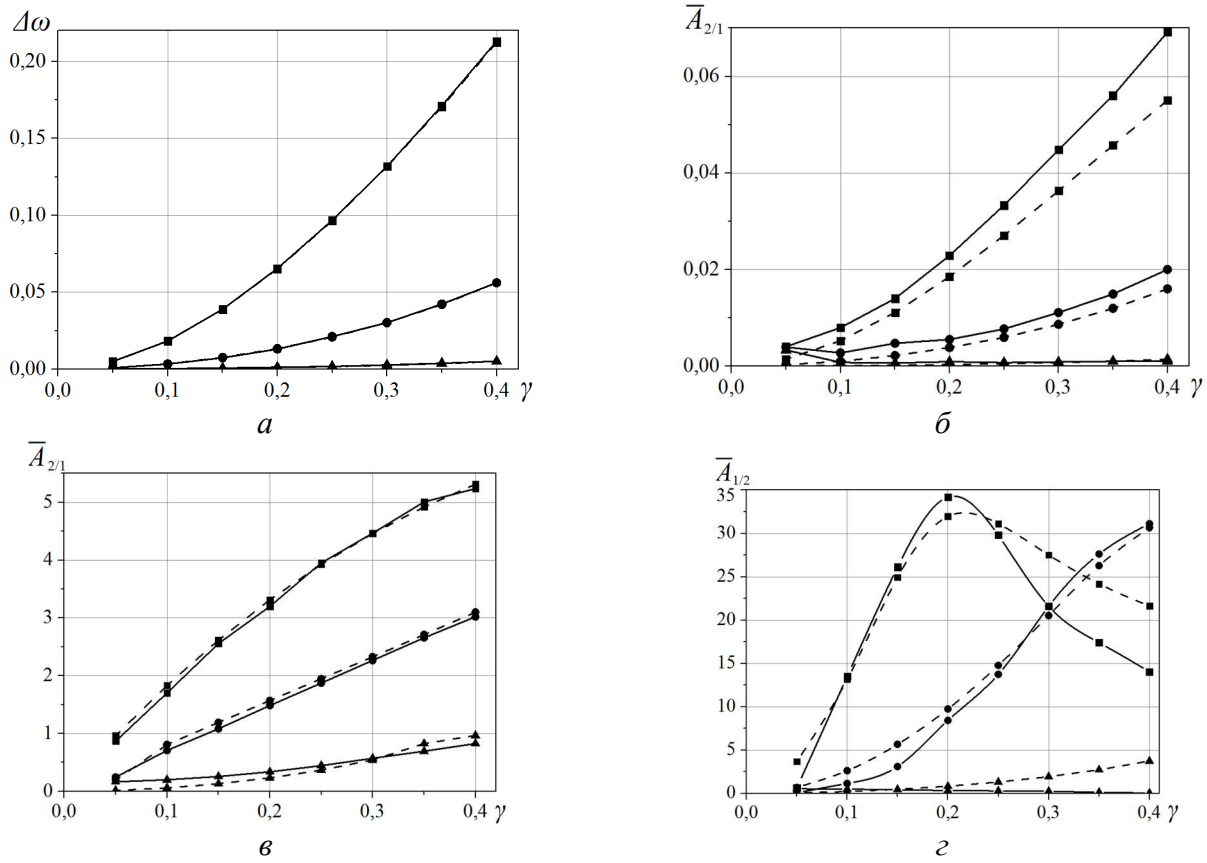


Рис. 2. Залежності відносної зміни власної частоти коливань $\Delta\omega$ (*а*) та відношення амплітуд домінуючих гармонік при основному (*б*), супер- (*в*) і субгармонічному (*г*) резонансах від відносної глибини тріщини γ, а $\theta = 0°$ (■), 45° (●) та 90° (▲).

В роботі представлені аналітична та чисельна методики визначення вібродіагностичних показників наявності поперечної тріщини в стрижні композитної структури при основному, супер- та субгармонічному резонансах згинної форми коливань. На прикладі консольного стрижня з тріщиною були отримані залежності вібродіагностичних показників від глибини тріщини для різних параметрів структури композитного матеріалу.

Література.

1. Matveev V.V., Onishchenko E.A. Vibrodiagnostic parameters of the presence of a semielliptic breathing crack in circular bars under super- and subharmonic resonances. *Strength of Materials*. 2016. Vol. 48, No. 2. P. 195-207.

УДК 699.83
С. Цибульник, к.т.н., доц., П. Мироненко, к.т.н., доц., О. Паздрій
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБУ ЗАХИСТУ ВІД ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

S. Tsybulnyk, Ph.D., Assoc. Prof., P. Myronenko, Ph.D., Assoc. Prof., O. Pazdrii
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFICIENCY OF A WIND LOAD PROTECTION MEANS

Abstract. In the conditions of the Antarctic, the problem of ensuring the reliability of critical infrastructure facilities is very acute. One of the structures, which has high requirements for operational safety at the antarctic Vernadsky station, is a vertical steel tank. Therefore, this work presents the results of an experimental study of the effectiveness of a means of protecting the tank against wind load.

Вступ. Українська антарктична станція Академік Вернадський з 1996 року прийняла більше двадцяти п'яти експедицій, які протягом року знаходилися майже в повній ізоляції від зовнішнього світу. Одним з об'єктів критичної інфраструктури станції є вертикальний сталевий циліндричний резервуар для зберігання дизельного палива. Враховуючи складні кліматичні умови в районі станції, а також місце розташування, яке не дає змоги проводити належний моніторинг та поточний ремонт, за роки своєї експлуатації технічний стан резервуару значно погіршився [1]. Отже, проблема забезпечення безаварійної експлуатації вертикального сталевого циліндричного резервуару на станції Академік Вернадський на сьогодні є не вирішеною та актуальною. Саме тому метою даної роботи є проведення експериментальних досліджень макетної моделі засобу захисту циліндричних об'єктів від вітрового навантаження для підтвердження результатів імітаційного моделювання, яке було проведено у попередніх роботах [2, 3].

Результати досліджень. Як показало імітаційне моделювання [2], для ефективного захисту резервуара можна використовувати обтічники круглої та зіркоподібної форми у поперечному перерізі. У якості макетної моделі об'єкту захисту використано вертикальний сталевий резервуар об'ємом 0,04 м^3. Враховуючи, що імітаційне моделювання проходило з урахуванням реальних розмірів об'єкта захисту, для експериментального дослідження усі геометричні характеристики (розміри, відстань до місця установки засобу захисту, тощо) були перераховані з урахуванням коефіцієнта подібності.

На основі результатів імітаційного моделювання та отриманих після перерахунку даних створено схеми проведення експерименту для різних варіантів засобу захисту. Усього було розглянуто три наступних випадки: без засобу захисту, із засобом захисту з круглим (діаметр 100 мм та 150 мм) поперечним перерізом, із засобом захисту з зіркоподібним (діаметр вихідного циліндру 100 мм та 150 мм) поперечним перерізом. Схему проведення експерименту з зіркоподібним обтічником із радіусом вихідного циліндру 100 мм зображено на рис. 1.

Для кожного з трьох описаних вище варіантів засобу захисту розроблено методику проведення експерименту. Наприклад, дослідження засобу захисту зіркоподібної форми проходило за наступною методикою:

1) Підготувати пульверизатор з водою, попередньо розчинивши у ній водорозчинну фарбу темного кольору.
2) Установити та закріпити вентилятор.
3) У відповідності до зображеної на рис. 1 схеми, на відстані 1 м (1000 мм) від вентилятора установити та закріпити обтічник зіркоподібної форми з радіусом труби-заготовки 50 мм (75 мм).

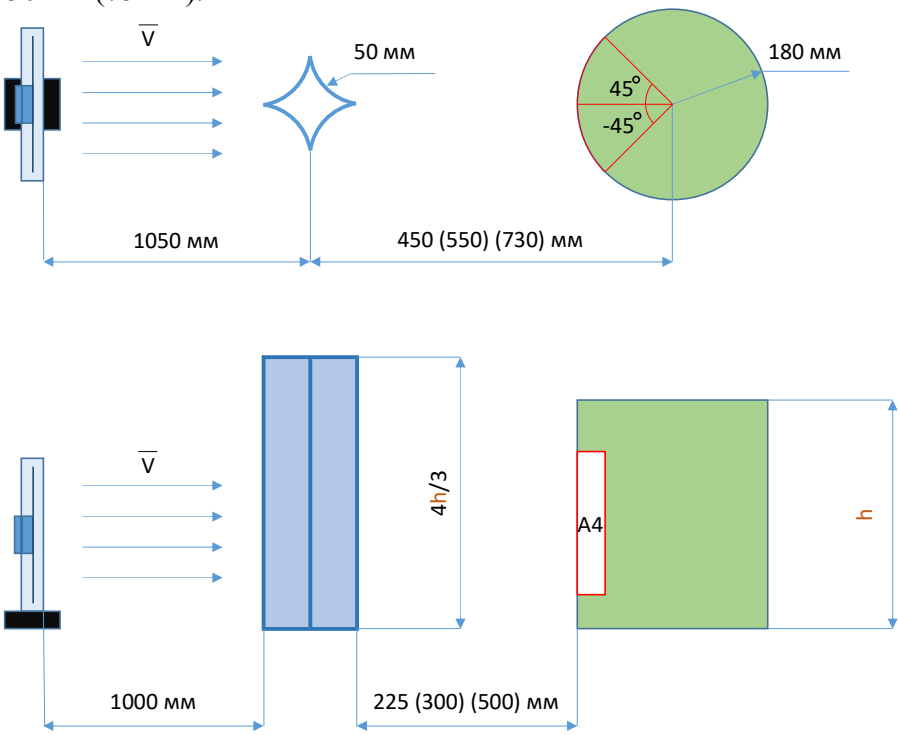


Рис.1. Схема проведення експерименту

4) У відповідності до зображеної на рис. 1 схеми, установити вертикальний циліндричний сталевий резервуар з радіусом 180 мм на відстані 225 мм між крайніми точками обтічника та резервуара. Крайні точки обтічника та резервуара визначаються за умови паралельності дотичних до радіусів (які є нормалями у точках дотику) цих об'єктів.

5) У відповідності до зображеної на рис. 1 схеми, наклеїти на резервуар листи білого паперу формату А4 таким чином, щоб була покрита позначена червоним кольором область (сектор).

6) Увімкнути запис відео.

7) Увімкнути вентилятор на максимальні оберти.

8) Крізь задню сітку вентилятора обережно розпилити воду з фарбою з пульверизатора на лопаті, які обертаються. **Застереження:** вода не має потрапити на відкриті частини двигуна, щоб виключити можливість виникнення короткого замикання!

9) Повторити етап 8) необхідну кількість разів для забезпечення повноти та однозначності визначення областей розподілу фарби по паперу.

10) Вимкнути вентилятор.

11) Зафіксувати на фото та відео результати експерименту, завершити запис відео.

12) Етапи 4)-11) повторити для відстаней між крайніми точками обтічника та резервуара 300 мм та 500 мм.

Аналогічні методики використовувалися для проведення експериментів з обтічником з круглим поперечним перерізом та без засобу захисту. Якісні результати експериментів зображено на рис. 2.

Отримані в ході експерименту якісні результати добре узгоджуються з імітаційним моделюванням і доводять високу ефективність використання обтічників для захисту об'єктів циліндричної форми. Обтічник зіркоподібної форми з діаметром труби-заготовки 150 мм показав найбільшу ефективність, проте в реальних умовах експлуатації не завжди є можливим зведення поруч з об'єктом захисту конструкції, яка за своїми розмірами аналогічна самому резервуару. Саме тому рекомендується використовувати для захисту зіркоподібний обтічник з діаметром труби-заготовки 100 мм, який показав не на багато гірший результат.

а) б)

Рис. 2. Результати експерименту: а) без використання засобу захисту; б) з використанням засобу захисту

Окрім зображених на рис. 2 якісних характеристик розподілу вітрового навантаження за допомогою термоанемометра FLUS ET-961 додатково було проведено вимірювання величини швидкості повітряного потоку. У ході вимірювання визначено, що максимальна швидкість повітряного потоку зменшується в 4 рази при використанні обтічника зіркоподібної форми у порівнянні з випадком відсутності засобу захисту. Отже, кількісні показники фізичного експерименту також підтверджують результати імітаційного моделювання і дають змогу зробити висновок про високу ефективність розроблених засобів захисту резервуара.

У подальших дослідженнях необхідно провести імітаційне моделювання елементів інфраструктури станції Академік Вернадський зі встановленим засобом захисту вертикального сталевого циліндричного резервуару з урахуванням актуальної рози вітрів. Це дасть змогу визначити місце розміщення обтічника для забезпечення ним найбільшої ефективності зниження навантаження від повітряного потоку.

Література.

1. Жук Г.В., Мороз И.В., Барвинко А.Ю., Барвинко Ю.П., Посыпайко Ю.Н. Особенности строительства и эксплуатации резервуара РВС-200 для хранения дизельного топлива в Антарктиде на станции «Академик Вернадский». *Автоматическая сварка*, 2017, № 2, С. 36-40.

2. Tsybulnyk S., Komenchuk I., Tymchenko A. Simulation of airflow at the Vernadsky station for multi-site damage identification. *Ukrainian Antarctic Journal*, 2017, № 16, С. 210-217.

3. Цибульник С.О., Накорик В.В., Рупіч С.С., Півторак Д.О. Моделювання повітряного потоку в районі української антарктичної станції. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*, 2022, № 2 (12), С**.** 61-68. https://doi.org/10.20998/2413-4295.2022.02.09

УДК 620.178.15/179.119
П. Булах, к.т.н., О. Масло, к.т.н., В. Швець, к.т.н
Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАНУ, Україна

ВПЛИВ ДЕГРАДАЦІЇ ХАРАКТЕРИСТИК ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НА КІНЕТИКУ ПОШКОДЖУВАНОСТІ МАТЕРІАЛУ В УМОВАХ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

P. Bulakh, Ph.D., O. Maslo, Ph.D., V. Shvets, Ph.D.
G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NASU, Ukraine

INFLUENCE OF DEGRADATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES ON THE KINETICS OF MATERIAL DAMAGE UNDER CYCLIC LOADING CONDITIONS

Abstract. The article shows that at deformations of the material, the level of which exceeds the deformation corresponding to the limit of proportionality, the modulus of elasticity of the first kind and the homogeneity parameter of the material, which was determined by the LM-hardness method, are in a correlation relationship.

З точки зору дослідження процесу накопичення пошкоджень в матеріалі, його деградацію під дією статичного навантаження можна вважати достатньо швидкоплинною, що характеризується одночасним протіканням двох основних процесів - зародження пошкоджень і їх зростання [1, 2], внаслідок чого можуть змінюватися властивості матеріалу. Дослідження дозволяють розділити вплив різних типів пошкодження структури на механічні характеристики. Зокрема, розсіяння значень границі текучості пов'язане, головним чином, із пошкодженнями зсувної природи, а значень границі міцності - з пошкодженнями, що виникають внаслідок розпушування і відриву матеріалу. Окремий клас пошкоджень викликає розсіювання значень характеристик пружності - модуля нормальної пружності і коефіцієнта поперечної деформації.

Виходячи з постулату про еквівалентність пружної енергії для випадку пошкодженого та непошкодженого стану авторами [3] було запропоновано оцінити параметр пошкодження за допомогою гіпотези про деградацію модуля пружності, проте у дещо іншому формулюванні:

$$D_E = 1 - \sqrt{\frac{E_i}{E_0}},$$

де E_i – поточне значення модуля пружності при розвантаженні; E_0 – вихідне значення модуля пружності, визначається з ДСТУ 2825-94.

Модуль пружності при розвантаженні визначався за допомогою лінійної апроксимації ділянки розвантаження за допомогою методу найменших квадратів.

У зв’язку з тим, що пластичні деформації, які виникають раніше, ніж напруження у металі досягнуть границі текучості, модуль пружності не лишається постійною величиною навіть на пружній ділянці кривої деформацій [4]. Це є причиною таких явищ, як пружна післядія і релаксація, що виникають при статичних навантаженнях і суттєво впливають на поведінку металів у пружному стані. Як відомо [5], пластичні деформації відбуваються внаслідок руху дислокації, що володіє власним полем напружень. Під дією зовнішніх прикладених до кристалу напружень, коли рух дислокацій відбувається у всіх зернах зразка, реалізується пластичний стан, що приводить до зміни структури і властивості металу. Звідси, приходимо до висновку, що

розвинені пластичні деформації, які перевищують границю текучості, призводять до вагомої зміни модуля пружності металу. Тобто, з ростом пластичної деформації відбувається зменшення величини модуля пружності.

Твердість матеріалу, як і модуль пружності першого роду E, є інтегральною характеристикою механічних властивостей структурного стану матеріалу. Зменшення модуля пружності при циклічному навантаженні пов'язане зі зниженням несучої здатності матеріалу, за рахунок накопичення структурних пошкоджень. Як показано в [6-8], за величиною зміни модуля пружності можна прослідкувати кінетику пошкоджуваності матеріалу в процесі експлуатації матеріалу, маючи вихідні характеристики.

Для зручності аналізу експериментальних даних, підставимо значення коефіцієнтів гомогенності в вираз для розрахунку пошкоджуваності:

$$D_m = 1 - \sqrt{\frac{m_i}{m_0}},$$

де m_0 – величина коефіцієнта гомогенності метала зразка у вихідному стані перед початком випробувань; m_i – значення коефіцієнта гомогенності, що отримані на основі обробки результатів вимірів твердості після встановленої кількості циклів навантаження зразка.

Зменшення однорідності структури матеріалу в оцінці коефіцієнтом гомогенності m при циклічному напрацюванні добре корелює із деградацією модуля пружності I роду E (рис. 1).

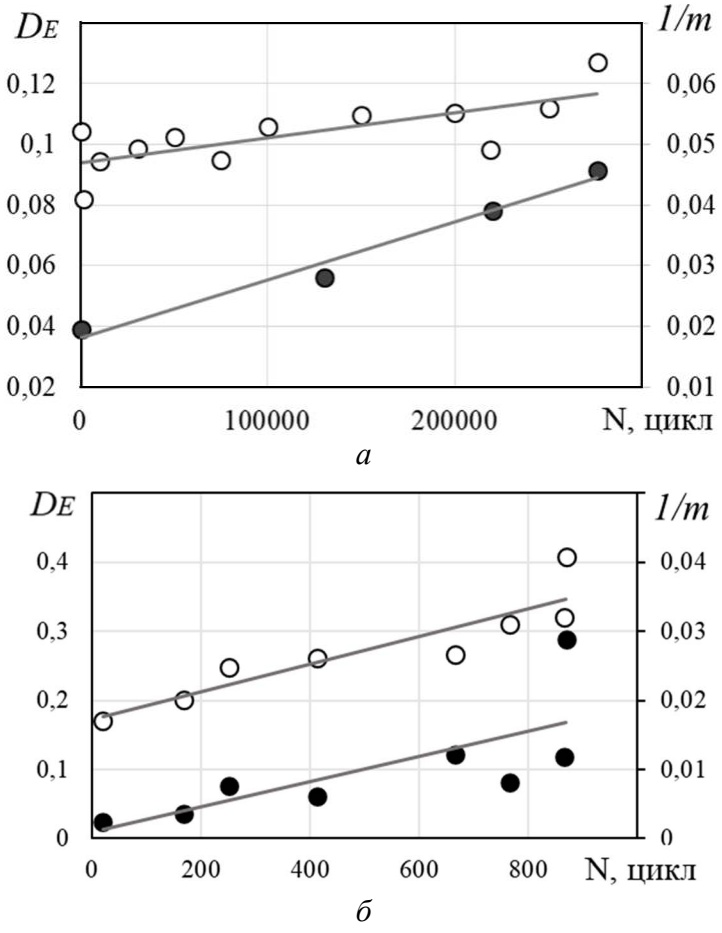


Рис.1. Кореляція деградації модуля пружності D_E (світлі точки) сталей 20(*а*) та 10ГН2МФА (*б*) з коефіцієнтом гомогенності m (темні точки) при циклічному навантаженні

Перебудова структури металу і, як наслідок, збільшення дефектів, що відбувається в результаті пластичної деформації, знижує модуль пружності. Після кожної такої перебудови структури на площадці текучості метал повертається до пружного стану, але вже з іншими пружними властивостями.

Враховуючи вище сказане, можемо вважати, що модуль пружності першого роду, як і коефіцієнт гомогенності, є показовим і чутливим до зміни структурного стану параметром, який для деформованого матеріалу відрізняється від свого вихідного значення, внаслідок накопичення у матеріалі розсіяних пошкоджень різної природи, що виникають при його опору дії як дотичних, так і нормальних напружень.

Оцінюючи практичну доцільність отриманих експериментальних даних, відмітимо ефективність достатньо простого у застосування методу LM-твердості при оцінці поточного стану матеріалів що можуть дозволити істотно спростити отримання експериментальних даних, які необхідні для розрахунків довговічності елементів конструкцій, що працюють в умовах малоциклового навантаження. Таким чином, проведені дослідження показали, що при деформаціях матеріалу, рівень яких перевищує деформацію, що відповідає границі пропорційності, модуль пружності першого роду та параметр гомогенності матеріалу перебувають у кореляційному зв'язку, який наближається до прямопропорційної залежності.

Література.

1. Lemaitre J., Chaboche J.-L. Mechanics of Solid Materials. Cambridge University Press, 1990. 584 p.

2. Лебедев А. А., Маковецкий И. В., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л., Швец В. П. Оценка поврежденности материала по рассеянию характеристик упругости и статической прочности. *Проблемы прочности*. 2006. № 2. С. 5–14.

3. Marcilio A., Jilin Y., Norman J. On the elastic modulus degradation in continuum damage mechanics. *Computers and Structures*. 2000. №76. С. 703–712.

4. Скрипник Ю.Д. Определение некоторых упругих характеристик материалов при помощи параболической интерполяции диаграмм деформирования. *Проблемы прочности*. 1982. № 11. С. 86-89.

5. Фридель Ж.. Дислокации. Москва,1967. 626 с.

6. Lemaitre J. A Course on Damage Mechanics. Springer Verlag, 1992. 247 p.

7. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. В 2. ч. Часть 1. Деформация и разрушение. Москва, 1974. 472 с.

8. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Богинич И. О. и др. Влияние размера зерна на рост поврежденности металла при пластическом деформировании. *Проблемы прочности*. 1997. №5. С. 5 – 13.

УДК 004.8

І. Коноваленко, к.т.н., доц., П. Марущак, д.т.н., проф., Г. Козбур, к.т.н., доц., О. Ясній
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ВПЛИВ ЧАСТОТИ ВІБРАЦІЙ ТА ЯКОСТІ ОСВІТЛЕННЯ НА КІЛЬКІСНІ ПОКАЗНИКИ ДЕФЕКТІВ, ВИЯВЛЕНИХ НА ПОВЕРХНІ МЕТАЛОПРОКАТУ З ЗАСТОСУВАННЯМ ГЛИБОКИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

I. Konovalenko, PhD., Assoc. Prof., P. Maruschak, D.Sc., Prof.; H. Kozbur, PhD., Assoc. Prof., O. Yasniy
Ternopil National Ivan Puluj Technical University

EFFECT OF VIBRATION FREQUENCY AND LIGHTING QUALITY ON QUANTITATIVE INDICATORS OF DEFECTS IDENTIFIED ON THE SURFACE OF ROLLED METAL WITH THE APPLICATION OF DEEP NEURON NETWORKS

Abstract. The system of technical diagnostics of technological defects in the surface of sheet metal-roll based on deep neuron networks was tested. The dependence of geometrical parameters in diagnosing technological defects was established in terms of the magnitude of illumination of the surface and the frequency of vibrations. It has been shown that the main contribution to the result of the recognition of lightness on the surface may be the value of illumination. Vibrations in the extended range of frequencies and amplitudes are less influenced on the values of identified geometrical parameters of defects.

Оптико-цифрові методи контролю стану поверхні смуг металопрокату забезпечують швидке виявлення та локалізацію дефектів. Камери, які зараз застосовують забезпечують для одержання кісних зображень смуг металопрокату, які є вхідної інформацією для оцінювання дефектності [1,2]. Дослідження впливу вібродинамічних процесів у вузлах металургійного обладнання, за високих швидкостей прокатування є окремою науковим і практичним завданням. Підвищення вібрації до небезпечного рівня обмежує продуктивність металопрокатного обладнання, знижує якість готових смуг по поздовжньої різнотовщинності та формує періодичні дефекти поверхні типу «ребристість», «поперечні тіньові смуги»», а також підвищує зношення валків.

На нашу думку, важливо оцінити вплив частоти вібрацій на якість розпізнавання дефектів смуг металопрокату за різних умов освітлення. Це дозволить сформулювати умови оптимального виявлення дефектів різної геометрії.

Для дослідження впливу вібрацій та освітлення на результат розпізнавання дефектів металеву пластину з дефектами типу "подряпина" фотографували у лабораторних умовах. При цьому змінювали освітленість, а пластину циклічно переміщували у вертикальному напрямку з частотою 10-30 Гц та амплітудою переміщень 0,1-03, мм. Циклічне переміщення пластини виконували на сервогідравлічній установці СТМ-100. Фіксували значення вертикального переміщення штока. Схема дослідної установки для отримання зображень металевої поверхні з пошкодженнями типу "подряпина" зображена на рис. 1. Освітлення поверхні аналізованої металевої смуги, розділеної на ділянки, виконано зверху. Зображення одержується внаслідок того, що різні ділянки металевої смуги неоднаково відхиляють падаюче на них світло, а відбиті промені мають різну інтенсивність. За пропонованої схеми освітлення камера одержує більшу частину відбитого світла, це так званий аналіз "у світлому полі". Напрямлене освітлення є майже перпендикулярним до досліджуваної

металевої поверхні. За таких умов зйомки поверхня буде яскраво сірою, а дефекти – добре видимими.

Для одержання зображень цих зон використовували камеру Nikon D5600. Для освітлення металевої пластини використовували лампу розжарювання потужністю 60 Вт.

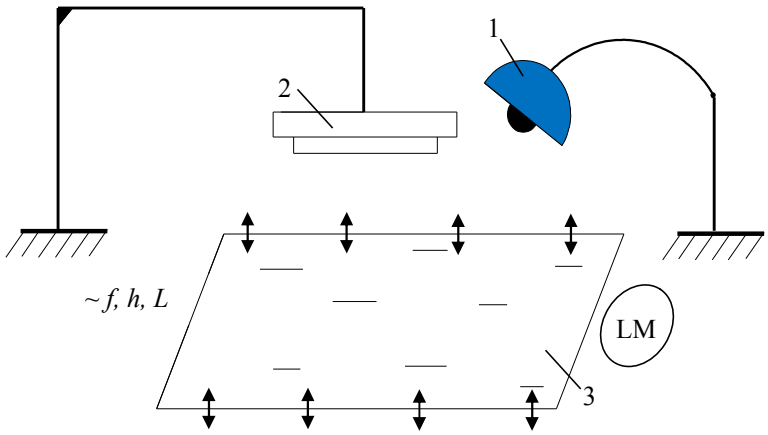


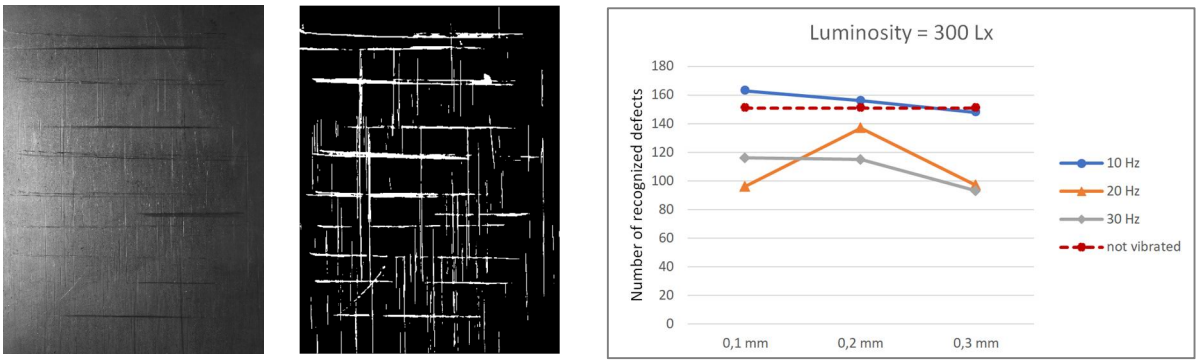
Рис. 1. Схема одержання зображень ділянок металевої смуги під час циклічного вертикального переміщення: 1 – лампа; 2 – фотокамера; 3 – металева смуга з пошкодженнями; LM – люксметр

Під час одержання зображень яскравість світла змінювали регулятором та контролювали люксметром, який залишався нерухомим. Фотозображення всіх ділянок були одержані у фіксованій точці зйомки, так як показано на рис. 1.

Для виявлення пошкоджених зон на отриманих зображеннях використовували згорткову нейронну мережу, навчену на зображеннях металопрокату [3]. Нейромережа має архітектуру U-net [4] з декодером ResNet152 [5]. Архітектура U-net складається з енкодера, який виявляє карти ознак, притаманні шуканим пошкодженням, і декодера, який проектує зони зображення, які найбільше відповідають знайденим ознакам, на зображення початкового розміру. Енкодер має 5 стадій. Кожна з них містить послідовно з'єднані згорткові шари, після яких виконується батч-нормалізація. Декодер також містить п'ять стадій, кожна з яких зв'язана з виходами відповідних стадій енкодера та виконує розширення й узагальнення його карт ознак. Вихідний шар нейромережі має розмір 256×256 нейронів з функцією активації sigmoid. Це дозволяє отримувати значення на в діапазоні [0,1], яке відображує ступінь достовірності, з якою модель розпізнає відповідний піксель як частину пошкодження.

Приклад початкового зображення пошкодженої поверхні та зображення з розпізнаними пошкодженнями приведено на рис. 2,а,б.

З метою кількісного оцінювання пошкоджень на поверхні важливо отримати числові показники, які характеризуватимуть вид наявних пошкоджень. Окремі об'єкти (об'єднані групи пікселів), розпізнані нейромережевою моделлю, представляють фрагменти поверхневих пошкоджень. З метою виявлення особливостей пошкоджень визначали їх геометричні параметри, що описують особливості кожного знайденого фрагмента пошкодження. Насамперед обчислювали площу як базовий параметр, що характеризує розмір пошкодження. Крім цього, розраховували периметр, який в поєднанні з площею описує нерівність краю об'єкта. Для розрахунку інших параметрів використали підхід "еквівалентного" елліпса [6].



а б в

Рис. 2. Початкове зображення (а), зображення з розпізнаними пошкодженнями (б) та залежність кількості розпізнаних дефектів від амплітуди коливань за різної частоти (в)

Досліджували вплив вібрацій та освітлення на результат розпізнавання пошкоджень. Із збільшенням освітленості поверхні площа ділянок, розпізнаних як пошкодження, збільшується. Зростає і кількість фрагментів пошкоджень. Це в першу чергу пояснюється тим, що при яскравішому освітленні більш видимими стають дрібні подряпини та елементи фактури поверхні. В нашому випадку особливо помітним є перехід від дуже низького рівня освітлення (2 лк) до вищого (50 лк). Якщо у першому випадку вертикальні подряпини на зображенні не видимі взагалі, то при 50 лк більша половина з них вже розпізнається. При освітленні 50 лк практично всі вертикальні пошкодження виявляються. Подальше зростання освітленості від 100 до 800 лк мало впливає на виявлення нових подряпин, але разом з цим робить об'єкти пошкоджень більшими, тому загальна площа пошкоджень із збільшенням освітленості зростає.

Побудовано залежності геометричних параметрів дефектів від величини освітлення досліджуваної поверхні та частоти її вібрацій (рис. 2,в). Виявлено, що головний вплив на результат розпізнавання пошкоджень на поверхні має величина освітленості. Вібрації у дослідженому діапазоні частот та амплітуд менше впливають на отримані геометричні параметри пошкоджень, ніж освітленість.

Література.

1. Мазур, И. П. Контроль качества поверхности горячекатаных полос / И. П. Мазур // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування: збірник наукових праць. – 2010. – № 60. – С. 174–178.

2. Мазур И.П. Проблемы контроля качества поверхности при производстве листового проката // Сталь. – 2011. – № 4. – С. 31-36.

3. Konovalenko, I.; Maruschak, P.; Brezinová, J.; Prentkovskis, O.; Brezina, J. Research of U-Net-Based CNN Architectures for Metal Surface Defect Detection. Machines 2022, 10, 327. https://doi.org/10.3390/machines10050327.

4. Ronneberger, O.; Fischer, P.; Brox, T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In Medical Image Computing and Computer. – Assisted Intervention 2015; Navab, N., Hornegger, J., Wells, W.M., Frangi, A.F., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland. – 2015. – pp. 234–241.

5. He, K.; Zhang, X.; Ren, S.; Sun, J. Deep residual learning for image recognition. In Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 26 June–1 July 2016. – pp. 770–778.

6. Konovalenko, I.; Maruschak, P.; Kozbur, H.; Brezinová, J.; Brezina, J.; Nazarevich, B.; Shkira, Y. Influence of Uneven Lighting on Quantitative Indicators of Surface Defects. Machines 2022, 10, 194. https://doi.org/10.3390/machines10030194.

УДК 621.9.019: 621.798.2: 620.111.1

В. Несін
Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕДУМОВ ВИНИКНЕННЯ ТА ВІЗУАЛЬНОГО ВИЯВЛЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ЗАДИРОК НА ФРЕЗЕРОВАНИХ ГРАНЯХ ПАКУВАННЯ З ЕКСТРУДОВАНОГО ПІНОПОЛІСТИРОЛУ

V. Nesin
Ukrainian Research Institute of Special Equipment and Forensic Science of the Security Service of Ukraine

RESEARCH OF THE PREREQUISITES FOR THE APPEARANCE AND VISUAL DETECTION OF SURFACE BURRS ON THE MILLED FACES OF EXTRUDED POLYSTYRENE FOAM PACKAGING

Abstract. The use of extruded polystyrene foam as packaging. Special milling of porous material. The formation of a rough, soft surface. Surface structure model. Formation of small particles of extruded polystyrene foam. Removal of small particles of material from a rough surface. Formation of surface burrs on milled faces. Description of an abstract model of burrs on milled faces. Definition of standard and addition special conditions for visual detection of burrs.

Для виготовлення пакування під багатокомпонентні пристрої в приладобудуванні застосовують різноманітні матеріали. Зокрема, такі як пресований пінопласт, ізолон, багатошаровий картон, фрезероване дерево, папір різної товщини та вологостійкості, пакувальні плівки, поролон та інші матеріали активно застосовуються при серійному виробництві. Виготовлення пакування для малих партій виробів, маються на увазі партії до 100 екземплярів, характеризується використанням універсального (неспеціалізованого) обладнання та уніфікованих процесів обробки. Перераховані вище широко вживані матеріали гарно зарекомендували себе при виготовленні пакування з використанням спеціалізованих процесів та спеціального обладнання в конвеєрному та потоковому виробництві. Для штучного та малосерійного виробництва для виготовлення пакування використовується стіродур або екструдований пінополістирол. Цей матеріал має будівельне призначення. Застосування його для пакування малих партій виробів, це нова якість матеріалу, що була виявлена, досліджена і впроваджена у практику діяльності [1].

Універсальний технологічний процес фрезерування екструдованого пінополістиролу або стіродуру (Рис. 1. Поз. 1 та Поз. 2) крім відходу стружки характеризується утворенням: 1) поверхневих витягнутих перпендикулярно до обробленої поверхні волокон (Рис.1. Поз. 3), довжина яких визначає шорсткість механічно обробленої поверхні; 2) дрібних часток матеріалу, які електростатичною силою притягуються до поверхні матеріалу, розташовуються по ній в межах поверхневих витягнутих волокон; 3) поверхневих задирок на фрезерованих гранях у вигляді тонкої плівки. Основи задирок розташовані на гранях перетину фрезерованих площин.

Поверхневі витягнуті волокна в межах пружних можливостей матеріалу мають відносну рухливість навколо координатних осей X та Y. Навколо осі Z можуть скручуватися. Вздовж осей X та Y матеріал волокон протидіє зрізаючому зусиллю, а відносно осі Z протидіє розриву (Рис. 1. Поз. 3). Сумарною характеристикою волокон може бути схема гнучкого закріпленого стрижня (Рис. 1. Поз. 4). Волокна створюють певну шорсткість поверхні, яка м'яко фіксує в пакуванні елементи виробу. Дефектом волокна на оброблених поверхнях не виступають.

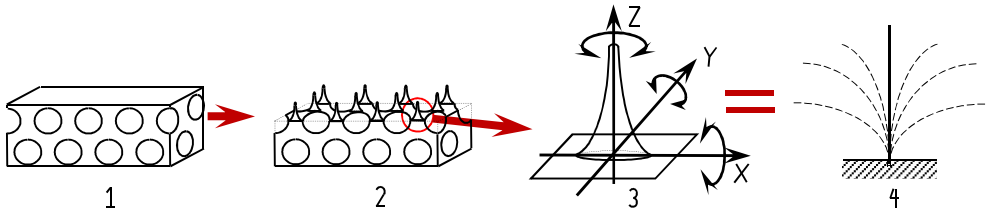


Рис. 1. Особливості утворення фрезеруванням та модель поверхневих витягнутих волокон

Дрібні частки матеріалу крім сили тяжіння та тертя піддаються силі електростатичного тяжіння. Погано прибираються з поверхонь звичайними технологічними засобами, такими як обдування стисненим повітрям. Додаткове протирання оброблених поверхонь зволоженою (але на мокрою) ганчіркою дозволяє перерозподілити статичний заряд між частками та виробом, розірвати зв'язки сил ектростатичного тяжіння та прибрати дрібні елементи з готових деталей.

Поверхневі задирки на гранях утворюються внаслідок активного впливу ріжучого інструменту на матеріал. Крім різання відбувається зминання, розтяг, переміщення шарів матеріалу в безпосередній близькості від інструменту. Відбувається локальне подолання сил тертя між зсунутими шарами матеріалу, що зрізається. Відбувається локальне виділення теплоти, що змінює газонаповнену структуру. Утворюється тонкий суцільний спресований шар матеріалу у вигляді полімерної плівки. На етапі виходу інструмента за межі матеріалу утворена внаслідок складних локальних термічних та деформаційних процесів плівка з перетвореного полістиролу позбавляється реакції недеформованих шарів матеріалу і не зрізається фрезою. Таким чином на гранях перетину сформованих поверхонь виробу залишаються необрізаними поверхневі задирки у вигляді тонких полімерних плівок. Механічні властивості матеріалу в цих утвореннях мало відрізняються від основного матеріалу. Це стосується зокрема пружних та пластичних характеристик. Відсутнім на властивості є вплив спіненої структури. Тому задирки на гранях є суцільними короткими пласкими елементами закріпленими в основі по лінії перетину двох твірних поверхонь деталі.

Вказані задирки мають високу пластичність, малу товщину 0,01 … 0,3 мм. Мають п'ять відносно вільних напрямків переміщення з 6 можливих (Рис. 2.). Вони міцно закріплені лише вздовж грані фрезерованих поверхонь матеріалу. Вздовж X, Z і навколо X, Y та Z – напрямки відносно вільних переміщень, вздовж вісі Y – напрямок значно обмежених переміщень.

За процедурою контролю поверхневих задирок на полімерних конструкційних матеріалах утворених після механічної обробки нормою для цих дефектів визначена величина від рівня шорсткості поверхні до 0,1 мм висоти.

Задирки орієнтовані в напрямку однієї з площин або під кутом до них, меншим чи рівним бісектрисі кута їх перетину. Найбільш імовірними напрямками орієнтації задирок залежать від умов виготовлення та зберігання виробів з цього матеріалу.

Зокрема за умови збільшеної вологості (>75%) та температури (>30°С) орієнтація напрямку розташування може становити 0° до однієї з двох твірних поверхонь грані. Такі поверхневі задирки можуть не проявитися у вигляді дефекту поверхні.

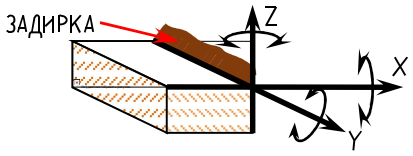


Рис. 2. Напрямки ступенів свободи задирок

Другою передумовою того, що поверхневі задирки можуть бути не виявленими візуально на фрезерованих гранях екструдованого пінополістиролу є певна прозорість для видимого світла. Однією з властивостей деяких полімерних матеріалів, в тому числі і газонаповнених по типу стіродуру, полягає в прагненні до прозорості для видимого світла (електромагнітного випромінення діапазону 380 … 790 нм) в тонких шарах матеріалу [2].

Третьою особливістю, що впливає на візуальне виявлення поверхневих задирок на гранях є малий візуальний контраст граней та задирок на них відносно основного контрольованого матеріалу.

Виходячи з викладеного, застосування візуально-оптичного методу неруйнівного контролю для виявлення поверхневих задирок на фрезерованих гранях пакування з екструдованого пінополістиролу може бути здійснене з врахування стандартних та додаткових умов проведення контролю.

До стандартних умов відповідно до EN 13018 [3] можна віднести: 1) Освітленість на рівні не менше 500 лк. 2) Відстань для візуального огляду від поверхні ≈600 мм. 3) Кут огляду >30° до поверхні. Бажано оглядати перпендикулярно до поверхні.

Додатковими умовами проведення візуально-оптичного контролю фрезерованих граней для виявлення поверхневих задирок на деталях з екструдованого пінополістиролу мають бути: 1) Вологість приміщення в якому зберігається не менше 4 годин виготовлене пакування не більше за 75%. 2) Необхідна температура в приміщенні 15<T<30°С.

Література.

1. Юшков А.Г., Лахтадир С.Л., Несін В.В. Особливості використання матеріалу STURODUR в якості транспортного та експлуатаційного пакування багатоелементних малогабаритних виробів: здатність до обробки, дефекти, контроль якості. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні:* матеріали науково-технічної конференції, 30…31 травня 2016 р., м. Київ / за ред. Р. В. Лютий, І. М. Гурія. м. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. С. 159-160.

2. Несін В.В., Франков О.С. Дослідження технології виконання та перевірки якості гравіювання поверхонь матеріалів з особливими органолептичними властивостями із застосуванням контрастних барвників. Технічна діагностика та неруйнівний контроль, 2021, №4, С. 54-57.

3. ДСТУ EN 13018:2017 Неруйнівний контроль. Візуальний контроль. Загальні принципи (EN 13018:2016, IDT).

УДК 624.014
С. Данильченко, Н. Чорномаз, к.т.н.
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя Україна

ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ДІАГНОСТУВАННЯ ПОШКОДЖУВАНОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Danulchenko S.M. Chornomaz N.U., Ph.D.
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

GENERAL PRINCIPLES OF DIAGNOSING THE DAMAGE OF BUILDING STRUCTURES

Abstract. Inspection of existing buildings is an extremely responsible task. Because, it is necessary to carefully identify all existing damages, systematize them, single out the scholastic and most significant influences, establish their cause and mechanism of action. That is why a team of the most qualified and experienced workers who have the necessary knowledge and clearly understand the essence of the task are involved in such works.

Для забезпечення надійності будівель, розробки методів ремонту і системи профілактики потрібна об'єктивна інформація про технічний стан конструкцій, елементів, вузлів і стиків. Технічна діагностика є частиною загальної теорії надійності. Конкретні її завдання пов'язані з раннім виявленням дефектів і характерних місць пошкодження конструкцій, використання ресурсу, оптимізацією процесів технічного обслуговування та визначенням причин ушкоджень і об'єму робіт по ремонту.

Існує чотири групи методів розпізнавання, що використовують в технічній діагностиці: імовірнісні методи статистичних рішень; методи розділення ознак у просторі; метричні методи; логічні методи. При цьому мається на увазі детальне знання об'єктів обстежень (розрахункових систем, конструкцій і матеріалів, умов експлуатації типових дефектів), накопичення інформації по аналогічних конструкціях, їх ушкодження і можливих причинах ушкоджень, наявність арсеналу типових рішень по ремонту. Оцінка стану конструкцій на різних етапах експлуатації будівель дозволяє виявити дефектні конструкції, що руйнуються, встановлює ознаки, причини, міру і межі ушкоджень з тим, щоб своєчасно і якісно провести їх ремонт. У зв'язку з цим необхідно здійснювати контроль за станом будівлі, починаючи з приймання її в експлуатацію (приймальний контроль), а також при виявленні дефектів, перед проведенням капітального ремонту.

Система контролю передбачає створення методів оцінки, приборів і засобів, дозволяючи визначати параметри технічного стану їх відповідності нормативним характеристикам. Дані, отримані в результаті оцінки стану конструкцій будівель що експлуатуються можуть служити основою для розробки заходів, які сприяють покращенню якості будівництва, вдосконаленню методів зведення нових будівель, правильної експлуатації і ремонту. Експлуатаційний знос будівель є в основному результатом тривалої силової дії і впливу зовнішнього середовища. Якби усі коефіцієнти, надійності, які використовувались при проектуванні, були абсолютно достовірними, то забезпечувалася б передбачена проектом довговічність будівлі. Уточнення кожного коефіцієнта може бути досягнуте на підставі накопичених експериментальних і статистичних даних.

В усіх областях машинобудування широко застосовують натурні або модельні випробування цілих конструкцій або їх елементів в природних умовах роботи. У будівельній практиці проведення таких експериментів дуже обмежене. Статистичні

дані не можуть бути накопичені і систематизовані без застосування сучасних математичних обчислювальних пристроїв. У минулому не було необхідності в накопиченні таких даних, оскільки цегляні будівлі будувалися з дуже великими запасами міцності і у меншій мірі зазнавали на собі впливи випадкових навантажень. Нині необхідність накопичення даних про середній рівень і періодичність зовнішнього впливу на будівлю і її елементів є очевидною.

Інформація про надійність будівель багатогранна, але головний її зміст повинні складати відомості про характер деформацій і відмов: умовах, при яких вони виникають, причинах їх появи та часу. Для економічної оцінки важливо знати, до яких наслідків привела несправність конструкцій та елементів. Таким чином, інформація про надійність будівель є комплексною техніко-економічною характеристикою.

Логічно доцільною є наступна послідовність діагностування будівельних конструкцій:

1) Підготовчий етап-вивчення конструктивних особливостей будівель та їх елементів, аналіз аналогів, обґрунтування вибірки спостережень;

2) Спостереження-фіксація параметрів, уточнення характеристик конструкцій що спостерігаються, виявлення впливу умов експлуатації, визначення об’ємів і видів ремонтно-відновних робіт;

3) Обробка результатів-визначення залежності, апроксимація емпіричної залежності теоретичної кривої, побудова моделей відмов елементів будівель, аналіз економічних наслідків несправностей та відмов.

Уникнути фізичного зносу будівельних конструкцій неможливо, однак знизити вплив шкідливих факторів на них, попередити появу стадії виходу з ладу конструкції можна шляхом проведення профілактичних заходів із застосуванням принципів діагностування пошкоджуваності будівельних конструкцій.

Література.

1. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. Видання офіц. Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України 2009.

2. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану.

3. ДБН В.1.2-5:2007 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів

4. ДБН В.1.2-5:2007. Науково-технічний супровід будівельних об'єктів.

5. Ігнатьєва В.Б. Залежність фізико-механічних властивостей бетонних сумішей від виду модифікуючи добавок / В.Б. Ігнатьєва, Д.В. Скакун // Naukowy i innowacyjny potencjal prezentacji: Miedzynar. naukowo-prakt. konf., 18 listopada 2018 r.: kolekcja prac naukowych z materialami, Opole, Polska. – Rowne, 2018. – Т. 5. - С. 11-12. Режим доступу: https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/conferences/issue/view/2018-11-18/110.

6. Ясній П. В. Методи моніторингу та розрахунку експлуатаційних впливів і динаміки руху колісних транспортних систем при транспортуванні великогабаритних вантажів : навчальний посібник / П.В. Ясній , В.З. Гудь , Ю.І. Пиндус , М. І. Гудь та ін. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2018. – 168 с.

УДК 699.822
В. Кісіль, В. Каспрук, к.т.н., доц.
Тернопільський національний технічний університет ім.І.Пулюя,Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕСТРУКТИВНИХ ФАКТОРІВ ЯКІ ВИЗНАЧАЮТЬ ПОШКОДЖЕННЯ БЕТОНУ

V. Kisil, V. Kaspruk, Ph.D., Assoc.Prof.
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

STUDY OF DESTRUCTIVE FACTORS THAT DETERMINE DAMAGE TO CONCRETE

Abstract. The process of carbonization of the surface of concrete and reinforced concrete products and structures in construction structures and buildings gradually causes the accumulation of various types of defects that affect their operational capabilities to one degree or another. Physical wear and tear leads to loss of reliability and durability of the structure due to the development of aging defects and deterioration of material properties.

Проведений аналіз бетонних і залізобетонних споруд в нашій державі свідчить, що проблема їхнього захисту як і раніше актуальна. Це пов'язано з недостатньою ефективністю існуючих захисних сумішей або необхідністю купувати імпортні матеріали за високою ціною. Цементний камінь є джерелом утворення капілярно пористої структури у бетоні та визначає, в основному, його стійкість до впливу різноманітних агресивних середовищ. Відомо що проникнення агресивного середовища у бетон відбувається по капілярах, число яких визначається кількістю води яка використовується для затвердівання бетонної суміш, у зв'язку з цим, природно чим нижче водоцементне співвідношення, тим щільніший бетон і вища його хімічна стійкість. Для водонепроникності бетону не бажані наскрізні макропори (капіляри, що фільтрують), які утворюються в результаті нерівномірного температурного розширення компонентів бетону при термообробці, в результаті пластичної усадки та седиментації при ущільненні [1]. Корозія цементного каменю під впливом води яка проникаючи в пори, здійснює руйнівний вплив на силікатні, керамічні і природні кам'яні будівельні матеріали. Вода не тільки вимиває компоненти будівельного каменю, викликаючи корозію І типу, але й знижує його міцність за рахунок абсорбційного полегшення деформаційних процесів. До зниження монолітності його структури призводить і розклинювальна дія водних плівок [2].Матеріали проникаючої дії незалежно від фірми виробника мають такий самий основний склад: портландцемент, кварцовий пісок певних фракцій та активні хімічні добавки. Саме склад активних добавок і визначає основну відмінність між складами гідроізоляційних матеріалів, які пропонує нам ринок.

Найбільш легкорозчинним компонентом портландцементного каменю є гідроксид кальцію, його розчинність залежить від температури та має залежність аномального характеру. Присутність у воді різних електролітів впливає і на розчинність цементного каменю. Так, при введенні в розчин хлориду натрію розчинення гідроксиду кальцію підсилюється. Особливу небезпеку становить процес вилуговування при фільтрації води через тіло бетону. Легкі бетони мають значне водопоглинання, яке досягає у окремих видів більше 30 %. Проникаюча усередину конструкції волога може викликати появу висолів на поверхні. Крім того, змінюються деякі фізичні властивості матеріалу і, насамперед – теплопровідність, яка при збільшенні вологовмісту в огороджуючих конструкціях на 10 % підвищується в 1,5…2,0 рази [2]. При позмінному заморожуванні й відтаванні зменшується міцність бетону. Перетворюючись у лід, вода збільшується в

об’ємі на 9,7 %, при цьому створюється сильний розклинювальний тиск, що руйнує стінки пор і капілярів [3]. Отже, чим менше загальна пористість бетону, тим вище його морозостійкість. Основними деструктивними факторами, які визначають пошкодження бетону при низьких температурах, є: гідростатичний тиск води в замкнутих порах, гідравлічний тиск води при її віджимі від фронту промерзання, кристалізаційний тиск льоду при його агрегації. Прояв кожного з перерахованих факторів залежить від умов заморожування бетону, його структури, стану поверхні твердої фази й інших параметрів [3]. Першим видом морозного руйнування приймають його однократне заморожування в ранньому віці, тобто до сформування необоротної структури, коли в порах замерзає вільна вода, присутня у них. Ступінь руйнування характеризується зниженням міцності, деформативності та зміною зовнішнього вигляду. Другим видом руйнування вважають порушення структурної стійкості затверділого бетону при багаторазовому, циклічному заморожуванні-відтаванні у водонасиченому стані. Третім видом є тріщиноутворення в конструкціях аж до повного порушення цілісності через деформації при лінійному скороченні або об’ємному стиску під впливом низьких температур нижче – 30^0 С [3]. Процес ускладнюється за наявності у воді електролітів. Відомо, що заморожування й відтавання при контакті бетону з розчинами солей діє на звичайні бетони більш руйнуюче, ніж аналогічний процес у воді. Особливо гостро пошкодження бетону від такого впливу проявляється в цементобетонних дорожніх покриттях, у процесі експлуатації яких застосовують хлористі солі для боротьби з ожеледдю. Морозосолеву корозію відрізняє її чітко виражена шаруватість [4]. У разі дрібношарового руйнування структури бетону відбувається відділення зерен заповнювача великої і середньої фракції. Руйнування бетону з утворенням деструктивної тріщини на глибині 0,5…1,0 см призводить до відшарування бетону разом з великим заповнювачем. Можуть спостерігатися випадки руйнування бетону по контактних площинах великого заповнювача із цементно-піщаної складової бетону. Руйнування бетону в результаті морозосолевої корозії відрізняється тим, що раптовому прояву інтенсивної деструкції з повною втратою механічної міцності бетону передує прихований період перед руйнування, який характеризується наявністю дрібних непомітних або малопомітних тріщин, що не знижують або мало знижують міцність бетону при стиску. З метою визначення термінів експлуатації виробів зроблені спроби математичного прогнозування морозо- і морозосолевої стійкості бетону. Вода здатна транспортувати в об’єм будівельного матеріалу різні електроліти (кислоти й луги) викликаючи корозію цементобетону II типу. Крім того, вода при міграції в порах переносить розчини солей (наприклад, сульфати), збільшення об’ємів яких при гідратації і кристалізації також призводить до зниження міцності основи (корозія III типу).

Література.

1.Кондращенко О.В. Корозія і захист будівельних матеріалів і конструкцій. Харків - ХНАМГ - 2005. 38с.

2.Бліхарський З.Я. Корозія бетонну конструкцій в агресивному кислотному середовищі //36 наукових, праць: Діагностика, довговічність, та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. - Львів: Каменяр, 2000. 134с.

3.Савицкий М.В., Титюк А.О., Литвенеко Д.А. Силові та енергетичні харак теристики бетону в умовах розвитку корозійних процесів // Матеріали II міжнародногосимпозіуму "Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій". - Львів, 1996. 148 с.

4.Комплексне вирішення проблеми підвищення міцності, атмосферо-, водо- та корозостійкості будівельних конструкцій з бетону, що експлуатується в складних інженерно-геологічних умовах. // зб. наук, праць: Будівельні конструкції. Кн. 1. - К.: НДІБК, 2003. - Вип. 59. 210с.

УДК 539.4
А.В. Кравчук канд. техн. наук, Є.О. Кондряков канд. техн. наук, ст. наук. співр, В.В. Харченко докт. техн. наук, академік, А.В. Богомолов канд. техн. наук.
Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, м. Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РУЙНУВАННЯ ТА ЇХ АНІЗОТРОПІЇ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ УДАРНИХ ВИПРОБУВАНЬ ЗРАЗКІВ РІЗНИХ ТИПІВ ЗІ СТАЛІ 15Х2НМФА

Andriy Kravchuk Ph.D., Ievgen Kondryakov Ph.D., Senior Reseacher, Valeriy Kharchenko Dr., Academic, Anatoliy Bogomolov Ph.D.

DETERMINATION OF FRACTURE ENERGY CHARACTERISTICS AND THEIR ANISOTROPY FOR DIFFERENT SPECIMENS TYPES FROM STEEL 15Kh2NMFA UNDER IMPACT TESTS

Abstract. The paper presents the impact tests results of different specimen's types from reactor pressure vessel steel 15Kh2NMFA. The standard Charpy specimens, sub-size specimens and side-grooved specimens, which were cut in three different directions were used for determination of fracture energy characteristics and their anisotropy. The full deformation and fracture energies and its components as well as crack propagation velocities were obtained using instrumented vertical drop weight impact testing machine equipped by high-speed recording system.

Використання сучасного апарату експериментальних методів, який включає інструментоване обладнання, оснащене високоточними системами реєстрації, методи кількісного фрактографічного аналізу із застосуванням можливостей сучасних високоточних комп'ютерних і програмних технологій, дозволяє проводити комплексні дослідження з оцінки поточного стану фізико-механічних характеристик матеріалів з високою точністю з урахуванням впливу різних факторів. Застосування наведених технологій дозволяє істотно підвищити точність та інформативність досліджень, отримати нові дані, підвищити ефективність і знизити економічну вартість проведеного аналізу, обґрунтувати додаткові резерви міцності для продовження строків експлуатації відповідального обладнання та критичних елементів конструкцій.

Останнім часом багато уваги приділяється розробці нових та удосконаленню існуючих експериментально-розрахункових методик оцінки залишкового ресурсу й обґрунтуванням продовження строків експлуатації елементів обладнання 1-го контуру АЕС. Урахування різних чинників, таких як деформаційна анізотропія фізико-механічних та енергетичних характеристик матеріалу, напружений стан, масштабний фактор та ін. може суттєво вплинути на оцінку міцності та прогнозування залишкового ресурсу відповідальних елементів конструкцій [1-5]. Тому необхідні комплексні експериментально-розрахункові дослідження з використанням сучасного обладнання та високоточних систем реєстрації. Також важливим чинником є підвищення інформативності випробувань для зменшення кількості експериментальних досліджень та економії дефіцитного матеріалу і людських ресурсів.

Світовий досвід досліджень у цьому напрямку показує великий розкид результатів експериментальних досліджень, пов'язаний з використанням різного типу обладнання та методик обробки результатів випробувань, впливу деформаційної анізотропії, динамічних ефектів та ін. [6-8]. Тому вдосконалення експериментальних методів за рахунок використання нових засобів реєстрації та обробки результатів, підвищення їх точності є актуальною задачею для підвищення достовірності

визначення поточного стану матеріалів, оцінки міцності та ресурсу відповідального обладнання 1-го контуру АЕС.

Одним з видів випробувань, який використовується для оцінки ступеню деградації матеріалу під час експлуатації внаслідок радіаційного та термічного окрихчування є ударні випробування зразків Шарпі. Останнім часом, крім стандартних зразків Шарпі для оцінки енергетичних характеристик використовуються малорозмірні зразки для дослідження впливу масштабного фактору [9,10] та зразки з бічними надрізами для уникнення впливу бічних утягувань [7,11]. Крім того, використання інструментованого експериментального обладнання дозволяє отримати додаткову інформацію та оцінювати характеристики тріщиностійкості за результатами ударних випробувань [12-14].

В даній роботі наведено результати ударних випробувань зразків трьох типів: стандартні зразки Шарпі, малорозмірні зразки та зразки з бічними надрізами. Зразки було вирізано з поковки зі сталі 15Х2НМФА у вихідному стані у трьох взаємо перпендикулярних напрямках. Випробування проводились в широкому діапазоні температур на інструментованому вертикальному копрі, обладнаному високошвидкісною системою реєстрації деформації та зусиль [15].

За результатами випробувань для всіх типів зразків отримано температурні залежності повної енергії деформування та руйнування, а також її складові: енергію зародження тріщини E_{init}, енергію в'язкого підростання тріщини $E_{d.c.g}$, енергію крихкого проскоку тріщини E_b та енергію в'язкого долому.

За результатами фрактографічних досліджень поверхонь зламу зразків визначено площі характерних зон та обчислено значення питомої енергії деформування та руйнування, а також її складові. Температурні залежності питомих енергій всіх типів зразків, вирізаних в різних напрямках, показані на рис.1.

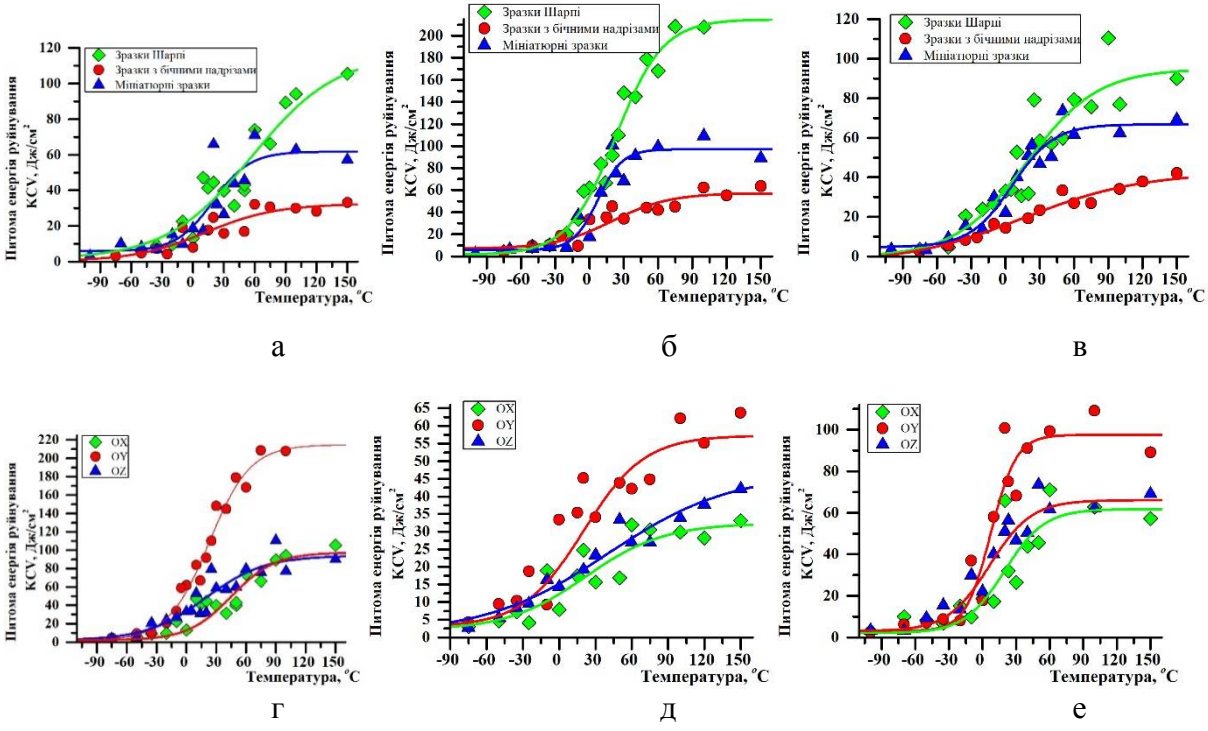


Рис. 1. Температурні залежності питомої енергії руйнування для зразків зі сталі 15Х2НМФА: а- напрямок ОХ, б – напрямок ОУ, в – напрямок ОZ; г– стандартні зразки Шарпі; д–зразки з бічними надрізами; е –малорозмірні зразки.

Як видно, значення питомої енергії на верхньому шельфі для всіх типів зразків, вирізаних у напрямку OY значно більші, ніж для двох інших напрямків. Для стандартних зразків Шарпі ця різниця складає 127%, для малорозмірних – 51%, для зразків з бічними надрізами – 67%.

Напрямок вирізки суттєво впливає на критичну температуру крихкості для малорозмірних зразків $T_{50\%}$ = 31°C (OX); $T_{50\%}$=12°C (OY); $T_{50\%}$ = 14°C (OZ) та стандартних зразків Шарпі $T_{50\%}$ = 49°C (OX); $T_{50\%}$=22°C (OY); $T_{50\%}$ = 47°C (OZ) і практично не впливає для зразків Шарпі з бічними надрізами - $T_{50\%}$ = 67°C (OX); $T_{50\%}$=69°C (OY); $T_{50\%}$ = 70°C (OZ).

Використання високошвидкісної системи реєстрації дозволяє визначити середні швидкості розповсюдження тріщини та її складові на окремих ділянках поверхні зламу. Для всіх типів зразків середня швидкість розповсюдження магістральної тріщини знижується з ростом температури випробування та також залежить від типу та напрямку вирізки зразків. На нижньому шельфі середня швидкість розповсюдження магістральної тріщини зразків Шарпі складає 580м/с, 615м/с та 520Дж, для малорозмірних зразків 625м/с, 715м/с та 606м/с, для зразків з бічними надрізами 625м/с, 615м/с та 690м/с по напрямках OX, OY, OZ відповідно.

Проведений комплекс експериментальних досліджень показав, що для коректного визначення енергетичних характеристик матеріалу необхідно враховувати напрямок вирізки зразків та напрямок розташування надрізу. На енергетичні характеристики матеріалу також впливає масштабний фактор та ефект утворення бічних утягувань, що також необхідно враховувати при оцінці міцності та ресурсу елементів відповідального обладнання 1-го контуру АЕС.

Література

1. М. Горицкий, Г.Р. Шнейдеров, М.А. Лушкин, «Особенности разрушения магистрального трубопровода диаметром 530 мм из низколегированной стали 17ГС», Деформация и разрушение материалов, 2020. № 3, 37-44.

2. А.Я. Красовский, В.Н. Красико, Трещиностойкость сталей магистральных трубопроводов, Наукова. думка. Киев 176, 1990.

3. Boris Margolin, Valentin Fomenko, Victoria Shvetsova, Elena Yurchenko On the link of the embrittlement mechanisms and microcrack nucleation and propagation properties for RPV steels. Part I. Materials, study strategy and deformation properties. Engineering Fracture Mechanics. 2022. Vol. 267. 108400.

4. Boris Margolin, Valentin Fomenko, Victoria Shvetsova, Elena Yurchenko On the link of the embrittlement mechanisms and microcrack nucleation and propagation properties for RPV steels. Part II. Fracture properties and modelling. Engineering Fracture Mechanics. 2022. Vol. 270. 108556.

5. Chenxi Ding et al. Influence of the notch curvature on the impact fracture of the three-point bending beam. Engineering Fracture Mechanics. 2021. Vol. 241. 107419.

6. A. V. Kravchuk, E. O. Kondryakov & V. V. Kharchenko Determination of Fracture Energy Characteristics and Their Anisotropy for 15Kh2NMFA Steel in Impact Bending Tests. Strength of Materials. 2021. Vol.53. P. 867 – 876.

7. Eugene Kondryakov, Olexandr Panasenko, Andriy Kravchyk, Valeriy Kharchenko Peculiarities of the crack initiation and propagation in different specimen types. Procedia Structural Integrity. 2019. Vol. 16. P. 43-50.

8. Kim Wallin Objective comparison of the Unified Curve and Master Curve methods. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2014. Vol. 122. P. 31-40.

9. Kim Wallin Sub-sized and miniature CVN specimen conversion methodology. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2020. Vol. 183. 104080.

10. А.В. Кравчук, Є.О. Кондряков Побудова кореляційних залежностей між результатами ударних випробувань стандартних та малорозмірних зразків Шарпі. Вісник НТУ «ХПІ» : Серія "Нові рішення у сучасних технологіях". 2018. №45 (1321). С. 3-7.

11. F. Di Gioacchino, E. Lucon, E.B. Mitchell, K.D. Clarke, D.K. Matlock Side grooved Charpy impact testing: Assessment of splitting and fracture properties of high-toughness plate steels. Engineering Fracture Mechanics. 2021. Vol. 252. 107842.

12. Chenglong Wang et al. A method for directly measuring fracture toughness and determining reference temperature for RPV steels by Charpy impact test. Engineering Fracture Mechanics. 2021. Vol. 243. 107526.

13. Jianhua Pan, Yan Wang A novel method for estimating the dynamic fracture toughness of austenitic stainless steel. Journal of Materials Engineering and Performance. 2020. Vol. 29. P. 1410-1415.

14. R. Chaouadi, R. Gerard Development of a method for extracting fracture toughness from instrumented Charpy impact tests in the ductile and transition regimes. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2021. Vol. 115. 103080.

15. В.В. Харченко, Е.А. Кондряков, В.Н. Жмака, А.А. Бабуцкий, Инструментированный копер для ударных испытаний: основные элементы, анализ работоспособности. Надёжность и долговечность машин и сооружений, 2006. №27, 120 – 127.

For notes

Для нотаток

ЗМІСТ

СЕКЦІЯ 1. МІЦНІСТЬ СУЧАСНИХ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ	
О. Повстяной, Р. Полінкевич, Н. Редько, **ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ПОРИСТИХ ПРОНИКНИХ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**	**7**
Й. Лучко, О. Кузін, В. Копилов, М. Кузін **РОЗРОБКА ПІДХОДІВ ДО ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЙ ЗМІЦНЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРУЖЕНЬ МЕТОДАМИ ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ**	**10**
В. Ковальчук, Й. Лучко **ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ, ЩО ДІЮТЬ НА МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ МОСТІВ**	**13**
М. Шульженко, А. Ольховський **ОЦІНКА ЗМІНИ ВІБРОМІЦНОСТІ ЛОПАТОК ПОТУЖНОЇ ПАРОВОЇ ТУРБІНИ ПІСЛЯ ЇХНЬОГО РЕМОНТУ**	**16**
В. Ковбашин, І. Бочар **СКЛАД СУМІШІ ДЛЯ СИЛІЦІЮВАННЯ ТА БОРУВАННЯ ВИРОБІВ ІЗ КАРБІДУ КРЕМНІЮ ТА ДИСИЛІЦИДУ МОЛІБДЕНУ**	**18**
І. Ярема, Р. Лещук, А. Гупка, В. Буховець **СТРУКТУРНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПІДХІД В КЕРУВАННІ ПОВЕРХНЕВОЮ МІЦНІСТЮ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ТЕРТІ**	**21**
С. Панченко, Г. Ватуля, А. Ловська, Є. Краснокутський **ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ КОНТЕЙНЕРА ТИПУ ХОПЕР ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ МОРЕМ**	**24**
Г. Ватуля, А. Ловська, А. Рибін, М. Павлюченков, Д. Петренко **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ХРЕБТОВОЇ БАЛКИ НАПІВВАГОНА З НАПОВНЮВАЧЕМ**	**26**
В. Дегтярев **ВПЛИВ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЯХ НА ГРАНИЧНІ НАПРУЖЕННЯ ЦИКЛУ**	**28**
М. Слободян, І. Кузь, І. Звізло **НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗА ЗГИНУ КРУГЛОЇ ПЛАСТИНИ З ТРІЩИНАМИ З УРАХУВАННЯМ СМУГОВОГО КОНТАКТУ ЇХНІХ БЕРЕГІВ**	**30**
С. Прищепко **МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПРОСТОРОВОГО КАРКАСУ ВИСОТНОЇ БУДІВЛІ**	**32**

В. Сверблюк **ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІЩЕННЯ АУТРИГЕРНИХ ПОВЕРХІВ У БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДІВЛЯХ**	**35**
В. Телемко **КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМІВНОГО СТАНУ КАРКАСУ АНГАРУ ДЛЯ ЛІТАКІВ**	**38**
Р. Кушнір, Я. Пастернак, Г. Сулим **ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТІЛ ІЗ ОБОЛОНКОВИМИ НЕОДНОРІДНОСТЯМИ НА ОСНОВІ ПОЄДНАННЯ СІТКОВИХ ТА БЕЗСІТКОВИХ МЕТОДІВ**	**41**
Н. Антоненко, І. Ткаченко, А. Ткаченко **ПРОСТОРОВА ЗАДАЧА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ДЛЯ ДВОШАРОВОЇ ОСНОВИ З НЕІДЕАЛЬНИМ ТЕПЛОВИМ КОНТАКТОМ МІЖ ШАРАМИ**	**43**
І. Луців, Т. Дубиняк, О. Манзій, С. Андрейчук. **РОЗРАХУНОК ДЕФОРМАЦІЙ ЕЛЕМЕНТІВ РОЛИКОВОГО ЛАНЦЮГА**	**45**
С. Курач, Д. Вознюк, Е. Сидоренко, Я. Ковальчук **ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВЕЛИКОПРОЛІТНОГО ПРОСТОРОВГО АРОЧНОГО КАРКАСУ БУДІВЛІ ГРОМАДСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**	**47**
В. Дзьоба, О. Стасюк, С. Данильченко, Н. Чорномаз **ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ КОМБІНОВАНОГО КАРКАСУ ІЗ ЗАЛІЗОБЕТОНУ ТА ДЕРЕВА БАГАТОПОВЕРХОВОЇ ЖИТЛОВОЇ БУДІВЛІ ПРИ ДІЇ ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ**	**49**
А-А. Семчук, Г. Крамар, М. Гудь **МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО КАРКАСУ ГРОМАДСЬКОЇ БУДІВЛІ ПРИ БАГАТОФАКТОРНОМУ РОЗРАХУНКУ**	**51**
В. Плисюк, Т. Ганущак **ВИЗНАЧЕННЯ І ПІДБІР МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ ПЛИТИ**	**53**
І. Погрелюк, С. Лаврись **КОРОЗІЙНА ТРИВКІСТЬ ПОРУВАТОГО ТИТАНУ В НЕОГРАНІЧНИХ КИСЛОТАХ**	**56**
І. Лисий, А. Лиса, Г. Крамар, М. Гудь **МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПОШКОДЖЕНОЇ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ КОЛОНИ З ВИКОРИСТАННЯ ПК «ЛІРА»**	**58**
В. ***Ігнатьєва*** **АНАЛІЗ РОБОТИ ПРОФІЛЬНИХ ВИРОБІВ, АРМОВАНИХ ВОЛОКНАМИ КОМПОЗИТІВ У КОНСТРУКЦІЇ**	**60**

Св. Гомон, С. Гомон, Л. Кулаковський **ДО ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ КЛЕЄНОЇ ДЕРЕВИНИ ХВОЙНИХ ПОРІД**	**62**
Р. Кушнір, Г. Сулим, Й. Піскозуб **ДЕФОРМУВАННЯ ТА МІЦНІСТЬ КОМПОЗИТНИХ СТРУКТУР З ТОНКИМИ СТРІЧКОВИМИ ВКЛЮЧЕННЯМИ**	**64**
R. Babudzhan, O. Vodka, M. Shapovalova **APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS FOR PREDICTING THE MECHANICAL BEHAVIOR OF DISPERSION-STRENGTHENED COMPOSITE MATERIAL**	**67**
С. Федак **МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕРИВЧАСТОЇ ПОВЗУЧОСТІ СПЛАВУ АМг6**	**70**
Б. Шелестовський, Г. Габрусєв, І. Габрусєва **ОЦІНКА МІЦНОСТІ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНОЇ ПЛИТИ ПРИ ЇЇ СТИСНЕННІ ДВОМА ШТАМПАМИ**	**73**
О. Мусієнко, Д. Фам, О. Моргун, Р. Діденко **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМПОНОВКИ СТРИЖНІВ АПАРАТУ ЗОВНІШНЬОЇ ФІКСАЦІЇ НА ЖОРСТКІСТЬ СИСТЕМИ FEM АНАЛІЗОМ**	**76**
Г. Никифорчин, П. Семенов, . О. Цирульник, , О. Звірко **ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНЮВАННЯ ДЕГРАДАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ЗА ДІЇ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТА СЕРЕДОВИЩ**	**79**
А. Середа, О. Каток, В. Харченко, Р. Кравчук, М. Рудницький, В. Швець, С. Бісик **ВИМІРЮВАННЯ ТВЕРДОСТІ ВИСОКОМІЦНИХ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СТАНДАРТУ СОУ 56-36-2021**	**81**
М. Підгурський, І. Підгурський, М. Сташків, Ю. Рудяк **МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ДВОХ ПОВЕРХНЕВИХ ПІВЕЛІПТИЧНИХ КОМПЛАНАРНИХ ТРІЩИН ДОВІЛЬНИХ РОЗМІРІВ ЗА ОДНОВІСНОГО РОЗТЯГУ ПЛАСТИНИ СКІНЧЕНИХ РОЗМІРІВ**	**84**
М. Підгурський, М. Сташків, І. Підгурський, В. Сенчишин, О. Підлужний, Д. Биків, В. Слободян, О. Підвисоцький, В. Гоголюк **ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ПЕРФОРОВАНИХ БАЛОК З ОДНОРЯДНИМ ТА ДВОРЯДНИМ РОЗТАШУВАННЯМ ОТВОРІВ**	**87**
Д. Баран, М. Гудь, В. Шумейко **ВПЛИВ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА УДАРНУ В'ЯЗКІСТЬ СТАЛІ 25Х1М1Ф**	**88**
О. Дивдик, В. Ясній, О. Ляшук, І. Окіпний, Р. Комар, П. Сокіл **ВПЛИВ НАТЯГУ ДОРНУВАННЯ НА КІНЕТИКУ РОСТУ ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ ЗА СТАЛОЇ АМПЛІТУДИ НАВАНТАЖЕННЯ**	**91**

М. Гудь **ПІДБІР РАЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ РОЗМІЩЕННЯ В'ЯЗЕЙ У ДНИЩІ ПЛАВАЮЧОГО БАСЕЙНУ**	**93**
Р. Кравчук, А. Кравчук **ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ ДЕФОРМУВАННЯ МАТЕРІАЛУ ДЖОНСОНА-КУКА ДЛЯ ТОНКОЛИСТОВОГО ПРОКАТУ ВИСОКОМІЦНОЇ СТАЛІ ARMOX 500T**	**95**
Yu. Lapusta, F. Chapelle, A. Sheveleva, V. Loboda **ANALYSIS OF ELECTRICALLY PERMEABLE CRACKS ON THE INTERFACE BETWEEN TWO ONE-DIMENSIONAL PIEZOELECTRIC QUASICRYSTALS**	**98**
СЕКЦІЯ 2. ДОВГОВІЧНІСТЬ СУЧАСНИХ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ	
В. Косарчук, М. Чаусов, П. Марущак, А. Пилипенко, В. Твердомед **МАСТИЛЬНІ КОМПОЗИЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ ПАР ТЕРТЯ**	**101**
Г. Цибаньов **ЗАРОДЖЕННЯ ТРІЩИНИ І ЗМІНА ГРАНИЦІ ВИТРИВАЛОСТІ У ПРОЦЕСІ ВТОМИ СТАЛЕЙ**	**103**
В. Сидяченко, А. Котляренко **ПРОГНОЗУВАННЯ В'ЯЗКОСТІ РУЙНУВАННЯ КОРПУСНИХ РЕАКТОРНИХ СТАЛЕЙ В ОБЛАСТІ КРИХКО-ВЯЗКОГО ПЕРЕХОДУ НА ОСНОВІ ЛОКАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ДВОВІСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ**	**106**
Я. Ковальчук, Н. Шингера, Я. Швед **ЛОКАЛІЗАЦІЯ НАПРУЖЕНЬ І ВТОМНЕ ПОШКОДЖЕННЯ ЗВАРНОЇ ФЕРМИ**	**109**
В. Труш, І. Погрелюк, О. Лук'яненко,Т. Кравчишин **ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ Zr-1%Nb ДИФУЗІЙНИМ НАСИЧЕННЯМ КИСНЕМ**	**111**
O. Zvirko, I. Dzioba, S. Lipiec, O. Tsyrulnyk, O. Venhryniuk **ON THE RELATIONSHIP BETWEEN MICROSTRUCTURE, MECHANICAL PROPERTIES AND HYDROGEN EMBRITTLEMENT OF PIPE STEELS**	**113**
О. Герасимчук, О. Кононученко **МОДЕЛЬ ШВИДКОСТІ РОСТУ КОРОТКОЇ ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ**	**115**
А. Сорочак **ВПЛИВ СТРУКТУРНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ МАТЕРІАЛУ ОСЕЙ КОЛІСНИХ ПАР ЛОКОМОТИВІВ НА МІКРОМЕХАНІЗМИ РОСТУ ВТОМНИХ ТРІЩИН**	**118**

A. Sedmak, T. Smoljanic, A. Milovanovic **REMAINING LIFE OF TI-6AL-4V ELI HIP IMPLANT WITH A CRACK**	**120**
СЕКЦІЯ 3. НОВІ ТА СУЧАСНІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ	
В. Лебедєв, С. Новиков **АНАЛІЗ ВПЛИВУ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ КОЛИВАНЬ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ВАННИ НА ЧАСТОТУ ПЕРЕНЕСЕННЯ ЕЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛУ**	**122**
В. Лебедєв **ЕФЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ МОДУЛЬОВАНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДУГОВОГО МЕХАНІЗОВАНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА НАПЛАВЛЕННЯ**	**125**
В. Лебедєв, С. Лой, Г. Єрмолаєв **НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ**	**128**
В. ***Лебедєв*** **МЕХАНІЗОВАНЕ ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОЛИСТОВИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНОЇ РОЗРОБКИ МЕХАНІЗМУ ПОДАЧІ**	**131**
В. Лебедєв, М. Бриков, Н. Макаренко **СУМІЩЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТА КОМБІНОВАНІ РІШЕННЯ ПРИ ВДОСКОНАЛЕННІ ТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЇ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА НАПЛАВЛЕННЯ**	**134**
В. Лебедєв **ЕЛЕКТРОДУГОВЕ МЕХАНІЗОВАНЕ ЗВАРЮВАННЯ В ПОЛОЖЕННЯХ ВІДМІННИХ ВІД НИЖНЬОГО**	**137**
В. ***Лебедєв*** **ЕЛЕКТРОДУГОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ ПОРОШКОВОЮ ЕЛЕКТРОДНОЮ СТРІЧКОЮ З ІМПУЛЬСНОЮ ПОДАЧЕЮ**	**139**
М. Яворська,Т. Дубиняк, В. Невожай, М. Пошивак **ТЕСТУВАННЯ РОЗРАХОВАНОГО КАСКАДУ МОСТОВОГО ВИПРЯМЛЯЧА В СИСТЕМІ MICROCAP-8**	**142**
М. Прокопів, О. Харченко, Г. Крамар, Л. Бодрова, Ю. Ущаповський, Г. Кисла **ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ПРИРОСТУ ТИСКУ ГАЗУ ПРИ ВАКУУМНО-КОМПРЕСІЙНОМУ СПІКАННІ НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДОГО СПЛАВУ ВК6М**	**145**
О. Ясній, В. Ясній, Г. Сулим, Я. Пастернак, В. Демчик **МОДЕЛІ ГІСТЕРЕЗИСНОЇ ПОВЕДІНКИ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ**	**148**
М. Гудь, М. Лановик **ВПЛИВ ХАОТИЧНО РОЗМІЩЕНИХ СТАЛЕВИХ ВОЛОКОН НА ВЛАСТИВОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОНУ**	**151**
М. Гудь, С. Єсін **ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ВИКОРИСТАННЯ 3D-ДРУКУ В БУДІВНИЦТВІ**	**153**

С. Йолтухівський, М. Гудь, **ВАРІАНТНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ВИСОТНИХ БУДІВЕЛЬ**	**155**
Ч. Пулька, М. Михайлишин, В. Сенчишин, О. Прохоренко, Вік. Сенчишин **ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ, ДЕФОРМАЦІЙ ТА ПЕРЕМІЩЕНЬ ПРИ ІНДУКЦІЙНОМУ НАПЛАВЛЕННІ ТОНКИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ**	**158**
Т. Кедик, М. Гудь **МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ КАРКАСУ БУДІВЛІ СКЛАДНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ ПРИ СУКУПНІЙ ДІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ**	**161**
В. Абаче, В. Френдій, П. Вівчар, Л. Мельник **ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВЛАШТУВАННЯ МІЖПОВЕРХОВОГО ПЕРЕКРИТТЯ ВИСОТНИХ БУДІВЕЛЬ**	**164**
І. Рибалко, О. Марков **МОДИФІКУВАННЯ ВІДНОВЛЕНОГО ШАРУ ЗНОШЕНИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ НАПЛАВЛЕННІ**	**166**
Л. Бодрова, Г. Крамар, С. Мариненко, І. Коваль, О. Муль, Я. Ковальчук[1], М. Прокопів **ЖАРОСТІЙКІСТЬ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ НА ПОДВІЙНІЙ КАРБІДНІЙ ОСНОВІ**	**168**
О. Заїка, В. Рудь, Л. Самчук **СТВОРЕННЯ СКЛАДНИХ КОНСТРУКЦІЙ МЕТОДОМ 3Д МОДЕЛЮВАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ 3Д ДРУКУ В УМОВАХ ДІЮЧОГО ПІДПРИЄМСТВА**	**171**
В. Барський, Я. Бабій **ОБГРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ПІДВИЩЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТОРГІВЕЛЬНОГО ЦЕНТРУ**	**174**
Р. Грицеляк **КОНЦЕПЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БУДІВЕЛЬ - "BIM"**	**176**
А. Левенець, М. Тихоновський **НОВІ ВИСОКОЕНТРОПІЙНІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ НАНОСТРУКТУРИЗАЦІЇ**	**179**
О. Ясній, В. Ясній, О. Малишевська, І.Дідич **МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПСЕВДОПРУЖНИХ СПЛАВІВ З ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ МЕТОДАМИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ**	**181**

O. Ivanov, P. Prysyazhnyuk, H. Kramar, S. Marynenko, I. Koval, O. Huryk **USING OF 3D MODELING FOR INVESTIGATION OF THE STRUCTURE OF HARDFACING MATERIALS DEVELOPED WITH FCAW USING OF POWDER ELECTRODES WITH REACTION MIXTURE FE-MO-B-C**	**184**
В. Коржик, В. Квасницький, А. Гринюк, О. Бабіч, О. Сливінський, С. Пелешенко, І. Лагодзінський **РОЗРОБКА ПЛАЗМОТРОНУ ДЛЯ ГІБРИДНОГО ПЛАЗМОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ З ОСЬОВОЮ ПОДАЧЕЮ ЕЛЕКТРОДНОГО ДРОТУ**	**187**
Н. Биків, В. Ясній, Ю. Лапуста, В. Будз **ВПЛИВ ЧАСТОТИ НАВАНТАЖЕННЯ НА ФУНКЦІОНАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ПСЕВДОПРУЖНОГО СПФ**	**190**
S. Guzii, T. Kurska, N. Grygorenko, V. Pokaliuk, O. Kostyrkin, O. Petrova **DETERMINATION OF THE FIRE-RETARDANT EFFICIENCY OF HEAT-INSULATING MIXTURES ON GEOCEMENT-BASED FOR THE PROTECTION OF METAL STRUCTURES FROM FIRE**	**192**
П. Савчук, В. Кашицький, О. Садова,В. Мазурок **МОДИФІКУВАННЯ БІОПОЛІМЕРНОЇ МАТРИЦІ ПОЛІВІНІЛАЦЕТАТОМ**	**195**
О. Ляшук, І. Гевко, Ю. Пиндус, О. Третьяков, О. Лах **ОПТИМІЗАЦІЯ ГЕОМЕТРІЇ ШПОНОЧНОГО ПАЗУ ВАЛА ЕКСТРУДЕРА**	**197**
О. Ясній, О. Пастух, Л. Цимбалюк, В. Яцишин, І. Дідич **МОДЕЛЮВАННЯ ДІАГРАМИ ДЕФОРМУВАННЯ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ 6060-Т651 МЕТОДАМИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ**	**202**
R. Kosturek **THE CONCEPT OF IMPROVEMENT HIGH-STRENGTH ALUMINUM ALLOYS FSW JOINT PROPERTIES VIA POST-WELD EXPLOSIVE TREATMENT**	**204**
В. Коржик, В. Квасницький, А. Гринюк, А. Перепічай, Є. Іляшенко, І. Лагодзінський, С. Пелешенко, В. Буріка **ВПЛИВ СПОСОБІВ ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ НА ФОРМУВАННЯ ШАРІВ ТА СТРУКТУРУ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ ПРИ АДИТИВНОМУ СИНТЕЗІ ВИРОБІВ ЗІ СТАЛЕЙ ТА СПЛАВІВ**	**207**
СЕКЦІЯ 4. ДІАГНОСТИКА ПОШКОДЖУВАНОСТІ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ	
В. Винар, М. Чучман, В. Івашків, Х. Василів, **ФРАКТОГРАФІЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ КОРОЗІЙНИХ ПОШКОДЖЕНЬ ТРУБНОЇ СТАЛІ З КОРОЗІЙНО-АКТИВНИМИ НЕМЕТАЛЕВИМИ ВКЛЮЧЕННЯМИ**	**210**
Й. Лучко, Т. Гембара **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЛЬТРАЦІЙНОЇ КОРОЗІЙНОЇ ТРИВКОСТІ НА СТАДІЇ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ БЕТОНУ**	**213**

О. Паздрій, Н. Бурау, **ВДОСКОНАЛЕННЯ БОРТОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ І КОНТРОЛЮ ДЛЯ БАГАТОКЛАСОВОЇ ДІАГНОСТИКИ АВІАЦІЙНОГО ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА**	**216**
І. Яворський, Р. Юзефович, О. Личак, Г. Трохим, І. Мацько **ОБРОБКА ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ МЕТОДАМИ ПЕРІОДИЧНИХ НЕСТАЦІОНАРНИХ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ПІДШИПНИКІВ**	**219**
Р. Юзефович, О. Личак, І. Яворський, І. Стецько, І. Стецько **ДІАГНОСТУВАННЯ МЕХАНІЗМІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ**	**222**
Г. Трохим, О. Личак, Р. Юзефович, І. Яворський, Р. Слєпко **МОДЕЛЬ СТОХАСТИЧНОЇ МОДУЛЯЦІЇ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ПІДШИПНИКІВ**	**224**
В. Федоров **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕВОЛЮЦІЙНОЇ ПОШКОДЖУВАНОСТІ МАТЕРІАЛІВ**	**226**
Л. Муравський, О. Куць, Г. Гаськевич **ОПТИКО-АКУСТИЧНИЙ МЕТОД ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ВНУТРІШНІХ ДЕФЕКТІВ У КОМПОЗИТНИХ СТРУКТУРАХ**	**228**
Є. Онищенко, О. Деркач, В. Матвєєв **ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМУШЕНИХ ЗГИННИХ КОЛИВАНЬ КОМПОЗИТНОГО СТРИЖНЯ З ПОПЕРЕЧНОЮ ТРІЩИНОЮ**	**231**
С. Цибульник, П. Мироненко, О. Паздрій **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБУ ЗАХИСТУ ВІД ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ**	**234**
П. Булах, О. Масло, В. Швець **ВПЛИВ ДЕГРАДАЦІЇ ХАРАКТЕРИСТИК ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НА КІНЕТИКУ ПОШКОДЖУВАНОСТІ МАТЕРІАЛУ В УМОВАХ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ**	**237**
І. Коноваленко, П. Марущак, Г. Козбур, О. Ясній **ВПЛИВ ЧАСТОТИ ВІБРАЦІЙ ТА ЯКОСТІ ОСВІТЛЕННЯ НА КІЛЬКІСНІ ПОКАЗНИКИ ДЕФЕКТІВ, ВИЯВЛЕНИХ НА ПОВЕРХНІ МЕТАЛОПРОКАТУ З ЗАСТОСУВАННЯМ ГЛИБОКИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ**	**240**
В. Несін **ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕДУМОВ ВИНИКНЕННЯ ТА ВІЗУАЛЬНОГО ВИЯВЛЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ЗАДИРОК НА ФРЕЗЕРОВАНИХ ГРАНЯХ ПАКУВАННЯ З ЕКСТРУДОВАНОГО ПІНОПОЛІСТИРОЛУ**	**243**

С. Данильченко, Н. Чорномаз **ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ДІАГНОСТУВАННЯ ПОШКОДЖУВАНОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ**	**246**
В. Кісіль, В. Каспрук **ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕСТРУКТИВНИХ ФАКТОРІВ ЯКІ ВИЗНАЧАЮТЬ ПОШКОДЖЕННЯ БЕТОНУ**	**248**
А. Кравчук, Є. Кондряков, В. Харченко, А. Богомолов **ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РУЙНУВАННЯ ТА ЇХ АНІЗОТРОПІЇ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ УДАРНИХ ВИПРОБУВАНЬ ЗРАЗКІВ РІЗНИХ ТИПІВ ЗІ СТАЛІ 15Х2НМФА**	**250**

Наукове видання

Міністерство освіти і науки україни
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка
НАН України
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка
НАН України
Військово-технічна академія імені Я. Домбровського (Польща)
Маріборський університет (Словенія)
Кошицький технічний університет (Словаччина)
Білостоцький технологічний університет (Польща)
Університет Клермон Овернь (Франція)
Українське товариство з механіки руйнування матеріалів

МІЦНІСТЬ І ДОВГОВІЧНІСТЬ СУЧАСНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ

Праці конференції

Відповідальний редактор *Павло Марущак*

Комп'ютерне макетування *Іван Підгурський*

М70 Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій. Праці Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 10-11 листопада 2022 р.) – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – 265 с.

ISBN 978-617-7875-43-6

Підписано до друку 08.11.2022. Формат 60×90, 1/16.
Друк лазерний. Папір офсетний. Гарнітура TimesNewRoman.
Умовно–друк. арк. 15,8. Наклад – 300 прим.
Замовлення № 08112022

*****

Друк ФОП Паляниця В. А.
Свідоцтво ДК №4870 від 20.03.2015 р.
м. Тернопіль, вул. Б. Хмельницького, 9а, оф.38.
тел. (0352) 528–777.