

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ПІДГУРСЬКИЙ ІВАН МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 620.178.3: 539.43

**МОДЕЛЮВАННЯ РОСТУ ПОВЕРХНЕВИХ ВТОМНИХ ТРІЩИН
У НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЯХ ПІСЛЯ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ**

Спеціальність 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль - 2020

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор **Ясній Петро Володимирович,**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя МОН України, м. Тернопіль, ректор університету

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Силованюк Віктор Петрович**

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, завідувач відділу теоретичних основ механіки руйнування

кандидат технічних наук, доцент

Біщак Роман Теодорович

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу МОН України, м. Івано-Франківськ, доцент кафедри зварювання конструкцій та відновлення деталей машин

Захист відбудеться “12” березня 2021 р. о 14:00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 58.052.01 в Тернопільському національному технічному університеті, імені Івана Пулюя (46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 79).

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 46001, м. Тернопіль, вул. Руська 56.

Автореферат розісланий “11” лютого 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

Б.Г. Шелестовський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Значна частина металевих конструкцій експлуатується під дією нерегулярного навантаження. Для таких конструкцій важливе значення має як оцінка довговічності на етапі проектування, так і визначення залишкової довговічності елементів конструкцій з наявними пошкодженнями у вигляді втомних тріщин, зокрема поверхневих. Тому актуальною задачею є розробка методик прогнозування довговічності елементів конструкцій з поверхневими тріщинами з урахуванням їх об'єднання та оцінкою впливу перевантаження.

Дослідження кінетики розвитку поверхневих втомних тріщин присвячена робота Андрейківа О.Є., Дацишин О.І., Книша В.В., Панасюка В.В., Саврука М.П., Силованюка В.П., Сушинського О.І., Троценка В.Т., Харченка В.В., Bezensek V., Carpinteri A., Newman J.C.

Оцінка процесів втомного руйнування суттєво ускладнюється при механічній взаємодії та злитті поверхневих тріщин. Задача зі злиття поверхневих тріщин розглянута в роботах Kashimoto, W.O. Sobojejo, R.A. Smith, C.J. Beyley, R. Bell, M. Kamaya. Моделі розвитку поверхневих втомних тріщин та методики оцінки залишкової довговічності ще не є достатньо опрацьовані, не ввійшли в стандарти ASME – XI, BS 7910, FITNET та ін. Разом з тим, обгрунтоване врахування періоду злиття поверхневих втомних тріщин створює додатковий резерв при оцінці залишкової довговічності елемента конструкції.

Вплив одноразових перевантажень розтягом на швидкість росту наскрізних тріщин досліджували Злочевський А.Б., Ясній П.В., Пиндус Ю.І., Шувалов О.М., Біщак Р.Т., О.Е. Wheeler, J.D. Willenborg, W.S. Johnson, Yuen, F.Taheri, Wang, X.P. Huang, G.Hlinka, M. Skorupa та для поверхневих тріщин – В.В. Покровський, О. Г. Іванченко, С.В. Петінов, Р.В. Гучинський, N.A. Fleck, F.C. Smith, R.A. Smith, P.S. Song, V.L. Shin. У дослідженнях вказаних авторів не розглянуто вплив перевантаження на затримку росту поверхневих тріщин зі складним за геометрією контуром.

Зв'язок роботи з науковими роботами планами, темами. Наукові результати, що складають основи дисертації отримані здобувачем, як виконавцем держбюджетних тем: “Оцінка несучої здатності і залишкової довговічності просторових елементів конструкцій з урахуванням набутих пошкоджень” № держреєстрації 0115U002447, 2015-2017 рр. та “Методологія оцінювання довговічності і продовження ресурсу елементів авіаційних конструкцій з експлуатаційними пошкодженнями біля кріпильних отворів” № держреєстрації 0118U003479, 2018-2020 рр., які виконувались в Тернопільському національному технічному університеті ім. І. Пулюя за тематичними планами НДР Міністерства освіти і науки України. Тематика наукових досліджень відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки України.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є встановлення закономірностей розвитку поверхневих тріщин зі складною геометрією контуру та з врахуванням впливу перевантаження і розроблення методики прогнозування залишкової довговічності елементів конструкцій. Для досягнення вказаної мети вирішували такі задачі:

1. Розробка методики визначення КІН для поверхневих тріщин канонічної та неканонічної форми контуру на основі МСЕ;

2. Виявлення основних закономірностей розвитку поверхневих тріщин, що об'єднуються;

3. Розробка імітаційної моделі об'єднання двох ідентичних поверхневих тріщин;

4. Розробка методики прогнозування залишкової довговічності поверхневої тріщини з врахуванням періоду злиття;

5. Виявлення основних закономірностей впливу одноразового перевантаження розтягом на затримку та кінетику розвитку поверхневих півліптичних тріщин з енергетично стабільним контуром;

6. Виявлення основних закономірностей впливу одноразового перевантаження на затримку та кінетику розвитку поверхневої тріщини зі складним за геометрією контуром.

Об'єкт досліджень – елементи конструкцій з поверхневими тріщинами зі складним за геометрією контуром.

Предмет досліджень – коефіцієнти інтенсивності напружень та кінетика поширення і злиття поверхневих втомних тріщин зі складною геометрією контуру в пластинах при регулярному навантаженні та при дії перевантаження.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження швидкості РВТ проводили на основі положень лінійної механіки руйнування. Визначення КІН вздовж контуру поверхневих півліптичних тріщин та поверхневих тріщин зі складними за геометрією контурами здійснювались методом скінчених елементів за допомогою спеціалізованого програмного комплексу "ANSYS". Експериментальні дослідження росту поверхневих втомних тріщин в пластинах досліджували на гідропульсаторі ZDM-100.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Уперше запропоновано імітаційну модель процесу злиття поверхневих тріщин, що базується на обґрунтованій геометрії ряду фіксованих контурів тріщин та розробленій методиці оцінки КІН вздовж зазначених контурів.

2. Розроблено статистичну математичну модель, яка оцінює коефіцієнти взаємодії тріщини, що об'єднуються в залежності від геометричних розмірів тріщини та параметра відносного злиття тріщини.

3. Виявлено основні закономірності впливу одноразових перевантажень розтягом на кінетику розвитку поверхневих втомних півліптичних тріщин у пластинах зі сталі 09Г2С з врахуванням коефіцієнта форми тріщини.

4. Виявлено основні закономірності впливу одноразових перевантажень розтягом на затримку росту та кінетику форми поверхневих втомних тріщин зі складною геометрією контуру.

Практичне значення одержаних результатів

Отримані результати дають змогу:

- застосувати розроблену методику побудови імітаційної моделі розвитку двох тріщин складного контуру для дослідження систем тріщин;
- оцінити залишковий ресурс безпечної експлуатації металоконструкцій з врахуванням періоду злиття поверхневих тріщин;
- оцінити довговічність елемента конструкції з поверхневими дефектами з врахуванням впливу перевантажень.

Результати роботи використовуються на стадії проектування для аналізу надійності та запасу міцності і безпечного ресурсу експлуатації конструкцій літальних апаратів у Державному підприємстві “АНТОНОВ”; а також, в ТОВ “ТЕХС” для оцінки довговічності посудин високого тиску, газопроводів, газорегуляторних установок УТРШТ і ПГРШТ на стадії розвитку поверхневих тріщин та при визначенні характеристик циклічної тріщиностійкості низьколегованих сталей.

Особистий внесок. Основу дисертаційної роботи складають результати, які отримані автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належать: результати експериментальних досліджень впливу перевантажень на затримку росту поверхневої тріщини зі складною геометрією контуру [1]; моделі злиття поверхневих тріщин [2, 12]; побудова скінчено-елементної моделі тріщин, що зливаються та результати визначення КІН [16, 17]; оцінка впливу конструктивних концентраторів напружень на величину КІН вздовж контурів модельованих півеліптичних тріщин [4, 6, 8]; розробка методики визначення КІН МСЕ для поверхневих тріщин [7]; аналіз експлуатаційних навантажень металевих конструкцій [11]; моделювання пошкоджуваності в елементах конструкцій мобільних машин та оцінювання їх залишкового ресурсу [9]; оцінка кінетики форми тріщини в зонах концентраторів напружень [13]; результати досліджень впливу перевантажень на затримку росту поверхневих півеліптичних тріщин з урахуванням зміни їх форми, коефіцієнта асиметрії, розмаху КІН основного циклу [10].

Апробація результатів дисертації. Основні результати, викладені в дисертаційній роботі, доповідались і обговорювались на 7th International Conference on Fracture Fatigue and Wear FFW 2018, Ghent University, Belgium; 14th International Conference Mechatronic Systems And Materials (MSM 2018) 2018, Zakopane, Poland; XVII Krajowa Konferencja Mechaniki Pekania 2019, Nucisko, Poland; IV,V,VI Міжнародних наук.-техн. конференціях „Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування” (Тернопіль, 2015; 2017; 2019 рр.). Всього за тематикою дисертаційної роботи брав участь у 15 наукових конференціях міжнародного рівня.

У цілому робота доповідалась на науковому семінарі Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано у 18 наукових працях: з них 6 у наукових фахових виданнях України з технічних наук [1, 5-9] (2 – зареєстровані у наукометричних базах з міжнародним індексом цитування Index Copernicus [1,5]); 3 статті у міжнародних періодичних виданнях(зареєстровані у наукометричній базі SCOPUS [3, 4, 11])(одна з них у Web of Science[11]); 1 робота у міжнародному періодичному виданні, опублікована як частини монографії[2]; 8 – праці, у збірниках матеріалів міжнародних конференцій [10, 12-18].

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із анотації, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 142 найменувань та додатків. Загальний обсяг роботи становить 162 с. – з них обсяг основного тексту – 122 сторінки, додатки – 2 сторінки. Дисертація містить 84 рисунки та 9 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, зв'язок роботи з науковими темами, сформульовано мету та задачі дослідження, показано наукову новизну та практичну цінність роботи. Приведено відомості про публікацію та апробацію роботи.

У **першому розділі** на основі огляду літературних джерел проаналізовано особливості розвитку поверхневих втомних тріщин в елементах конструкцій. Зазначено, що поверхневі тріщини в процесі розвитку можуть об'єднуватись у магістральні тріщини, що мають складну геометрію контуру.

Для прогнозування втомної довговічності найбільш широко використовуються положення лінійної механіки руйнувань. Проведено аналіз моделей поширення втомної тріщини при регулярному навантаженні та з перевантаженнями. Більшість детерміністичних моделей для прогнозування кінетики розвитку тріщини після перевантаження класифікуються за такими ознаками: моделі пластичних зон, залишкових напружень, закриття тріщини, моделі МСЕ. Велика кількість запропонованих моделей свідчить про складність оцінки перехідних процесів у вершині тріщини після перевантажень, особливо за її складної конфігурації.

Другий розділ присвячений розробці та опису методик і дослідженню методом скінчених елементів (МСЕ) КІН K_I вздовж фронту поверхневих півеліптичних тріщин (канонічної форми) та тріщин зі складним за геометрією контуром (неканонічної форми). В основі розрахунку КІН K_I методом скінчених елементів лежить розрахункова схема, що включає опис геометрії об'єкта, його механічні характеристики і опис граничних і початкових умов у вигляді сукупності можливих обмежень, а також навантажень, що діють на об'єкт (рис. 1). Потім, у результаті розрахунку, на основі прийнятої фізичної моделі матеріалу, обчислюються вихідні параметри експерименту, зокрема КІН нормального відриву K_{Ic} .

Питання створення якісної і водночас раціональної сітки у вказаному алгоритмі є ключовим при вирішенні задач механіки деформівного твердого тіла з тріщинами. Якість розрахункової сітки впливає на збіжність результатів розрахунку, а її раціональність – на час, необхідний для розв'язку задачі.

Загальноприйнята процедура розв'язку задач механіки руйнування для об'єктів з поверхневими тріщинами МСЕ зводиться до генерування трьох видів сіток: початкової (глобальної) для всього об'єкта, локальної сітки з поверхневою тріщиною, яка інтегрується в об'єкт, та сітки скінчених елементів у перехідній зоні.

Моделювання поверхневих тріщин в об'єктах здійснювалося засобами програмного комплексу скінчено-елементного аналізу ANSYS Workbench, який широко застосовується для вирішення задач механіки деформівного твердого тіла і механіки конструкцій. КІН K_I вздовж фронту поверхневої тріщини визначали способом інтегрування по контурах, що оточують вершину тріщини. Для їх точного розрахунку вибиралося коректне значення максимального радіуса інтегрування, в межах якого будуть розташовані контури; їх кількість; кількість розбиттів контурів в коловому напрямку та кількість розбиттів вздовж фронту поверхневої тріщини.



Рис. 1. Основний алгоритм визначення КІН для поверхневих тріщин канонічної та неканонічної форми

На рис. 2 представлено фрагмент скінчено-елементної моделі пластини з поверхневою півеліптичною тріщиною (тріщиною канонічної форми).

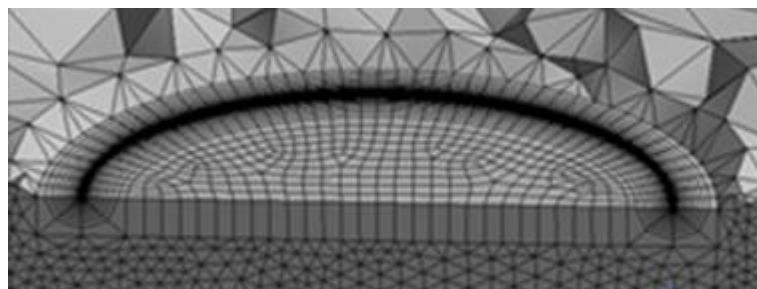


Рис. 2. Фрагменти скінчено-елементної моделі пластини з поверхневою півеліптичною тріщиною

За результатами аналізу побудови сітки скінчених елементів встановлено, що для поверхневих півеліптичних тріщин кількість апроксимаційних точок рекомендовано брати не менше ніж 25; для сідлоподібних тріщин кількість точок апроксимації значно зростає: від 180 для симетричного сідлоподібного контуру до 800–1000 точок для несиметричного сідлоподібного фронту (рис. 3).

Як бачимо, для вірогідного визначення КІН вздовж контуру тріщин неканонічної форми, особливо несиметричних, кількість точок апроксимації зростає в десятки разів, що впливає на час необхідний для розв'язку задачі.

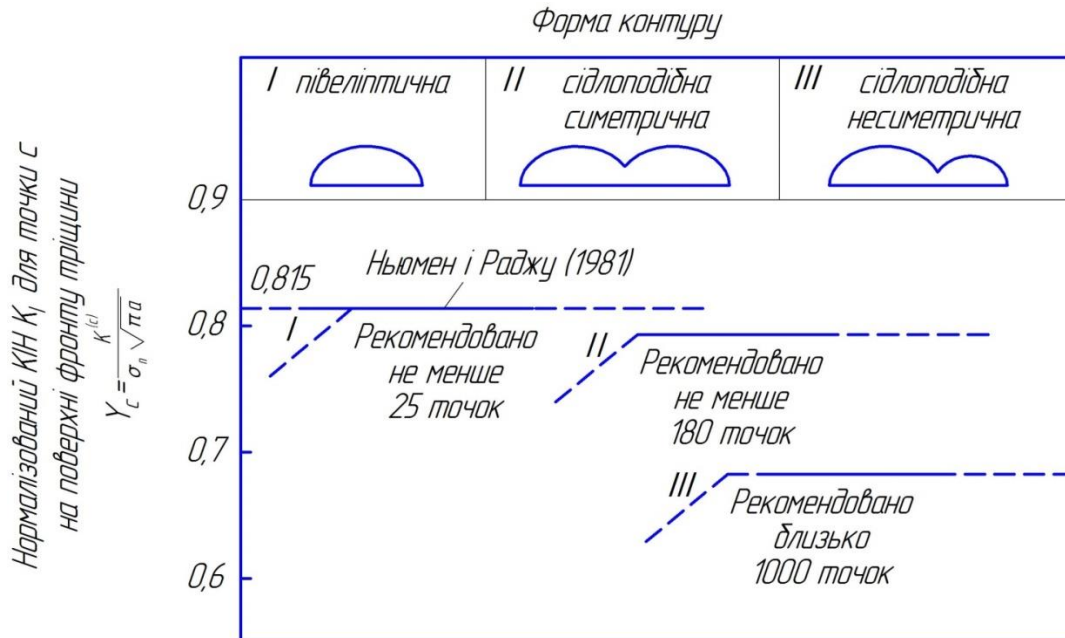


Рис. 3. Залежність точок екстраполяції від геометрії фронту поверхневих тріщин канонічної та неканонічної форм

Мінімальна кількість скінчених елементів в межах контурів інтегрування, що оточують вершину тріщини, приймалась 24 при мінімальному розмірі скінченого елемента 0,1 – 0,4 мм. При цьому, коректні значення КІН отримували, починаючи з третього контуру.

З метою визначення значень КІН за запропонованою методикою, моделювали поверхневі півеліптичні тріщини в пластинах з поперечним перетином 80x20 мм при дії напружень розтягу $\sigma = 300$ МПа. Матеріал пластини – низьколегована сталь 09Г2С з $\sigma_T = 380$ МПа. Коефіцієнт Пуассона при пружному деформуванні становив $\nu=0,3$.

Отримані значення КІН порівнювались з результатами, обчисленими за відомими залежностями Ньюмена-Раджу для порівнюваних геометричних форм поверхневих тріщин, похибка не перевищувала 1,5 %.

Зважаючи на обмеження, що накладаються при конструюванні сітки скінчених елементів: неможливість генерації сітки СЕ в поверхневих тріщинах з різкими (зигзагоподібними) змінами її фронту, недопущення накладання проєкцій контурів інтегрування суміжних тріщин, необхідності створення деякої буферної зони між контурами інтегрування фронтів поверхневих тріщин, що об'єднались в одну магістральну тріщину, запропоновано ряд методик для визначення КІН для поверхневих тріщин зі складним за геометрією контуром та тріщин, розташованих в зонах впливу конструктивних концентраторів напружень, які забезпечили отримання вірогідних значень КІН по фронту таких тріщин.

У **третьому розділі** розроблено імітаційну модель злиття ідентичних компланарних поверхневих тріщин, статистичну математичну модель зміни коефіцієнта взаємодії в зоні об'єднання ідентичних поверхневих тріщин та проведено оцінку впливу періоду злиття тріщин на залишкову довговічність пластини з тріщинами, що об'єднуються.

При розповсюдженні поверхневої півеліптичної тріщини в елементі конструкції при циклічному навантаженні, традиційний підхід до аналізу розвитку руйнування є досить простим і ефективним. При об'єднанні

поверхневих тріщин спостерігається розповсюдження магістральної тріщини з сідлоподібним контуром, що постійно змінюється в часі. Це вимагає нетрадиційного підходу до аналізу її росту. Складність, насамперед, пов'язана з необхідністю визначення КІН вздовж сідлоподібного контуру, який змінюється при циклічному навантаженні, оскільки універсальні розрахункові залежності для рішення цієї задачі відсутні. Зазначимо, що обчислення КІН необхідно багаторазово повторювати. Значні труднощі також пов'язані з встановленням форми контуру та траєкторії його розвитку в процесі циклічного навантаження.

Для подолання зазначених проблем при визначенні довговічності при об'єднанні поверхневих тріщин пропонується спрощений підхід, оснований на імітаційному моделюванні.

Геометричні параметри моделі злиття поверхневих тріщин (рис. 8) обґрунтовано на основі багатьох експериментальних досліджень та випадків руйнування конструкцій.

Як відомо, формування складних геометричних контурів наштовхується на проблему неможливості їх опису єдиною кривою. Це викликало необхідність конструювання складених кривих (кривих, що формуються з дуг простих сплайнів). Спряження дуг у випадку двох ідентичних півеліптичних тріщин наведено на рис. 4.

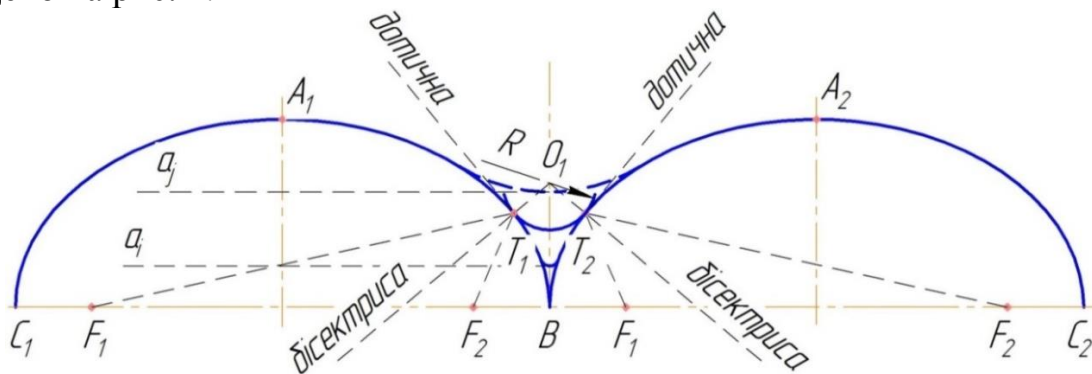


Рис. 4. Ілюстрація методу моделювання вирівнюючої області контуру при об'єднанні двох ідентичних поверхневих тріщин

На наступному етапі МСЕ визначаємо КІН для ряду фіксованих конфігурацій контурів, що імітують розвиток сідлоподібного фронту поверхневої тріщини. Фрагмент скінчено-елементної моделі сідлоподібного контуру представлено на рис. 5.

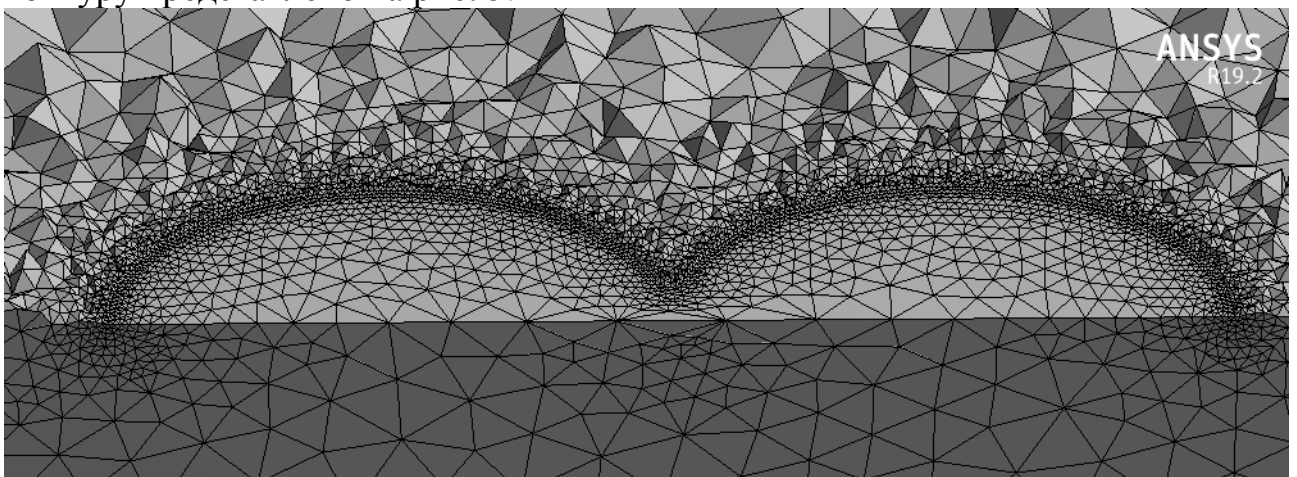


Рис. 5. Фрагменти скінчено-елементної моделі пластини з поверхневою півеліптичною тріщиною неканонічної форми

Результати розрахунку КІН K_I вздовж контурів ідентичних поверхневих тріщин при моделюванні їх об'єднання наведено на рис. 6. Результати представлено для восьми різних контурів, що моделюють поступове розповсюдження тріщини в зоні злиття між тріщинами. Заповненість западини характеризується співвідношенням $\frac{a_{coal}}{a}$, де a – глибина кожної з двох симетричних тріщин, що об'єднуються; a_{coal} – відстань від поверхневої осі магістральної тріщини до найглибшої точки сідлоподібної западини кожного із змодельованих контурів.

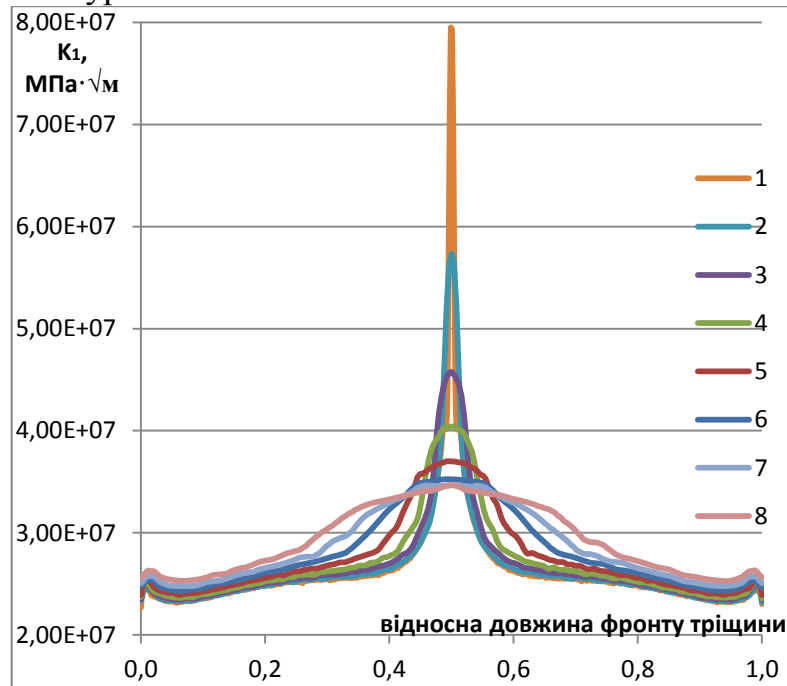


Рис. 6. Розподіл значень КІН K_I вздовж контуру поверхневої сідлоподібної тріщини при моделюванні поступового злиття $\frac{a_{coal}}{a}$: 1) 0,149; 2) 0,256; 3) 0,378; 4) 0,491; 5) 0,626; 6) 0,754; 7) 0,85; 8) 0,95 при $\sigma = 187,5$ МПа.

Аналіз розподілу КІН K_I свідчить, що їх максимальні значення спостерігаються в зоні об'єднання тріщин (посередині контуру), причому найвище значення КІН спостерігається при найменшій значенні $\frac{a_{coal}}{a} = 0,149$.

Апробацію запропонованої імітаційної моделі об'єднання двох півеліптичних тріщин здійснено за даними експериментальних досліджень [Bezensek]: сталь 50D BS 4360 ($\sigma_y = 330$ МПа; $\sigma_u = 560$ МПа); параметри циклічної тріщиностійкості $n = 2,92$; $C = 8 \cdot 10^{-12}$ МПа $^{-n} \cdot \text{м}^{1-n/2}$; коефіцієнт асиметрії $R = 0,1$.

Розрахунок довговічності N_{model} (рис. 7) здійснювався на основі інтегрування модифікованого диференціального рівняння Періса-Ердогана, що описує середньоамплітудну ділянку КДВР сталі 50D BS 4360:

$$N_{model} = \int_{a_{coal\ min}}^{a_{coal\ max}} \frac{1}{C(\Delta K_{a_{coal}})^n} da_{coal}, \quad (1)$$

де $\Delta K_{a_{coal}}$ – розмах КІН для найглибшої точки a_{coal} кожного з досліджуваних сідлоподібних контурів поверхневої тріщини (отримано за запропонованою методикою);

a_{coal} – відстань від найглибшої точки кожного з контурів до поверхні зразка.

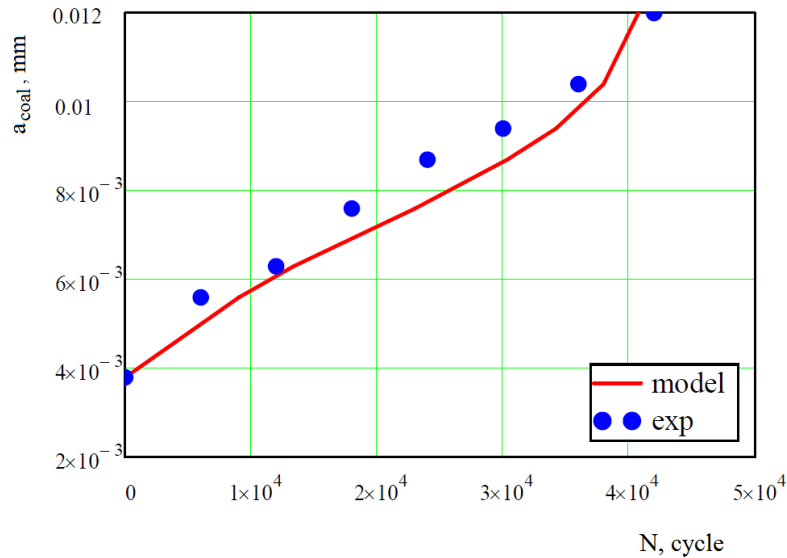


Рис.7. Порівняння результатів імітаційного моделювання процесу об'єднання поверхневих тріщин з експериментальними даними [Bezensek]

Зазначимо, що отримане значення кількості циклів $N_{model} = 40410$ цикл., необхідних для злиття тріщин, добре узгоджується з експериментальним значенням $N_{exp} = 42000$ цикл. (похибка не перевищує 5%). Також варто зазначити якісну збіжність кривої довговічності, отриманої при моделюванні, з експериментальними даними [Bezensek].

Для отримання за результатами імітаційного моделювання математичної моделі, що описує зміну КІН K_I в зоні об'єднання двох ідентичних поверхневих тріщин, застосовували регресійний аналіз. Математичну модель представимо у вигляді поліноміального рівняння, у якому входними факторами є відношення $a/4c$, де a – глибина кожної з двох симетричних тріщин, $4c$ – довжина магістральної тріщини на поверхні в момент дотику, а також відношення $\frac{a_{coal}}{a}$, де a_{coal} – відстань від поверхні зразка до найглибшої точки сідлоподібного фронту кожного із змодельованих контурів; вихідним параметром є коефіцієнт взаємодії γ_{coal} , що характеризує відношення КІН у найглибшій точці сідлоподібного фронту до значення КІН для поверхневих точок тріщин з півдіагоналями a/c . Структурну модель проведення імітаційного моделювання із зазначенням входних і вихідних параметрів наведено на рис. 8.

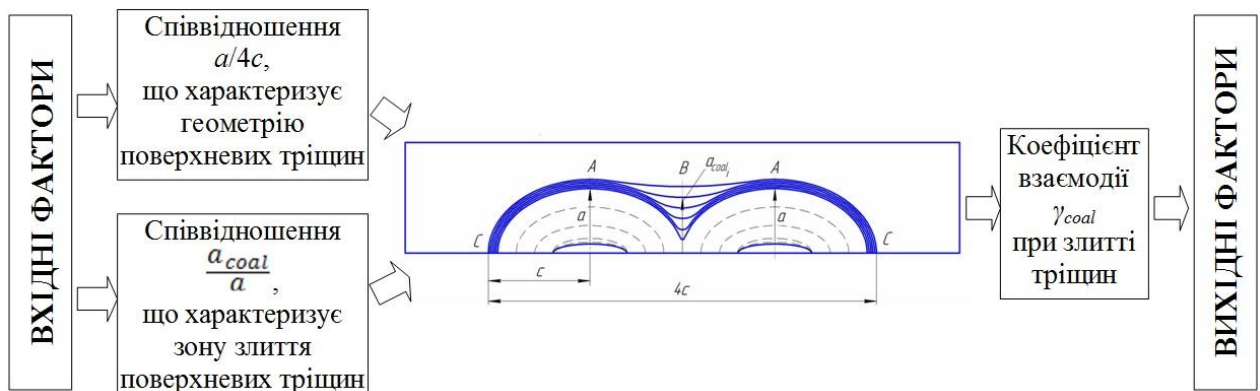


Рис. 8. Структурна схема імітаційного моделювання об'єднання двох ідентичних поверхневих тріщин

Після перевірки адекватності апроксимуючої моделі та оцінки статистичної значущості коефіцієнтів рівняння регресії та подальшого переходу від кодованих позначень входних змінних факторів до натуральних величин,

одержано рівняння регресії, яке функціонально описує зміну коефіцієнта взаємодії γ_{coal} при злитті двох поверхневих півеліптичних тріщин в одну магістральну поверхневу тріщину:

$$\gamma_{coal} = 3,42 + 2,47 \left(\frac{a}{4c}\right) - 6,63 \left(\frac{a_{coal}}{a}\right) - 16,82 \left(\frac{a}{4c}\right) \left(\frac{a_{coal}}{a}\right) + 28,34 \left(\frac{a}{4c}\right)^2 + 6,84 \left(\frac{a_{coal}}{a}\right)^2 \quad (2)$$

Отримане рівняння регресії може бути застосоване для визначення характеру функціональної зміни коефіцієнта взаємодії γ_{coal} при злитті поверхневих тріщин, в залежності від їх відносних геометричних розмірів $\frac{a}{4c}$, та геометрії зони злиття $\frac{a_{coal}}{a}$ тріщин у таких межах варіювання змінних факторів $0,075 \leq \frac{a}{4c} \leq 0,250$; $0,1 \leq \frac{a_{coal}}{a} \leq 0,95$.

За одержаним рівнянням регресії побудована поверхня відгуку (рис. 9, а) та двовірний переріз поверхні відгуку (рис. 9, б) зміни коефіцієнта взаємодії в зоні злиття ідентичних поверхневих тріщин як функціонала $\gamma_{coal} = f\left(\frac{a}{4c}; \frac{a_{coal}}{a}\right)$.

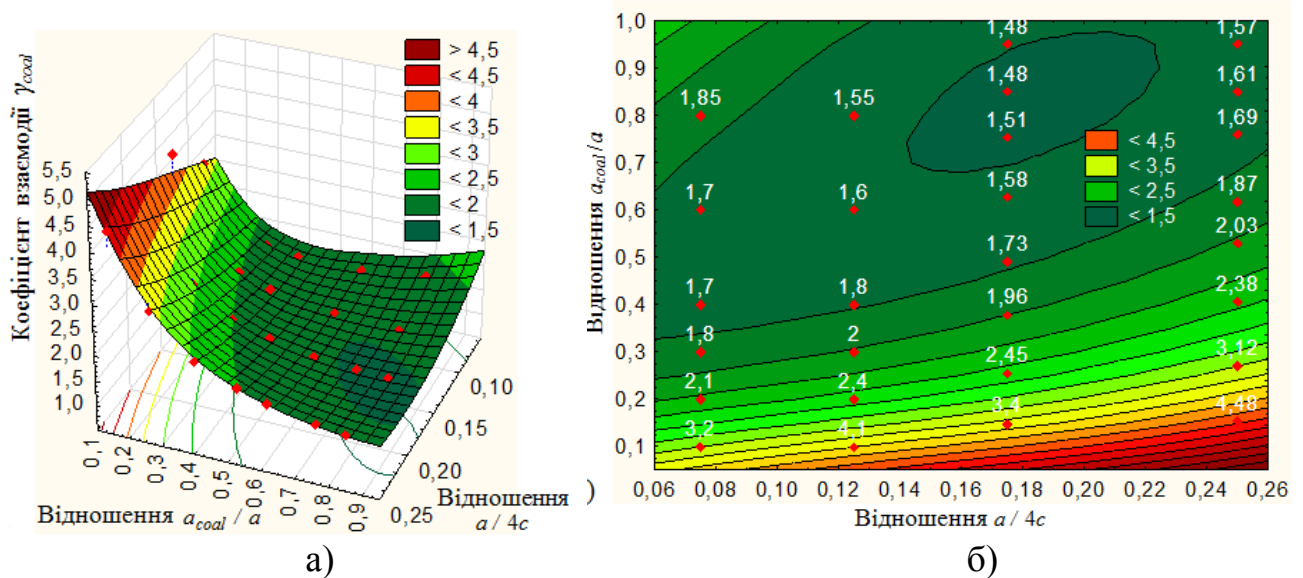


Рис. 9. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз (б) поверхні відгуку зміни коефіцієнта взаємодії γ_{coal} в зоні злиття двох ідентичних поверхневих тріщин як функціонал $\gamma_{coal} = f\left(\frac{a}{4c}; \frac{a_{coal}}{a}\right)$.

Аналіз коефіцієнтів регресійного рівняння, поверхні та перерізу відгуку вказує на суттєвий вплив як геометрії тріщин (співвідношення глибини поверхневої тріщини a до суми діагоналей двох тріщин $4c$ на поверхні зразка), так і положення найглибшої точки сідлоподібного контуру a_{coal} в процесі об'єднання, яке характеризується співвідношенням $\frac{a_{coal}}{a}$. Фактором, який має найбільший (домінуючий) вплив на зміну апроксимованих значень коефіцієнта взаємодії γ_{coal} є відношення $\frac{a_{coal}}{a}$. Відношення $a/4c$ має менш суттєвий вплив на зміну апроксимованих значень коефіцієнта взаємодії γ_{coal} . Причому вплив цих двох вхідних факторів є неоднозначним: при більших значеннях $a/4c$ та невеликих $\frac{a_{coal}}{a}$ коефіцієнти взаємодії γ_{coal} є максимальними ($\gamma_{coal} \geq 3$ при $\frac{a_{coal}}{a} < 0,2$) поступово знижуючись зі збільшенням $\frac{a_{coal}}{a}$. Мінімальні значення коефіцієнта взаємодії γ_{coal} знаходиться у межах $\gamma_{coal.min} = 1,48 \dots 1,51$ за зміни значень факторів: $0,14 \leq a/4c \leq 0,22$ та $0,7 \leq \frac{a_{coal}}{a} \leq 0,95$. Максимальні значення

коефіцієнтів взаємодії γ_{coal} при $\frac{a_{coal}}{a} < 0,2$ можна пояснити великими значеннями КІН K_I в зоні спряження на початковому етапі злиття тріщин. При подальшому збільшенні $\frac{a_{coal}}{a}$ значення КІН та коефіцієнти взаємодії γ_{coal} в сідлоподібному контурі зменшуються, наближаючись до значення КІН у найглибшій точці поверхневої тріщини, що утворилась в результаті об'єднання.

Іншою причиною збільшення значень γ_{coal} є зростання вхідного фактора $a/4c$, що характеризує геометричні параметри тріщин, що зливаються. Так, збільшення $a/4c$ до 0,125; 0,175; 0,25 призводить до зростання γ_{coal} в 1,11; 1,26; 1,57 рази відповідно у порівнянні з $\gamma_{coal} = 3,04$ для $a/4c = 0,075$.

На основі проведених досліджень встановлено, що для невеликих за розмірами (40% товщини елемента) тріщин, тривалість стадії злиття ($< 8\%$) несуттєво впливає на залишкову довговічність пластини (при досліджуваних товщинах $t = 20 \dots 25$ мм). Для більших магістральних тріщин, довжина яких співрозмірна з товщиною елемента, вплив періоду об'єднання збільшується до 18 – 25%, що суттєво уточнює розрахунок залишкової довговічності елемента конструкції.

У **четвертому розділі** проведено оцінку впливу перевантажень на затримку росту поверхневих півеліптичних тріщин в сталі 09Г2С з параметрами циклічної тріщиностійкості $n = 3,08$; $C = 8,9 \cdot 10^{-12}$ (МПа) $^{-n} \cdot \text{м}^{(1-n/2)} \cdot \text{цикл}^{-1}$.

Одноразові чи багаторазові перевантаження розтягом викликають сповільнення в розвитку як наскрізних, так і поверхневих тріщин. Це явище має велике практичне значення для розробки і уточнення оцінки живучості елементів конструкцій і деталей машин при нерегулярному навантаженні. Кількість циклів затримки росту N_D тріщини залежить від величини перевантаження Q_{OL} та параметрів подальшого циклічного навантаження, коефіцієнта асиметрії циклу навантаження R , матеріалу та ін.

Дослідження проведено для енергетично стабільної форми тріщини $a/c = 0,786$, для якої КІН вздовж контуру є практично однаковими. Моделювалися рівні одиничних перевантажень $Q_{OL} = 1,67; 1,8; 2,0$ та $2,2$, які поєднувались з циклічними напруженнями основного циклу $\sigma_{nom} = 120; 150; 187,5; 200$ МПа. Коефіцієнт асиметрії циклу навантажень у всіх випадках становив $R = 0,25$.

Моделювання затримки росту тріщини здійснювалось за допомогою спеціалізованої програми AFGROW. Точність прогнозованих результатів росту тріщини за кількістю циклів, а також збіжність даних зі зміни форми контуру в процесі циклічного навантаження не перевищувала 2% у порівнянні з експериментальними даними, отриманими при регулярному навантаженні, а також при оцінці впливу перевантаження.

Встановлено (рис. 10, а), що підвищення рівня перевантаження Q_{OL} збільшує кількість циклів затримки N_D . Також встановлено, що при менших розмахах КІН затримка N_D є більшою і, навпаки, при збільшенні розмаху КІН – зменшується (рис. 10, б). Такі закономірності спостерігаються для кожного з рівнів Q_{OL} .

Спостерігається добра збіжність результатів експериментальних досліджень, отриманих для наскрізних тріщин, з даними, що описують вплив перевантажень та рівня подальшого циклічного навантаження, які отримані при імітаційному моделюванні тріщин з енергетично стабільним контуром.

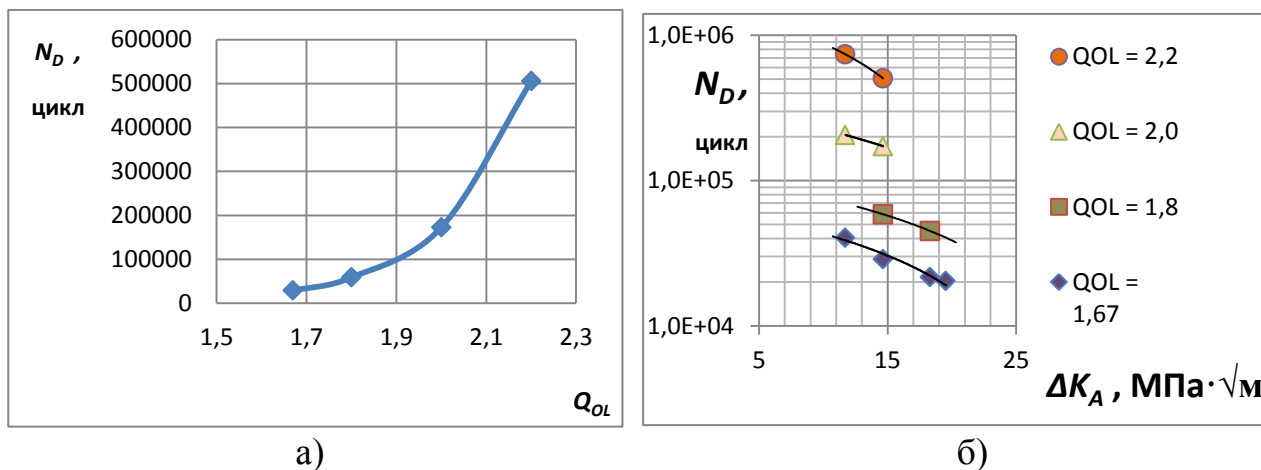


Рис. 10. Залежність кількості циклів затримки N_D розвитку півеліптичної тріщини від рівня перевантаження Q_{OL} розтягом (а) та розмаху КІН (б)

На рис. 11, а представлено результати затримки N_D росту тріщини при перевантаженні $Q_{OL} = 1,67$ для досліджуваних конфігурацій фронту тріщини: $a/c = 0,2; 0,5; 0,786$. Встановлено, що зі зменшенням a/c затримка росту тріщини зростає за експоненціальною залежністю відповідно в 1,16 та 1,71 рази. Підвищення рівня перевантаження до $Q_{OL} = 1,8$ у порівнянні з $Q_{OL} = 1,67$ (моделювання проведено при $\sigma = 187,5$ МПа; $R = 0,25$) приводить до подальшого збільшення кількості циклів затримки N_D (більше, як у два рази) для всіх досліджуваних випадків зміни форми тріщини. Зменшення коефіцієнта асиметрії з $R = 0,25$ до $R = 0$ (рис. 11, б) також привело до зменшення N_D у 2,3 – 2,4 рази для кожного з досліджуваних випадків, і тренд змін N_D є подібним до даних при $R = 0,25$.

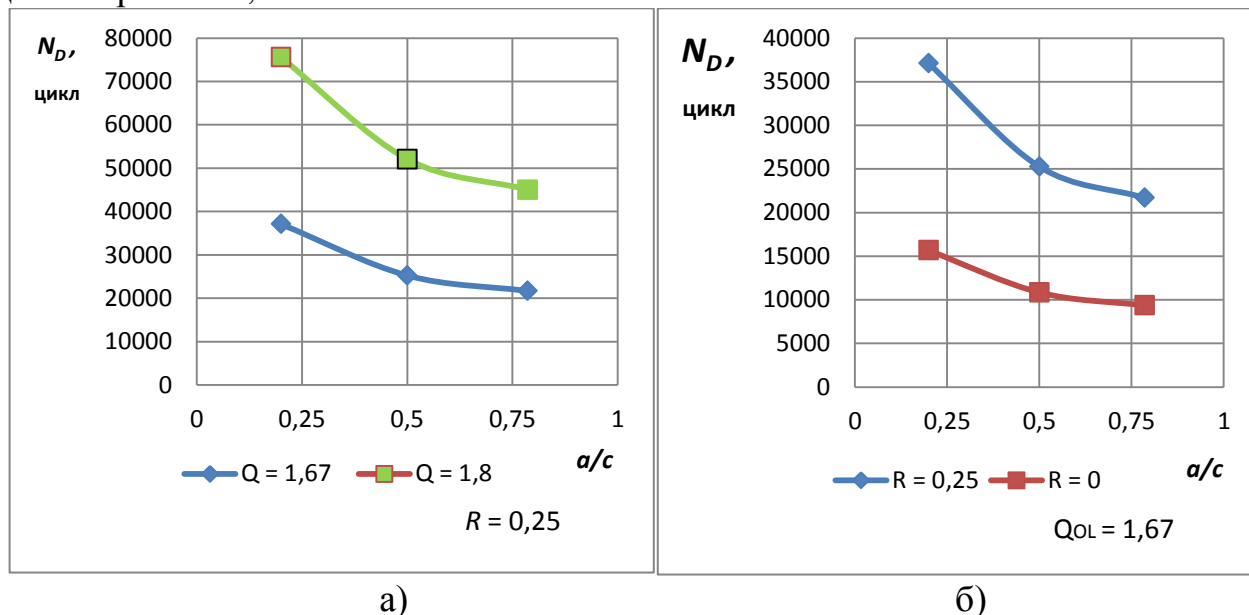


Рис. 11. Залежність кількості циклів затримки N_D розвитку поверхневих півеліптичних тріщин з різними параметрами форми $a/c = 0,2; 0,5; 0,786$ від рівня перевантаження Q_{OL} (а) та коефіцієнта асиметрії R (б)

Зміни кількості циклів затримки N_D розвитку поверхневих тріщин різної форми, пов'язані, у першу чергу, з величиною та розподілом КІН вздовж криволінійного контуру кожної з тріщин та їх взаємодією в процесі розвитку. Значно менший вплив на кількість циклів затримки матиме, в даному випадку, зміна жорсткості напружено-деформівного стану вздовж фронту поверхневої тріщини.

В п'ятому розділі представлено результати дослідження розвитку поверхневих тріщин зі складним за геометрією контуром після впливу одноразових перевантажень розтягом, методика та особливості визначення КІН вздовж несиметричного фронту поверхневої тріщини, методика прогнозування РВТ після перевантажень.

З метою дослідження кінетики росту поверхневої тріщини неканонічної форми при дії перевантажень розтягом та подальшого циклічного навантаження проведено експериментальні дослідження пластин зі сталі 09Г2С з поперечним перерізом 80x20 мм (рис. 12, б) під дією циклічного розтягу на гідропульсаторі ZDM-100. У пластинах тонкою дисковою фрезою товщиною 0,13 мм були ініційовані компланарні надрізи різної глибини, що перекривали один одного. Під дією циклічного навантаження ініціювали поверхневу втомну тріщину з несиметричним фронтом, що моделює процес об'єднання тріщини. Несиметричний фронт тріщини розділено на дві частини: тріщина 1, якому відповідає півдіагональ з довжиною на поверхні зразка $c_1 = 12,0$ мм та тріщина 2 з відповідною довжиною на поверхні зразка по поверхні зразка $c_2 = 10,0$ мм. Загальна довжина макротріщини $2c = c_1 + c_2 = 22$ мм. Саме при сумарній довжині $2c = 22,0$ мм було здійснено перевантаження $Q_{OL} = 1,67$; параметри базового циклічного навантаження $\sigma_n = 187,5$ МПа; коефіцієнт асиметрії циклу навантажень $R = 0,25$. Наступне перевантаження $Q_{OL} = 1,5$ було прикладене при тих же параметрах основного циклічного навантаження та біжучій довжині тріщини $2c = 33,2$ мм (рис. 12, б).

Для порівняння досліджували також розвиток поверхневих півеліптичних тріщин канонічної форми (рис. 12, а). Злами зразків та схематизація контурів поверхневих тріщин представлено на рис. 12.

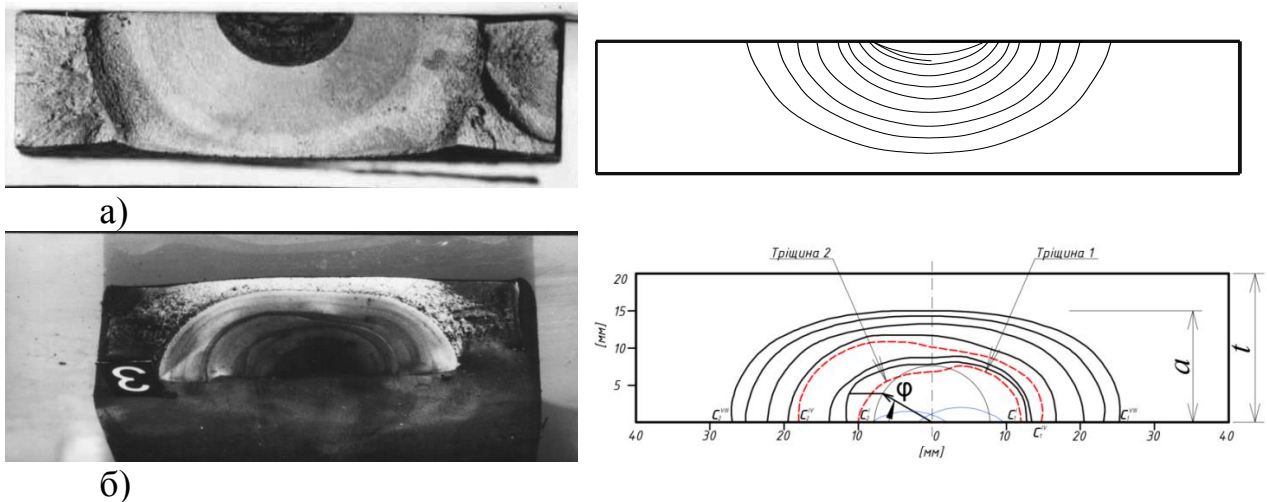


Рис. 12. Злами та схематизація кінетики контуру поверхневих тріщин: а) півеліптична тріщина за регулярного навантаження; б) тріщина зі складним за геометрією початковим контуром після перевантажень та за подальшого регулярного навантаження.

Розглянуто якісні результати розвитку поверхневої неканонічної тріщини перевантажень розтягом. Після дії одноразового перевантаження $Q_{OL} = 1,67$ на макротріщину, яка виникла при злитті різних тріщин, відбулося гальмування розвитку поверхневої тріщини по всьому її контуру. При подальшому циклічному навантаженні спочатку відбулася активізація контуру меншої тріщини (II), в той час, як контур більшої з тріщин (I) знаходився ще в стані

сповільненого розвитку (рис. 13). Очевидно, що в залежності від величини перевантаження, менша тріщина може перевищити за розмірами сусідню тріщину, що й спостерігалось при проведенні експерименту. При дії наступного перевантаження $Q_{OL} = 1,5$ тенденція розповсюдження поверхневої тріщини залишилася такою ж: після періоду сповільненого розвитку активніше почала розвиватися менша з тріщин (у даному випадку I), а потім – більша. Слід зазначити, що інтенсивність сповільненого росту втомної тріщини $Q_{OL} = 1,5$ виявилась меншою, ніж при перевантаженні $Q_{OL} = 1,67$.

Аналіз зміни форми неканонічної поверхневої тріщини після впливу перевантаження та подальшого циклічного навантаження суттєво відрізняється від форми симетричної поверхневої тріщини за таких же умов навантаження. Поверхнева симетрична тріщина зберігає півеліптичну форму як при регулярному циклічному навантаженні, так і після перевантаження розтягом, в той час як форма неканонічної тріщини при перевантаженнях наближається до прямокутної, оскільки тріщина пришвидшено розвивається в напрямках, що відповідають параметричному куту $\varphi = 30 \div 35^\circ$. Найбільше сповільнення розвитку тріщини спостерігається в області злиття тріщини.

Отже, перевантаження в тріщинах неканонічної форми приводить до інтенсивної затримки росту втомної тріщини, а також до значної зміни контуру тріщини. Майже такої ж форми набуває поверхнева тріщина при дії попереднього пластичного деформування, що застосовується для підвищення довговічності зварних з'єднань. Встановлено, що затримка росту поверхневої півеліптичної тріщини після дії перевантаження $Q_{OL} = 1,67$ становила $N_D = 21690$ циклів; для складної за геометрією тріщини – збільшилась у 4,2 рази.

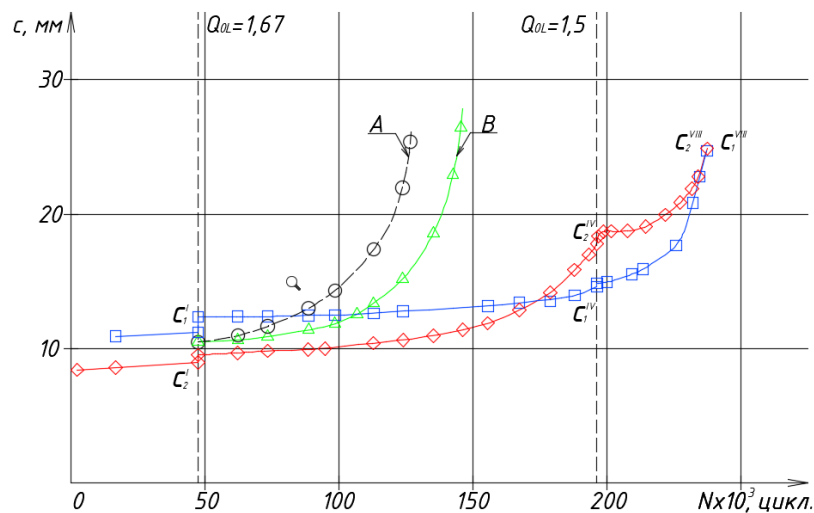


Рис. 13. Закономірності впливу перевантажень на розповсюдження поверхневих тріщин у низьколегованій сталі 09Г2С: А – ріст півеліптичної тріщини при циклічному навантаженні; В – ріст півеліптичної тріщини при перевантаженні; □ – розповсюдження тріщини I після перевантажень; ◇ – розповсюдження тріщини II після перевантажень.

Інтенсивність впливу перевантаження характеризується також зміною швидкості росту тріщини після перевантаження у характерних точках (рис. 14).

Складні перехідні процеси, які відбуваються після перевантаження в поверхневих тріщинах зі складним за геометрією контуром, пов'язані з розподілом значень КІН вздовж фронту та їх перерозподілом після впливу перевантаження.

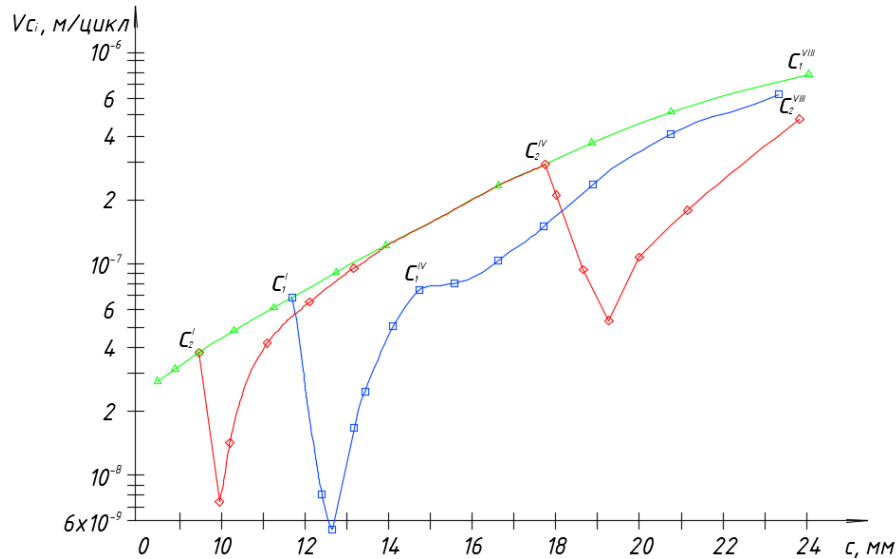


Рис. 14. Криві зміни швидкості розповсюдження поверхневих точок контуру тріщин: Δ – при регулярному циклічному навантаженні; \square – при перевантаженнях (тріщини I); \diamond – при перевантаженнях (тріщини II).

На рис. 15, а наведено розподіл КІН, отриманий МСЕ, для контуру I до моменту прикладання перевантаження. Особливістю розподілу КІН є пікове значення K_{max} в зоні спряження тріщин, яке на 25% є більшим за мінімальні значення КІН на ділянках фронту, що знаходяться поряд. Для порівняння наведено розподіл значень КІН для поверхневої півеліптичної тріщини канонічної форми. На рис. 15, б наведено розподіл КІН вздовж контуру VIII поверхневої тріщини неканонічної форми.

Модель оцінки впливу перевантаження на затримку росту поверхневої тріщини зі складною геометрією полягає в наступному. Для врахування сповільненого розвитку тріщини після перевантаження застосовуємо модифіковане рівняння:

$$V = C \cdot (K_{max\,eff})^n \quad \text{при} \quad R = 0 \quad (3)$$

Ефективне значення КІН

$$K_{max\,eff} = K_{max} - K_{res} \quad (4)$$

описує зменшення швидкості РВТ внаслідок виникнення залишкових КІН K_{res} після перевантажувального циклу. Тут K_{max} – максимальний КІН основного циклу навантажень; K_{res} – залишковий КІН.

Ефективне значення КІН $K_{max\,eff}$ та ефективне максимальне напруження циклу навантажень $\sigma_{max\,eff}$ пов'язані залежністю:

$$K_{max\,eff} = \sigma_{max\,eff} \cdot \sqrt{\pi \cdot l_i} \cdot Y_i, \quad (5)$$

де Y_i – нормалізовані значення КІН, що визначаються для характерних точок фронту поверхневої тріщини неканонічної форми (рис.15,а) із залежності:

$$K_{max} = \sigma_{max} \cdot \sqrt{\pi \cdot l_i} \cdot Y_i, \quad (6)$$

звідки

$$Y_i = \frac{K_{max}}{\sigma_{max} \cdot \sqrt{\pi \cdot l_i}} \quad (7)$$

де σ_{max} – максимальні напруження основного циклу навантажень; l_i – біжучі точки фронту поверхневої тріщини.

Ефективні напруження циклу навантажень $\sigma_{max\,eff}$ визначаються також у результаті додавання залишкових напружень стиску σ_{res} в межах пластичної зони, утвореної перевантаженням, з напруженнями σ_{max} .

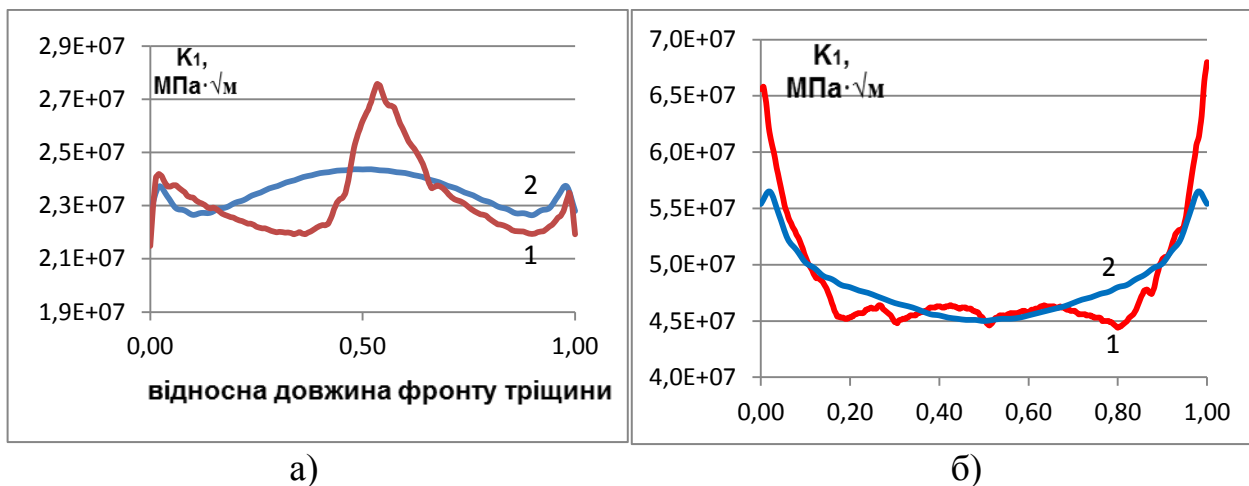


Рис. 15. Розподіл значень КІН вздовж фронту поверхневої тріщини канонічної (1) та неканонічної (2) форм при розтягу пластини ($\sigma = 187,5$ МПа): а – контур I; б – контур VIII.

Застосовуючи запропоновану методику, за відомими значеннями швидкості окремих точок фронту поверхневої тріщини неканонічної форми в зоні впливу перевантажень визначено розподіл КІН $K_{max\ eff}$ та залишкові напруження стиску σ_{res} , що спричинюють затримку N_D росту точок фронту тріщини.

Похибка при оцінці кількості циклів затримки РВТ після перевантаження не перевищує 20% у порівнянні з експериментальними даними.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення та вирішення наукової задачі, що полягає у виявленні основних закономірностей впливу перевантаження розтягом на затримку і кінетику росту поверхневих тріщин зі складною геометрією контуру та запропоновано методику оцінки цього впливу.

1. Розроблено імітаційну модель об'єднання двох поверхневих півеліптичних тріщин, як поступового їх злиття при циклічному навантаженні. Модель базується на обґрунтуванні геометричних параметрів ряду фіксованих конфігурацій контурів, що імітують розвиток сідлоподібного фронту об'єднаної тріщини, та оцінці КІН характерних точок цих контурів.

2. Розвинуто методику визначення КІН нормального відриву вздовж контуру поверхневих тріщин із сідлоподібним фронтом за одновісного розтягу пластин. Отримано регресійну залежність, що оцінює коефіцієнти взаємодії тріщин в залежності від геометричних розмірів тріщини та параметра відносного злиття тріщин.

3. Розроблено методику прогнозування залишкової довговічності елементів конструкцій з поверхневими втомними тріщинами при їх злитті. Встановлено, що обґрунтоване врахування росту тріщини в зоні об'єднання збільшує до 25 % розрахункову довговічність у порівнянні з існуючими методиками розрахунку, нормами та стандартами.

4. Досліджено основні закономірності впливу перевантаження на затримку росту поверхневої втомної тріщини в низьколегованій сталі 09Г2С за одновісного розтягу пластин. Встановлено, що для енергетично стабільного контуру при коефіцієнті форми $a/c = 0,78 \div 0,8$ підвищення коефіцієнта перевантаження з $Q_{OL} = 1,67$ до 1,8; 2,0 та 2,2 приводить до збільшення

затримки росту втомної тріщини N_D у 2; 6 та 17,5 разів відповідно. Збільшення розмаху КІН основного циклу навантажень приводить до зменшення кількості циклів затримки N_D . Зі збільшенням коефіцієнта асиметрії кількість циклів затримки N_D зростає.

5. Виявлено основні закономірності впливу перевантаження $Q_{OL} = 1,67$ на затримку росту поверхневих втомних тріщин N_D з однаковою довжиною на поверхні $2c$ та різним співвідношенням півосей $a/c = 0,2; 0,5$ та $0,786$. Встановлено, що зі зменшенням відношення півосей затримка N_D збільшується майже у 2 рази, що пояснюється зменшенням розмаху КІН основного циклу навантаження для найглибшої точки фронту тріщини. Вплив перевантаження Q_{OL} на зміну параметра форми поверхневих півеліптичних тріщин a/c є незначним.

6. Встановлено значний вплив перевантаження розтягом на затримку росту N_D та на кінетику форми поверхневих тріщин зі складною конфігурацією контуру в пластинах з низьколегованої сталі 09Г2С. При коефіцієнтах перевантажень $Q_{OL} = 1,5$ та $Q_{OL} = 1,67$ затримка росту втомних тріщини зростає у 3 і 4,2 рази відповідно у порівнянні з ідентичними за розмірами півеліптичними тріщинами канонічної форми. Суттєво змінюється при цьому конфігурація контуру.

7. Розроблено методику прогнозування залишкової довговічності елементів конструкцій з поверхневими тріщинами зі складною геометрією контуру на основі аналізу НДС з урахуванням злиття тріщин та перевантажень.

ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, в яких опубліковано основні наукові результати

1. Pidgurskyi I. Research of surface cracks propagation with a complex geometric contour after the influence of tensile overloads / Ivan Pidgurskyi , Mykola Pidgurskyi // Scientific Journal of TNTU. – Ternopil: TNTU, 2020. - Vol. 97. - No 1. - P. 110-117. (**Index Copernicus, Google Scholar**)
2. Pidgurskyi, M., Stashkiv, M., Pidgurskyi, I., Makar, A. (2020) Numerical investigation of stress intensity factors for surface cracks under coalescence. *Procesy zmęczenia i mechanika pękania. Opole, 2020.* - Vol. 536. – P. 231-246. ISSN 1429-6063, ISBN 978-83-66033-76-4 (**Частина монографії**)
3. Malezhyk, M.P., Pidhurs'kyi, M.I., Rudyak, Y.A., Pidhurs'kyi, I.M. & Voitovych, L.V. (2019) Investigation of the Fracture of an Orthotropic Plate with Circular Hole and Two Edge Cracks Under Pulsed Loading by the Method of Dynamic Photoelasticity. *Materials Science*, 55(2). P. 254-258. (**SCOPUS**)
4. Pidgurskyi, Mykola & Rudyak, Yuri & Pidgurskyi, Ivan. (2019). Research and Modeling of Stress-Strain State and Fracture Strength of Triplexes at Temperatures 293–213K. // *Lecture Notes in Mechanical Engineering Ser Proceedings of the 7th International Conference on Fracture Fatigue and Wear., Belgium, Ghent University, 2018.* – P.135-150. (**SCOPUS**)
5. Pidgurskyi I. Analysis of stress intensity factors obtained with the fem for surface semielliptical cracks in the zones of structural stress concentrators // Scientific Journal of TNTU. - Ternopil: TNTU, 2018. - Vol. 90. - No 2. - P. 92-104. (**Index Copernicus, Google Scholar**)
6. Підгурський І.М. Вплив конструктивних концентраторів напружень на величину коефіцієнтів інтенсивності напружень вздовж контурів модельованих

півеліптичних тріщин // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ: ДДМА, 2016. – №2 (38). – С. 191-195. **(Фахова стаття)**

7. Ясній П. Дослідження КІН двох взаємодіючих поверхневих півеліптичних тріщин методом скінчених елементів / П. Ясній, І. Підгурський // Вісник ТНТУ. – Тернопіль: ТНТУ, 2014. – №2. – С. 15-25. **(Фахова стаття)**

8. Підгурський Н.И. Особенности расчета коэффициентов интенсивности напряжений для поверхностных трещин, развивающихся у сварных швов / Н.И. Підгурський, В.Н. Барановський, В.В. Ляхов, И.Н. Підгурський // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії, 2012. – № 3 (28). – С. 211-215. **(Фахова стаття)**

9. Підгурський М. Аналіз особливостей розвитку пошкоджуваності в статично невизначуваних стержневих системах / М. Підгурський, М. Сташків, І. Підгурський // Вісник ТНТУ. – Тернопіль: ТНТУ, 2011. – Спецвипуск. – Ч. 2. – С.118-123. **(Фахова стаття)**

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

10. Ясній П. В. Оцінка впливу перевантажень на закономірності росту поверхневих втомних тріщин у низьколегованих сталях / П. В. Ясній, І. М. Підгурський, М. І. Підгурський // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“. – Тернопіль: ТНТУ, 2020. – С. 52-55.

11. Mykola Pidgurskyi, Yevgen Ripetskyi, and Ivan Pidgurskyi Research and simulation of load modes in the evaluation of mobile machines resource / AIP Conference Proceedings 2029, 020064 (2018) – 7р. **(SCOPUS, Web of Science)**.

12. Ясній П.В. Моделювання злиття компланарних півеліптичних тріщин методом скінчених елементів / П.В. Ясній, І.М. Підгурський, М.Я. Сташків, М.І. Підгурський // Праці VI Міжнародної науково-технічної конференції “Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування” – Тернопіль: ТНТУ, 2019. – С. 128–132.

13. Підгурський І.М. Порівняльний аналіз КІН та кінетики форми поверхневих півеліптичних тріщин в однорідному полі напружень та в зоні концентраторів / І.М. Підгурський, І.Б. Окіпний, М.Я. Сташків, І.В. Кенс // Праці V Міжнародної науково-технічної конференції “Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування”, – Тернопіль: ТНТУ, 2017. – С. 110-113.

14. Pidgurskyi, I. (2017) Modelling of structural stress concentrators influence on stress intensity factors of surface semielliptical crack using finite element method. *VII Inter University Conference of Students, PhD Students and Young Scientists “Engineer of XXI Century”*. Volume 1. P. 241-248.

15. Pidgurskyi, I. (2016) Simulation of non-transverse surface cracks in the machinery and structures elements. *VI Inter University Conference of Students, PhD Students and Young Scientists “Engineer of XXI Century”*. P. 749-756.

16. Ясній П. Моделювання МСЕ взаємодії двох півеліптичних поверхневих тріщин при розтягу / П. Ясній, І. Підгурський. // Матеріали IV Міжнар. наук.-техн. конф. “Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи діагностування і прогнозування”. - Тернопіль: ТНТУ, 2015. - С. 232-235.

17. Підгурський І.М. Визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень вздовж контуру поверхневих тріщин при їх злитті / І. М. Підгурський, Я. Р. Дубик // Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції “Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування”. – Тернопіль: ТНТУ, 2015. – С.256 – 258.

18. Підгурський І. Моделювання КІН двох взаємодіючих поверхневих півеліптичних колінеарних тріщин методом скінчених елементів // Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції “Проблеми механіки та фізико-хімії конденсованого стану речовини”. – Миколаїв: Миколаївський національний університет ім. В.О. Сухомлинського, 2015. – С. 68-70.

АНОТАЦІЯ

Підгурський І.М. Моделювання росту поверхневих втомних тріщин у низьколегованих сталях після перевантажень. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2020.

У дисертаційній роботі вирішено наукову задачу, що полягає у встановленні основних закономірностей впливу разових перевантажень розтягом на затримку росту поверхневих півеліптичних тріщин (тріщин канонічної форми) у низьколегованих сталях. Виявлено особливості кінетики розвитку поверхневих тріщин зі складним за геометрією контуром після дії перевантажень та розроблені підходи для їх оцінювання.

Запропоновано імітаційну модель об'єднання ідентичних компланарних поверхневих тріщин при циклічному навантаженні, в основі якої лежить розроблена статистична математична модель, що описує зміну КІН в зоні злиття тріщин. Запропоновано методику прогнозування залишкової довговічності елементів конструкцій при злитті ідентичних компланарних поверхневих тріщин.

Ключові слова: перевантаження, півеліптична поверхнева тріщина, тріщина із сідлоподібною формою, коефіцієнти інтенсивності напружень, метод скінчених елементів, затримка розвитку тріщин.

АННОТАЦИЯ

Пидгурский И.Н. Моделирование роста поверхностных усталостных трещин в низколегированных сталях после перегрузок. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 - механика деформируемого твердого тела. - Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2020.

В диссертационной работе решена научная задача, которая заключается в установлении основных закономерностей влияния разовых перегрузок растяжением на задержку роста поверхностных полуэллиптических трещин (трещин канонической формы) в низколегированных сталях. Обнаружены особенности кинетики развития поверхностных трещин со сложным по геометрии контуром после воздействия перегрузок и разработаны подходы к их оценке.

Предложена имитационная модель объединения идентичных компланарных поверхностных трещин при циклической нагрузке. Основанием этой модели служит разработанная статистическая математическая модель, описывающая изменение КИН в зоне слияния трещин. Предложена методика

прогнозирования остаточной долговечности элементов конструкций при слиянии идентичных компланарных поверхностных трещин.

Ключевые слова: перегрузка, полуэллиптическая поверхностная трещина, трещина с седловидной формой, коэффициенты интенсивности напряжений, метод конечных элементов, задержка развития трещин.

ANNOTATION

Pidgurskyi I.M. Simulation of fatigue surface cracks growth in low-alloy steels after overloads. – Manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 01.02.04 – mechanics of deformable solid. - Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, 2020.

The scientific problem of identifying the fundamental laws of surface cracks development in the course of their coalescence under cyclic loading is solved in the dissertation. A simulation model of coalescence of identical coplanar surface cracks has been developed. Based on the definition of SIF for contours which are modeling the gradual propagation of cracks in the coalescence zone, the proposed model was tested to compare the calculated durability with experimental data.

Based on regression analysis within the boundaries of the proposed simulation model, a statistical mathematical model was developed, which describes the change of SIF in the zone of coalescence of two identical surface cracks. Based on the developed models a technique has been proposed to determine SIF of normal separation along a contour of a surface crack with a saddle-shaped front under uniaxial tension.

The influence of single tensile overloads on the growth retardation of surface semielliptical cracks with energy stable contour of low-alloy steel 09Г2С was estimated. It is established that raising the level of single overload increases the number of cycles of growth retardation of the surface fatigue crack. Increasing the amplitude of the SIF of the base level of cyclic loading leads to a decrease in the number of delay cycles with material thickness $t = 20$ mm.

The influence of the compression parameter a/c of the semielliptical crack on the retardation of the number of cycles of its growth under tensile overload was investigated. It is established that a decrease in the compression parameter a/c leads to an increase in the number of delay cycles.

The results of research of the development of surface cracks with a complex geometry contour after application of one-time overloads have been presented. It is established that the number of cycles of growth retardation of a non-canonical surface crack after the effect of tensile overload increases significantly (by several times) in comparison with a surface semielliptical crack of similar size at the same overload. Another peculiarity of cracks of non-canonical shape under the action of overload is a change in the shape of the contour, which approximates a rectangle. Approaches for estimating the growth retardation of non-canonical surface cracks have been proposed.

Keywords: overload, semielliptical surface crack, saddle-shaped crack, stress intensity factors (SIF), finite element method, crack development retardation.