

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

Шишковський Роман Олегович

УДК 539.4

**ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ І ДОВГОВІЧНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ
КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ СКЛАДНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЗА
ЕНЕРГЕТИЧНИМ ПІДХОДОМ**

01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль -2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Іваницький Ярослав Лаврентійович,
НУ «Львівська політехніка», професор
кафедри опору матеріалів та будівельної
механіки

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, м. Івано –Франківськ,
доцент кафедри зварювання

Захист відбудеться 26 листопада 2021 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 58.052.01 у Тернопільському національному технічному університеті
імені Івана Пулюя (46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 79)

З дисертацією можна ознайомитися в Науково-технічній бібліотеці
Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 46001,
м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розісланий 22.жовтня 2021 року.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради

Б.Г.Шелестовський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний розвиток машинобудівної галузі та інтенсифікація технологічних процесів супроводжується зростанням енергосилових характеристик машин та механізмів, а також високими вимогами для безпечної і тривалої їх експлуатації. Проблема надійної роботи та довговічності конструкцій має особливо важливе наукове і практичне значення у різних галузях промисловості, для об'єктів машинобудування, які піддані складному навантаженню протягом тривалого періоду експлуатації. Також для дороговартісних конструкцій є вимоги, щодо зниження коефіцієнта запасу міцності при надійній роботі. До таких конструкцій належать паливні баки ракет-носіїв. Враховуючи наявність концентраторів напружень (люки, зварні шви та ін.) в цих місцях виникає складний напружено-деформований стан. Тому встановлення допустимого робочого тиску необхідно проводити на основі характеристик міцності, які би враховували зміни опірності матеріалу деформуванню за складного навантаження.

При тривалій роботі крупногабаритних конструкцій, зокрема в матеріалі валу гідротурбіни під дією складного циклічного навантаження важливо є обґрунтоване встановлення довговічності, а після тривалого періоду експлуатації визначення його залишкового безпечного ресурсу роботи.

Для оцінювання безпечного ресурсу елементів конструкцій, які працюють в умовах складного навантаження, необхідно визначати напружено-деформований стан з врахуванням перерозподілу напружень в матеріалі та зміною його фізико-механічних характеристик. Враховуючи, що руйнування елементів конструкцій відбувається в локальному об'ємі необхідно визначати характеристики міцності та довговічності незалежні від умов навантаження.

Вагомий вклад у розвиток методів визначення напружено-деформованого стану та оцінки довговічності елементів конструкцій з врахуванням умов експлуатації зробили українські та зарубіжні вчені. Серед них – Андрейків О.Є., Дзюба А.П., Зіньковський А.П., Карпінос Б.С., Касаткін Б.С., Красовський А.Я., Лебедев А.А., Леонов М.Я., Лобанов Л.М., Марущак П.О., Муравський Л.І., Панасюк В.В., Писаренко Г.С., Стрельнікова С.О., Троценко В.Т., Харченко Є.В., Чаусов М.Г., Ясній П.В.,

іноземних – Коффін, Менсон, Гудмен, Баскін, Коцаньда та ін.

Зокрема нерозв'язаними залишаються задачі оцінки напружено-деформованого стану та кінетики розвитку пошкоджень для елементів конструкцій, які працюють за складного напруженого стану. Необхідно сформулювати методологію оцінювання міцності та довговічності високонавантажених і дороговартісних елементів конструкцій на основі визначення напружено-деформованого стану в локальному об'ємі з врахуванням зміни характеристик опірності матеріалу до утворення та розвитку пошкоджень під статичним або циклічним навантаженням.

Необхідний подальший розвиток критеріїв оцінки пошкодження матеріалу і експериментальних методів визначення характеристик міцності елементів конструкцій та залишкового ресурсу роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відповідності до програм науково-дослідних робіт:

«Методика визначення залишкового ресурсу, залізобетонних мостових балок та розроблення технічних засобів моніторингу деформацій», номер державної реєстрації 0114U000819. «Розроблення методики та технічних засобів для моніторингу напружено-деформованого стану гідротурбін з урахуванням умов експлуатації». (ДБ// моніторинг) номер держреєстрації 0117U004447, а також при виконанні г/д тематики «Розроблення технологій діагностування елементів конструкцій та локального руйнування засобами оптичної спекл-метрології, фазозсувної інтерферометрії та цифрової голографії для виконання робіт з обстеження технічного стану підземного переходу ст. метро «Святошин» м. Київ.

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є розроблення методик та технічних засобів контролю для визначення міцності і довговічності елементів конструкцій за складного навантаження. Досягнення поставленої мети вимагає вирішення наступних задач:

- сформулювати критерій локального руйнування елементів конструкцій за складного навантаження на основі енергетичного підходу;
- розробити методики та технічні засоби для визначення істинних деформацій в локальних об'ємах з використанням методу цифрової кореляції зображень;
- розробити методики побудови істинних діаграм деформування та визначити енергію руйнування металу;
- встановити величину граничного тиску в паливному баку ракети – носія;
- розробити методики побудови діаграм втомної міцності матеріалу за енергетичним підходом;
- визначити залишковий ресурс роботи валу гідротурбіни Київської ГАЕС.

Об'єкт дослідження – процес деформування і руйнування елементів конструкцій під складним статичним і циклічним навантаженням.

Предмет досліджень – міцність паливних баків ракет-носіїв і довговічність валів гідротурбін.

Методи дослідження

Методологічною основою є використання математичного та фізичного моделювання напружено-деформованого стану в елементах конструкцій за складного навантаження.

Для підтвердження адекватно отриманих результатів моделювання використано експериментальні методи досліджень НДС в локальному об'ємі металу з використанням методу оптико-цифрової кореляції зображень (ЦКЗ). Механічні випробування при статичних та циклічних навантаженнях, визначення локальних деформацій і напружень та питомої енергії руйнування.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у застосуванні енергетичного підходу до оцінки напружено-деформованого стану в локальному об'ємі деформованого твердого тіла, побудові повних рівноважних й істинних діаграм руйнування та встановленні питомої енергії руйнування матеріалу.

1. Сформульовано енергетичний критерій для кількісної оцінки міцності елементів конструкцій підданих складному навантаженню.

2. Вперше сформульовано експериментальну методологію та розроблено необхідні засоби для побудови повних рівноважних діаграм за силової схеми

розтягу та кручення.

3. Визначено енергію руйнування за розтягу та кручення зразків на основі побудованих істинних діаграм руйнування в локальному об'ємі.

4. Розроблено методику та визначено допустимий робочий тиск у паливному баку на основі моніторингу деформацій та істинних діаграм руйнування сплаву АМГ-6.

5. Вперше встановлено зміну густини матеріалу та швидкості проходження акустичної хвилі від ступеня пружно-пластичного деформування матеріалу.

6. Вперше побудовано діаграму втомної міцності в координатах «енергія деформування W - кількість циклів до руйнування N » для сталі 20 ГС на основі реєстрації величини циклічних деформацій встановлену методом ЦКЗ та визначено довговічність валу гідротурбіни.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена у дисертаційній роботі методика прогнозування робочого тиску у паливному баку ракети – носія на основі моніторингу напружено-деформованого стану за навантаження 0,5 робочого тиску методом ЦКЗ та побудованих істинних діаграм руйнування сплаву АМГ-6 дала можливість розрахувати допустимий тиск без руйнівних випробувань на ДП «КБ» «Південне».

Запропоновані автором технічні рішення при побудові істинних діаграм руйнування за статичного та циклічного навантажень значно підвищили ефективність визначення залишкового ресурсу роботи елементів конструкцій за складного навантаження.

Особистий внесок здобувача. Результати, які складають основу дисертаційної роботи і виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Формування структури та висновків обговорено з науковим керівником дисертації.

У публікаціях написаних у співавторстві здобувачеві належить [1-3, 5-9] розроблення та технічна реалізація методів експериментальних досліджень руйнування матеріалів та побудови істинних діаграм, визначення впливу складного навантаження на опірність матеріалів руйнуванню.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідались та обговорювались на вітчизняних та міжнародних конференціях, зокрема: Міжнародній конференції «Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки» (Київ, 2019), науково-практичній конференції «Сучасні розрахунково-експериментальні методи визначення характеристик ракетно-космічної техніки» (Дніпро, 2019), Міжнародному науково-практичному семінарі «Обмін досвідом роботи в сучасній судовій експертизі (Львів, 2019), Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ» (Львів, 2020).

У повному обсязі робота доповідалась та обговорювалась на науковому кваліфікаційному семінарі кафедри «Опір матеріалів та будівельна механіка» Національного університету «Львівська політехніка» (Львів 2020).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 9 праць: 5 статей у фахових виданнях, які включені до наукометричних баз Scopus та Web of Science: 4- у матеріалах та тезах доповідей конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел 151. Загальний обсяг становить 171 сторінку (з них 145 сторінок основного тексту), з 66 рисунками (з них 2 рисунки, що займають 2 сторінки), 6 таблицями, бібліографічним списком із найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі висвітлено проблему забезпечення надійної тривалої експлуатації елементів конструкцій за складного навантаження, а також обґрунтовано актуальність та важливість задачі з визначення залишкового ресурсу дороговартісного обладнання. Визначено наукову новизну і практичну цінність.

У першому розділі зроблено аналітичний огляд літератури за темою дисертації. Зокрема наведено короткі відомості та подано загальну характеристику оцінювання напружено-деформованого стану та встановлення залишкового ресурсу роботи елементів конструкцій підданих тривалому складному навантаженню.

Наведено основні концепції та методи визначення характеристик втомної міцності матеріалів, а також зроблено огляд новітніх методів контролю стану матеріалу з використанням оптико-цифрових систем. Зроблено критичний аналіз існуючих підходів до оцінювання міцності та довговічності елементів конструкцій на основі енергетичних критеріїв за складного навантаження і сформульовано мету та завдання роботи.

У другому розділі для визначення міцності та довговічності елементів конструкцій за складного навантаження сформульовано критерій, який базується на енергетичному підході.

Згідно критерію в процесі пружно-пластичного деформування матеріалу нагромаджуються пошкодження в локальному об'ємі. За міру енергетичного пошкодження матеріалу елемента конструкції ω прийнято відношення енергії пружно-пластичного деформування в локальному об'ємі $W(x,y,z)$ матеріалу до її критичної величини W_c , яка є інваріантною характеристикою опірності матеріалу руйнуванню.

$$\omega = W(x,y,z) / W_c \quad (1)$$

Енергія пружно-пластичного деформування в локальному об'ємі за складного навантаження виразиться, як сума енергії пружно-пластичного деформування за розтягу W_σ і зсуву W_τ .

$$W(x,y,z) = W_\sigma(x,y,z) + W_\tau(x,y,z) \quad (2)$$

Руйнування локального об'єму матеріалу елемента конструкції настане в результаті досягнення рівності

$$\omega(x,y,z) = 1 \quad (3)$$

Для моделювання мішаного процесу деформування і руйнування та визначення характеристик міцності матеріалу вибрана силова схема розтягу та кручення циліндра з концентратором на зовнішній поверхні (рис. 1). За розтягу циліндра з концентратором реалізується механізм відриву на основі цих досліджень визначають W_σ ($\sigma_{0,2}$, σ_w , δ , Ψ). У випадку навантаження чистим крученням деформування і руйнування відбувається за механізмом зсуву, а на підставі

результатів випробувань визначають $W_\tau(\tau_{0,3}, \tau_0, \gamma)$.

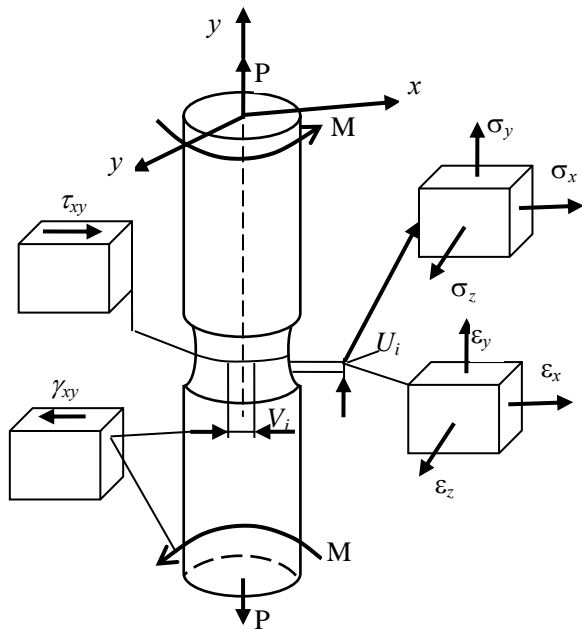


Рис. 1 Силова схема навантаження циліндра зусиллям розтягу P та моментом кручення M (u_i – база вимірювання приросту нормальних переміщень, V_i – база вимірювання зсувних переміщень)

Сумісне навантаження розтягом та крученням формує у вершині концентратора складний напружений стан, який визначається в залежності від співвідношення деформацій розтягу та зсуву. Величину енергії пластичних деформацій за розтягу W_σ і зсуву W_τ визначають наступним чином:

$$W_\sigma = \int_0^e \sigma(x, y, z) de, \quad W_\tau = \int_0^\gamma \tau(x, y, z) d\gamma \quad (4)$$

тут e, γ - деформація розтягу та зсуву, σ, τ - напруження розтягу та зсуву в локальному об'ємі матеріалу.

Розроблено експериментальну методику для визначення питомої енергії руйнування за розтягу циліндричного зразка на основі побудованих повних рівноважених діаграм. Випробування проводили з використанням спеціального пристосування (рис. 2), яке забезпечує контрольоване жорстке фіксоване переміщення зразка та рівномірне пошкодження, підростання тріщини без спонтанного руйнування. При навантаженні здійснювали реєстрацію переміщення в локальному об'ємі металу методом цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) та визначали величину деформацій.

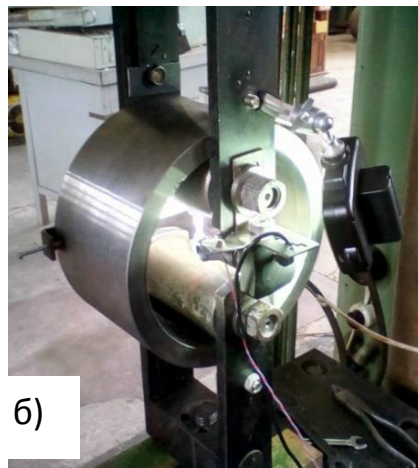
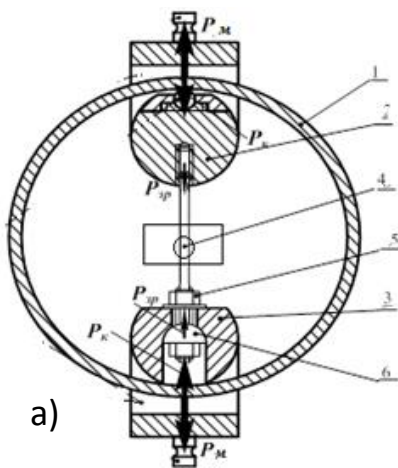


Рис. 2 Пристрій для жорсткого навантаження зразків на розривній машині а) – схема, б) – конструкція:

1– кільце, 2,3 – захоплювачі, 4- камера, 5– зразок, 6 – сферична гайка.

Складові деформацій в напрямку осі x - ϵ_{xx} та в напрямку осі y - ϵ_{yy} обчислюють за

закладеним алгоритмом програмного забезпечення (ПЗ) формулами та показано на рис. 3.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right], \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (5)$$

Цифрова камера SMP забезпечує на ділянці поверхні 326,4x244,8 мм точність вимірювання 1 мкм.

Для достовірної оцінки деформаційного стану поверхні елементів конструкцій встановлено умови для оптимального розміру бази вимірювання переміщень. Умовою вибору бази є збіг деформацій за різних величин переміщень впродовж цього проміжку. Таким чином, для сталі 20 оптимальною є база 0,5 мм, яка забезпечує інваріантність визначених деформацій (рис.4).

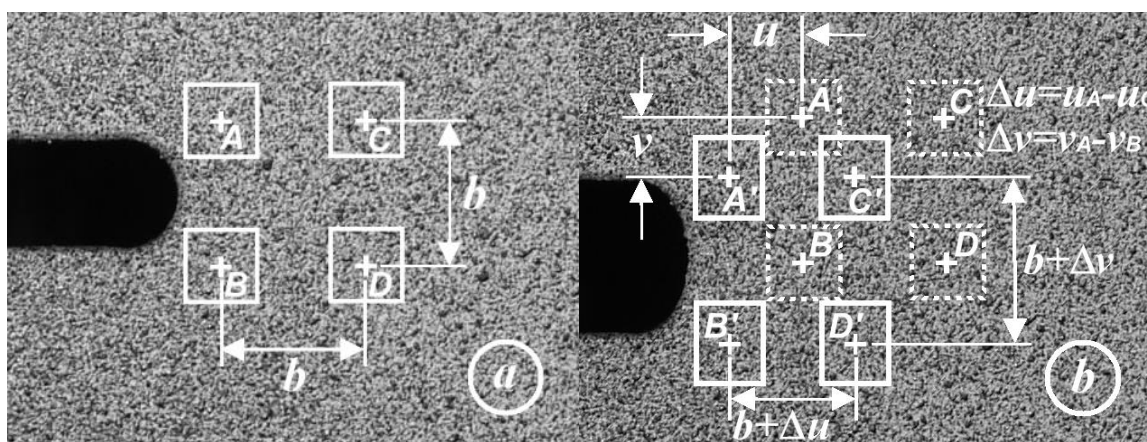


Рис. 3 Схема визначення переміщень та розрахунку деформацій методом ЦКЗ: *a* – вихідний знімок, *b* – zdeформована поверхня.

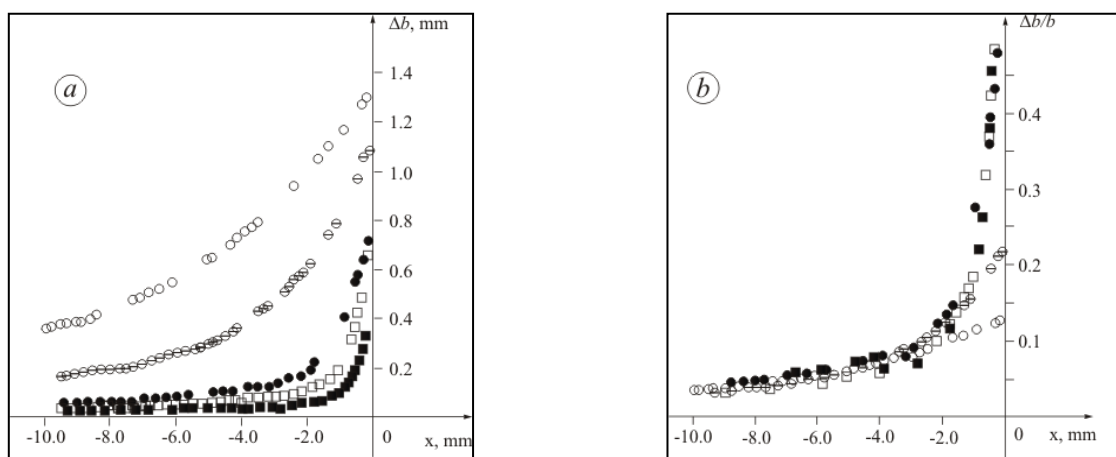


Рис.4 Розподіл переміщень (*a*) та деформацій (*b*) перед вершиною концентратора для різних баз вимірювання: точки відповідають результатам на певних довжинах баз (○ – 10.2 mm, ⊙ – 4.0 mm, ● – 1.5 mm, □ – 1.0 mm, ■ – 0.5mm)

Величину істинних (реальних) напружень визначали за розтягу циліндричного зразка Бріджмена із сталі 65Г діаметру D_n на основі повної рівноважної діаграми

(рис.5а) та які будували за різних величин деформацій, а також розподілу внутрішньо утвореної D_c . Величину діаметра внутрішньої тріщини D_c у зразку (рис.6) визначали шляхом зрізу металу до центру в області максимальної деформації. Замірявши мікроскопом діаметр перетину та утвореної тріщини встановлювали реальну площу поперечного перерізу зразка F_i та визначали істинні напруження S_i . В результаті цього будували діаграму «істинні напруження S_i – істинна деформація e_i »

Величина істинної деформації e для сталі 65 встановленої методом ЦКЗ є більшою у 2,1 раза за відносну деформацію E , визначену за стандартами. Істинні напруження для сталі 65Г на 38% перевищують стандартні значення.

Величину енергії руйнування визначали за формулою

$$W_\sigma = \int_0^{e_{ic}} S_i(\epsilon e_i) de \quad (6)$$

На рис.5б наведено діаграму руйнування для сталі 65Г, яка побудована за розробленою методикою та порівняно з діаграмою встановленою за стандартом.

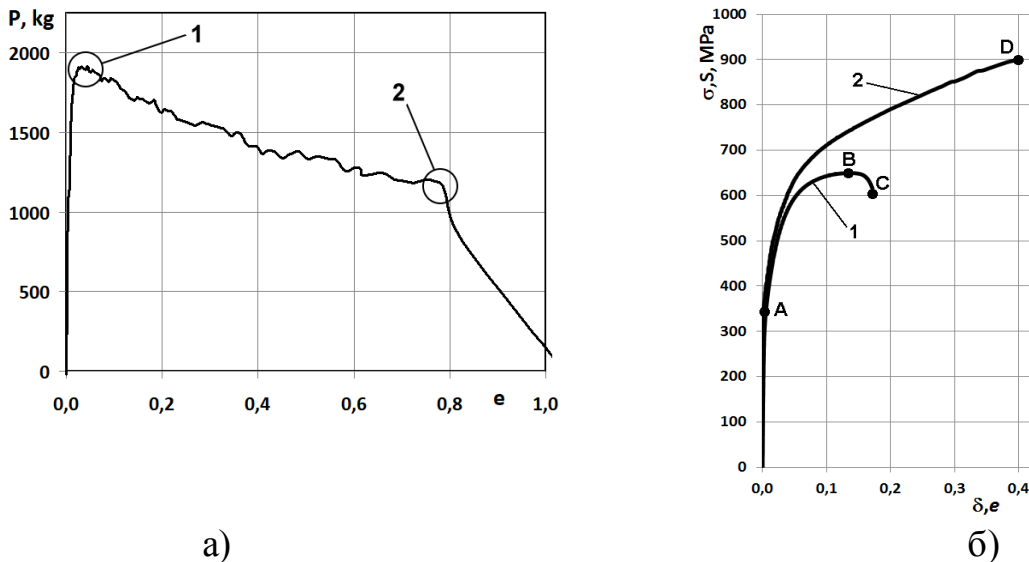


Рис. 5 Діаграма для сталі 65Г а) рівноважна; б) істинна. (1– за стандартом; 2 – методом ЦКЗ)

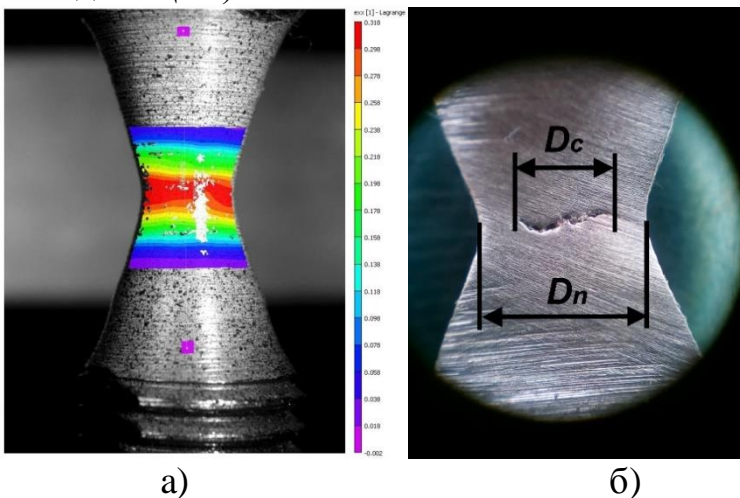


Рис. 6 Розподіл деформації у робочій зоні зразка, одержаний методом ЦКЗ (а) та вимірювання розміру внутрішньої тріщини у шийці зразка (б).

Для зручності обчислень експериментально побудовану діаграму деформування апроксимують степеневою функцією

$$S(e) = m \cdot e^n \quad (7)$$

де S – істинні напруження,

e - істинна деформація.

Для сталі 65Г коефіцієнт m рівний 1085, а $n=4$.

Розроблена методика з визначення енергії деформування за зсуву включає випробування за силовою схемою кручення циліндричного зразка (рис. 7) з концентратором напружень. В процесі навантаження реєструють момент кручення M та відносний зсуву поверхонь V з використанням методу ЦКЗ. Почергово партію зразків закручують на установці (рис.8) до різних ступенів деформування. Після цього руйнують відповідні партії зразків за силовою схемою три точкового згину в результаті отримують злами зразків з тріщинами різних розмірів та визначають величину руйнівних напружень τ_{ci} за формулою

$$\tau_{ci} = \frac{16M_{ci}}{\pi d_i^3} \quad (8)$$

де M_{ci} – момент кручення; d_i – діаметр перехийка. На основі цих результатів будують діаграму руйнування за кручення «істинні напруження τ_i – істинна деформація γ_i ». Із діаграми визначали питому енергію руйнування, як площу, що обмежена кривою та віссю деформацій.

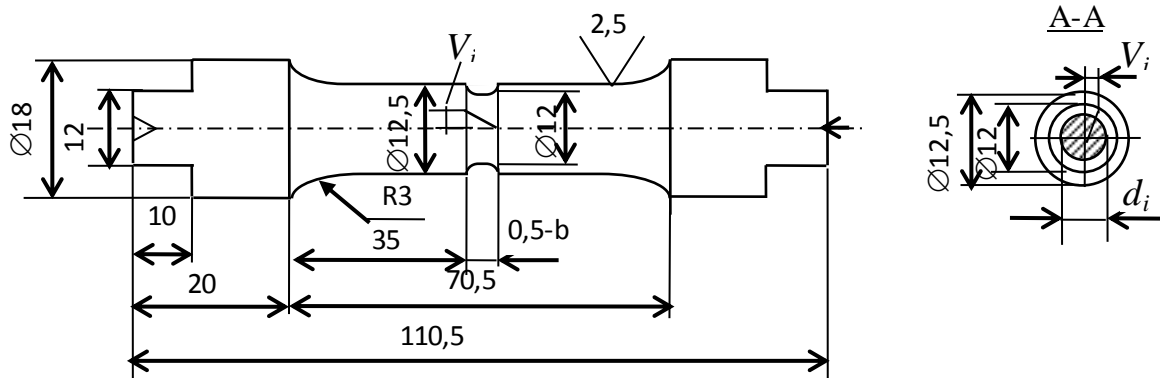


Рис.7 Зразок для визначення характеристик матеріалу за зсуву



Рис. 8 Випробувальна установка для розтягу і кручення циліндричних зразків

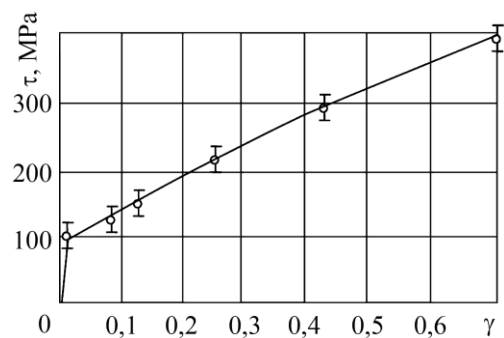


Рис. 9 Діаграма «істинні напруження τ – істинна деформація γ » за кручення циліндричних зразків.

$$W = 425,3 \text{ MPa} = 425,3 \text{ Mj/m}^3.$$

Повну енергію руйнування W_τ пружної і пружно-пластичної складових визначали за формулою:

$$W_{\tau} = W_{\tau_1} + W_{\tau_2} = \int_0^{\gamma_{0,3}} \tau_1(\gamma) d\gamma + \int_{\gamma_{0,3}}^{\gamma_c} \tau_2(\gamma) d\gamma = \frac{1}{2} G \gamma_{0,3}^2 + \frac{G_{0,3}}{\gamma_{0,3}^n} \frac{\gamma_c^{n+1} - \gamma_{0,3}^{n+1}}{n+1} \quad (9)$$

де $\tau_1 = G \cdot \gamma$ - зсувні напруження за пружної деформації;

G - модуль зсуву;

$\tau_{0,3}$ - напруження текучості зсуву;

$n=0,216$ - коефіцієнт для сталі 20 ГС.

Енергія руйнування для сталі 20ГС за зсуву $W_{\tau} = 425,3 \text{ МПа} = 425,3 \text{ Мдж/м}^3$.

Для оцінки стану матеріалу в елементі конструкції після тривалої експлуатації та визначення залишкового ресурсу в роботі проведені дослідження, які базуються на встановленні зміни швидкості ультразвукової хвилі в залежності від ступеня пошкодження. Експериментальні дослідження проводили на плоских зразках шляхом встановлення зміни швидкості поширення поздовжньої хвилі від величини деформації, яка показана на рис. 10.

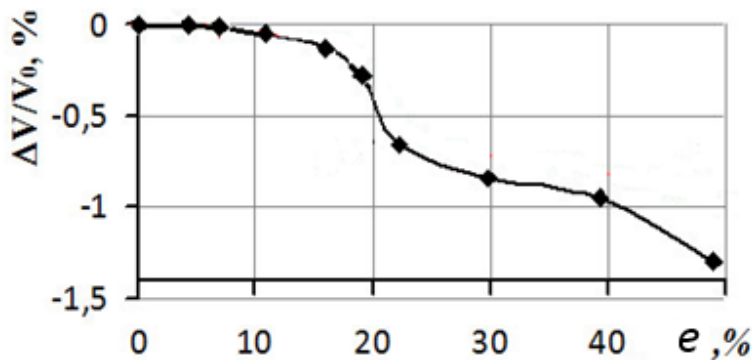


Рис. 10 Залежність швидкості поширення акустичної хвилі від деформації.

Встановлено зв'язок між зменшенням швидкості ультразвукової хвилі при зростанні величини пластичної деформації $e_{пл}$

$$e_n(\Delta V) = \left[a_1 + b_1 \left(\frac{\Delta V^{-1} - a_2}{b_2} \right)^{\frac{c_1}{c_2}} \right]^{-1} \quad (10)$$

Для сталі 20 ГС встановлені коефіцієнти $a_1 =$; $b_1 =$; $a_2 =$; $b_2 =$; $c_1 =$; $c_2 =$

У третьому розділі розроблено методологію для визначення робочого тиску в паливному баку ракети носія. Для цього МСЕ розраховують НДС та встановлюють область поверхні бака, де напруження і деформації максимальні. Проводять лабораторні дослідження на плоских зразках з концентратором та шпрингелем. За результатами випробувань будують рівноважні діаграми та визначають істинні деформації на оптимальній базі 0,2 мм вимірювання видовження для сплаву АМГ-6. Будують істинні діаграми руйнування на основі визначених істинних напружень з врахуванням зміни площі поперечного перерізу. Проводять розрахунок питомої енергії руйнування сплаву АМГ-6 на основі істинної діаграми руйнування. Встановлюють оптико-цифрову систему на поверхні стінки паливного бака в області максимальних деформацій, що встановлені МСЕ. Навантажують бак внутрішнім тиском $p=0,5 p_*$, (p_* – критичний тиск). Визначають розподіл деформацій методом ЦКЗ та встановлюють локальні на базі 0,2 мм. З істинної діаграми руйнування визначають величину напружень і розраховують енергію деформування. На основі встановленої залежності зміни енергії деформування від величини робочого тиску, яку побудовано при випробуванні макету, прогнозують

максимальний робочий тиск з врахуванням коефіцієнта запасу міцності.

На основі результатів випробувань плоских зразків на розтяг встановлено, що величина пластичної складової деформації ϵ визначена за стандартним методом менша у 2 рази за величину локальної деформації e , встановлену методом ЦКЗ. Деформація зразків з гострим надрізом встановленої на базі $\leq 0,2$ мм стає рівною величині, яка визначена на тій же базі при розтягу суцільного непошкодженого зразка, що підтверджує її інваріантність.

Побудовано істинну діаграму руйнування в координатах « S - e » (рис. 11), та показано, що визначені характеристики з діаграми є близькими до значень, які встановлені з врахуванням пластичного деформування та зміною поперечного перерізу зразка.

Результати експериментальних досліджень отримані за одновісного розтягу з використанням методу ЦКЗ за стандартним та локальними підходами наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Механічні характеристики за стандартним і локальним підходами.

Характеристики міцності Спосіб розрахунку	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	ϵ_4 , %	Ψ , %	S , МПа	e , %	W_c , мДж/м ³
За стандартом	155	315	15	-	-	-	-
Поперек	200	360	15	21,8	435	24,6	176
Вздовж	210	365	13,8	18,6	445	20,7	160

На основі даних експериментальних досліджень побудовано діаграму руйнування сплаву АМГ-6 в координатах « S - e », яка встановлює взаємозв'язок напружень та деформацій на всьому проміжку пружного і пружно-пластичного деформування аж до руйнування (рис. 11).

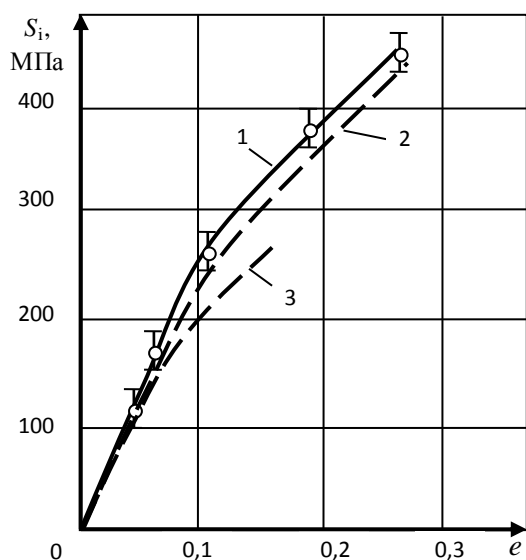


Рис. 11 Діаграма деформування
1 – істинна « S - e »,
2 – врахування локальної деформації в шийці зразка, 3 – за стандартом.

Площа під діаграмою « S - e » виражає величину питомої енергії руйнування, яку необхідно використовувати для оцінювання міцності і несучої здатності елементів конструкцій.

Істинну діаграму руйнування для сплаву АМГ-6 описано функцією

$$S(e) = 715e^{0,27} \quad (11)$$

де $S(e)$ істинні напруження, e – істинна деформація.

Величину енергії руйнування W_c обчислюють за формулою

$$W_c = \int_0^{e_c} 715 \cdot e^{0,27} de \quad (12)$$

Визначено енергію руйнування за силовою схемою двовісного розтягу хрестоподібних зразків та встановлено її незалежність від жорсткості напружено-деформованого стану в околі концентраторів напружень (рис.12). Установа забезпечує двовісне навантаження від незалежних приводів, що забезпечує різну жорсткість напружено-деформованого стану у зразку.

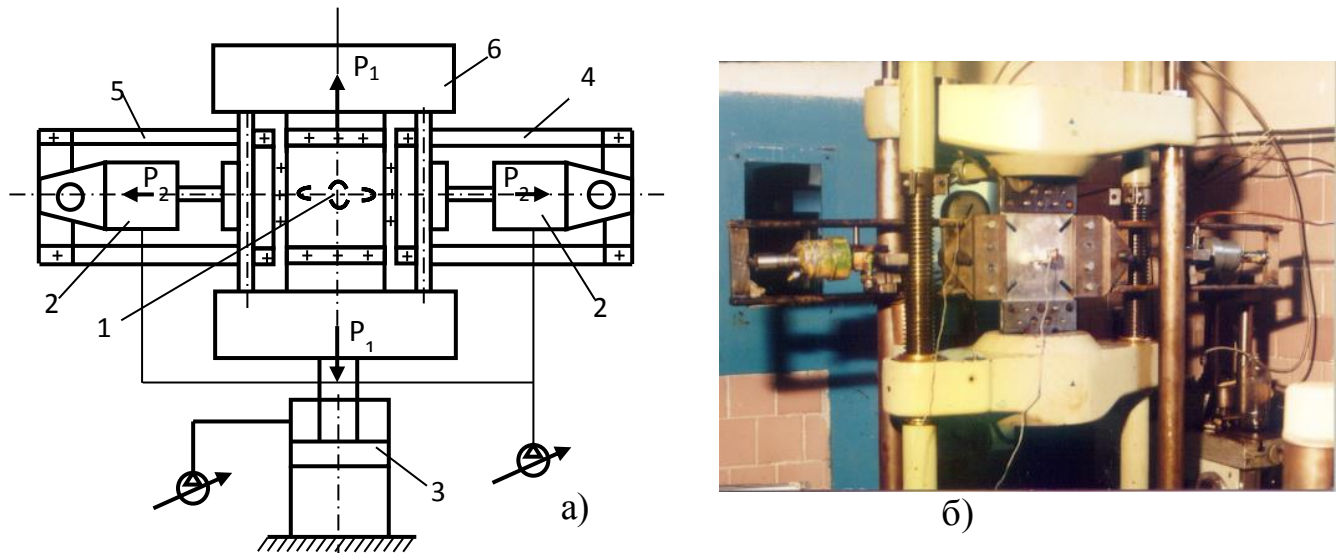


Рис. 12 Схема навантаження хрестоподібного зразка за двовісного розтягу а) та випробувальна установка б)

1- зразок, 2- навантаження зусиллям P_2 , 3- навантаження зусиллям P_1 , 4,5- рама, 6- корпус установки EUS-20.

Величину енергії руйнування W_c визначали, як суму енергії в напрямку осі Ox - W_x і напрямку Oy - W_y . При зміні жорсткості напруженого стану складові енергії W_x і W_y змінюється (рис.13).

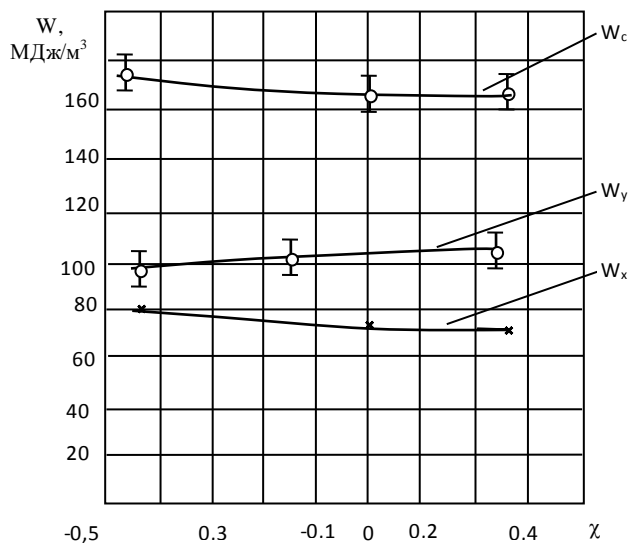
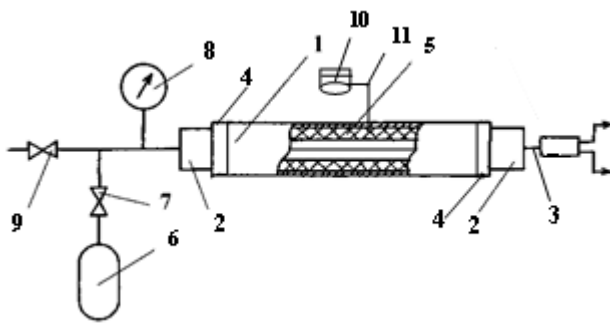


Рис. 13 Залежність питомої енергії руйнування W_c сплаву АМГ-6 в залежності від жорсткості напруженого стану.

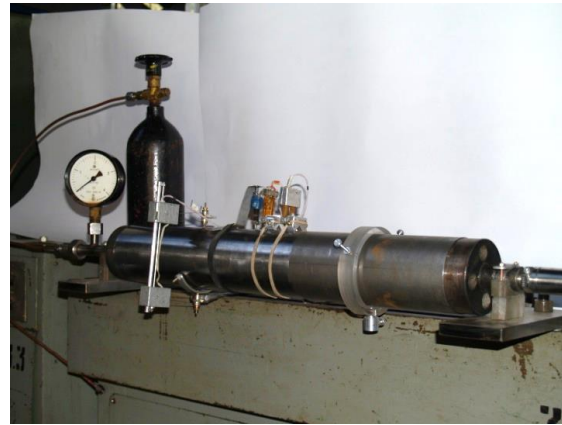
При збільшенні жорсткості навантаження, тобто $0 < \chi < 0,5$, зменшується площа зони інтенсивних пластичних деформацій.

При цьому зменшення жорсткості навантаження знижує міцнісні характеристики матеріалу S та збільшує деформаційні e .

Для верифікації підходу щодо визначення напружено-деформованого стану та встановлення допустимого робочого тиску проведені дослідження на трубчастому зварному макеті із сталі Ст3 з використанням методу ЦКЗ (рис.14).



а)



б)

Рис. 14 Установка для натурних випробувань макету: а) схема; б) конструкція
 1 – труба, 2 – фланець, 3 – болт, 4 – ущільнення, 5 – рукав, 6 – балон, 7 –
 вентиль, 8 – манометр, 9 – вентиль.

Для сталі Ст3 будували істинну діаграму руйнування та встановлено значення питомої енергії руйнування W_c . При навантаженні макету внутрішнім тиском P методом ЦКЗ реєстрували переміщення в околі концентратора і визначали деформацію. В результаті встановлено, що залежність енергії руйнування W_c від тиску P є подібною до істинної діаграми руйнування. Залежність зміни внутрішнього тиску у макеті труби p в залежності від енергії деформування W можна описати степеневою функцією

$$p(W) = m W^{1/n} \quad (13)$$

де p – внутрішній стиск у трубі; m, n - коефіцієнти, які є характеристиками матеріалу, що встановлені при випробуванні зразків із сталі Ст.3 (рис. 15).

На основі такого підходу проведено дослідження та прогнозування допустимого робочого тиску в паливному баку ракети носія «Циклон-4» третього ступеня, виготовленого із сплаву АМГ-6. Згідно з програмою сертифікаційних випробувань реалізовано розроблену методику на ДП «КБ» «Південне».

Вимірювання переміщень поверхні паливного бака проводили на ділянці, де є максимальні розрахункові напруження (рис. 16). Навантаження паливного бака здійснювали збільшенням тиску поетапно і на кожному з них реєстрували переміщення і цифрові зображення.

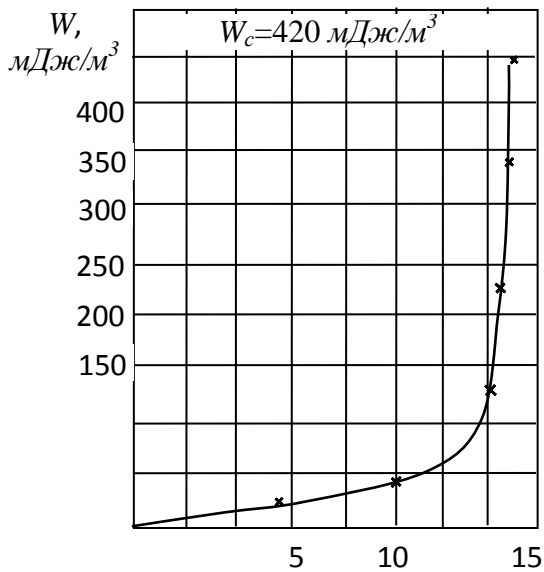


Рис. 15 Зміна енергії деформування трубчатого макету від величини внутрішнього тиску.

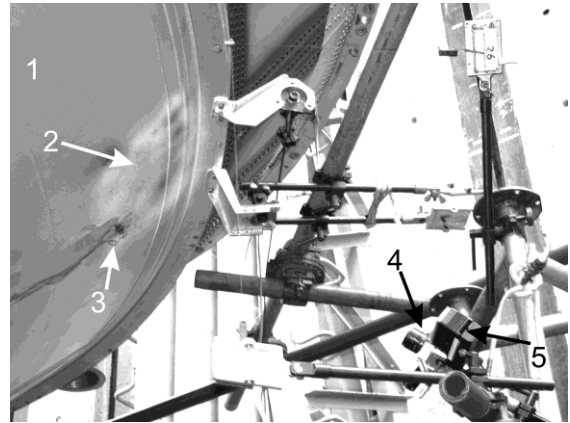


Рис. 16 Фото ОЦС закріпленої на стійці біля паливного баку 1- паливний бак, 2 - контрольована ділянка, 3 – тензоперетворювач, 4 - відеокамера, 5 - світлодіодний освітлювач.

Програмними засобами обробляли цифрові зображення та визначали поздовжні e_y і поперечні e_x деформації. Визначені деформації при навантаженні і розвантаженні методом ЦКЗ подано на рис. 17.

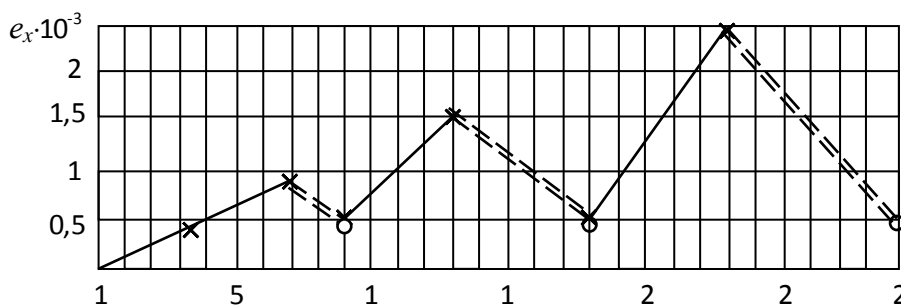


Рис. 17 Зміна локальних деформацій e_x в точці С на поверхні бака під час випробувань
x- навантаження (суцільна);
o- розвантаження (штрихова)

За величиною деформацій ϵ_x і ϵ_y із істинної діаграми руйнування (рис. 18) визначали величину істинних напружень для сплаву АМГ-6 у найбільш навантаженій точці, яку встановили розрахунковим методом. За формулою (13) розраховували величину енергії руйнування сплаву АМГ-6, яка рівна 178 МДж/м^3 . В результаті будували залежність «енергія деформування W – тиск в баку р».

Криволінійну ділянку діаграми до граничного тиску описували функцією аналогічно, як і для істинної діаграми руйнування сплаву АМГ-6. Точка перетину кривої із значенням енергії руйнування відповідає максимальному значенню тиску для даної конструкції бака (рис 19).

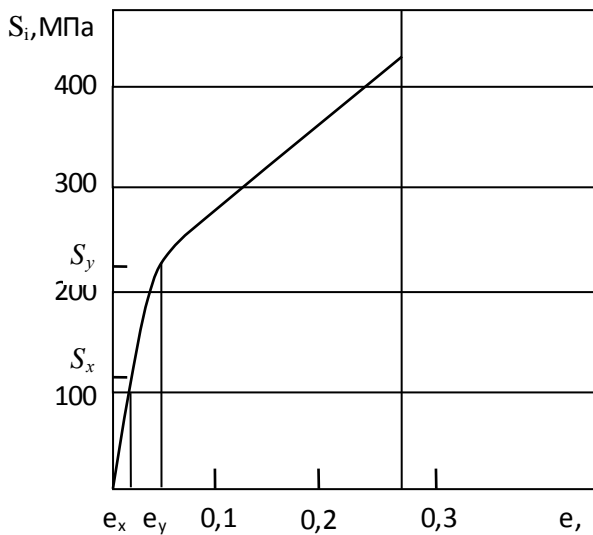


Рис. 18 Визначення локальних напружень S_y і S_x в точці С для сплаву АМГ-6 за даними локальних деформацій e_y і e_x із істинної діаграми

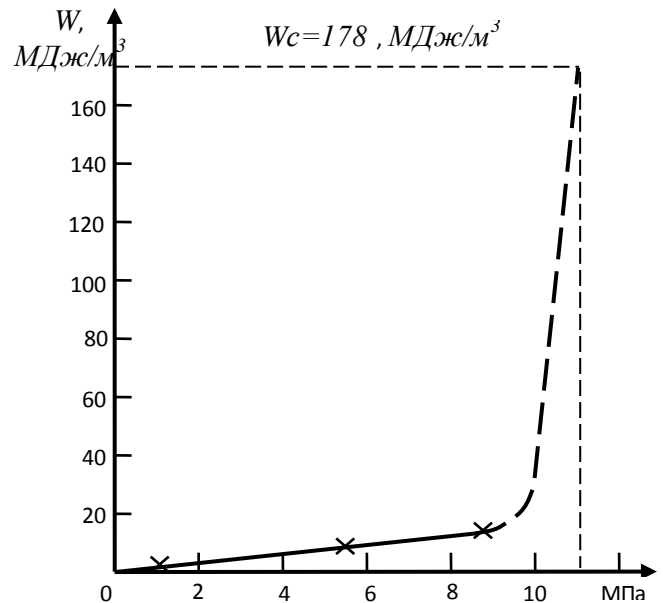


Рис. 19 Зміна енергії деформування в паливному баку x - експериментальні дані ЦКЗ – розрахунок.

У четвертому розділі з використанням методу скінченних елементів проведено моделювання та розраховано напружено-деформований стан валу гідротурбіни Київської ГАЕС. Вал навантажений осьовим зусиллям та вагою робочого колеса, згинним та крутним моментами. Результуюча скінчено-елементна модель вала становила 30103 вузли, та 17518 елементів тетраїдноподібної форми. Розраховано напружено-деформований стан, розподіл еквівалентних напружень (рис. 20) та деформацій (рис. 21).

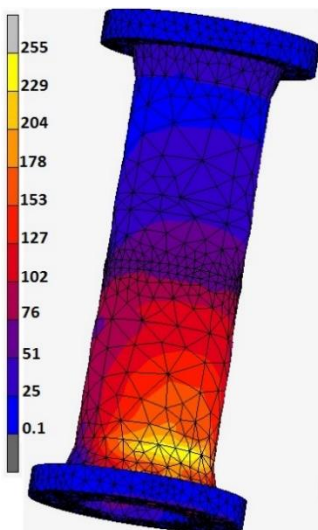


Рис. 20 Розподіл еквівалентних максимальних напружень в кінці навантаження.

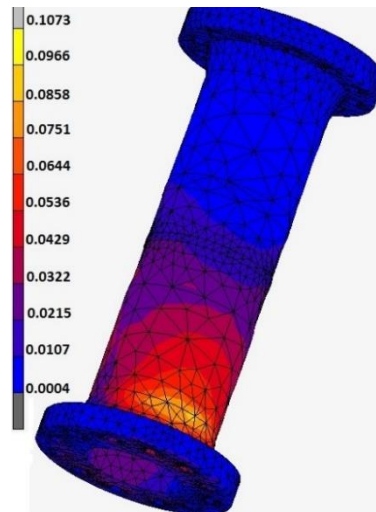


Рис. 21 Розподіл загальних еквівалентних максимальних деформацій в кінці навантаження.

Максимальні напруження та деформації у валі досягають в районі другого підшипника. Ресурс вала гідротурбіни Київської ГАЕС визначено за силовим критерієм з урахуванням зміни втомних характеристик для сталі 20ГС, а також даних про напрацювання агрегатів за період експлуатації, становить $1,5 \times 10^7$ циклів (рис. 22).

Розроблено методику побудови повних діаграм циклічного деформування та

визначено ресурс вала гідротурбіни за енергетичним критерієм. Методика передбачає випробування циліндричних зразків круговим згином та реєстрацією величини деформації методом ЦКЗ, тобто петлі гістерезису за розмахом напружень та деформацій. Величину енергетичних втрат матеріалу за один цикл навантаження визначали, як площу, що обмежена петлею діаграми пружно-пластичного деформування.

Величину напружень, що відповідає зареєстрованій деформації при згині зразка, визначали з допомогою апроксимаційної функції істинної діаграми руйнування для сталі 20ГС (рис. 23).

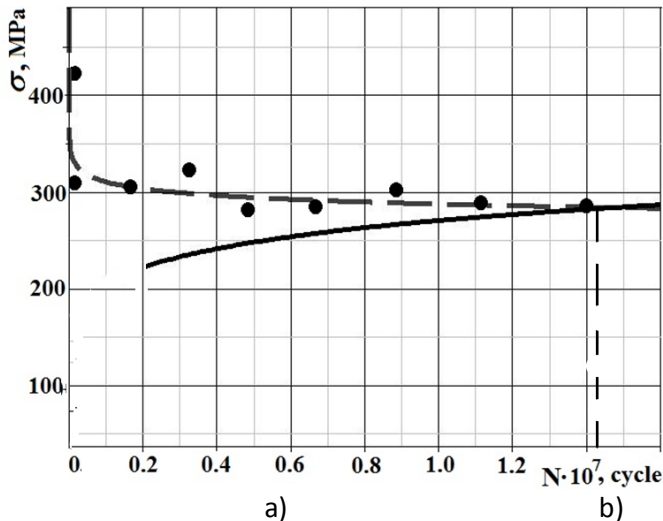


Рис.22 Крива Веллера для сталі 20ГС (точки) та максимальне еквівалентне напруження, яке виникає в найбільш критичній точці вала (суцільна лінія).

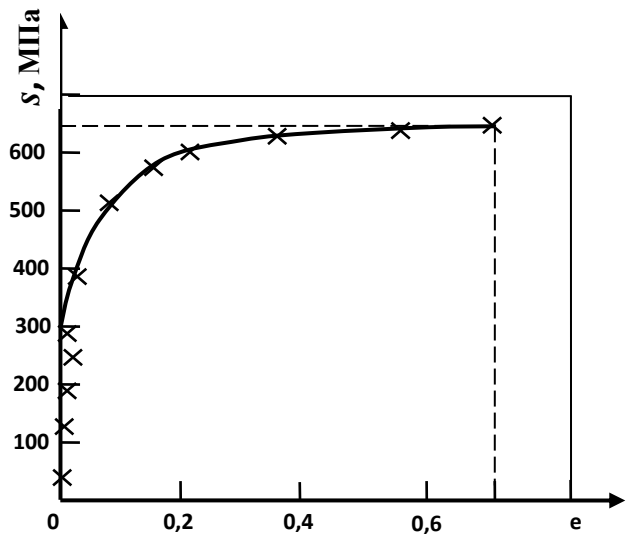


Рис. 23 Істинна діаграма руйнування сталі 20ГС

$$S(e) = A \left(\frac{e_c}{e_t} \right)^n \quad (14)$$

e_c - істинна деформація;

e_t - деформація течіння;

$A=290$ – коефіцієнт для сталі;

$S(e)$ - напруження.

Величину енергії одного циклу навантаження визначали за формулою

$$W_m = 2 \int_{e_{\min}}^{e_{\max}} S(e) de \approx \Delta S_m \cdot \Delta e_m \quad (15)$$

В результаті випробувань побудовано діаграму втомного руйнування для сталі 20 ГС в координатах «енергія циклу W - кількість циклів N » (рис. 24). За енергетичним підходом кількість циклів до руйнування становить $1,8 \cdot 10^7$ циклів.

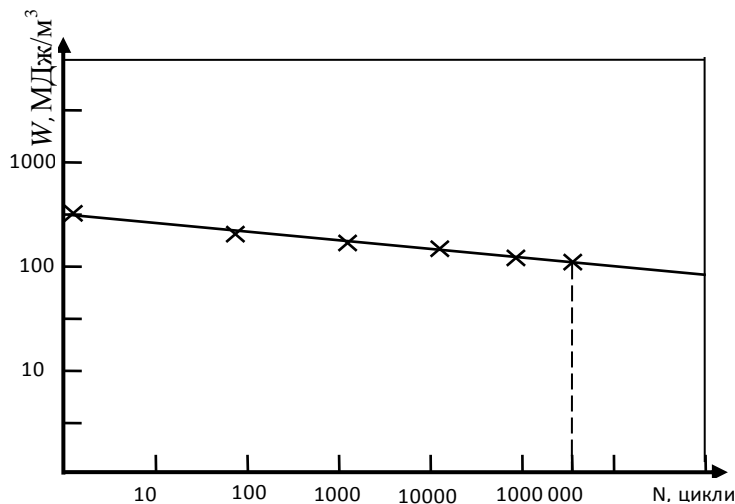


Рис. 24 Діаграма втомного руйнування сталі 20 ГС в координатах «енергія циклу W – кількість циклів N »

ВИСНОВКИ

1. Сформульовано розрахункову модель для визначення міцності і довговічності елементів конструкцій за складного статичного та циклічного навантажень.
2. Розроблено методику та технічні засоби для побудови істинних діаграм руйнування з використанням методу ЦКЗ.
3. Розроблено методику та технічні засоби контролю для визначення питомої енергії руйнування металів, як інваріантної характеристики деформування розривом та зсувом. Величина істинної деформації ϵ для сталі 65 перевищує відносну деформацію у 2,1 рази. Істинні напруження S перевищують границю міцності за стандартами на 38%.
4. Встановлено, що питома енергія руйнування визначена в локальному об'ємі з використанням методу ЦКЗ є незалежною характеристикою опірності руйнуванню сплаву АМГ-6 від жорсткості навантаження. Істинні деформації для сплаву АМГ-6 перевищують стандартні значення на 19%, а істинні напруження на 20%.
5. Розроблено методику та встановлено величини деформацій в стінці паливного бака ракети-носія з використанням методу ЦКЗ при проведенні натурних сертифікаційних випробувань. Побудовано діаграму зміни величини енергії деформування від внутрішнього тиску та встановлено граничну величину тиску в баку. Розроблено алгоритм розрахунку напружено-деформованого стану в стінці паливного бака.
6. Розроблено методику побудови діаграм втомного руйнування металів на основі енергетичного підходу «енергія деформування» – кількість циклів до руйнування».
7. Розраховано МСЕ напружено-деформований стан для вала гідротурбіни Київської ГАЕС та встановлено допустимий ресурс роботи за силовими і енергетичними підходами.
8. Визначено граничну кількість циклів навантаження вала гідротурбіни Київської ГАЕС за силовим та енергетичним підходами. За енергетичним підходом гранична кількість циклів на 28% більша, ніж за силовим.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз даних:

1. Моделювання пружно-пластичного деформування тіла на основі енергетичного балансу та моніторингу деформацій. //Wei Ming, Іваницький Я. Л., Кунь П. С., Шишковський Р. О. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2019. – №.3– С. 50-54. (Modeling of the Elastoplastic Deformation of a Body Based on the Energy Balance and Monitoring of Strains /M. Wei, Ya. L. Ivanyts'kyi, P.S. Kun', R. O. Shyshkovs'kyi// *Materials Science*. 2019. Vol. 55, №3. P. 352–357).
2. Оцінювання міцності болтових з'єднань композитних пластин. /Іваницький Я. Л., Гвоздюк М. М., Максименко О. П., Клиш С., Харченко Є. В., Шишковський Р. О. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2019. – №.2 - С. 116-120. (Evaluation of the Strength of Bolted Joints of Composite Plates. //Ya. L. Ivanyts'kyi, M. M. Hvozdyuk, O.P. Maksymenko, S. Kłysz, E.V. Kharchenko, R.O. Shyshkovs'kyi // *Materials Science*. 2019. Vol. 55, №2. P. 265–271).
3. Experimental Determination of critical Strain Energy density of Ductile Materials/ Y. Molkov, Ya. L. Ivanyts'kyi, T. M. Lenkovs'kyi, A Trostianchyn. V. Kulyk, R.O. Shyshkovs'kyi// *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science* – 2019. Vol.5, №1. P. 39-44.
4. Шишковський Р.О. Визначення питомої енергії руйнування матеріалу за зсувної деформації// Фіз. - хім. механіка матеріалів.- 2020.- №2.- С.21-25. (Determination of the Specific Fracture Energy of the Material under Shear Deformation. // R.O. Shyshkovs'kyi // *Materials Science*. 2020. Vol. 56, №2. P. 160–165).
5. Розрахунок міцності металів та експериментальна апробація підходу. //Гануліч Б.К., Іваницький Я.Л., Кунь П.С., Шишковський Р.О., Бойко В.М. // Фіз. - хім. механіка матеріалів.- 2020.- №4.- С.19-25. (Evaluation of the Theoretical Strength of Metals and Experimental Verification //B. K. Ganulich, Ya. L. Ivanytskyi, V. M. Boiko, R. O. Shyshkovskyi // *Materials Science*. 2020. Vol. 56, №2. P. 454–460).

Статті у збірниках матеріалів конференцій

1. Прогнозування робочого тиску у паливному баку/ Я.Л. Іваницький, В.М. Сіренко, О.П. Максименко, Д.В. Клименко, Р.О. Шишковський// Науково-практична конференція ДП «КБ «Південне» Сучасні розрахунково експериментальні методи визначення характеристик ракетно-космічної техніки, Дніпро, 10-12 грудня 2019 р. С. 58.
2. Експериментальне визначення розподілу напружень у багатошаровому болтовому з'єднанні композит-метал / Я.Л. Іваницький, О.П. Максименко, Д.В. Клименко, М.М. Гвоздюк, Р.О. Шишковський // Науково-практична конференція ДП «КБ «Південне» Сучасні розрахунково експериментальні методи визначення характеристик ракетно-космічної техніки, Дніпро, 10-12 грудня 2019 р. С.46.

3. Встановлення безпечного ресурсу роботи елементів літальних апаратів та технічні засоби контролю / Я.Л. Іваницький, О.П. Максименко, М.М. Гвоздюк, Р.О. Шишковський// Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки» Київ, 10 жовтня, 2019. С.58-59.
4. Оцінювання безпечного ресурсу елементів конструкцій військової техніки та технічні засоби контролю/ Я.Л. Іваницький, П.С. Кунь, Р.О. Шишковський// Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ. Тези доповід. Міжн. наук.-технічної конференції.- Львів. Національна академія сухопутних військ ім. П. Сагайдачного. 2020.

АНОТАЦІЯ

Шишковський Р. О. Оцінювання міцності і довговічності елементів конструкцій в умовах складного навантаження за енергетичним підходом. – на правах рукопису.

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, 2021.

Дисертаційна робота присвячена проблемі визначення міцності і довговічності елементів конструкцій за складного навантаження, формулюванню методології оцінки їх ресурсу роботи на основі енергетичного критерію.

На основі балансу енергії пружно-пластичного деформування та енергетичних втрат, які ідуть на руйнування в локальному об'ємі матеріалу розроблено енергетичний критерій для визначення гранично-рівноважного стану тіла навантаженого розтягом і зсувом.

При досягненні енергією пружно-пластичного деформування енергії руйнування матеріалу відбувається розділення тіла на фрагменти. Розроблено методіку для визначення питомої енергії руйнування матеріалу за розтягу циліндричного зразка і побудові повних рівноважних діаграм деформування з використанням спеціального пристрою за жорсткої схеми навантаження і реєстрації деформації методом ЦКЗ в локальному об'ємі.

Проведено дослідження, побудовано діаграми деформування, визначено істинні напруження і деформації, а також питому енергію руйнування для сплаву АМГ-6. Встановлено, що питома енергія є інваріантною величиною опірності матеріалу руйнуванню і не залежить від жорсткості зовнішнього навантаження.

За розробленим підходом і сертифікаційних випробувань на ДП «КБ «Південне» встановлено граничний робочий тиск у паливному баку ракети-носія.

Проведено розрахунок напружено-деформованого стану МСЕ вала гідротурбіни та встановлено ресурс роботи з використанням силового підходу. Проведено експериментальні дослідження та побудовано діаграми втомного руйнування для сталі 20ГС в координатах «питома енергія одного циклу W – кількість циклів N » на основі якої визначено довговічність валу гідротурбіни Київської ГАЕС.

Ключові слова: *складне навантаження, локальна деформація, метод ЦКЗ, питома енергія руйнування.*

АННОТАЦІЯ

Шышковский Р.О. Оценка прочности и долговечности элементов конструкций в условиях сложного нагружения за энергетическим подходом – на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04– механика деформированного твердого тела. Тернопольский национальный технический университет им. Ивана Пулюя Министерство образования Украины, Тернополь, 2021.

Диссертационная работа посвящена проблеме определения прочности и долговечности элементов конструкций при сложном нагружении, формулированию методологии оценивания их ресурса работы на основе энергетического критерия.

На основании баланса энергии упруго-пластического деформирования и энергетических потерь, идущих на разрушение в локальном объеме материала разработан энергетический критерий для определения предельно-равновешаного состояния тела нагруженного растяжением и сдвигом.

При достижении энергией упругопластического деформирования энергии разрушения материала происходит разделение тела на фрагменты. Разработано методика для определения удельной энергии разрушения материала при растяжении цилиндрического образца и построении полных равновесных диаграмм деформирования с использованием специального устройства за жесткой схемы нагружения и регистрации деформации методом ЦКЗ в локальном объеме.

Разработано методика определения энергии разрушения при сдвиге путем кручения цилиндрического образца.

Проведены исследования, построены полные диаграммы деформирования, определены истинные напряжения и деформации, а также удельная энергия разрушения сплава АМГ-6. Установлено, что удельная энергия является инвариантной величиной сопротивления материала разрушению и не зависит от жесткости внешнего нагружения. На основании разработанного подхода и сертификационных испытаний на ГП «КБ «Южное» установлено предельное рабочее давление в топливном баке ракеты-носителя.

Проведено расчет напряженно-деформированного состояния МКЕ вала гидротурбины и установлено ресурс работы с использованием силового подхода. Проведено экспериментальные исследования и построены диаграммы усталостного разрушения для стали 20ГС в координатах «удельная энергия одного цикла W-количество циклов N» на основании которой определена долговечность вала гидротурбины Киевской ГАЭС.

Ключевые слова: *сложное нагружение, локальная деформация, метод ЦКЗ, удельная энергия разрушения.*

ANNOTATION

Shyshkovskiy R.O. Evaluation of strength and life time of structural elements under complex loading using the energy approach – a qualifying scientific paper on the rights of the manuscript.

Thesis for gaining a Degree of Candidate of Sciences (Technology) in Speciality 01.02.04 – mechanics deformable solid – Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Ternopil, 2021.

The thesis is devoted to the analysis of the present state of the problem of strength and durability of structural elements under complex loading, the results of theoretical and experimental researches are analyzed. According to the results of the analysis and experimental data, a methodology for determining the strength and durability of structural elements based on the energy criterion is formulated. On the basis of the balance of elastic-plastic deformation and energy losses spent on fracture in the local volume of material, the energy criterion is developed to determine the boundary-equilibrium state of a body under tensile and shear loading. According to the criterion, damages in the local volume are accumulated under elastic-plastic deformation in a solid body.

When energy of elastic-plastic deformation reaches the energy of material fracture, the body is split into fragments, in the case of complex loading the energy of elastic-plastic deformation is given as the sum of elastic-plastic deformation under tension and shear. The method is developed to determine the specific energy of material fracture by tension of a cylindrical specimen and construction of complete equilibrium diagrams using a special device under rigid mode of loading. The true deformation is determined using the digital image correlation method (DIC) in the local area where a homogeneous stress-strain state is achieved.

The value of the true stresses is determined and the diagrams on the basis of which the specific energy of fracture, taking into account internal damages (defects) in the sample deformation are constructed. The DIC method is based on operations on speckle images of the optically rough surface and software processing of a number of digital images recorded during loading to track the movement of the points of the sample deformable surface and to calculate deformations.

The method for determining the specific energy of shear fracture, based on a force chart of cylindrical specimen torsion, is developed. The method is developed and researches have been carried out on specimens of different degree of deformation by passing acoustic wave and the dependence of the wave propagation speed on the damage magnitude is constructed. It is established that the density of the material in the fracture zone decreases with the change in the wave propagation speed.

Investigations are carried out, complete deformation diagrams are constructed, the true stresses and the specific fracture energy for the AMG-6 alloy are determined. On the basis of strength characteristics the stress-strain state is established in the wall of the carrier-rocket fuel tank. It is established that the specific fracture energy is invariant value and does not depend on changes in the external load rigidity. According to the developed approach and the program of certification tests at SE "Pivdenne" DB, the developed methodology has been implemented and the maximum working pressure in the fuel tank of the carrier-rocket is calculated. Using the finite element method, the simulation is performed and the stress-strain state of the turbine shaft is calculated. The turbine shaft is loaded with torque and bending moment, as well as the tensile force. Experimental studies are conducted for the shaft material and the specific energy for tensile and torsion is determined.

Considering that the shaft operates under cyclic loads, the change in energy losses of the material in one load cycle is estimated. The dependence of the change in the magnitude of the deformation energy in one cycle on the number of load cycles is constructed. According to the results of the studies, the life time of the turbine shaft is calculated.

Key words: *complex loading, local deformation, method of digital image correlation, specific fracture energy.*