

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»

Кваліфікаційна
наукова праця на
правах рукопису

Шишковський Роман Олегович

УДК 539.4

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

Спеціальність 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
Р.О. Шишковський

Науковий керівник Іваницький Ярослав Лаврентійович, доктор технічних наук, професор

Львів -2020

Анотація

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

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла. – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України Львів, 2020.

Перший розділ Дисертаційна робота присвячена аналізу сучасного стану проблеми міцності і довговічності елементів конструкцій за складного навантаження, проаналізовано результати теоретичних і експериментальних досліджень. За результатами аналізу та даними експериментальних досліджень сформульовано методологію визначення міцності і довговічності елементів конструкцій на основі енергетичного критерію.

У другому розділі на основі балансу пружно-пластичного деформування і енергетичних затрат, які ідуть на руйнування в локальному об'ємі матеріалу розроблено енергетичний критерій для визначення гранично-рівноважного стану тіла навантаженого розтягом та зсувом. Згідно критерію в процесі пружно-пластичного деформування у твердому тілі нагромаджуються пошкодження у локальному об'ємі. При досягненні енергією пружно-пластичного деформування енергії руйнування матеріалу відбувається розподіл тіла на фрагменти у випадку складного навантаження енергію пружно-пластичного деформування подано як суму пружнопластичного деформування за розтягу та зсуву. Розроблено методику для визначення питомої енергії руйнування матеріалу за розтягу циліндричного зразка та побудові повних рівноважних діаграм з використання спеціального пристрою за жорсткої схеми

навантаження. Істинну деформацію визначають з використанням методу цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) в локальній області де досягнуто однорідний напружено-деформований стан. Визначено величину істинних напружень та побудову діаграм на основі яких визначають питому енергію руйнування з врахуванням внутрішніх пошкоджень (дефектів) при деформуванні зразка.

В основу методу ЦКЗ покладено операції над спекл-картинами оптично шорсткої поверхні та програмну обробку низки цифрових зображень, які зареєстровані в процесі навантаження для відстежування переміщень точок деформівної поверхні зразка і розрахунку деформацій.

Розроблено методику з визначення питомої енергії руйнування за зсуву, в основу якої покладено силову схему кручення циліндричного зразка. Розроблено методику та проведено дослідження на зразках різного ступеня деформування шляхом пропускання акустичної хвилі та побудовано залежність швидкості проходження хвилі від величини пошкодження. Встановлено, що густина матеріалу в зоні руйнування знижується із зміною швидкості проходження хвилі.

У третьому розділі проведено дослідження, побудовано повні діаграми деформування, визначено істинні напруження та питому енергію руйнування для сплаву АМГ-6. На підставі характеристик міцності встановлено напружено-деформований стан у стінці паливного бака ракети носія. Встановлено, що питома енергія руйнування є інваріантною величиною і не залежить від змін жорсткості зовнішнього навантаження. За розробленим підходом та програмою сертифікаційних випробувань на ДП «КБ» «Південне» реалізовано розроблену методику і розраховано максимальний робочий тиск в паливному баку ракети-носія.

У четвертому розділі з використанням методу скінченних елементів проведено моделювання та розраховано напружено-деформований стан валу турбіни. Вал турбіни навантажений крутячим і згинним моментом, а також

зусиллям розтягу. Для матеріалу вала проведено експериментальні дослідження і визначено питому енергію за розтягу та кручення.

Враховуючи, що вал працює за циклічних навантажень оцінено зміну енергетичних втрат матеріалу за один цикл навантаження. Побудовано залежність зміни величини енергії деформування за один цикл від кількості циклів навантаження. За результатами проведених досліджень розраховано довговічність валу гідротурбіни.

Abstract

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.

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

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

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 first chapter. 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.

In the second chapter, 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.

In the third chapter, 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.

In the fourth chapter 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.

Список публікацій здобувача

1. 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. 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. 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. 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

6. 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.
7. 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.
8. 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.

9. 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. С.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	12
РОЗДІЛ 1. ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ І ДОВГОВІЧНОСТІ	
ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ СКЛАДНОГО	
НАВАНТАЖЕННЯ ЗА ЕНЕРГЕТИЧНИМ ПІДХОДОМ.....	
1.1. Аналітичний огляд підходів до оцінки міцності і довговічності елементів конструкцій.....	14
1.2. Методики для визначення характеристик втомної міцності матеріалів.....	19
1.3. Методи оцінювання напружено-деформованого стану обладнання гідроелектростанцій.....	21
1.4. Оцінювання витривалості елементів конструкцій на основі енергетичних критеріїв.....	23
.	
1.4.1. Енергетичні критерії втомного руйнування при мішаних механізмах навантаження.....	27
1.5. Сучасні підходи до оцінювання напружено-деформованого стану та залишкового ресурсу конструкцій.....	35
1.6. Висновки до розділу та формулювання завдань досліджень.....	42
.	
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБЛЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО КРИТЕРІЮ	
РУЙНУВАННЯ ДЛЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ПІДДАНИХ	
СКЛАДНОМУ НАВАНТАЖЕННЮ.....	
2.1. Вступні зауваження.....	45
2.2. Оцінювання пружно-пластичного деформування елементів конструкцій на основі енергетичного балансу.....	47
2.3. Моделювання мішаного деформування та руйнування за умов розтягу і кручення.....	54
2.4. Розроблення методики для визначення питомої енергії руйнування за розтягу.....	60

2.4.1. Методика обробки цифрових зображень.....	62
2.4.2 Реалізація методу ЦКЗ та технічні засоби контролю при розтягу зразків.....	65
2.4.3. Вибір оптимального розміру бази для визначення деформацій методом КЦЗ.....	66
2.4.4. Методичні аспекти побудови повних рівноважних діаграм деформування з використанням ЦКЗ.....	72
2.5. Методика визначення питомої енергії руйнування за зсуву. .	77
2.5.1 Порядок проведення випробувань.....	80
.	
2.6 Встановлення пошкодження елементів конструкцій після тривалої експлуатації за зміною фізичних параметрів.	85
2.6.1 Проведення досліджень для сталі 20 ГС.....	89
.	
2.6.2. Аналіз результатів випробувань.....	92
2.7. Основні результати та висновки до розділу 2.....	94
РОЗДІЛ 3. ВСТАНОВЛЕННЯ ДОПУСТИМОГО ТИСКУ У ПАЛИВНОМУ БАКУ РАКЕТИ - НОСІЯ ЗА ЕНЕРГЕТИЧНИМ ПІДХОДОМ.	96
3.1. Визначення енергії руйнування сплаву АМГ-6.	99
.	
3.2 Вплив жорсткості напружено-деформованого стану на міцність елементів конструкцій.....	108
3.3. Визначення руйнівного тиску трубчастого макету з концентратором напружень.....	119
3.4. Встановлення напруженого стану і допустимого робочого тиску в паливному баку ракети носія методом цифрової кореляції зображень.....	124
Висновки до розділу 3.	133
.	

РОЗДІЛ 4. ВИЗНАЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ТА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ДЛЯ ВАЛА РАТОРА ГІДРОТУРБИНИ КИЇВСЬКОЇ ГЕС...	135
4.1. Існуючі методики оцінки ресурсу елементів конструкцій гідротурбін.....	138
4.2. Визначення довговічності елементів конструкції з урахуванням наявності дефектів типу тріщин	139
..	
4.3. Методика моделювання та оцінювання НДС і довговічності валу ротора гідротурбіни	142
.....	
4.4. Методика побудови діаграм циклічного деформування і руйнування.....	147
4.4.1 Розрахунок енергетичних затрат при циклічному навантаженні.....	152
Висновки до розділу 4.....	156
.	
Список використаних джерел.....	157

ВСТУП

Розвиток сучасної техніки з підвищеними вимогами до інтенсифікації технологічних процесів, що супроводжується збільшенням енергосилових параметрів механізмів і машин потребує підвищеної уваги до безпечної їх роботи. В процесі тривалої експлуатації елементів конструкцій за стандартного циклічного або змінного в часі навантаження можливі непередбачувані відхилення. В результаті цього в елементах конструкцій можуть виникати передчасні пошкодження, що буде змінювати загальний ресурс безпечної роботи конструкції. Тому реальний стан конструкції може не відповідати розрахунковому ресурсу роботи. Для цього важливо врахувати такі зміни шляхом періодичного оцінювання реального стану обладнання і на підставі таких досліджень уточнювати залишковий безпечний ресурс роботи.

Переважає більшість виходу з ладу механізмів та машин, які можуть призводити до аварій, пов'язана з втратою опірності до руйнування матеріалів за умов їх складного циклічного або статичного навантажень.

Тому проблема підвищення безпечної експлуатації деталей машин пов'язана із розробленням заходів, щодо попередження втомного руйнування металів і їх сплавів. З розвитком сучасної техніки є необхідним підвищення питомої несучої здатності конструкції при зниженні матеріалоемності механізмів, що пов'язано із підвищенням напруженості в матеріалі. Вимога, щодо збільшення терміну надійної експлуатації потребує більш об'єктивної оцінки впливу умов та терміну експлуатації на зміну опірності втомному руйнуванню матеріалів. Також розвиток сучасної техніки передбачає використання нових матеріалів поведінку яких необхідно враховувати при їх тривалому складному статичному та циклічному деформуванні. Таким чином для достовірної оцінки ресурсу роботи деталей машин і механізмів визначальним є достовірне визначення характеристик опірності складному статичному і втомному руйнуванню матеріалів, оцінка напружено-деформованого стану, встановлення залежностей їх зміни від умов навантаження.

З науково-технічною проблемою із визначення ресурсу надійної роботи деталей машин і механізмів пов'язано багато досліджень, як фундаментального так і прикладного характеру з формулювання методик та засобів контролю для оцінки втомного руйнування матеріалів з врахуванням багаторежимного навантаження. Починаючи з робіт Веллера дослідження, що пов'язані з проблемою втоми металів і конструкцій та розвитком технологічних прийомів підвищення надійної роботи деталей машин і механізмів значно розширились.

Вагомий вклад у розвиток методів визначення напружено-деформованого стану та оцінка довговічності елементів конструкцій з врахуванням умов експлуатації зробили українські та зарубіжні вчені. Серед них – Писаренко Г.С., Трощенко В.Т., Лебедев А., Леонов М.Я., Панасюк В.В., Чаусов М.Г.

Іноземних – Коффін Л.Ф., Менсон С., Гудмен, Баскін, Коцанода і ін.

Зокрема нерозв'язаними залишаються задачі оцінки напружено-деформованого стану та кінетики розвитку пошкоджень для елементів конструкцій, які працюють за складного напруженого стану. необхідний подальший розвиток критеріїв оцінки ступеня пошкодження матеріалу та залишкового ресурсу роботи. Для оцінки безпечного терміну експлуатації елементів конструкцій необхідно розробити нові підходи із встановлення реального напружено-деформованого стану в елементах конструкцій та визначення ступеня пошкодження матеріалу з врахуванням інваріантних характеристик та умов експлуатації.

РОЗДІЛ 1.

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

1.1. Аналітичний огляд підходів до оцінки міцності і довговічності елементів конструкцій

Багато деталей і виробів зокрема вал гідротурбіни бурильні колони, валки прокатних станів і ін., працюють при циклічному навантаженні за умов додаткового статичного розтягу-стиску, що викликає асиметрію циклу. Внаслідок цього метали і сплави змінюють свою опірність деформуванню і руйнуванню. Тому при розрахунку залишкового ресурсу елементів конструкцій важливим є оцінити такі зміни. При проектному розрахунку деталей, що піддані дії циклічного навантаження і статичного розтягу, та оцінки працездатності матеріалу використовують характеристики які визначені на основі двох типів діаграм: граничних напружень і граничних амплітуд напружень [1,2].

Діаграма граничних напружень циклу (діаграми Смітта) [1] будують в координатах «максимальне напруження σ_{\max} - середнє напруження σ_m », які описуються рівнянням.

$$\sigma_{\max} = \sigma_{-1} + (1 + \xi_m) \sigma_m \quad (1.1)$$

$$\sigma_m = \sigma_{-1} + \xi_m \sigma_m \quad (1.2)$$

Діаграму граничних амплітуд напружень (діаграма Гудмена) [2] будують в координатах « $-\sigma_a - \sigma_m$ », яка виражає залежність граничних амплітуд напружень від середнього напруження.

Лінія граничних амплітуд напружень описується рівнянням параболи

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_b} \right)^k \right] \quad (1.3)$$

На витривалість матеріалу позитивно впливають стискальні напруження, що є важливим для практики. Цю залежність використовують, як технологічний підхід щодо підвищення опірності втомному руйнуванню за рахунок стискальних напружень на поверхні деталі.

Для опису кривих втомної міцності у більшості випадків використовують двопараметричні залежності у вигляді прямої лінії в логарифмічній системі координат [3-10].

У працях [3,11,12] рівняння подано у степеневому вигляді

$$\lg(\sigma_{an}) = b \lg N + a \quad (1.4)$$

де a і b – параметри рівняння, які визначають за даними втомних випробувань;

σ_{an} – амплітудні напруження асиметричного циклу навантаження, що зведені до симетричного;

N – кількість циклів до руйнування.

Амплітудні напруження визначають за формулою

$$\sigma_{an} = \sigma_a + \Psi_{cd} \cdot \sigma_m, \quad (1.5)$$

де σ_a – амплітудні напруження циклу;

σ_m – середні напруження циклу;

Ψ_{cd} – коефіцієнт чутливості конструкції до асиметрії циклу навантаження.

Побудови кривих втоми реалізують за спеціально розробленою методикою випробувань зразків, які можуть бути виготовлені з натурального елемента. Такий підхід нівелює вплив форми конструктивного елемента та геометричних параметрів.

Для визначення довговічності деталей загального машинобудування без руйнування можна використовувати трипараметричне рівняння [3,13-21].

$$N = \frac{Q}{\sigma_{\max}} \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\sigma_{\max} - \bar{\sigma}_{rk}}{V_0} \right) - 1 \right]^{-1} \right\} \quad (1.6)$$

де N – кількість циклів до руйнування деталі;

σ_{\max} – максимальне напруження регулярного навантаження при постійному коефіцієнті асиметрії $r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$;

V_0 – параметр, який має розмірність напружень;

$Q = N_0 \cdot \bar{\sigma}_{rk}$ – коефіцієнт витривалості,

N_0 – параметр, що характеризує кількість циклів до точки нижнього перегину кривої втоми;

$\bar{\sigma}_{rk}$ – частинне значення границі витривалості, що відповідає імовірності цілісності (без руйнування).

Величина $\bar{\sigma}_{rk}$ визначається за наступною формулою

$$\bar{\sigma}_{rk} = \bar{\sigma}_{r\min} - tS_{r\max} \quad (1.7)$$

де $\bar{\sigma}_{r\min}$ – нижня межа довірчого інтервалу для середнього значення границі витривалості за регулярного навантаження з коефіцієнтом асиметрії r ;

$S_{r\max}$ – верхня межа довірчого інтервалу для квадратичного відхилення значень границі витривалості;

t – квантиль нормального розподілу.

Застосування трипараметричного рівняння має перевагу у зв'язку із врахуванням збільшення дисперсії до довговічності при зменшенні діючого напруження.

Для визначення кількості циклів до руйнування в роботі [22] використовують трипараметричне рівняння у вигляді

$$\lg N = a + b_1 \lg \sigma_r + b_2 \lg (\sigma_m)^2 \quad (1.8)$$

де σ_r , σ_m – середнє напруження та розмах напружень циклу;

a , b_1 , b_2 – константи, які визначають в результаті випробувань повнорозмірних зразків.

У випадку, коли експлуатаційні навантаження створюють у матеріалі конструкції спектр напружень, які перевищують границю втоми то при оцінюванні довговічності та залишкового ресурсу можна знехтувати напруженнями низьких амплітуд. Разом з тим у випадках, коли спектр низьких амплітуд у процентному відношенні до високих напружень є більш 50% тоді необхідно при визначенні довговічності використовувати нижню частину діаграми втоми.

Для попередження аварій та визначення оптимальних періодів неруйнівного контролю використовують G - критерій [23]. В основі даного критерію покладено ступінь пошкодження найбільш напруженого перерізу елементу конструкції D , яка визначається відношенням площі зони втоми до номінальної площі перерізу.

Процес втомного пошкодження на основі G - критерію описується лінійною функцією

$$G = G_0 - (g_0 - G_k) \frac{N_T}{N} \quad (1.9)$$

де $G = \lg D$ – поточне значення критерію;

$G_0 = |\lg D_0|$, $G_k = |\lg D_k|$ - значення критерію в початковий момент реєстрації та в момент руйнування відповідно;

N_T – біжуча кількість циклів навантаження;

N – кількість циклів до руйнування.

Величину G визначають за результатами дефектоскопічного обстеження елементу конструкції для якого прогнозують довговічність. Величину G_0 і G_k встановлюють за результатами випробувань на втомну міцність у лабораторних умовах.

В загальному машинобудуванні довговічність деталей прогноують на підставі G – критерію [13-16].

Згідно даного критерію процес втомного руйнування описується зростанням ступеня пошкодження за умов циклічного навантаження з постійними параметрами і описується наступним рівнянням

$$G = \left| \ln \left[1 - \exp \left(- \frac{D}{1-D} \frac{\sigma_{\max}}{f} \right) \right] \right| \quad (1.10)$$

де G - величина критерію опору втоми;

D - ступінь пошкодження небезпечного перерізу, рівний відповідно площі зони втоми до номінальної площі перерізу;

σ_{\max} – максимальне напруження циклу;

f – параметр з розмірністю напруження, який приймають незмінним для вибірки однотипних об'єктів.

G – критерій є безрозмірною додатною величиною, яка змінюється від 1 до 0, що відповідає моменту долому.

В роботі [13] функція зв'язку між ступенем пошкодження і критерієм G може бути записана у вигляді:

$$G = C_I \left(1 - \frac{n - n_1}{N - n_1} \right) \quad (1.11)$$

де G_1 – величина критерію, яка встановлюється на підставі даних про роздільну здатність засобів технічної діагностики;

n_1 – кількість циклів навантаження до початку реєстрації пошкодження;

n – кількість циклів навантаження, що відповідає зменшенню критерію до величини G ;

N – кількість циклів навантаження до настання граничного пошкодження.

При заміні величини G_1 і n_1 на G_0 та n_0 та прийнявши що $n_0=0$. Тоді значення C_0 можна визначити за формулою

$$G_0 = \left| \ln \left[1 - \exp \left(- \frac{D}{1 - D_0} \frac{\sigma_{\max}}{f} \right) \right] \right| \quad (1.12)$$

де D_0 – початковий ступінь пошкодження небезпечного перерізу, який приймається незмінним для однотипних об'єктів.

Тоді рівняння набуде виду

$$G = G_0 \left(1 - \frac{n}{N} \right) \quad (1.13)$$

На підставі статистичного аналізу результатів кореляційний зв'язок між величинами G - критерію, які отримані на підставі локальних напружень та відносним напрацюванням з більшою точністю (або з меншою похибкою) оцінює втомну міцність. Це пояснюється тим, що процес нагромадження пошкоджень є локальним і вимагає визначати довговічність за напружено-деформованим станом в обмеженому (локальному) об'ємі металу.

Для цього необхідно використовувати критерії та технічні засоби контролю, які дають змогу визначати характеристики міцності матеріалу з врахуванням його пошкодження, що проходить в найбільш напруженому локальному об'ємі.

1.2. Методики для визначення характеристик втомної міцності матеріалів.

В процесі циклічного навантаження деталей машин і механізмів в металі відбувається поступове нагромадження пошкоджень внаслідок якого зароджується тріщина з наступним руйнуванням. Цей процес відображає властивість матеріалу до нагромадження пошкоджень і характеризується, як втомна міцність металу.

Втома характеризує зниження несучої здатності матеріалу під дією повторних циклічно - змінних навантажень. На практиці для механізмів і машин найбільш поширеним є синусоїдальний цикл навантаження. Основною базовою характеристикою, що дає представлення про опірність втомному руйнуванню досліджуваного виробу або зразка є діаграма втоми.

Діаграми втоми найбільш часто будують в координатах « σ -lgN», яку можна подати у вигляді двох ламаних ліній. За границю витривалості σ_{-1} встановлюють величину напружень руйнування на базі випробувань $5 \cdot 10^6$ - 10^7 циклів навантаження. У цьому випадку границя витривалості σ_{-1} відповідає асимптоті до якої наближається нижня гілка залежності « σ -N». Втома матеріалів є складним фізичним процесом, що пов'язаний з нагромадженням циклічних деформацій і розвитком пошкоджень. Внаслідок циклічного навантаження в металі нагромаджуються пошкодження, які є різними для кожної стадії циклічного деформування (область мало циклової і багато циклової втоми). Для експериментального визначення границі витривалості σ_{-1} і побудови діаграм втоми розроблено ряд методик і пристроїв для випробувань.

За силовою схемою навантаження використовують машини на згин з обертанням від різних механізмів приводу. Також використовують машини за циклічного розтягу-стиску з інерційним або гідравлічним приводом.

У відповідності до ГОСТ 25.502-79 для випробувань на втомну міцність використовують гладкі циліндричні зразка чи плоскі зразки з укороченою довжиною. Також на практиці широко використовують зразки нестандартні з концентратором напружень (зразки Бріджмена).

Випробування гладких циліндричних зразків з концентратором напружень реалізують згідно рекомендацій [24]. Для побудови діаграми втоми по Велеру використовують метод графічної інтерполяції або найменших квадратів. Базою випробувань для визначення границі витривалості прийнято число 10^7 циклів. Характерною ознакою цих діаграм є спадна ділянка залежності для багатоциклової області. Для багатьох металів діаграма втоми

при симетричному циклі навантаження задовільно описується рівнянням Вейбула [25].

$$\sigma_{\max} = \sigma_{-1} + a(N+B)^{-\alpha} \quad (1.14)$$

a і B - коефіцієнти; α – постійна для даного матеріалу. Для металів $B \ll 10^4$, тому при побудові втоми в області багатоциклових навантажень цим коефіцієнтом можна знехтувати.

1.3. Методи оцінювання напружено-деформованого стану обладнання гідроелектростанцій

Протягом тривалої експлуатації обладнання гідроелектростанцій яке відпрацювало нормативний термін експлуатації потребує розробки нових підходів та експертних оцінок щодо подальшої їх роботи. У зв'язку із неможливістю провести масштабну заміну зношеного і застарілого обладнання на ГЕС проводять періодичні ремонти або заміну окремих вузлів. Одним із найбільш навантажених і відповідальних елементів ротора гідроагрегату є вал турбіни. Вал турбіни має трубчасту циліндричну форму і підданий дії осьового навантаження та крутного моменту, що передається від робочого колеса до ротора. Для деталей машин, що працюють в умовах циклічного навантаження в межах 10-200 Гц.

В реальних умовах експлуатації різного виду елементів конструкцій піддані складному навантаженню. Внаслідок цього у матеріалі виникають, як нормальні так і дотичні напруження, а в основному це їх комбінація. Відомо три групи факторів, які обумовлюють вплив при оцінюванні витривалості конструкції та матеріалу

- 1) Співвідношення головних нормальних і дотичних напружень;
- 2) Неоднорідний розподіл напружень і деформацій по перерізу елемента конструкції;
- 3) Форма і схема навантаження.

Для оцінки витривалості елементів конструкцій з врахуванням виду напруженого стану використовують характеристики міцності матеріалу, які отримані при випробуванні зразків на згин, розтяг – стиск і кручення.

Встановлено, що для багатьох вуглецевих і легованих сталей та сплавів існує залежність між границею втоми при крученні τ_{-1} і згині з обертанням σ_{-1} зокрема $\tau_{-1}=(0,52-0,58) \sigma_{-1}$ [26,27]. Ці результати узгоджуються з відомими теоріями міцності матеріалів за складного напруженого стану, зокрема з критерієм Мізеса. Відомо, що умову складного напружено-деформованого стану реалізували шляхом накладання симетричного згину і кручення. Змінюючи співвідношення між рівнями напружень згину і кручення в роботі [26] отримано залежність у вигляді еліпса, яка є близькою до критерію Мізеса. Також літературні дані вказують на те, що границя витривалості при розтягу-стиску σ_{-1}^{p-c} є значно меншою, чим при круговому згині і становить $\sigma_{-1}^{p-c} = 0,8 \sigma_{-1}$. Цей факт свідчить про те, що витривалість за умов неоднорідного напружено-деформованого стану збільшується у порівнянні з однорідним. При цьому збільшення градієнта напружень приводить до збільшення приросту витривалості матеріалу. В роботі [28] проведено дослідження суцільних і трубчатих циліндричних зразків і встановлено, що границя витривалості трубчатого зразка $\tau_{-1}^{p-c} = 0,8 \tau_{-1}$ від суцільного зразка.

Границя витривалості також значно залежить від форми зразка і вона збільшується із зменшенням об'єму матеріалу який є в області максимальних напружень.

Для більшості елементів конструкцій матеріал підданий циклічним знакозмінним повторним навантаженням. Разом з тим в інженерній практиці є випадки коли втомлюваність матеріалу проходить при статичних довготривалих навантаженнях, що мають складний механізм деформування (кручення-розтяг). В результаті такого складного статичного навантаження в матеріалі виникають дефекти та змінюється витривалість конструкції.

Розділяють три типи статичної втоми металів і сплавів.

- 1) сповільнене (затримане) пошкодження і руйнування металів;
- 2) корозійне розтріскування металів під дією активних робочих середовищ;
- 3) високотемпературне руйнування в умовах повзучості.

Статична втома і руйнування елементів конструкцій спостерігається, як у випадку тривалої дії зовнішнього робочого навантаження, так і під дією внутрішніх напружень, що виникають внаслідок їх перерозподілу (чистоти поверхневої обробки; наявність концентраторів і ін..) Кількісно оцінити фактори впливу на перерозподіл внутрішніх напружень у матеріалі та їх зміну в процесі експлуатації є досить утрудненою задачею. Для цього використовують руйнівні методи контролю. Сучасні методи досліджень на статичну втому базуються переважно на використанні лабораторних досліджень зразків у спеціальних установках де прикладають відповідне навантаження.

На підставі проведених досліджень зразків довготривалим розтягом будують діаграми тривалої міцності в координатах «нормальні напруження – логарифм часу до руйнування» і встановлюється характерний для даної бази випробувань границя статичної витривалості. На підставі отриманих результатів проводять проектний розрахунок несучої здатності елементів конструкцій.

1.4. Оцінювання витривалості елементів конструкцій на основі енергетичних критеріїв.

Визначення витривалості елементів конструкцій, які працюють в умовах складного навантаження, базується в основному на встановленні напружено-деформованого стану та характеристик опірності руйнуванню матеріалу. Разом з тим при встановленні міцності і довговічності елемента конструкцій необхідно врахувати вплив багатьох факторів, зокрема розмірів і форми елемента конструкції, схеми зовнішнього навантаження і ін. Це вказує на те, що для розрахунку допустимих навантажень та ресурсу роботи елементів

конструкцій необхідно використовувати характеристики міцності матеріалу і витривалості, які повинні бути інваріантними відносно вказаних факторів.

В межах лінійного деформування характеристики міцності матеріалів однозначно визначаються модулем Юнга. У випадку наявності концентраторів напружень при навантаженні виникає напружено-деформований стан що відповідає пружно-пластичному деформуванню.

Для таких випадків оцінювати міцність і довговічність елементів конструкцій за величиною напружень або деформацій є не зовсім коректно, оскільки зв'язок між ними складний і неоднозначний.

Більш достовірний розв'язок задачі такого роду можна отримати з використанням енергетичних підходів. У роботі [29] теоретично обґрунтовано два види критеріїв: перший передбачає оцінювання загальної кількості поглиненої енергії твердим тілом при його навантаженні, а другий полягає в оцінюванні енергії в елементарному об'ємі матеріалу в околі концентратора напружень. Підтвердженням тому є процес переходу матеріалу із стану пружного в пружно-пластичний та формування джерела руйнування. Процес формування шийки при руйнуванні зразка, або в околі отвору вказує, що руйнування локалізується в матеріалі. Дослідження цих змін в реальних елементах конструкцій для найбільш напружених місць в локальних об'ємах дасть відповідь на їх несучу здатність.

Для визначення поглинутої енергії руйнування в матеріалі випробовують зразки Шарпі на ударну в'язкість та розраховують «критичну енергію пластичного деформування» [30].

У роботі [31] для цього використовують термін «енергія затрачена на руйнування», а у праці [32] – «енергія деформації до руйнування».

Енергетичний підхід, який базується на визначенні питомої енергії руйнування в малому об'ємі в околі концентратора напружень запропонований в робота [33,34]. В цьому критерії використано характеристику «поглинута питома енергія до руйнування», що є близьким до критерію Г. СІ [33].

Підхід, що передбачає використання величини поглинутої питомої енергії до руйнування, як характеристики короткочасної і тривалої міцності для пружно-пластичних матеріалів є найбільш загальним, оскільки не обмежує клас матеріалів для яких він може застосовуватись.

При пластичному деформуванні до моменту початку руйнування матеріал поглинає енергію, що підведена до тіла зразка. При досягненні енергією критичної величини в локальному об'ємі відбувається нагромадження пошкодження матеріалу в результаті чого зароджується тріщина (виникає дефект). В процесі цього відбувається сконцентрована локалізація деформацій і в подальшому проходить руйнування. Цей критерій найбільш повно обґрунтовує процес деформування і руйнування в матеріалі і передбачає визначати напружено-деформований стан в локальному об'ємі. За критерієм руйнування прийнята умова досягнення критичного значення питомої енергії деформування, тобто величини питомої енергії руйнування, що є характеристикою матеріалу чинити опір руйнуванню.

Величина питомої енергії руйнування W_c є незалежною від умов навантаження та відображає фундаментальну характеристику опірності руйнування матеріалу, та найбільш точно описує процес зародження і поширення тріщин. Питома енергія руйнування одиниці об'єму металу є сумою енергії пружного деформування, енергія пластичного деформування і енергії росту тріщини. Енергія пластичного деформування становить найбільшу складову за дві інші. В роботі [34] показано, що енергію поглинену одиницею об'єму при деформуванні визначають за величиною площі під діаграмою «істинне напруження σ_i – істинна деформація ε_i ».

$$W_c = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma_{ij}(\varepsilon) d\varepsilon_{ij} \quad (1.15)$$

Враховуючи те, що величина W_c визначається, як енергія що характеризує взаємодію міжатомних зв'язків вона є фундаментальною при визначенні міцності твердих тіл.

На підставі експериментальних даних отриманих на основі розтягу циліндричних зразків в роботі [34] запропоновано формулу для визначення енергії руйнування

$$W_c = \frac{\sigma_{02} + 2\sigma_b}{3} \left(\sigma_b \frac{d_b^2}{d_m^2} + \sigma_{cr\ icm.} \right) \ln \frac{d_m}{d} \quad (1.16)$$

де σ_{02} – умовна межа течіння;

σ_b – умовна межа міцності;

$\sigma_{cr\ icm.}$ – критичні істинні напруження;

d_0 – початковий діаметр зразка; d_m – діаметр шийки розірваного зразка.

В роботі [34] розглянуто процес пластичного деформування матеріалу, як взаємозв'язаний і включає питому енергію деформування в області рівномірного і локалізованого течіння. Тобто питома енергія руйнування визначається за формулою

$$U_f = W_c = U_m - U_{nf} \quad (1.17)$$

де U_m – питома енергія деформування до моменту локалізації (МДж/м³), тобто коли в матеріалі досягнуто величини умовної границі міцності.

$$U_m = \frac{\sigma_b(1 + \delta_p) \ln(1 + \delta_p)}{\ln(1 + \delta_p) + 1} \quad (1.18)$$

U_{nf} – питома енергія деформування за межею міцності до руйнування

$$U_{nf} = \left[\frac{\sigma_b(1 - \psi) + \sigma_{cr}}{2(1 - \psi)} \right] \left[\ln \frac{1}{1 - \psi} - \ln(1 + \delta_p) \right] \quad (1.19)$$

δ_p – відносне рівномірне видовження

σ_{cr} – істинне напруження руйнування

$\Psi = (S_a - S_n) / S_0$ – відносне звуження зразка;

S_0 – початкова площа поперечного перерізу зразка;

S_n – площа поперечного перерізу шийки після розриву.

1.4.1. Енергетичні критерії втомного руйнування при мішаних механізмах навантаження.

Напружено-деформований стан деформування змінюється від прикладених зовнішніх зусиль, що в свою чергу змінює умови деформування пов'язані з формуванням локальної пластичної зони передруйнування, яке залежить від швидкості деформації, температури, навколишнього середовища.

Властивість матеріалу деформуватись зсувом залежить від нормальних напружень на площині ковзання, зокрема це справедливо для крихких матеріалів граничний його стан описується критерієм максимального розтягуючого напруження [35]. За складного напружено-деформованого стану напруження в тілі визначаються коефіцієнтом $K = \sigma_3 / \sigma_1 (\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3)$, а деформації відношенням максимальної головної деформації руйнування при одновісному і багатовісному розтягу $\varepsilon_0 (m = \varepsilon_1 / \varepsilon_0)$. Залежність $K = f(m)$ [35] показує, що для всіх матеріалів пластична деформація руйнування зменшується з ростом ступеня тривісності навантаження, яка є функцією головних напружень. Тому пряме використання критеріїв руйнування при одновісному навантаженні для оцінки гранично-рівноважного стану в умовах змішаного деформування потребує уточнень і нових розробок.

Розподіл напружень і деформацій при складному напружено-деформованому стані може бути встановлений на основі ефективних напружень і деформацій визначених за теорією енергії формозміни, теорією Мізеса, або найбільших дотичних напружень.

Для пружно-пластичних матеріалів необхідно розробити метод визначення інтенсивності вивільнення енергії для дійсного розподілу напружень тіл складної геометрії і порівнювати з критичним значенням для одного матеріалу.

Проблемі визначення гранично рівноважного стану тіла, що знаходиться в умовах складного напруженого стану та встановлення інваріантного критерію руйнування на основі енергетичного підходу присвячено ряд робіт.

В першу чергу це критерії, що базуються на енергії пружного деформування з використанням гіпотез Губера-Мізеса.

Зокрема критерії зміни об'єму і густини енергії деформації зсуву передбачають те, що втомне руйнування буде відбуватись, коли повна енергія деформації Φ досягне критичного значення [36, 37]

$$\Phi = \frac{1}{2} \sigma_{aij} \varepsilon_{aij}. \quad (1.20)$$

Критерій енергії деформацій Φ (узагальнена гіпотеза Губера-Мізеса) передбачає, що повна робота деформації рівна сумі енергії що йде на зміну об'єму Φ_y , енергії зміни форми Φ_i (енергія зсуву) [38, 39]

$$\Phi = \Phi_y + \Phi_i = \frac{1}{6} \sigma_{akk} \varepsilon_{akk} + \frac{1}{2} S_{aij} e_{aij}. \quad (1.21)$$

Цей критерій добре узгоджується для крихких матеріалів при циклічному навантаженні з високим коефіцієнтом асиметрії і малій пластичній деформації.

У роботі [40] запропоновано критерій, що базується на оперуванні густиною усередненої енергії за цикл навантаження в об'ємі V , де виникає градієнт напружень. Встановлення середньої об'ємної деформації за цикл визначається

$$W_y = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi_y(t) dt = \left(\frac{1-2\nu}{6E} \right) \frac{1}{T} \int_0^T \sigma_{kk}^2(t) dt, \quad (1.22)$$

і енергія за цикл від деформації зсуву

$$W_f = \frac{1}{2} \int_0^T \Phi_f(t) dt = \left(\frac{1+\nu}{2E} \right) \frac{1}{T} \int_0^T S_{ij}(t) S_{ij}(t) dt, \quad (1.23)$$

сумарна усереднена енергія в циклі

$$W = W_y + W_f. \quad (1.24)$$

Міра енергії при багатовісному навантаженні визначається

$$T_{ED} = \frac{W_y}{W_y + W_f}. \quad (1.25)$$

Усереднена питома енергія деформації при втомі багатовісній $\omega(\delta)$ визначається

$$\omega(\delta) = \frac{1}{V} \iiint_v (W_\delta - W) dV.$$

$$\omega_{f(\delta)} = \omega_{(1)} \frac{F[T_{eD(\delta)}, \beta]}{F[T_{eD(1)}, \beta]} \quad (1.26)$$

Коефіцієнт $\beta \approx 0$ для пластичних матеріалів і $\beta \approx 3$ для крихких матеріалів

де

$$\omega_{(1)} = \frac{\sigma_{afrb} - \sigma_{af}}{4E} \quad (1.27)$$

Цей критерій був апробований експериментально на циліндричних зразках для різних матеріалів:

для сталі 30 NCD16 ($\beta=0,96$) при плоскому згині; пропорційному плоскому згині і крученні; синфазному ($\pi/2$) плоскому згині і крученні; і при двох комбінаціях згину і кручення;

для сталі XC18 ($\beta=0$) при плоскому згині і комбінованому навантаженні плоский згин-кручення коли зсув фаз складає 0, $\pi/4$, $\pi/2$;

для сталі 39 CD4($\beta=1,33$) при плоскому згині;

для FGS800-2($\beta=3,09$) при плоскому згині.

Порівняння експериментальних даних для чотирнадцяти варіантів із теоретичними результатами показує, що розбіжність не перевищує 10%.

Критерії, які базуються на енергії пластичних деформацій застосовують для опису довговічності на основі дисипації енергії пластичних деформацій за цикл [41].

В роботі [42] запропоновано критерій, який базується на визначенні енергії при розтягу і зсуві. Згідно цього критерію робота пластичних деформацій (рівна сумі енергій від всіх компонент деформацій в циклі) є пропорційна параметру пошкоджуваності і впливає на втомну довговічність, тобто час до моменту утворення тріщини розмір, якої можна вимірювати. Ця теорія використовувалась для опису співвідношення між циклічними напруженнями і деформаціями за багатовісного навантаження (зі зсувами фаз). Пропонована теорія включає шлях пластичних деформацій, а критерій записується наступною формулою

$$\Delta W_{ij}^p = \int_{\text{цикл}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^p = AN_f^{-\beta}, \quad (1.28)$$

де ΔW_{ij}^p - сума областей петлі гістерезису від різних компонентів деформацій, A і β константи матеріалу.

Для аналізу експериментальних досліджень при кімнатній температурі в умовах комбінованого навантаження розтягом і крученням циліндричного

зразка із сталі 1%Cr-Mo-V [43] використано аналітичне співвідношення. При цьому енергія руйнування визначалась за формулою

$$\Delta W_{ij}^p = \Delta W_{xx}^p + 2\Delta W_{xy}^p = \int_{\text{цикл}} (\sigma_{xx} d\varepsilon_{xx}^p + \sigma_{xy} d\gamma_{xy}^p) = AN_f^{-\beta}. \quad (1.29)$$

Для шести кутів зсуву фази і шести амплітуд в роботі [43] проведено аналіз і показано, що найкращій збіжності експериментальних результатів з аналітичним співвідношенням відповідає коефіцієнт $\beta = 0,5$.

Для сталі AISI316 в роботі [44] цей коефіцієнт знайдено і він дорівнює $\beta = 0,3$. Експериментальні дослідження проведені на тонкостінних циліндричних зразках із сталі 42CrMo [45] при синфазному розтягу і крученні. При цьому визначено величини $A = 216 \text{ MJ/m}^3$ і $\beta = 0,814$ на основі аналізу петель гістерезису.

Аналіз восьми критеріїв деформації проведений в роботі [46] з метою встановлення кореляційних залежностей для сталі SAE-1045 при циклічному згині, крученні і трьох комбінаціях кручення зі згином – синхронно та зі зсувом фаз на $\pi/2$ градусів. При цьому методом кінцевих елементів одержані задовільні результати і встановлені величини $A = 465 \text{ J/m}^3$ і $\beta = 0,57$.

Критерії що базуються на сумі пружної і пластичної енергій деформації є більш універсальними. Зважаючи на те, що пружна енергія деформацій не враховує нагромадження пошкоджуваності матеріалу при низькоамплітудному навантаженні, а пластична енергія деформації є мінімальною при багатоцикловій втомі, для опису цього явища необхідно використовувати критерії що враховують дві форми енергії.

Зокрема в роботі [47] запропоновано критерій, що базується на сумі двох складових енергії зсуву, для синхронного навантаження яка має вигляд.

$$W_f = \int_{\text{цикл}} S_{ij} de_{ij}, \quad (1.30)$$

S_{ij} – девіатор напружень, e_{ij} – девіатор деформацій. Девіатор статичної деформації зсуву e_{ij} у формулі (1.30) складається з пружної і пластичної деформацій, а W_f є також сума пружної і пластичної енергії при зсуві. З використанням деформаційної теорії пластичності, запропоновано обчислювати величину W_f на основі кривої деформування напруження-деформація

$$W_f = \xi \Delta \bar{\varepsilon} \Delta \bar{\sigma} + \Delta \bar{\varepsilon} \bar{\sigma}_m, \quad (1.31)$$

ξ – коефіцієнт кореляції напружень коли матеріал є в пластичному стані; $\bar{\sigma}_m = (\bar{\sigma}_u + \bar{\sigma}_L)/2$ – еквівалентні середні напруження розраховані від верхньої частини $\bar{\sigma}_u$ і від нижньої $\bar{\sigma}_L$ границі ефективних напружень (при симетричному одновісному навантаженні $\bar{\sigma}_m = \Delta \sigma / 2$).

Для заданого числа циклів до руйнування N_f цей критерій може бути одержаний за амплітудами ефективного напруження $\Delta \bar{\sigma}$ і деформації $\Delta \bar{\varepsilon}$ та амплітудами еквівалентних напружень $\Delta \sigma_{eq.}$ і деформацій $\Delta \varepsilon_{eq.}$ у вигляді

$$\frac{1-n'}{2(1+n')} \left(1 - \frac{\Delta \sigma_{eq.}}{E \Delta \varepsilon_{eq.}} \right) \Delta \varepsilon_{eq.} \Delta \sigma_{eq.} + \frac{1}{2} \Delta \varepsilon_{eq.} \cdot \Delta \sigma_{eq.} = \xi \Delta \bar{\varepsilon} \Delta \bar{\sigma} + \Delta \bar{\varepsilon} \bar{\sigma}_m. \quad (1.32)$$

де n' - коефіцієнт деформаційного зміцнення за циклічного навантаження.

В пружній зоні коефіцієнт $\xi = 0$ ($\Delta \sigma_{eq.} = E \Delta \varepsilon_{eq.}$) і перші складові в рівнянні (1.32) пропадають.

В роботі [47] автори запропонували формулу для визначення енергії

$$\Psi = \frac{\xi \Delta \bar{\varepsilon} \Delta \bar{\sigma} \left(1 + \alpha \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \right)}{f(\bar{\rho})}, \quad (1.33)$$

$\sigma_m = \sigma_{m_{kk}}$ є сумою значень амплітуд нормальних напружень; α - коефіцієнт; $\sigma = \Delta\bar{\sigma}/2$ - амплітуда ефективних напружень; $f(\bar{\rho})$ - функція багатовісного навантаження.

На основі експериментальних досліджень встановлено, що

$$f(\bar{\rho}) = \rho^{-n} (n \geq 0) \quad (1.34)$$

Для одновісного навантаження $\alpha = 0,5\xi$ і $f(\bar{\rho}) = 1$ тоді рівняння (1.33) переходить в (1.34), тобто $\psi = W_f$.

Критерій (1.33) дозволяє проводити апроксимацію експериментальних даних. Енергія, визначена рівнянням (1.30) W_f і рівнянням (1.33) ψ , є енергією пружних і пластичних деформацій при зсуві в критичній площині, яка є однією з восьмигранних площин.

В роботі [48] запропоновано критерій, який базується на сумарній енергії U_T від пружної і пластичної деформацій і використовується для оцінки повної енергії деформації за багатовісного циклічного навантаження

$$U_T = \int_{\text{цикл}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}. \quad (1.35)$$

Енергія U_T включає об'єм деформування і енергію деформації зсуву, яка складається з пружної і пластичної складових. Цей критерій був апробований на алюмінієвому сплаві 2024-T4 за одновісного циклічного навантаження. Апробація проведена при двовісному втомному навантаженні на циліндричних зразках із м'якої сталі і титанового сплаву.

В роботі [49] сумарну енергію деформації запропоновано визначити за формулою

$$U_T = \sigma_{max} \frac{\Delta\varepsilon}{2}. \quad (1.36)$$

В роботах [50, 51] розроблено критерій, який враховує суму пружної енергії і пластичну енергію від ефективного напруження за розтягу. Він оперує сумою енергій пружної деформації в додатній частині циклу навантаження ΔW^{e+} та пластичних деформацій ΔW^p , що виражається формулою

$$\Delta W^t = \Delta W^{e+} + \Delta W^p, \quad (1.37)$$

$$\Delta W^e = \int_{\text{цикл}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^e = \Delta W_D + \Delta W_V = \frac{1+\nu}{3E} \sigma_{\max}^2 + \frac{1-2\nu}{6E} \sigma_{\max}^2, \quad (1.38)$$

$$\Delta W^p = \int_{\text{цикл}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^e = \int_{\text{цикл}} S_{ij} d\varepsilon_{ij}^e = \frac{1-n'}{1+n'} \Delta \bar{\sigma} \Delta \bar{\varepsilon}^p. \quad (1.39)$$

Модель визначення енергії руйнування на критичній площині запропонована в роботі [52]. Для тонкостінних циліндричних зразків із сталі AISI 304 за комбінованого пропорційного і непропорційного розтягу-стиску розроблена модель, яка базується на результатах роботи [53] при одновісному навантаженні

$$\sigma_{\max} \varepsilon = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \varepsilon'_f (2N_f)^{b+c}. \quad (1.40)$$

В даному рівнянні входять параметри на які впливає енергія в площині втомної тріщини, а енергія на інших площинах не враховується. Цей критерій включає пружні та пластичні складові енергії нормальних деформацій і включає в себе середні напруження циклу $\sigma_m (\sigma_{\max} = \sigma_a + \sigma_m)$. Дослідження ініціювання та росту тріщини при циклічному розтягу-стиску і крученні, які приведені в роботах [53], підтверджують можливість використання критерію

(1.40) в умовах багатоосьової втоми для матеріалів у яких тріщина поширюється за нормальним відривом.

В роботі [54] запропоновано параметр втомного руйнування тобто питому роботу зсувних і нормальних напружень в критичній площині

$$C_{SWT} = 2\tau_{\max} \gamma_a + (\sigma_n)_{\max} (\varepsilon_n)_a \quad (1.41)$$

Площина, в якій цей параметр досягає максимального значення, є критичною.

В роботі [55] використали віртуальну енергію деформації в критичній площині, як параметр оцінки багатовісної втоми при синхронному і асинхронному циклічному навантаженні.

$$\Delta W = \Delta W_n + \Delta W_s = \Delta \sigma_n \Delta \varepsilon_n + \frac{\Delta \tau_n \Delta \gamma_n}{2}. \quad (1.42)$$

Енергія нормальної деформації в критичній площині W_n і енергія від деформації зсуву W_s в критичній площині визначаються розмахом нормальних напружень $\Delta \sigma_n$ і деформацій $\Delta \varepsilon_n$, а також розмахом зсувних напружень $\Delta \tau_n$ і деформацій $\Delta \gamma_n$.

1.5. Сучасні підходи до оцінювання напружено-деформованого стану та залишкового ресурсу конструкцій

Надійність та довговічність машин і споруд після тривалої експлуатації базується на об'єктивній оцінці стану матеріалу та його пошкодженнях, тобто здатності чинити опір деформуванню і руйнуванню при робочих параметрах навантаження протягом певного періоду. Встановлені залежності між напруженнями та деформаціями для вихідного стану матеріалу можуть змінюватись, оскільки в об'ємах появляються внутрішні дефекти. При робочих

навантаженнях в цих об'ємах локальні напруження можуть перевищувати границю пружності, в результаті чого виникають незворотні (пластичні) деформації, що викликають розвиток пошкоджень.

Для оцінки технічного стану залишкового ресурсу відповідальних конструкцій розроблено ряд нових підходів і технологій. Зокрема розроблені методики акустико-емісійного контролю, які базуються на аналізі сигналів акустичної емісії [56,57]. Акустико-емісійним методом виконують діагностику посудин високого тиску, магістральних і технологічних трубопроводів. Створення таких систем можна використовувати для неперервного контролю появи та розвитку дефектів. На цій основі розроблено модель для визначення об'ємної пошкоженості згідно якої акустико-емісійна пошкоженість є пропорційна до механічної дефектності. Площу утворених дефектів опосередковано визначають за сумою амплітуд акустичної емісії [58].

На підставі розробленої моделі та експериментальних досліджень встановлено такі наукові положення [59,60].

1. об'ємна пошкоженість матеріалу є пропорційною до істинної деформації кристалічних тіл;
2. сума амплітуд сигналів акустичної емісії під час навантаження тіла є пропорційною до істинної деформації;
3. акустико-емісійна міра пошкоженості тіла лінійно залежить від істинної деформації.

Для діагностики та моніторингу напружено-деформованого стану металоконструкцій підймальних машин і визначення причин граничного стану (залишкового ресурсу) використовують методи магнітної діагностики які базуються на вимірюванні магнітної характеристики металу – коерцитивної сили.

В основу методу неруйнівного контролю покладено кореляційні залежності між механічними властивостями металу і одним із основних фізичних параметрів петлі магнітного гістерезису коерцитивної сили [61]. Ця

характеристика є найбільш чутлива до зміни густини дисклокацій структури металу.

Приріст величини коерцитивної сили при виникненні напружень в металі відносно вихідного стану по відношенні до стану руйнування складає від 100 до 400%. Якщо при однократному навантаженні за границю течіння $\sigma_{0,2}$ досягається певне значення коерцитивної сили, то при наступному вимірюванні першочергове значення величини коерцитивної сили не повернеться до початкового. Це відповідає умовам переходу металу із стану пружного до пружно-пластичного деформування. Відношення приросту коерцитивної сили до часу за який відбулось пошкодження металу виражається лінійною залежністю та виражає швидкість нагромадження пошкоджень в конструкції, що піддається діагностуванню [62].

В роботах [63,64] розроблено алгоритм проведення комплексу основних робіт при оцінюванні напружено-деформованого стану металоконструкцій підймальних споруд із застосуванням магнітної структуроскопії.

Разом з тим при такому науково-технічному підході перед експертами є найбільш складне питання – встановивши, що елемент конструкції є пошкодженим спрогнозувати залишковий ресурс роботи. Отримані значення коерцитивної сили фактично не дають відповіді на питання: на якому етапі робочого циклу підймальні споруди і за рахунок яких факторів деградації металу елементи конструкції досягли граничного напружено-деформованого стану, і як встановити термін безпечної експлуатації.

Для дослідження напружено-деформованого стану і контролю якості зварних з'єднань і конструкцій розроблено методи голографічної інтерферометрії [65-68] створено систему автоматичного комп'ютерного аналізу голографічних інтерферограм на основі яких можна визначити три компоненти просторового вектору [69].

Метод електронної широкографії [69] для визначення деформацій в елементах конструкції базується на електронній обробці оптичної інформації. Згідно цього методу отримують картини інтерференційних смуг, які дають

інформацію про переміщення точок поверхні досліджуваного об'єкта. За допомогою цього методу можна спостерігати динаміку інтерференційних смуг на екрані. Суть методу широкографії полягає у наступному: поверхня досліджуваного об'єкта освічується когерентним лазерним опроміненням. При цьому розсіяне світло утворює спеклкартину, попадає на зсувний елемент і фіксується в площині цифрової камери. На матриці камери формується пара поперечно-зсувних зображень об'єкту. Ці два зображення інтерферують між собою, утворюючи хаотичну інтерференційну картину, яка вводиться в цифрову камеру, що підключена до ПК і обробляється для отримання широкограми [70].

В роботах дослідників [71-73] розширено використання методу коерцитивної сили для діагностичних задач оцінки стану частково пошкодженого металу в елементах конструкції після їх тривалої експлуатації. Використання коерцитометрії для оцінки стану металу протягом тривалої експлуатації дало можливість встановлювати стан металу великорозмірних конструкцій в процесі їх виготовлення, монтажу і експлуатації. Це також відноситься до нагромадження втоми металу всієї споруди із визначенням локальних зон концентрації та факторів деградації, а також оцінкою швидкості нагромадження. Метод не вимагає спеціальної підготовки металу і може бути застосований у процесі роботи.

В роботі [74] проведено імовірнісна оцінка довговічності валу гідротурбіни при наявності тріщин.

За результатами досліджень стану металу неруйнівними методами контролю встановлено наявність втомних тріщин, які виникли внаслідок корозії і інтенсивних силових навантажень. Розглянуто та враховано, що тріщини виникають і розвиваються за дії згинних моментів, що приводять до поширення за механізмом нормального відриву. На основі відомих аналітичних залежностей швидкості поширення тріщини від силових параметрів навантаження розраховано кількість циклів до руйнування вала.

В роботах [75-84] розроблено метод оптико-цифрової кореляції зображень (ЦКЗ). Метод базується на кореляційному порівнянні розподілу інтенсивностей спекл-картин оптично-шорстких поверхонь. При цьому враховується лише інтенсивність оптичного поля, що у поєднанні з алгоритмами визначення інтенсивностей кореляційних піків на субпіксельному рівні забезпечує достатньо високу точність вимірювань при спрощеному апаратурному забезпеченні. Такий підхід є простіший у порівнянні з технологіями електронної спекл-інтерферометрії [78-80].

Особливістю деформування матеріалу в області концентраторів напружень при статичному навантаженні, а також при тривалому циклічному, змінюється шорсткість поверхні матеріалу. Тому використання методу ЦКЗ для таких випадків є перевагою перед високо прецизійним методом фазозсувної електронної спекл-інтерферометрії оскільки не потребує реєстрації розподілу фаз у спекл-картині.

На цій підставі використання методу ЦКЗ для визначення переміщень в околі концентраторів напружень на основі кореляційного порівняння фрагментів спекл-картин є достатньо переконливим і доцільним при визначенні напружено-деформованого стану.

Відомо декілька інформаційних технологій двовимірної і тривимірної ЦКЗ.

Зокрема класичний метод ЦКЗ (digital image correlation) з використанням некогерентного освітлення поверхні [75,77,81], метод вимірювання цифрового переміщення спеклів з використанням лазерного освітлення поверхні [82], а також електронну спекл-фотографію [76-78].

Для вимірювання переміщень деформівної поверхні матеріалу використовують метод класичної цифрової кореляції зображень (ЦКЗ, ДІС-digital image correlation) [85-89]. Метод ЦКЗ широко використовується як в лабораторних дослідженнях так і на практиці при оцінюванні напружено-деформованого стану та встановленні залишкового ресурсу елементів

конструкцій на підставі аналізу поля переміщень і деформацій в процесі тривалої експлуатації.

Для встановлення величини переміщень та розподілу деформацій на поверхні методом ЦКЗ реєструють послідовно два цифрових зображення деформівної ділянки – перше без навантаження і наступне після його прикладання. Зареєстровані зображення за допомогою цифрової камери заносять розрахунковою програмою в ПК, автоматично розбивають на однакову кількість фрагментів, які відтворюють у певному масштабі відповідні елементарні площадки. Відносні переміщення першого і наступного зображень визначаються через зміщення положення максимуму крос-кореляційної функції цих фрагментів, яка визначається схематично що показано на рис. 1.1.

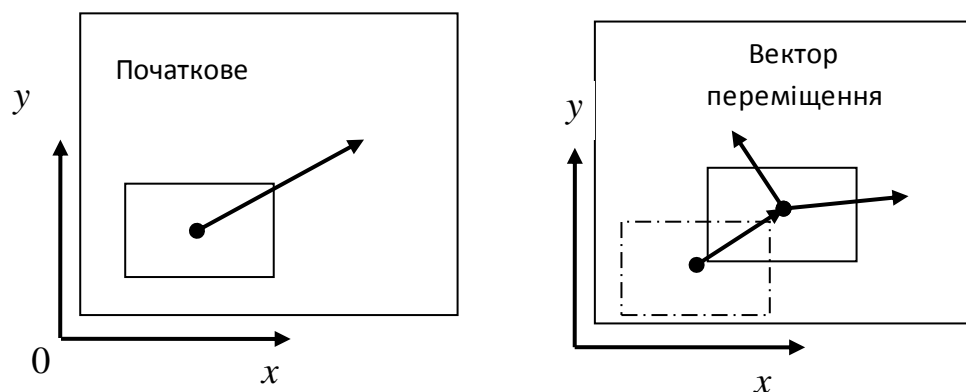


Рис.1.1 Схематичне представлення дослідної поверхні до і після деформації

Крос кореляційна функція для фрагментів до і після навантаження визначається у цифровому вигляді наступним чином

$$\tilde{C}(k, l) = \sum_i^{N_1-1} \sum_j^{N_2-1} [f_1 m_1(i, j) \cdot f_1 m_2(9k + i, l + j)] \quad (1.43)$$

де $f_1 m_1$ - фрагмент першого цифрового зображення розміром $n_1 \times n_2$ пікселів;

$f_1 m_2$ - фрагмент другого цифрового зображення після навантаження розміром $n_1 \times n_2$ пікселів;

$k, l = 0, 1 \dots N-1$ – дискретні просторові відліки функції крос-кореляції, при цьому повинно виконуватись співвідношення $N_1 - N_2 \geq (h_1 + h_2)^2$.

Для двовимірних цифрових сигналів крос-кореляційну функцію розраховують з допомогою швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Вираз для розрахунку крос-кореляції двох фрагментів набуває вигляду

$$\tilde{C}(k, l) = F^{-1}(H_{s1} \times H_{s2}^*) \quad (1.44)$$

де $H_{s1}(r, s) = F(f_1 m_1)$ і $H_{s2}^*(r, s) = F(f_1 m_2)$ - ШПР, відповідно першого і другого фрагментів;

* - комплексно спряжена величина;

$r, s = 0, 1 \dots m-1$ – дискретні просторові частоти.

Для підвищення точності встановлення крос-кореляційних піків і зменшення похибок при встановленні координат їх максимумів використовують інверсний фільтр з коефіцієнтом $\alpha = 0,9$.

$$\tilde{C}(k, l) = F^{-1} \left[\frac{H_{s1} \times H_{s2}^*}{(H_{s1} \times H_{s2}^*)^{1-\alpha}} \right] \quad (1.45)$$

На основі аналізу стосовно вибору розмірів фрагменту встановлено залежність $h_1 \cdot h_2 \geq 1 \cdot 10^4$ пікселів. Таким чином поверхня об'єкта в зоні контролю розбивається на певну кількість елементарних площадок відносно переміщення яких $(\Delta x, \Delta y)$ визначають в площині поверхні.

Величину переміщення площадок розраховують за зміщенням координат максимуму функції крос-кореляції фрагментів

$$\Delta x = \beta \cdot k_m, \quad \Delta y = \beta \cdot l_m,$$

де β - масштаб зображення.

Загальна блок-схема алгоритму роботи ОЦК подано на рисунку 1.2.

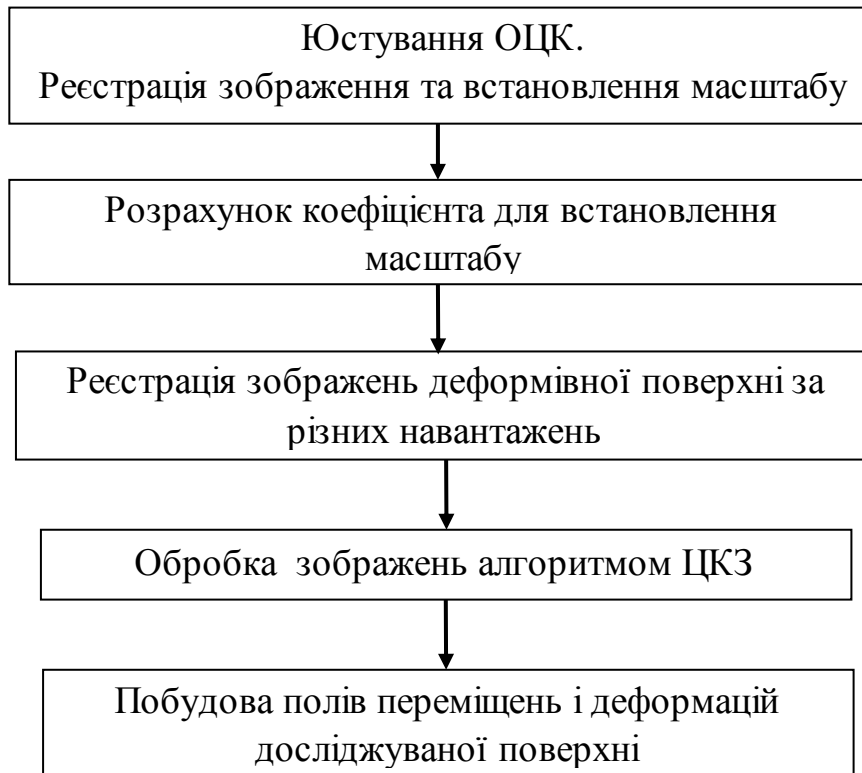


Рис. 1.2 Блок схема алгоритму роботи ЦКЗ.

1.6. Висновки до розділу та формулювання завдань досліджень

На основі аналізу відомих методик та технічних засобів контролю з визначення міцності та довговічності елементів конструкцій напружено-деформованого стану за їх складного навантаження не дають об'єктивної відповіді на встановлення залишкового ресурсу та безпечного терміну експлуатації.

Зокрема підходи механіки руйнування розглядають випадки коли у елементі конструкції наявна тріщина. В такому випадку напружено-деформований стан оцінюють в околі вершини тріщини. Довговічність елемента конструкції з тріщиною оцінюють на підставі кінетичних діаграм втомного руйнування.

На підставі цих діаграм розраховують час за який тріщина проросте від мінімального значення досягне критичної величини. Разом з тим встановити

напружено-деформований стан в околі вершини тріщини на працюючому елементі конструкцій із врахуванням зовнішнього навантаження є доволі проблематично. Кінетична діаграма може бути використана при оцінюванні довговічності елемента конструкції з наявною тріщиною. Як показує аналіз досліджень ресурс роботи деталі з тріщиною становить 20%-30%, а решту 70-80% включає період зародження дефектів в матеріалі.

Тому важливим є розроблення підходів, які би могли враховувати напружено-деформований стан за інваріантними характеристиками в локальних об'ємах. Відомо, що процес розвитку пошкоджень, їх з'єднання та утворення магістральної тріщини є локальним. Внаслідок, цього в елементах конструкцій в місцях де напружено-деформований стан є максимальний (концентраторів напружень, гамтелей і ін.) формується зона інтенсивного пошкодження, яка і є джерелом початку пластичного деформування зародження та розвитку дефектів. Оцінювання ступеня пошкодження матеріалу елементів конструкцій після тривалої експлуатації важливо проводити для попередження аварійних ситуацій.

Тому для об'єктивної оцінки довговічності та надійної роботи елементів конструкцій, які працюють за умов складного навантаження необхідно розробити підходи для експериментального визначення істинних характеристик міцності і довговічності, які би були інваріантними, щодо масштабного фактору та з урахуванням умов навантаження. Враховуючи, що розрахунок напружено-деформованого стану, як на основі аналітичних так і числових підходів базується на його визначенні в локальних об'ємах, а характеристики міцності встановлюють на основі усереднених значень, виникає певна невідповідність. Для елементів конструкцій, які працюють за складного навантаження в околі концентраторів формується складний напружено-деформований стан. Тому для визначення міцності і довговічності елементів конструкцій за складного навантаження необхідно використовувати енергетичний підхід згідно якого напружено-деформований стан який формується в умовах складного

навантаження в повній мірі визначається енергією пружно-пластичного деформування.

Застосування технічних засобів контролю, зокрема методу, кореляції цифрових зображень, дає можливість визначати деформації в локальних об'ємах при деформуванні зразків, а також на реальних об'єктах при їх експлуатації та встановлювати величину допустимих навантажень.

Наведене вище дає обґрунтовані підстави сформулювати мету та завдання дисертаційного дослідження, які подані нижче.

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є: розроблення методик та технічних засобів контролю для визначення міцності і довговічності елементів конструкцій за складного навантаження.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити основні задачі:

- Сформулювати локальний критерій руйнування елементів конструкцій за складного навантаження на основі енергетичного підходу.
- Розробити методики та технічні засоби для визначення істинних деформацій в локальних об'ємах матеріалу з використанням методу цифрової кореляції зображень.
- Розробити методики побудови істинних діаграм 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.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО КРИТЕРІЮ РУЙНУВАННЯ ДЛЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ПІДДАНИХ СКЛАДНОМУ НАВАНТАЖЕННЮ.

2.1. Вступні зауваження

Переважна більшість обладнання в промисловості, зокрема бурильні колони, вали, гідротурбіни, парові турбіни і ін. працює в складних експлуатаційних умовах. Для забезпечення надійної роботи такого обладнання та попередження катастроф актуальним є питання пов'язані з прогнозуванням несучої здатності і довговічності елементів конструкцій з врахуванням реальних умов роботи. Обладнання, що працює протягом тривалого періоду експлуатації вимагає перегляду технічного стану та встановлення безпечного залишкового ресурсу роботи. Це пов'язано в першу чергу з тим, що внаслідок тривалої експлуатації, непередбачуваних порушень технологічних режимів відбувається перевантаження внаслідок яких у локальних місцях елементу конструкцій змінюється напружено-деформований стан, проходить пластичне деформування та виникають внутрішні пошкодження матеріалу. Слід зауважити, що зміна напружено-деформованого стану по різному впливає на утворення дефектів (одновісне, двовісне і ін. навантаження), тому для випадків коли обладнання працює в умовах складного навантаження необхідно розробити нові підходи і технічні засоби контролю при визначенні міцності і довговічності, які повинні враховувати це.

Для оперативного контролю і періодичності ремонту та запобіганню катастроф створюють спеціальні служби технічної діагностики.

Тому питання пов'язані з прогнозуванням міцності, надійності та залишкового ресурсу високонавантажених елементів конструкцій, енергетичної нафтовидобувальної та хімічної галузей на протязі останніх десятиліть знаходились в центрі уваги науковців та інженерів. В процесі досліджень

впливу конструктивних і технологічних концентраторів, на зміну напружено-деформованого стану розроблено нові підходи, створено розрахункові методи для оцінювання міцності і довговічності елементів конструкцій (метод скінченних елементів, метод кінцевих різниць і ін.), а також сформульовано методології з експериментального визначення характеристик міцності і витривалості матеріалів.

Зокрема в роботах [90,91] встановлено за умов складного навантаження біля концентраторів напружень під дією стискуючих зусиль при пластичному течінні матеріалу проходять фазові перетворення, зміна коефіцієнта поперечної деформації. Для сталі 20 після попереднього зміцнення крученням і наступним руйнуванням розтягом залежність $\sigma=f(\tau)$ заміщується в напрямку збільшення зростання зсувних напружень. При цьому напруження розтягу зменшуються. У випадку попереднього зміцнення розтягом і наступним руйнуванням крученням відбувається збільшення нормального руйнівного напруження та зменшення дотичного. На зміну поверхні течіння більший вплив спостерігається для пластичних матеріалів [91]. Перехід від пластичного до крихкого руйнування зменшує вплив попереднього навантаження [92]. У праці [93] дослідженнями встановлено, що за умов двовісного навантаження руйнівне напруження зростає у порівнянні з одновісним розтягом. Зміна напружено-деформованого стану від одновісного до тривісного зменшує характеристику пластичності, а також впливає на головне руйнівне напруження.

Таким чином можна стверджувати, що зміна умов навантаження приводить до зміни пластичного деформування матеріалу та механізмів його руйнування.

Отже для вирішення питань пов'язаних з оцінкою міцності і довговічності елементів конструкцій, які працюють за умов складного напружено-деформованого стану необхідно провести комплекс досліджень які би дали можливість вибрати інваріантний критерій процесу руйнування, незалежний від схеми навантаження. Також необхідно розробити методики для експериментального визначення характеристик міцності і витривалості, які

будуть враховувати зміну напружено-деформованого стану в процесі експлуатації, а також при появі та розвитку дефектів. Оскільки характеристики міцності, що визначені за стандартними методами не враховують і не визначають місця максимальних деформацій та напружень, а є усередненими і залежними від масштабного впливу в роботі пропонується підхід який передбачає встановлювати характеристики міцності і витривалості на підставі напружено-деформованого стану визначеного в локальному об'ємі. Це пов'язано в першу чергу з тим, що у всіх випадках нагромадження пошкоджень і руйнування матеріалу відбувається в локальному обмеженому об'ємі, де досягається критичний стан. При цьому величину деформацій встановлюють на підставі методу цифрової кореляції зображень (ЦКЗ), а істинні напруження визначають на основі побудованої істинної діаграми руйнування матеріалу.

Отримані таким чином характеристики відображають найбільш повно стан матеріалу і є незалежними від масштабного фактору. Зокрема встановлена характеристика міцності матеріалу за цим підходом наближається до теоретичної.

2.2. Оцінювання пружно-пластичного деформування елементів конструкцій на основі енергетичного балансу

Для визначення залишкового ресурсу роботи елемента конструкцій в експлуатаційних умовах необхідно дослідити поточний енергетичний стан матеріалу за зміною деформаційних процесів, які оцінюють за результатами моніторингу деформацій різними методами [94]. За результатами моніторингу обчислюють енергію деформування в локальних об'ємах де досягаються максимальні напруження. За спрощеною процедурою не враховують складний напружений стан у поточний момент експлуатації, а за основу беруть одну (визначальну) компоненту напружень та деформацій [5]. Таке спрощення, або не врахування цих аспектів може привести до суттєвих розходжень між розрахунковим значенням енергії деформування та реальним станом елемента

конструкції. У багатьох випадках перехід від розрахованих аналітично компонент тензора деформацій та напружень здійснюють на основі характеристик міцності за одновісного деформування. Повні питомі енергетичні запаси пружно-пластичного деформівного тіла визначають із діаграми руйнування стандартних циліндричних або плоских зразків за статичного розтягу. В залежності від умов експлуатації елемента конструкції (статичне, циклічне, динамічне і ін.) та інформації про зміну властивостей матеріалу під впливом певного типу навантаження визначену за діаграмою руйнування критичну енергію деформування приймають за розрахункову або з деякими поправками. За відомою історією навантаження встановлюють залишкову енергію, яку приймають за розрахункову критичну енергію руйнування. При цьому розподіл деформацій і напружень на всіх ділянках та вузлах конструкції завжди має бути менший від критичного на величину коефіцієнта запасу міцності. Разом з тим через непередбачувані експлуатаційні зміни (перевантаження) внаслідок яких відбувається розвиток пошкоджень та зменшення залишкової енергії руйнування в результаті чого відповідальні вузли конструкції можуть суттєво понизити запас міцності. Тому моніторинг деформацій за реальних умов експлуатації та одночасне оцінювання реального напружено-деформованого стану дає підстави для тривалої надійної і безпечної роботи елементів конструкцій.

Для цього розглянемо і проаналізуємо розвиток пружних та пластичних деформацій за складного напруженого стану у довільній точці А (рис.2.1). досліджуваного фрагмента поверхні на основі вимірювання переміщень Δ (бази вимірювань) де напружено-деформований стан є практично однорідним в області макродеформацій та оцінимо розбіжності складного напруженого стану з одновісним розтягом.

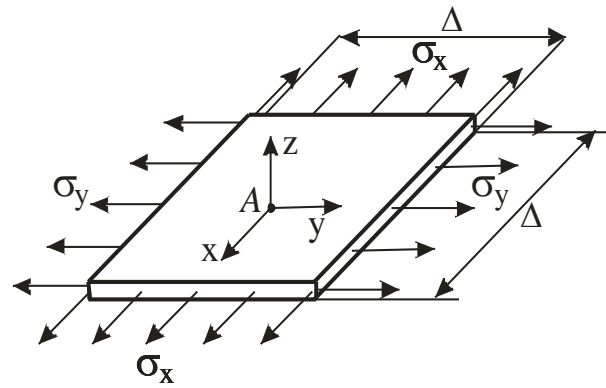


Рис. 2.1 Фрагмент підданої моніторингу поверхні за плоского напруженого стану.

За тривісного напруженого стану зв'язок між відповідними напруженнями σ_k і ε_k ($k=x,y,z$) у кожній точці тіла визначається за відомою системою співвідношень [98].

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \lambda\theta + 2G\varepsilon_x \\ \sigma_y &= \lambda\theta + 2G\varepsilon_y \\ \sigma_z &= \lambda\theta + 2G\varepsilon_z \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

де $\theta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$; $G = E[2(1+\mu)]$; $\lambda = \mu \cdot E[(1-2\mu)(1+\mu)]$; E, G, μ - пружні константи матеріалу.

Для випадку плоского напруженого стану коли $\sigma_z=0$ систему (2.1) можна спростити. При оцінюванні напруженого стану за величиною визначеної експериментальним шляхом деформації при одновісному розтягу, для такого випадку відхилення від точного значення для однієї компоненти напружень можна визначити із співвідношення (2.2)

$$\sigma_x = \sigma_x^{(1)} \left\{ \frac{1}{1+\mu} \left[1 + \frac{\mu}{1+2\mu} (1 + \alpha_2 + \alpha_3) \right] \right\} \quad (2.2)$$

де $\sigma_x^{(1)}$ - напруження за одновісного розтягу; α_2, α_3 - відповідні показники жорсткості деформування у різних напрямках ($\alpha_2 = \varepsilon_y / \varepsilon_x$, $\alpha_3 = \varepsilon_z / \varepsilon_x$), які

пов'язані на основі системи рівнянь (2.1) із жорсткістю за двовісного навантаження $\varkappa = \sigma_y / \sigma_x$ залежностями [99].

$$\alpha_2 = \frac{\varkappa - \mu}{1 - \varkappa\mu}; \quad \alpha_3 = -\mu \frac{1 + \varkappa}{1 - \varkappa\mu} \quad (2.3)$$

Графічно відхилення наближеного значення напружень від точного залежно від зміни параметрів μ і \varkappa подано на рис. 2.2.

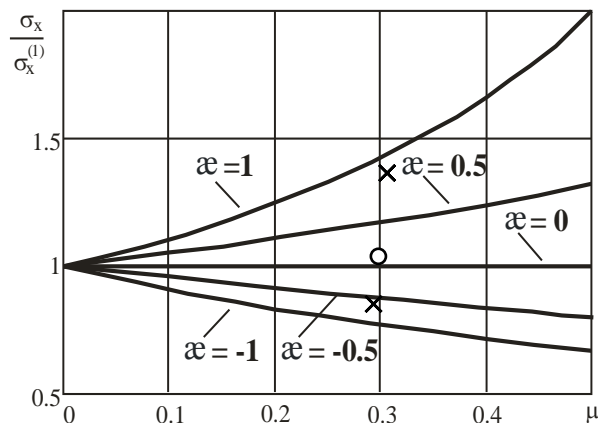


Рис. 2.2 Співвідношення точного σ_x і наближеного розрахунків напружень $\sigma_x^{(1)}$ за різних умов навантаження та властивостей матеріалу

За спрощеної оцінки напруженого стану сталюї труби ($\mu=0,3$) під дією внутрішнього тиску похибка становить 20% у бік зменшення (точки на рис. 2.2), а потенціальна енергія деформування згідно з виразами (2.1)

$$W = 0,5(\sigma_x \cdot \varepsilon_x + \sigma_y \cdot \varepsilon_y + \sigma_z \cdot \varepsilon_z) = 0,5(\sigma_x \cdot \varepsilon_x + \sigma_y \cdot \varepsilon_y) \quad (2.4)$$

або у відносних значеннях

$$W/W_x = 1 + \alpha_2^2 + \mu(1 - \mu)^{-1}(1 + \alpha_2)^2 \quad (2.5)$$

Тут $W_x = 0,5E\varepsilon_x^2$ - питома потенційна енергія однорідного пружного тіла за одновісного розтягу.

Якщо використовувати спрощені схеми оцінювання енергетичного стану поверхні під час визначення напружень за експериментально встановленими компонентами деформацій вживати залежності одновісного розтягу в пружній зоні та просумувавши енергетичні складники у трьох напрямках як незалежні, наближена формула для енергії набуде вигляду

$$\tilde{W}/W_1 = 1 + \alpha_2^2 + \mu^2 \cdot (1 - \mu)^{-2} (1 + \alpha_2)^2 \quad (2.6)$$

Для випадку, коли $\mu=0$ співвідношення (2.5) і (2.6) тотожні. Для сталевих матеріалів $\mu=0,3$ вони мало відрізняються лише на проміжку $\alpha_2 \geq 0,1$ (рис. 2.3а), а для значень $\mu=0,5$ величини потенціальної енергії встановлені за формулою (2.5) суттєво перевищують точні значення на всьому проміжку зміни α_2 (рис. 2.3б).

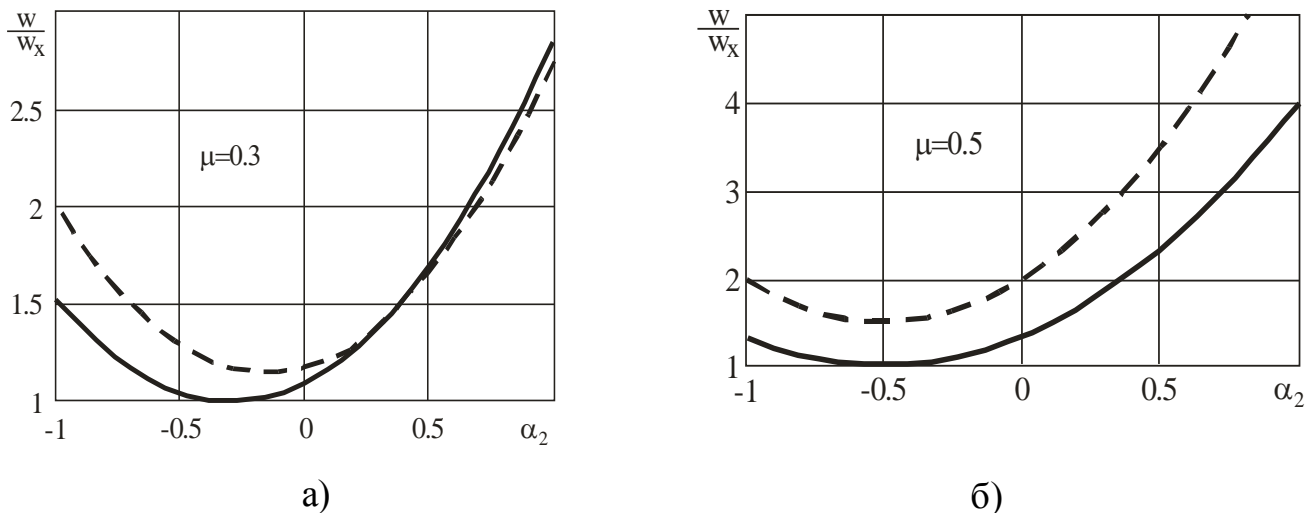


Рис. 2.3а,б Залежність потенціальних енергій від жорсткості деформацій (w/w_x – суцільна лінія; \tilde{W}/W_x – пунктирна лінія)

Для пружної зони деформування матеріалу встановлений єдиний узагальнений закон Гука, який однозначно визначає зв'язок між деформаціями і напруженнями. Встановлення напружено-деформованого стану та поведінки

матеріалу для пружно-пластичного деформування проводять за різними теоріями. Для деформаційної теорії пластичності при встановленні зв'язку між складним напружено-деформованим станом і одновісним розтягом введено поняття інтенсивності напружень і деформацій. При відсутності дотичних компонент напружень і деформацій інтенсивність напружень σ_i , та інтенсивність деформацій ε_i визначають за наступними формулами (2.7) і (2.8)

$$\sigma_i = \left[\frac{\sqrt{(\alpha - 1)^2 + 1 + \alpha^2}}{\sqrt{2}} \right] \sigma_x \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_i = \left[\frac{2\sqrt{1 + \alpha^2 + \alpha^2}}{\sqrt{3}} \right] \varepsilon_x \quad (2.8)$$

Зв'язок між величинами ε_i і σ_i описує узагальнена діаграма деформування [98] якщо експериментальну діаграму руйнування апроксимувати степеневу залежністю

$$\sigma_0(\varepsilon_0) = \sigma_T (\varepsilon_0 / \varepsilon_T)^n, \quad (2.9)$$

де σ_T - границя плинності матеріалу; ε_T - значення, що відповідає початку пластичних деформацій ($\varepsilon_T = 0,002$); $n = 0,2$ для сталей та нехтуючи коефіцієнтом Пуассона узагальнену діаграму « σ - ε » можна описати формулою (2.9). При цьому $\varepsilon_i = \varepsilon_0$; $\sigma_i = \sigma_0$.

Енергія пластичного деформування за складного напруженого стану

$$W = \int_{\varepsilon_T}^{\varepsilon_i} \sigma(\varepsilon_i) d\varepsilon = W_x \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{1 + \alpha^2 + \alpha^2} \right]^{1+n} \quad (2.10)$$

тут W_x – енергія пластичного деформування за одновісного розтягу в напрямку осі x :

$$W_x = (1+n)^{-1} \sigma_T \cdot \varepsilon_T^{-n} \cdot \varepsilon_x^{1+n} \quad (2.11)$$

На рис 2.4 графічно подано зміну відносної величини енергії пластичного деформування.

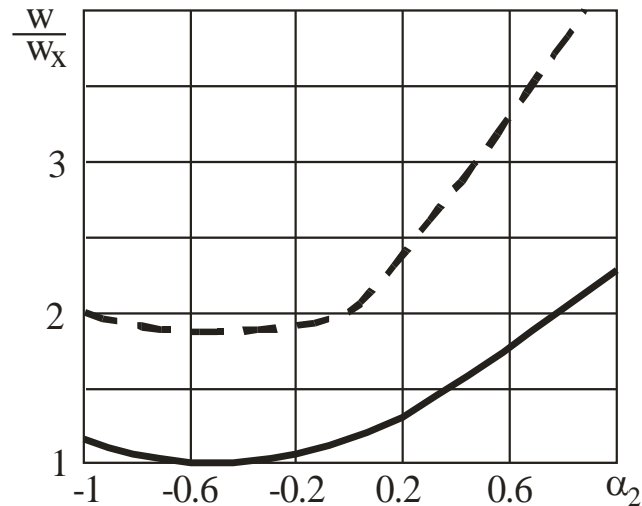


Рис. 2.4 Залежність енергій пластичного деформування від жорсткості деформацій (w/w_x – суцільна лінія; \tilde{W}/W_x – пунктирна лінія)

Із аналізу залежностей встановлено, що величина енергії розрахована за наближеним підходом майже вдвічі завищує локальні втрати. Тому при розрахунку напружено - деформованого стану та оцінювання залишкового ресурсу роботи для елементів конструкцій, які працюють за умов складного навантаження необхідно врахувати деформації, які виникають в реальному об'єкті (розтяг + кручення, кручення + згин і т.д.) за реальної жорсткості навантаження.

Результати експериментальних досліджень показують, що для квазікрихкого матеріалу зокрема сталь 65 Г після нормалізації дані узгоджуються із розрахунком.

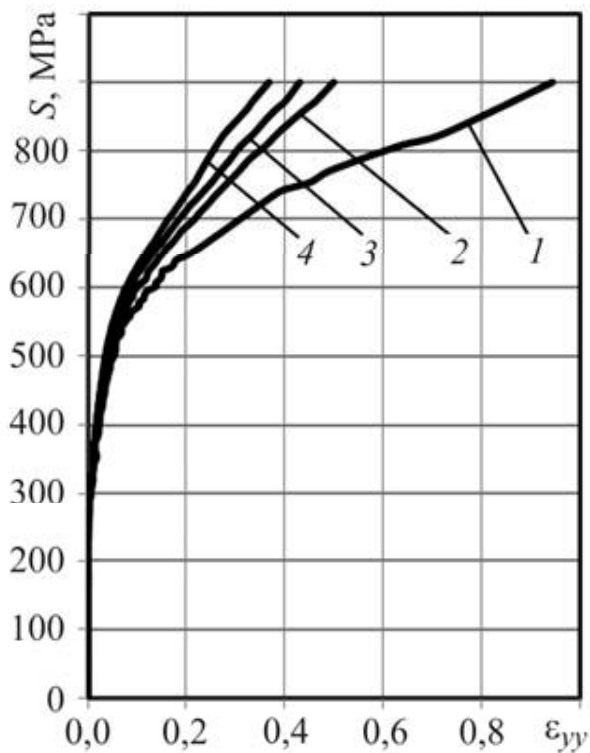


Рис. 2.5 Діаграми деформування сталі 65Г, отримані з використанням різних баз визначення деформації: 1 – база 2,5 μm ; 2 – 7,5; 3 – 15; 4 – 660 μm .

Разом з тим слід зауважити, що запропоновані критерії розроблені для силових схем навантаження коли прикладені зовнішні зусилля розтягу та зсуву пропорційно збільшуються. Для даного випадку траєкторія навантаження за кожним механізмом представлена прямою лінією, Це пов'язано в першу чергу з тим, що зміна траєкторії навантаження із пропорційної на складну буде змінювати умови формування зони пластичності біля вершини концентратора змінювати характеристики матеріалу в зоні передруйнування врахувати, які можна лише на основі фізичних моделей мікропластичних деформацій у цій зоні.

2.3. Моделювання мішаного деформування та руйнування за умов розтягу і кручення

Створення надійних методів оцінки міцності і безпечної роботи відповідальних елементів конструкцій базується на використанні достовірно визначених характеристик опору матеріалів руйнуванню.

При пружному деформуванні суцільного тіла сусідні частини його без навантаження займають своє вихідне положення зберігаючи початкову близькість і для такого стану напруження і деформації задані. Однак, якщо в тілі наявні дефекти, або мікропластичні деформації то при навантаженні вони будуть розвиватись і тоді близькі частини, які були у вихідному положенні ніколи не займуть попереднього положення. Розподіл напружень, який був до розвитку дефекту і після його поширення зміниться, оскільки змінилась границя і форми тіла, з'явилися нові поверхні, де напруження відсутні. Тому для визначення напружень і деформацій при пружно-пластичному деформуванні необхідно розв'язувати відповідні крайові задачі. Крім цього для визначення напружено-деформованого стану необхідно додатково ввести критерій гранично-рівноважного тіла, який настане коли напруження в тілі досягнуть напружень руйнування, які є характеристикою даного матеріалу. Розв'язок таких задач передбачає вирішення наступних питань.

В рамках прийнятого критерію визначити навантаження, які приведуть до старту тріщини в тілі.

Якщо провести випробування елемента конструкції, що відповідає експлуатаційним умовам навантаження можна встановити критичне зусилля при якому стартує тріщина.

Математична теорія знаходження умов навантаження рівноважного тіла це спроба кількісно оцінити процеси, які проходять в ідеалізованому середовищі, що наділене спрощеними властивостями наближеними до реального тіла з деякими відмінностями.

Опис цих процесів, що проходять в ідеалізованому середовищі і які можна описати з допомогою математичних співвідношень порівнюють із результатами експериментальних даних для деяких характерних діапазонів навантажень, що відповідає реальним.

Моделювання процесу заключається у знаходженні найкращої ідеалізації для розглядуваного випадку. Зокрема процес руйнування можна розглядати з позицій моделі суцільного середовища (континіуму) або моделі з частин. У цьому випадку модель з частин можливо і більш точно описує процеси, що проходять при деформуванні. Однак опис в рамках такої моделі нашоветься на математичні труднощі.

Перехід до континуальної моделі спрощує опис взаємозв'язків між частинами, де маса зосереджена не в частинках а в об'ємі. У суцільному пружно-пластичному середовищі зв'язок між напруженнями і деформаціями об'ємів здійснюється через модулі пружності і це досить точно відбиває реальний процес. Однак опис процесів, що проходять біля дефектів вимагають певних уточнень та досліджень. Моделювання процесу руйнування ускладнюється, якщо зовнішнє навантаження, яке прикладене до тіла є складне, що додатково впливає на зміну напружено-деформованого стану. Тому аналіз силових схем реалізації мішаного деформування і руйнування повинен відповідати реальним умовам експлуатації елементів конструкцій, розподілу напружень враховувати можливість проведення досліджень на серійних випробувальних установках, а також визначати характеристики міцності матеріалу та довговічності елементів конструкції. В процесі експлуатації елементи гідротурбін трансмісійних, і торсійних валів, бурових колон передають крутні моменти, поздовжню силу, терплять згин, тобто працюють при складному навантаженні. В місцях концентрації напружень зокрема у різьбових з'єднання бурових колон зароджуються втомні тріщини, як наслідок дії крутного моменту і поздовжньої сили [100-102]. Аналіз зломів показує, що утворення їх проходило в умовах дії нормальних і зсувних напружень тобто руйнування відбулось за мішаним механізмом.

Однак на сьогоднішній день дослідження процесу деформування та руйнування за механізмом поперечного зсуву не набули достатнього розвитку. Зокрема не встановлені умови та характеристики при руйнуванні за механізмом поперечного зсуву, не стандартизовані методи визначення характеристик

міцності. Моделювання, мішаного деформування та визначення характеристик міцності матеріалів здійснюють за силовою схемою розтягу пластини з центральною тріщиною розташованою під кутом до навантаження [103], розтяг компактного зразка в спеціальних захоплювачах [104], кручення порожнинного циліндра [102,105,106]. Враховуючи, що багато елементів конструкцій трасмісійні вали, бурові колони і ін., піддані дії змінного навантаження згину розтягу і кручення внаслідок чого в місцях концентрації напружень виникає складний напружений стан від розтягу і зсуву. Для розтягу циліндричного зразка розроблені і стандартизовані методичні рекомендації, визначення характеристик міцності.

Для визначення міцності і довговічності елементів конструкцій за складного навантаження вводиться критерій, який базується на енергетичному підході накопичення пошкодженості в локальному об'ємі матеріалу. За міру енергетичної пошкоджуваності деталі ω прийнято відношення енергії пружно-пластичного деформування локального об'єму матеріалу до її критичного значення

$$\omega = W(x, y, z) / W_c \quad (2.12)$$

Енергія пружно-пластичного деформування для випадку складного навантаження виразиться, як сума енергій пружно-пластичного деформування за розтягу W_σ і зсуву W_τ

$$W(x, y, z) = W_\sigma(x, y, z) + W_\tau(x, y, z) \quad (2.13)$$

Руйнування елемента об'єму матеріалу настане в результаті досягнення рівності

$$\omega(x, y, z) = 1 \quad (2.14)$$

Тому для моделювання процесу мішаного деформування (розтяг-кручення) та визначення характеристик вибрана силова схема розтягу та кручення циліндра з концентратором на зовнішній поверхні, (рис. 2.6) для встановлення місця руйнування. При навантаженні циліндра з концентратором розтягом реалізується відрив на основі чого визначають характеристики $\sigma_{0,2}$, σ_B , δ , Ψ . У випадку навантаження чистим крученням накопичення пошкоджень та руйнування відбувається за механізмом поперечного зсуву при цьому визначають характеристиками $\tau_{0,3}$, τ_B , γ . Сумісне навантаження розтягом та крученням створює у вершині концентратора складний напружений стан, при цьому змінюється гранично-рівноважний стан тіла в залежності від співвідношення деформації розтягу та зсуву.

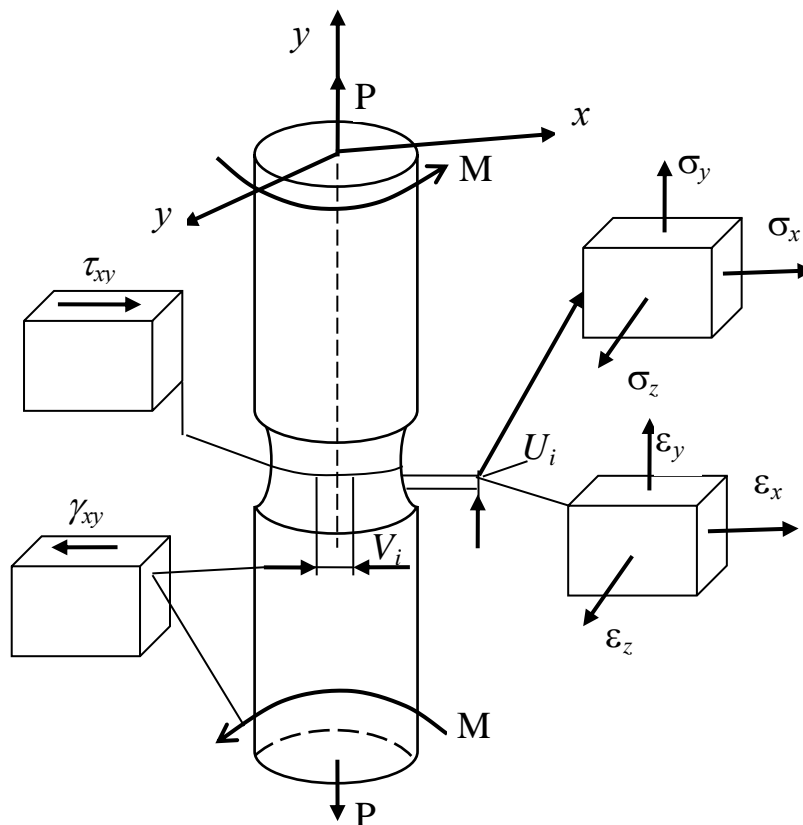


Рис. 2.6 Силовa схема навантаження циліндра розтягом P та крученням (u_i – база вимірювання приросту нормальних переміщень, V_i – база вимірювання зсувних переміщень)

Величину енергії пластичних деформацій від розтягу W_σ і зсуву W_τ визначимо на основі результатів роботи [107]

$$W_\sigma = \int_0^\varepsilon \sigma(x, y, z) d\varepsilon, \quad (2.15)$$

$$W_\tau = \int_0^\gamma \tau(x, y, z) d\gamma. \quad (2.16)$$

Тут ε , γ – деформація розтягу та зсуву, σ , τ – напруження за розтягу та зсуву в локальному об'ємі матеріалу.

В результаті пружно-пластичного деформування (статичного або циклічного) у матеріалі проходить процес утворення та розвитку пошкоджень, що в загальному буде зменшувати опірність руйнуванню.

При виникненні та розвитку дефектів у матеріалі відбувається його енергетичні втрати. Відношення енергії пружно-пластичного деформування W до величини енергії руйнування W_c виражає відносну енергетичну пошкодженість. Встановивши зміну внутрішнього геометричного пошкодження, яке може визначатись площею руйнування, від величин деформації встановленою методом ЦКЗ на поверхні зразка можна її використовувати для встановлення реальних пошкоджень елементів конструкцій після їх тривалої експлуатації.

При побудові повних рівноважених діаграм руйнування та встановлення залежності величини внутрішніх пошкоджень матеріалу від значення поверхневої деформації можна оцінити реальний стан деталі.

Іншими словами за величиною істинної деформації встановленої в елементі конструкції з внутрішнім пошкодженням після тривалої експлуатації методом ЦКЗ та величиною істинних напружень можна обчислити значення енергетичних втрат за час роботи елемента конструкції. Різниця між питомою

енергією руйнування, яка є інваріантною характеристикою матеріалу і енергетичними втратами за час експлуатації становить залишкову міцність деталі.

2.4. Розроблення методики для визначення питомої енергії руйнування за розтягу

Елементи конструкцій в основному працюють при складному навантаженні в результаті якого відбувається локалізація напружено-деформованого стану де проявляється найбільший вплив. Процес руйнування включає однорідний напружено-деформований стан у всьому об'ємі матеріалу при його пружному деформуванні, а також його локалізацію за умов пружно-пластичного деформування. Тому дослідити поведінку матеріалу при пружно-пластичному деформуванні можна на підставі характеристик міцності і деформативності та їх зміни, визначивши величини напружень і деформацій в локальному об'ємі де вони є максимальні і практично однорідні. Ці величини є визначальними і інваріантними оскільки практично не залежать від масштабного фактору і однозначно оцінюють реальну міцність. Тому важливим є використання методу ЦКЗ для реєстрації поля переміщень в локальному об'ємі та визначенні істинних деформацій. Також в процесі деформування важливо використовувати для розтягування пристрій за силовою схемою жорсткого навантаження, який дозволяє контролювати переміщення, як при пружному так і пластичному деформуванні та поетапному руйнуванні, що дозволяє контролювати підростання тріщин у зразку для встановлення істинних напружень.

Для побудови повних рівноважних діаграм за розтягу розроблено відповідні технічні засоби та методику проведення досліджень. Для випробування використовують циліндричні зразки типу Бріджмена. Робочу зону зразка шліфували після чого на поверхню наносили хаотичний крапковий малюнок спеціальною еластичною фарбою для забезпечення вимог до

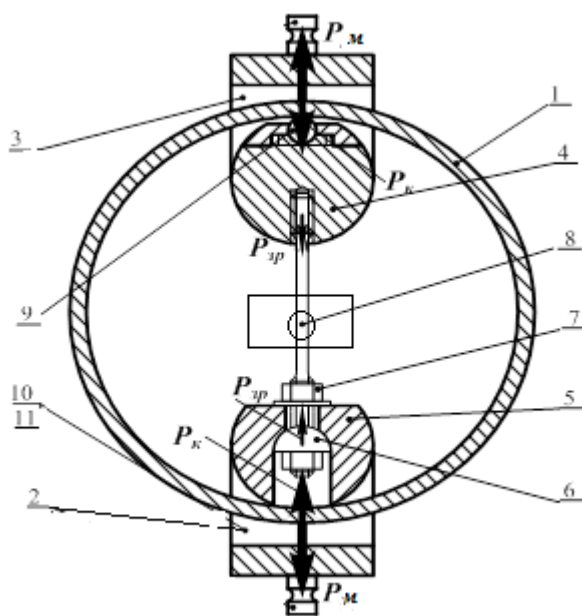
технології безконтактних вимірювань методом цифрової кореляції зображень (ЦКЗ).

Проведення досліджень при випробуванні зразків реалізували на спеціальному пристосуванні, яке було встановлено на універсальній розривній установці. Пристосування забезпечує навантаження зразка за силовою схемою жорсткого контрольованого переміщення.

Пристосування складається із жорсткого кільця 1 тягів 2, які з'єднані з захоплювачами 4,5, гайки 6, контргайки 7, зразка 8, екстензометра 9, цифрової камери 10 з кронштейном 11.

Зразок 8 вкручений на різьбі у верхній захоплювач 4, а на протилежному кінці закручена сферична гайка 6 яка встановлена в нижній захоплювач 5. Контргайкою 7 зразок закріплений жорстко до нижнього захоплювача 5.

Пристрій з допомогою тяг 2, що з'єднані із нижнім 5 і верхнім 4 захоплювачами встановлюють у траверси розривної машини.



а)



б)

Рис. 2.7а,б Пристрій для жорсткого навантаження зразків на розривній машині а) –схема, б) - конструкція

При навантаженні зусилля через тяги передається до захоплювачів переміщення, яких стримує жорстке кільце, а його деформування контролюється екстензометром. Жорсткість кільця є на порядок більша за величину руйнівного зусилля зразка. При цьому жорстке кільце деформується в межах пружності і його сумарне переміщення є набагато більшим за максимальне видовження зразка в момент розриву. Таким чином попередньо протаровують кільце на установці для встановлення залежності «зусилля на кільці P_k – переміщення кільця V ».

Зусилля на зразку P_z обчислюють, як різницю показів сило вимірювача машини P_m і зусилля на кільці P_k за формулою (2.17).

$$P_z = P_m - P_k \quad (2.17)$$

При навантаженні зразка записують на ПК зміну зусилля, а також реєструють зображення поверхні з допомогою оптичної системи на основі промислової цифрової камери Tourcam.

На підставі отриманих співвідношень для визначення питомої енергії руйнування за розтягу W_σ і кручення W_τ необхідно розробити методики та побудувати діаграми деформування, які будуть слугувати основою при встановленні характеристик міцності матеріалу за нормального відриву W_σ^f та кручення W_τ^f або за складного навантаження.

2.4.1. Методика обробки цифрових зображень

В основу методу ЦКЗ покладено операції над спекл-картинами оптично шорсткої поверхні програмну обробку низки цифрових зображень, які зареєстровані в процесі навантаження для відстежування переміщень множинних точок деформівної поверхні і розрахунку деформації [108-110]. Для покращення зображення на поверхні зразка з допомогою еластичної фарби створюють крапковий малюнок.

Реалізацію технології ЦКЗ здійснюють поетапно. На першому етапі досліджувану поверхню освітлюють лазерним (когерентним) джерелом випромінювання і за допомогою матричного детектора у вигляді ПЗЗ – матриці реєструють спекл-картину вихідної (недеформованої) поверхні, яка описується функціями і спекл-картину деформованої поверхні. Зареєстровані зображення цифровою відеокамерою вводяться в комп'ютер і запам'ятовуються у вигляді цифрових зображень, які описуються функціями.

Наступний етап передбачає розбиття кожного цифрового зображення на фрагменти (1 і 2).

Визначають переміщення кожного фрагмента зображення 2 і зображення 1. В результаті цього формується крос кореляційний пік. Обробка зображень за методом ЦКЗ удосконалюється і висвітлена в Інтернет ресурсах [111-116].

Згідно цих розробок величину деформацій між двома точками А і В визначають за величиною вертикальних V і горизонтальних U переміщень встановлених на початковій відстані (базі вимірювання). Схема показана на рис. 2.8.

Для цього необхідно знайти на поверхні точки А' і В' на зображенні 2 (здеформована поверхня), що відповідають точкам А і В на зображенні 1 (вихідна поверхня).

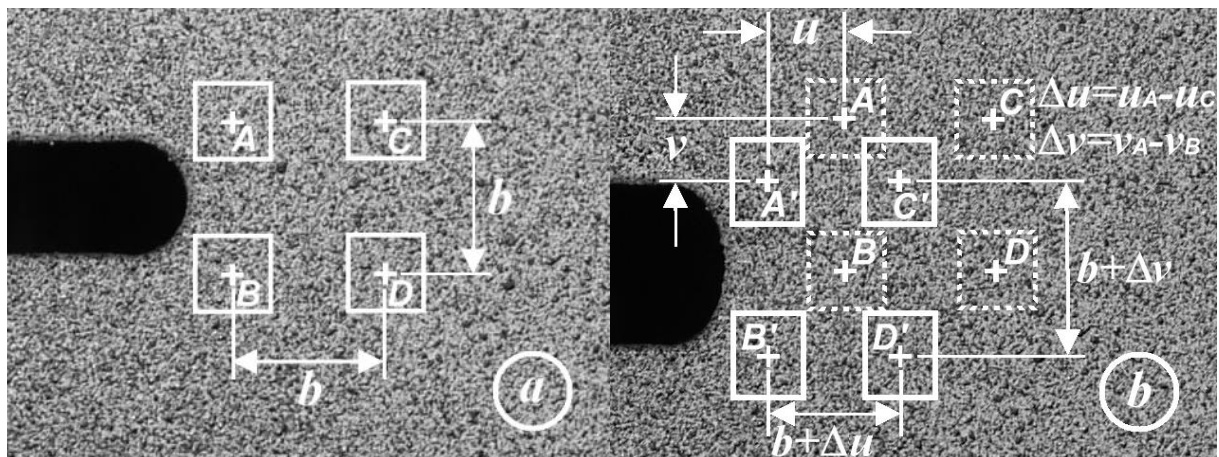


Рис. 2.8 Схема визначення переміщень та розрахунку деформацій методом ЦКЗ: a – вихідний знімок, b – zdeформована поверхня.

Для ідентифікації з точок A' і B' (пікселів) на зображенні zdeформованої поверхні навколо кожного пікселя вибирають ділянки прямокутної форми в межах якої розподіл відтінків пікселів з великою імовірністю буде неповторним. За цією ділянкою відстежують переміщення центральної точки пікселя. На основі закладеного алгоритму в програмне забезпечення (ПЗ) для ЦКЗ на зображенні zdeформованої поверхні відслідковується ділянка з аналогічним розподілом відтінків пікселів. Після цього встановлюють координати A' і B' на зображенні zdeформованої поверхні та визначають горизонтальні U і вертикальні V переміщення відносно вихідного положення.

Складові деформації в напрямку осі x — ε_{xx} , та в напрямку осі y — ε_{yy} обчислюють за закладеним в алгоритм ПЗ формул

$$\varepsilon_{xx} = \frac{du}{dx} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{du}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 \right] \quad (2.18)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{dv}{dy} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{du}{dy} \right)^2 + \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \right]$$

Точність вимірювань (роздільна здатність) визначається класом цифрової камери, а також розміром досліджуваної ділянки поверхні і використанням ПЗ. В основному для досліджень напружено-деформованого стану можна отримати роздільну здатність по переміщенню 0,01 пікселя зображення, а також 0,01% по відносній деформації. Зокрема камера SMP (3264x2448 пікселів) забезпечує на ділянці поверхні розміром 326,4x244,8 мм точність вимірювання 1 мкм. Зменшення розмірів контрольованої ділянки пропорційно підвищує точність вимірювання. Отже метод ЦКЗ можна використовувати з достатньою точністю при встановленні напружено-деформованого стану, як для лабораторних досліджень при випробуванні зразків, а також елементів

конструкцій, зокрема мостових балок, елементів літальних апаратів, валів гідротурбін, паливних баків ракет-носіїв. Перевірку точності даного підходу проводили при визначенні модуля Юнга, коефіцієнта Пуассона різними альтернативними методами (тензометрування, метод сіток метод широкографії ін.) Результати вимірювань методом ЦКЗ довели свою перевагу за багатьма параметрами (точність, швидкість, повторюваність і ін.)

2.4.2 Реалізація методу ЦКЗ та технічні засоби контролю при розтягу зразків.

В зальному метод ЦКЗ є оптико-цифровим і передбачає вимірювання переміщень при деформуванні (переміщенні) поверхонь, і включає в себе оптичну систему для реєстрації зображень та обчислювальну [117,118]. Обчислювана система включає ПЗ методу ЦКЗ, яке встановлено на ПК. Також для реалізації методу ЦКЗ при дослідженні металів необхідно додаткове пристосування, зокрема для встановлення і кріплення джерела світла, а також цифрової камери.

Зокрема при випробуванні зразків на дослідних установках можливе закріплення цифрової камери безпосередньо до зразка з метою усунення взаємного переміщення та підвищення точності вимірювань. Для цього використовують спеціальні засоби кріплення.

При реєстрації переміщень на доволі великій відстані від камери до об'єкта використовують спеціальні штативи кріплення.

В якості цифрової камери можна використовувати цифрову промислову фотовідеокамеру або цифровий дзеркальний фотоапарат для реєстрації зображень досліджуваної поверхні. Для встановлення та кріплення лазерного джерела випромінювання, чи спеціального джерела світла на базі світловодів або ламп розжарювання використовують допоміжні засоби, які забезпечують їх надійність. Для управління цифровою камерою та збереження отриманих

зображень, обробки їх за допомогою програмного забезпечення метод ЦКЗ використовують комп'ютер або ноутбук.

Реалізацію методики вимірювання переміщень та визначення локальних деформацій за різних схем випробування зразків та їх різновидів (циліндричні, плоскі, балкові, трубчасті і ін.) за допомогою оптичних систем на базі цифрової камери Olympus E300 із додатковим спеціальним тубусом.

2.4.3. Вибір оптимального розміру бази для визначення деформацій методом КЦЗ

В процесі тривалої експлуатації елементів конструкцій існує велика загроза розвитку пошкоджень у матеріалі.

Для продовження ресурсу надійної їх роботи необхідно встановити реальний напружено-деформований стан. Особливо це актуально для елементів конструкцій з концентраторами напружень в околі яких в матеріалі можуть виникнути зони пластичного деформування. Такі зміни та зони можна встановити на основі моніторингу процесу деформування елементів конструкцій методом ЦКЗ.

Разом з тим для достовірної оцінки деформаційного стану матеріалу елементів конструкцій в процесі експлуатації можна встановити методом ЦКЗ. Разом з тим визначальним при цьому є вибір розміру бази вимірювання переміщень де напружено-деформований стан є однорідним і база буде оптимальною для точок поверхонь внаслідок зміни зовнішніх навантажень, умов роботи і ін.

Розрахункові моделі для аналітичного визначення розподілу деформацій і напружень у твердому деформівному тілі в основному базуються на припущеннях їх однорідності. За таким підходом можна використовувати класичні і сучасні математичні методи із граничними переходами нескінченно малих і великих величин. Однак в процесі деформування матеріали реальних конструкцій лише наближено можуть задовольняти умові однорідності тільки

на макрорівні, тому що вони суттєво є неоднорідними з точки зору мікрорівня у зв'язку з кристалічною (зернистою) мікроструктурою. Тому для таких випадків необхідно використовувати малі, розміри сумірні з розмірами структурних елементів матеріалу, величинами баз вимірювання переміщень недопустимих при визначенні деформацій точок досліджуваної поверхні.

За теоретичним визначенням для однорідного тіла, навантаженого зовнішніми силовими факторами (рис.2.8) величини лінійної деформації в точці $A(x,y)$ в напрямку \bar{n} на базі b виражається формулою

$$\varepsilon_{\bar{n}} = \lim_{b \rightarrow 0} \frac{b^* - b}{b} \quad (2.19)$$

Для плоского двовісного випадку, як деформації так і переміщення в будь-якій точці мають свої компоненти вздовж двох осей координат. Теоретичні співвідношення Коші для лінійної компоненти деформації [129] ε_y мають такий вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v}{\partial y} \quad - \quad \text{малі деформації} \\ \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \quad - \quad \text{скінченні деформації} \end{array} \right. \quad (2.20)$$

де u, v – складові переміщень точки A по осях Ox, Oy

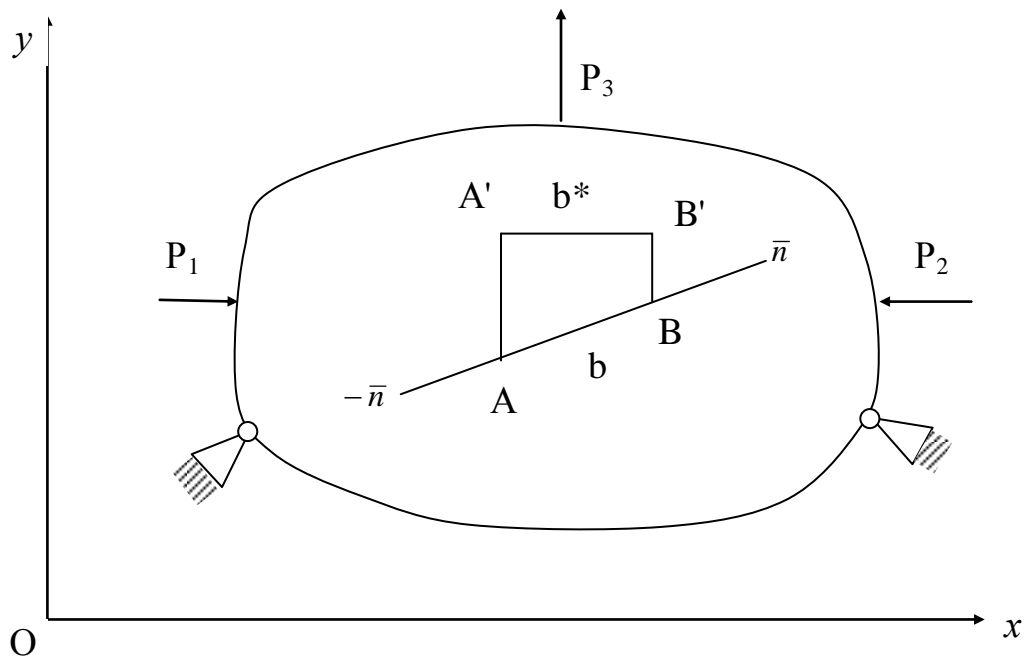


Рис. 2.9 Лінійні переміщення точок в заданому напрямку.

У випадку направлення бази вимірювань по осі Oy

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta y} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\Delta b}{b} \quad (2,21)$$

де b – розмір бази вимірювання; Δx , Δy , Δb – відносні прирости переміщень.

Для реальних вимірювань переміщень задовольнити граничний перехід $b=0$ практично неможливо з технічних причин, оскільки зменшувати як завгодно розмір бази не можна у випадку, коли розраховують характеристику матеріалу на макрорівні. Тому розмір бази вимірювання переміщень для розрахунку деформацій повинен бути значно більшим за розмір зерна структури металу, тобто охоплювати хоча би десять зерен, що є першою умовою. Це пояснюється різною деформативністю і міцністю тіла зерна і границі зерна.

$$b \gg d$$

де d – розмір зерна мікроструктури металу.

Згідно стандартизованих досліджень при визначенні відносної деформації на циліндричних зразках за базу вимірювання переміщень вибирають робочу зону зразка l_0 . Величину деформації (відносне видовження) металу визначають відношенням приросту робочої довжини зразка $\Delta l = l - l_0$ (видовженням) до початкової робочої довжини l_0

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.22)$$

При навантаженні зразка у пружній зоні деформівний стан по довжині зразка є однорідний і деформація визначена в довільній зоні буде однакою (рис. 2.10. Лінія 1)

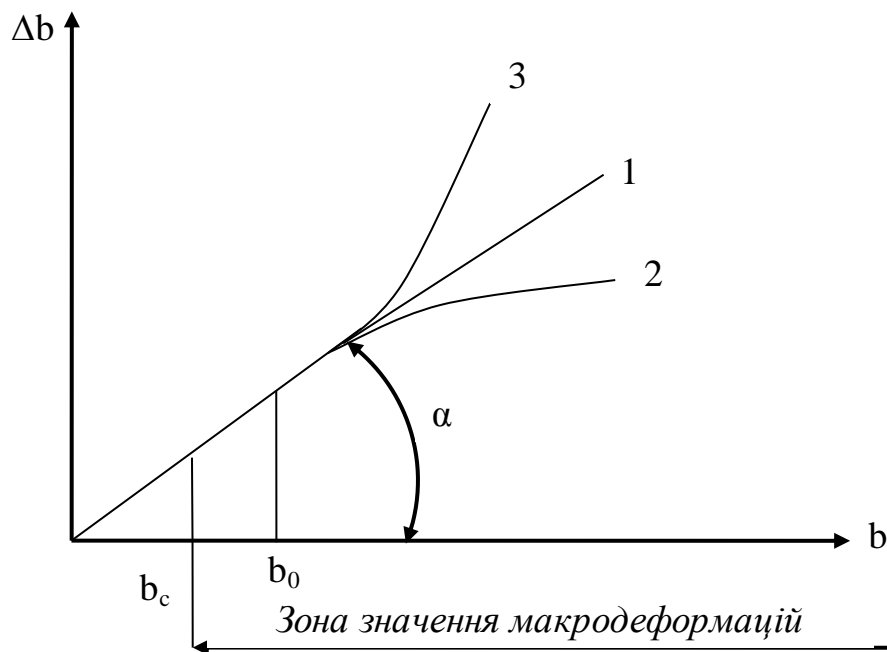


Рис.2.10 Схема збіжності деформацій в однорідній (1) та неоднорідних (2,3) зонах.

В момент появи шийки деформація буде локалізуватись і матеріал переходить у пластичний стан. В зоні шийки деформація зразка в кожному перерізі буде різною і чим менша база вимірювання видовження в шийці тим

більша деформація буде наближатись до однорідної. У цій області металу напружено-деформований стан буде практично однаковий.

Оскільки формула (2.22) є наближеною, тому що не враховує зміну довжини зразка, чи бази вимірювання в процесі деформування то вводиться поняття істинної (логарифмічної) деформації $\bar{\varepsilon}_{zp}$

$$\bar{\varepsilon}_{zp} = \ln\left(1 + \frac{\Delta l}{l_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2.23)$$

У вищенаведених залежностях (2.22) – (2.23) визначальними параметрами є лінійні видовження типу $\frac{\Delta b}{b}$ або $\frac{\Delta l}{l_0}$, які безпосередньо визначають деформації (малі, одномірні), або з їх допомогою виражаються інші деформації (істинні, скінченні).

Для практики важливим є те задовольняючи умову (2.21) з одного боку, важливо забезпечити збіжності шуканих значень деформацій на деякому проміжку зміни розмірів баз з іншого боку, що і буде другою умовою для даного випадку визначення деформацій. На рис. 2.10 схематично зображено вплив зменшення бази вимірювання b на досягнення визначуваного значення лінійної деформації, яка у заданих координатах визначається кутом нахилу α . У такому випадку база вимірювання потрапляє у певну зону відносної однорідності деформацій, що підтверджує незалежність між ними. Однозначно, що високі значення деформацій потребують менших розмірів для вимірювання переміщень оскільки величина ділянок локалізації обернено пропорційні значенням деформацій.

Вибір оптимального розміру бази вимірювання видовження в околі концентратора напружень за розтягу дискового зразка було підтверджено експериментальним шляхом. Для цього випробовували дисковий зразок з боковим концентратором радіусом заокруглення 0,2 мм (рис. 2.11).

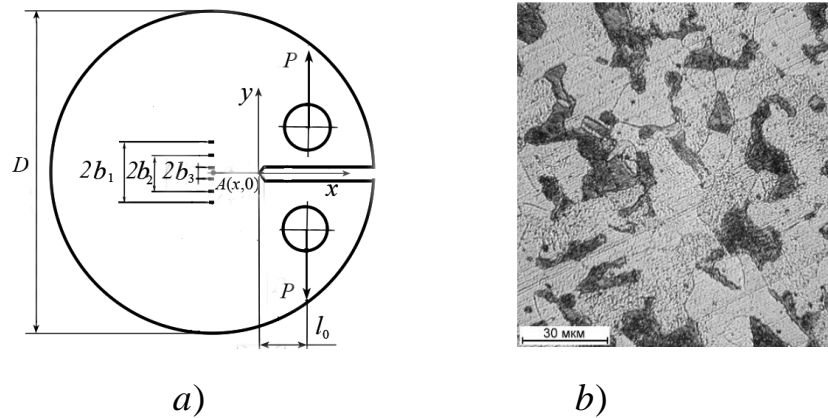


Рисунок 2.11 Дисковий зразок зі сталі 20 для випробувань на позацентровий розтяг (а) та мікроструктура матеріалу (b)

Вершина надрізу зміщена на 10 мм від осі розтягу зразка. Зразки із сталі 20 товщиною 3 мм. Мікроструктура сталі подана на рис. 2.11 де очевидно феритні зерна переважають як кількісно так і за розмірами, максимальний з яких становить 35 мкм [122,123].

Оптична система для реєстрації зображень складається з цифрової камери Tour Tech UCMOS 10000KPA з роздільною здатністю 3600x2800 pixels, яка жорстко закріплена до зразка і світлодіодного джерела світла [124].

Масштаб отриманих зображень становить 200 pixels/mm, що є достатнім для визначення деформацій.

В лабораторних умовах зразки навантажували позацентровим статичним розтягом на випробувальній установці FP-100 при швидкості переміщення рухомої траверси 2mm/min. В процесі випробувань реєстрували зусилля розтягу динамометром машини значення якого записували у ПК з допомогою АЦП і відповідного програмного забезпечення. Паралельно з реєстрацією зусилля розтягу фотографували ділянку поверхні зразка з частотою зйомки 1fps, що відповідає часу реєстрації зусилля.

Результати досліджень за дії статичного навантаження $P=1140$ kg для однієї компоненти деформацій ϵ_y подано на рис. 2.12.

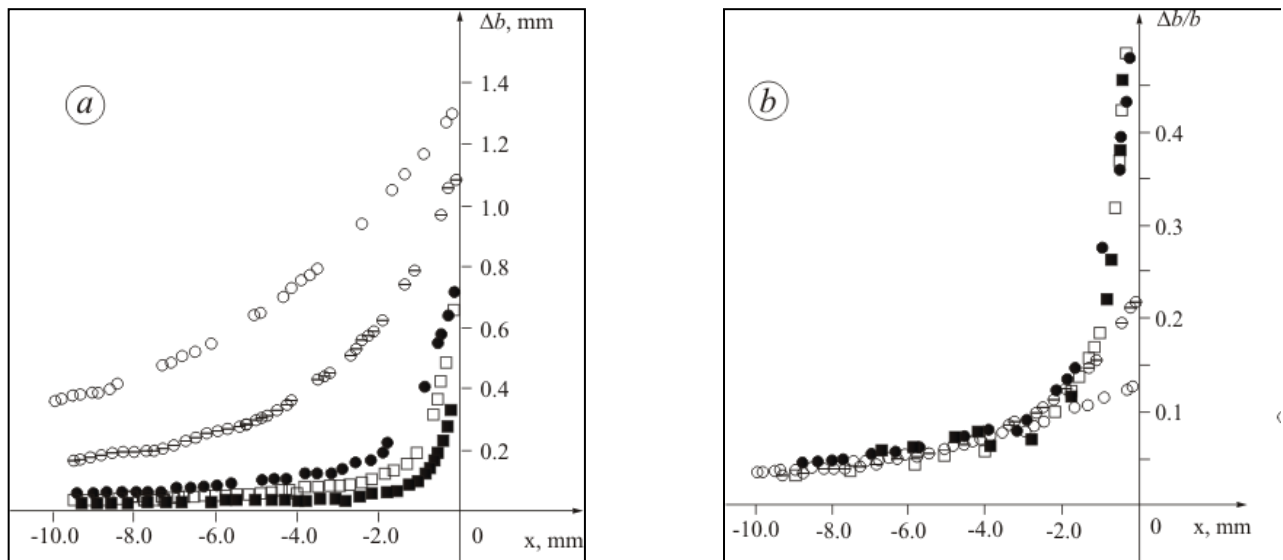


Рисунок 2.12 Розподіл переміщень (а) та деформацій (b) перед вершиною концентратора для різних баз вимірювання: точки відповідають результатам на певних довжинах баз (○ – 10.2 mm, ⊙ – 4.0 mm, ● – 1.5 mm, □ – 1.0 mm, ■ – 0.5mm)

Аналіз результатів розподілу переміщень показує, що обчислені на продовженні концентратора для п'яти довжин баз вимірювання від 10,2 mm до 0,5 mm є різні і зберігають тенденцію збіжності впродовж всього проміжку. При цьому для найменшої бази числові значення розмірів яких перевищують (на порядок) характерні розміри мікроструктури сталі 20ГС приводять до дуже близьких значень деформацій, що є доказом їх незалежності, та можна вважати істинними деформаціями для сталі 20.

2.4.4. Методичні аспекти побудови повних рівноважних діаграм деформування з використанням ЦКЗ

Для визначення стандартних механічних характеристик матеріалу проводять дослідження зразків в лабораторних умовах на підставі яких будують діаграми деформування [125-127]. Побудовані залежності зміни силових параметрів (зусилля навантаження, напруження) від деформаційних (абсолютне чи відносне видовження) добре описують аналітичні залежності в

області пружних і пружно-пластичних деформацій до появи шийки у зразку. З появою шийки при одновісному розтягу зразка в матеріалі формується тривісний напружений стан. В результаті цього в матеріалі виникають пластичні зони, що приводить до зародження внутрішніх дефектів (тріщин), які зменшують поперечний переріз зразка, і до його спонтанного руйнування. За характеристику міцності матеріалу приймають напруження, які визначені без врахування наявних внутрішніх тріщин та без встановлення істинних (реальних) напружень. Цю характеристику називають умовною границею міцності σ_b , яка є на порядок меншою від теоретичної міцності матеріалу встановлену аналітичним (розрахунковим) шляхом.

Невідповідність теоретичної і експериментально визначеної характеристики міцності матеріалу спонукала до пошуку різних способів побудови діаграм. Зокрема при визначенні напружень з врахуванням зміни площі поперечного зразка будували діаграми в координатах “S- Ψ ”, “S-e”, які називають істинними. Разом з тим при силовій схем навантаження, яка передбачає збільшення зусилля не вдається зареєструвати появу та розміри внутрішніх дефектів у зразку, оскільки їх руйнування відбувається спонтанно за рахунок вичерпування енергетичних запасів матеріалу при значних величинах прикладеного зовнішнього навантаження та напруженнях, що перевищують міцність матеріалу. Також існуючі методи з оцінювання відносних деформацій передбачають визначати її як усереднену величину на базі де вони є неоднорідні по довжині. Експеримент показує, що розмір шийки при випробуванні зразків є досить великим і по її довжині деформації визначені на різних базах будуть різні. Тому для побудови істинних діаграм руйнування необхідно врахувати це. Враховуючи також факт неоднозначної залежності між напруженнями і деформацією при пластичному деформуванні для різних станів (різної термообробки) доцільно оцінювати опірність матеріалу руйнування на основі інваріантних характеристик. Питома енергія руйнування матеріалу, встановлена на основі істинних напружень та деформацій, визначених в

локальному об'ємі, де є однорідний напружено-деформований стан, найбільш об'єктивно характеризує міцнісні і деформаційні властивості матеріалу.

Повна рівноважна діаграма та на цій основі визначені характеристики міцності і деформативності повинні відтворювати поведінку матеріалу, як при випробуванні зразка так і в реальній конструкції. Зокрема найбільші деформації матеріалу в елементі конструкції виникають в околі концентраторів напружень. При деформуванні такого елемента конструкції в локальному об'ємі проходить перерозподіл напружень, виникають пластичні зони напружень в результаті чого відбувається їх перерозподіл та стримування у загальному об'ємі пружно-деформованого металу. Такий процес деформування у великому об'ємі металу елементу конструкції відповідає силовій схемі жорсткого навантаження зразка з фіксованим переміщенням, який можна відтворити у лабораторних умовах. Таким чином зразок необхідно випробувати за силовою схемою жорсткого переміщення для стримування спонтанного руйнування та визначення величини пошкодження, істинних напружень і деформацій.

Для побудови повних рівноважних діаграм деформування розроблені відповідні технічні засоби, для визначення переміщень в локальному об'ємі, а також навантаження зразка за жорсткого контрольованого переміщення.

В результаті побудованих повних діаграм встановлюють істинні напруження та істинні деформації і будують істинні діаграми руйнування. За істинними діаграмами визначають величину енергію деформування та руйнування.

Для випробувань та побудови повних рівноважних діаграм використовували циліндричні зразки з концентратором (рис. 2.13) із сталі 20ГС у стані поставки. Стандартні механічні характеристики якої є наступні: межа течіння $\sigma_{0,2} = 277$ МПа межа міцності $\sigma_b = 533$ МПа, відносне видовження $\delta_5 = 24\%$, відносне звуження $\Psi = 40\%$. Робочу зону зразка шліфували і наносили крапковий хаотичний малюнок на поверхню спеціальною еластичною фарбою за технологією безконтактних вимірювань методом ЦКЗ. Випробування зразків реалізували з використанням обладнання за методикою викладеною у 2.4.

вимірювання локальних переміщень за зміною, яких визначали величину деформації, здійснювали методом ЦКЗ. Реєстрацію зображень та їх обробку методом ЦКЗ здійснювали оптичною системою з використанням цифрової камери Tourcam USMOS 10000 КРА і об'єктивом Xeonplan.

Частота реєстрації зображень становила 0,5 fps. В результаті обробки зображень одержали розподіл деформацій у робочій зоні зразка на різних етапах деформування, що відповідає певній пошкодженості. Величину пошкодження зразка встановлювали шляхом зішліфовування зони максимальних деформацій для кожного етапу деформування на половину діаметра для вимірювання величини утвореного дефекту. Повна діаграма деформування «*P-e*» показана на рис. 2.14 де вказано символами X етапи навантаження зразків розтягом у приспосібленні. На зішліфованій поверхні зразка з допомогою інструментального мікроскопу МИМ-6 вимірювали величину (діаметр) утвореної тріщини, площа якої відповідає пошкодженню.

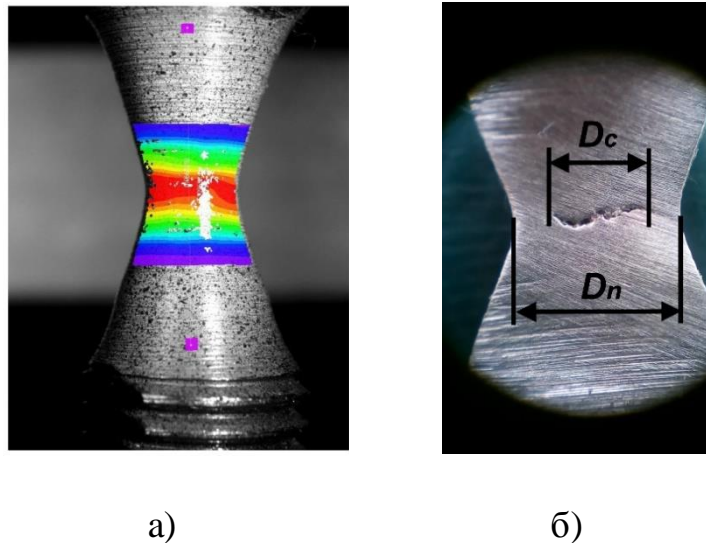


Рис. 2.13 Розподіл деформації у робочій зоні зразка, одержаний методом ЦКЗ (а) та вимірювання розміру внутрішньої тріщини у шийці зразка (б).

Істинні напруження в шийці зразка до появи тріщини визначали за стандартною методикою.

При наявності тріщини величину істинних напружень S_i для кожного етапу деформування визначали за формулою:

$$S = P_i / \frac{\pi}{4} (D_n^2 - D_T^2) \quad (2.24)$$

де P - сила розтягу зразка,

D_n – діаметр шийки зразка,

D_T – діаметр тріщини в зразку.

За величиною встановлених методом ЦКЗ істинних деформацій e на базі 100 мкм, а також обчислених істинних напружень S_i будували повну істинну діаграму руйнування для сталі 65Г. (табл. 2.1, рис. 2.14)

Для порівняння на рис. 2.14б (1) показана діаграма, яка побудована за стандартом, де т.В відповідає умовній границі міцності σ_b .

Таблиця 2.1.

Значення механічних характеристик для сталі 65Г

№ п/п	Зусилля P, кН	e_x	e_y	e_z	S, МПа	W, Мдж/м ³
	18,10	0,121	0,398	0,121	906	1630

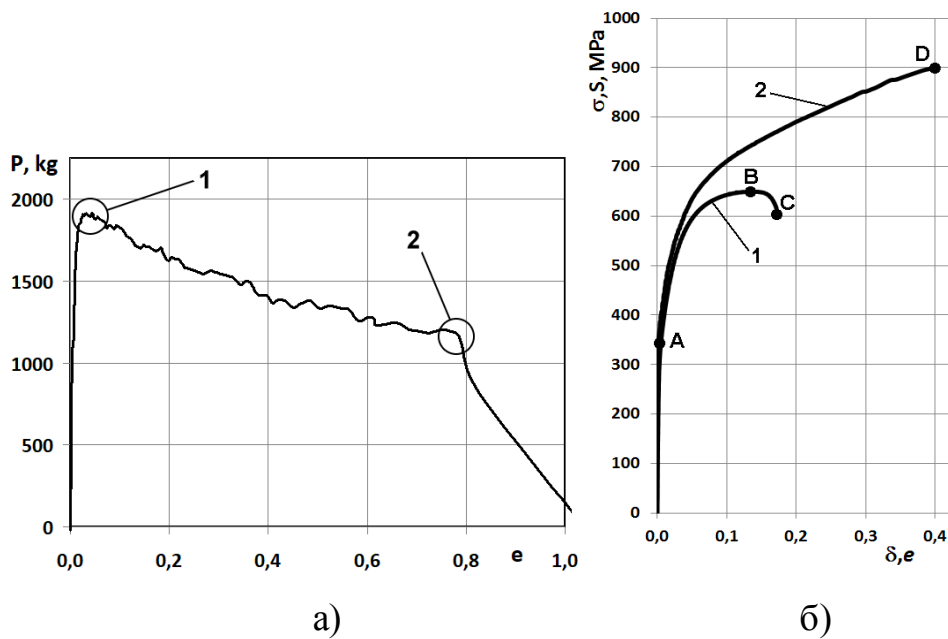


Рис. 2.14 Діаграма для сталі 65Г а) рівноважна; б) істинна.

2.5. Методика визначення питомої енергії руйнування за зсуву

Дослідження процесу руйнування за поперечного зсуву в останні роки поглибилися. Це пов'язано перш за все з випадками руйнування бурових колон, шаруватих композиційних матеріалів, трансмісійних валів і ін. Разом з тим для багатьох випадків джерелом початку руйнування та поширення відбувалось за механізмом поперечного зсуву [128].

Для встановлення інваріантного критерію оцінювання несучої здатності елементів конструкцій, які піддані дії крутного моменту та визначення характеристик матеріалу за зсуву необхідно розробити надійну методику експериментальних досліджень. Достовірність визначення характеристик міцності дозволить надійно оцінювати міцність і довговічність елементів конструкцій, що піддані дії крутного моменту, а також складного навантаження, зокрема крученню та розтягу.

Такому навантаженню піддані вали гідротурбіни, які передають крутний момент від робочого колеса до генератора, а також зусилля розтягу та згинального моменту. У таких випадках пошкодження в матеріалі можуть виникати внаслідок тривалої дії зовнішніх силових факторів нормального та

зсувного характеру, а також взаємодії з водою при температурі $(50-80)^{\circ}\text{C}$. для використання сформульованого критерію при визначенні довговічності за складного навантаження розроблено методику визначення питомої енергії руйнування за зсуву W_{τ} . Методика визначення характеристик міцності базується на випробуванні циліндричних зразків з концентратором при скручуванні на спеціальному пристосуванні, і забезпечує кручення, розтяг, а також сумісне навантаження. Ескіз зразка подано на рис. 2.15. Робочу зону зразка шліфували після чого наносили хаотичний крапковий малюнок спеціальною еластичною фарбою для дотримання вимог технології безконтактних вимірювань методом ЦКЗ.

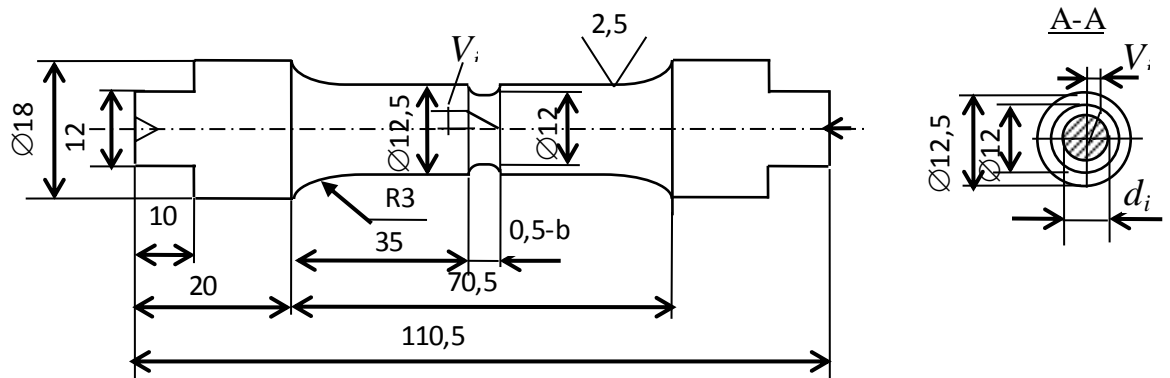


Рис.2.15 Зразок для визначення характеристик матеріалу за зсуву

Для проведення випробувань використовували спеціальне пристосування, яке зображено на рис. 2.16 і забезпечує навантаження циліндричного зразка; кручення, розтягом, а також сумісним крученням і розтягом.

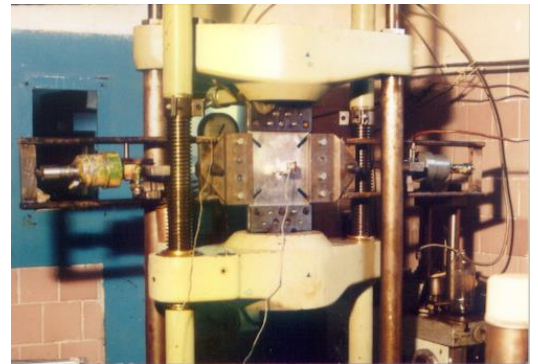
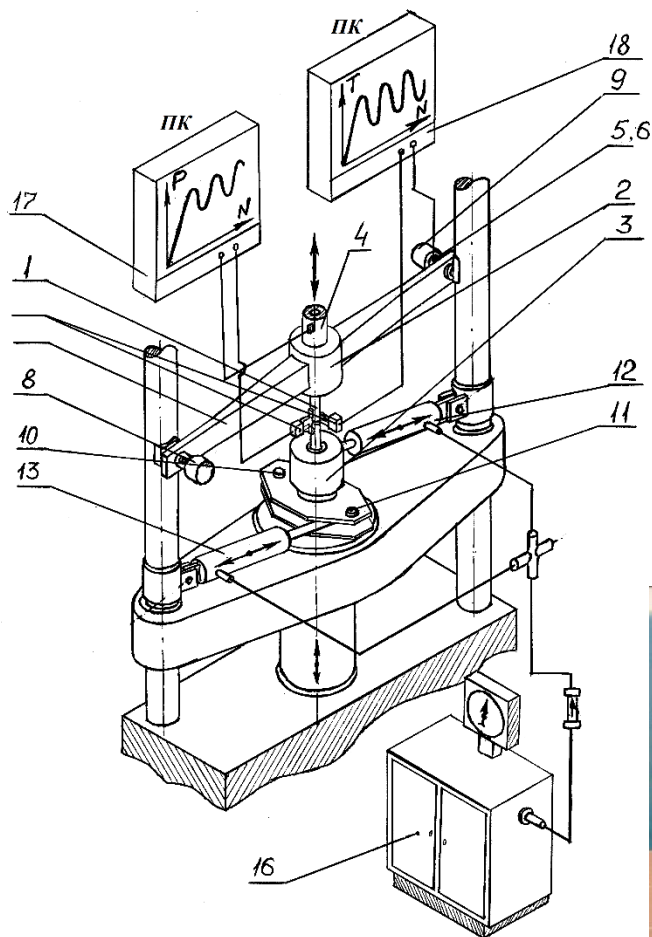


Рис. 2.16 Випробувальна установка для розтягу і кручення циліндричних зразків

Зразок 1 встановлюють в універсальні захоплювачі 2,3, які фіксують лисками для кручення і розтягу з допомогою галтелей. Верхній захоплювач 2 у вигляді коромисла з'єднаний з випробувальною машиною EUS-20 через динамометр розтягу- стиску 4, а його кінці через динамометри 5,6, які реєструють зусилля закруту контактують з колонами машини і одночасно утримують захоплювач від прокручування. Момент кручення на зразку визначають, як добуток зусилля зареєстроване динамометрами 5,6 на плече між ними. Одночасний контакт динамометрів забезпечується регулюванням їх гайками 8,9. Нижній захоплювач в якому закріплений другий кінець зразка з'єднаний з машиною EUS-20 і має можливість вільно обертатись навколо поздовжньої осі через упорний підшипник. До важелів нижнього захоплювача через штифти 10 і 11 приєднані гідроциліндри 12 і 13 протилежні кінці, яких

через шарніри 14,15 з'єднані з несучими колонами. Переміщення циліндрів 12,13, тобто навантаження зразка крученням, забезпечує автономна гідростанція 16.

Сигнали від динамометрів сили розтягу і кручення через АЦП подають на ПК 17,18 де їх реєструють. Для вимірювання взаємного зміщення (зсуву) двох половин зразка при його крученні використовують метод ЦКЗ. Порядок проведення роботи з визначення взаємного зміщення V_i та встановлення деформації зсуву аналогічний, як при розтягу циліндричного зразка поданого у розділі 2.4.4.

2.5.1 Порядок проведення випробувань

Випробування циліндричних зразків для визначення питомої енергії руйнування за кручення проводили з використанням спеціального пристрою встановленому на універсальній розривній машині EUS-20 рис. 2.16. Для випробувань використовували суцільний циліндричний зразок зображений на рис.2.15.

Зразки виготовляли із сталі 20 ГС у стані поставки, що відповідає матеріалу вала гідротурбіни. Стандартні механічні характеристики сталі 20 ГС такі: границя течіння $\sigma_{0,2} = 277$ МПа, границя міцності $\sigma_b = 538$ МПа, відносне видовження $\delta_5=24\%$; відносне звуження $\Psi=40\%$. Поверхню концентратора шліфували і наносили хаотичний крапковий малюнок спеціальною еластичною фарбою, що відповідає технології безконтактних вимірювань оптичним методом для підвищення точності [88-90]. Крутний момент на зразку обчислювали за формулою

$$M_k = 2P \cdot l \quad (2.25)$$

де P - зусилля на одному динамометрі

l - плече від осі зразка до осі динамометра.

Зображення по дні концентратора реєстрували з допомогою оптичної системи на основі промислової цифрової камери Toupcan UC MOS 100 KPA з об'єктивом Xenoplan. Частота реєстрації зображень становила 0,5 fps. За результатами обробки зображень отримували розподіл взаємних зміщень V_i двох протилежних частин відносно лінії розділу на базі $b=0,5$ мм.

За результатами випробувань будували діаграму «момент кручення M – зсув V ».

Першу партію зразків (3 шт.) закручували моментом M_1 до точки 1 (рис. 2.17), яка відповідає початку пластичного течіння та зародженню тріщини. При досягненні моменту M_1 в т.1 зразок знімали із випробувальної установки і руйнували його за силовою схемою триточкового згину. На зламі зразка вимірювали діаметр вершин утвореної тріщини від скручування d_i .

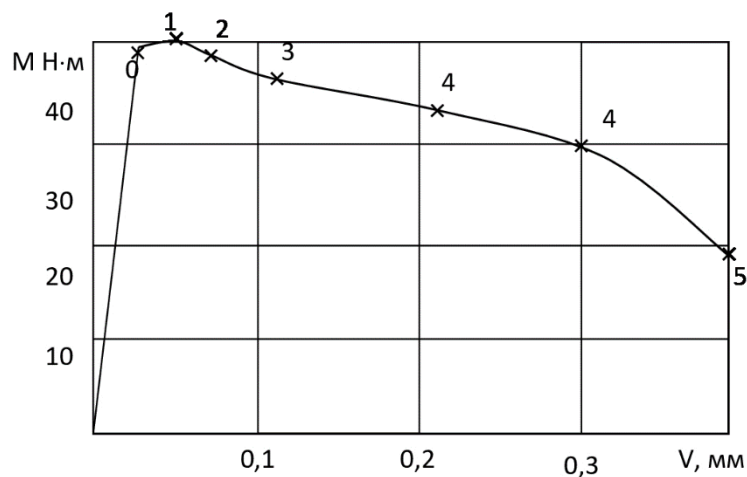


Рис. 2.17 Діаграма деформування « $M-V$ » при випробуванні зразків крученням.

Розраховували величину моменту опору січення за формулою:

$$W_i = \frac{\pi d_i^3}{16} \quad (2.26)$$

де d_i – діаметр зразка що відповідає i -му просуванню тріщини.

За величиною зміщення V_i встановленого методом ЦКЗ вираховували зсувну деформацію γ_i за формулою:

$$\gamma_i = \frac{V_i}{b}; \quad (2.27)$$

де V_i – зміщення зсуву.

$b = 0,5$ мм – база вимірювання зміщення.

Другу партію зразків навантажували до т. 2 на діаграмі (рис. 2.17), і проводили таку ж процедуру в результаті якої встановлювали величину моменту M_2 і момент опору січення W_2 , як у першому випадку.

Наступні партії зразків навантажували до т. 3,4,5 аналогічним чином обчислювали величини W і γ для кожної точки. Точка 5 відповідає спонтанному руйнуванню зразка.

Для кожної точки з повної рівноважної діаграми визначали величину критичних напружень зсуву τ_{ci} за формулою (2.28)

$$\tau_{ci} = \frac{16M_{ci}}{\pi d_i^3} \quad (2.28)$$

За даними отриманими експериментальним шляхом будували істинну діаграму руйнування за зсуву « $\tau \sim \gamma$ ».

В процесі випробувань зразків одержували вихідну експериментальну криву в координатах «момент кручення M – зсув V » (рис.2.17). На діаграмі точка 1 відповідає моменту появи тріщини в концентраторі. Ділянка 1 -5 відповідає статичному підростанню тріщини від поверхні концентратора до центру зразка. Спадна ділянка діаграми після точки 5 відповідає спонтанному руйнуванню залишкового кільцевого перерізу зразка.

Розраховували істинні напруження τ та деформації γ на основі діаграми « $M-V$ » для сталі 20 ГС таблиця 2.2.

Таблиця 2.2.

Значення експериментальних даних при крученні зразків

Точка навантаження на діаграмі	d, мм	M, н·м	γ , (d ϕ /dx)	τ , МПа
1	12	40,1	0,003	120
2	11,4	39,4	0,006	150
3	10,2	37,1	0,23	215
4	9,3	33,2	0,42	295
5	7,31	29,9	0,62	380

Відмінним для випробування за розробленою методикою від стандартних досліджень є те що одержані локальні деформації перевищують ті які визначені стандартною методикою.

За обчисленими значеннями істинних напружень, на основі встановленої локальної деформації методом ЦКЗ будували повну істинну діаграму деформування зразка за кручення (рис. 2.18).

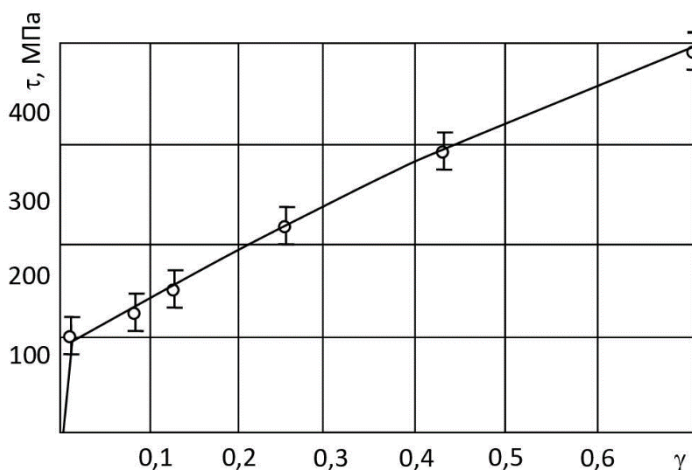


Рис. 2.18 Діаграма «істинні напруження τ – істинна деформація γ » за кручення циліндричних зразків.

Із діаграми визначали питому енергію руйнування, як площу що

обмежена кривою діаграми і віссю деформацій.

В загальному повну енергію руйнування W_τ за кручення визначали, як сума пружної складової W_1 та пружно-пластичної W_2 .

$$\begin{aligned}
 W_\tau &= W_{\tau_1} + W_2 = \int_0^{\gamma_{0,3}} \tau_1(\gamma) d\gamma + \int_{\gamma_{0,3}}^{\gamma_c} \tau_2(\gamma) d\gamma = \int_0^{\gamma_{0,3}} G \cdot \gamma d\gamma + \tau_{0,3} \int_{\gamma_{0,3}}^{\gamma_c} \left(\frac{\gamma}{\gamma_{0,3}} \right)^n d\gamma = \\
 &= \frac{1}{2} G \gamma_{0,3}^2 + \frac{G_{0,3}}{\gamma_{0,3}^n} \cdot \frac{\gamma_c^{n+1} - \gamma_{0,3}^{n+1}}{n+1}.
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

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

G – модуль зсуву;

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

γ - біжуче значення зсувної деформації;

$\gamma_{0,3}$ - деформація, що відповідає границі течіння за зсуву.

$n = 0,216$ - коефіцієнт;

$$W = 193,592 \text{ МПа} = 193,582 \cdot 9,8 = 1897,2 \text{ Мдж/м}^3$$

Порівняння значень питомої енергії руйнування визначеної з класичної діаграми та повної істинної, запропонованої на основі локального підходу показує, що величина встановлена із повної істинної діаграми є в 1,7 рази більша ніж за класичним підходом.

Разом з тим величини енергії руйнування за деформації зсуву є на 18% менша ніж величина енергії руйнування встановлена за локальним підходом при руйнуванні розтягом. Використання енергії руйнування на основі побудованої повної діаграми деформування за зсуву, як інваріантної характеристики матеріалу дає підстави використовувати її в процесі розрахунку напружено-деформованого та граничного станів елементів конструкцій за дії зсувних деформацій.

2.6 Встановлення пошкодження елементів конструкцій після тривалої експлуатації за зміною фізичних параметрів

В процесі експлуатації елементів конструкцій піддані дії силових факторів та робочого середовища внаслідок чого відбувається деградація матеріалу. Зміна стану металу за дії підвищеної температури, локальної пластичної деформації, непередбачуваних перевантажень є характерним за експлуатації багатьох елементів конструкцій енергетичного обладнання. Тому важливо вивчити механізми зміни властивостей металу під дією цих чинників, оцінити ступінь пошкодження за даними неруйнівного контролю з метою встановлення залишкового ресурсу роботи, щоби запобігти непередбачувані аварії. Для оцінки стану та ресурсу матеріалу в елементі конструкції використовують різноманітні неруйнівні методи контролю зокрема зміну акустичних властивостей, які пов'язані з їх динамічною структурою, залишковими механічними напруженнями, різноманітними дефектами структури, фазовим складом тощо. Тому провівши відповідні лабораторні дослідження на зразках та отримавши певні закономірності змін між фізичними параметрами і механічними характеристиками в матеріалі їх можна використовувати при технічному діагностуванні стану елементів конструкцій. Зокрема перспективною характеристикою для оцінки стану матеріалу в процесі його пошкодження є швидкість проходження акустичної хвилі (АХ) в металі [131] за зміною якої можна оцінити стан металу. Для цього використовують прецизійні методи вимірювання швидкості ультразвукових хвиль [129-133], які використовують у неруйнівному контролі та фізиці твердого тіла. Особливістю цих методик є можливість вимірювати локальну швидкість у визначеній зоні зразка або деталі [131]. На підставі таких досліджень можна встановити неоднорідність матеріалу по об'єму зразка. Зокрема в межах одного зразка де є зони пружної, пружно-пластичної деформацій, можна отримати інформацію про зміну його стану. Це є важливо тому, що зміна властивостей матеріалу за дії силового і температурного навантажень є неоднорідною,

зокрема пластична деформація.

Пластична деформація є просторово неоднорідна і залежить від силової схеми навантаження, геометричної форми, та початкової неоднорідності металу, а також наявність залишкових механічних напружень. Створення наперед прогнозованої неоднорідності властивостей металу дає можливість оцінити вплив різних чинників на досліджуваний процес. Для встановлення зміни швидкості акустичної хвилі за різного ступеня пошкодження у сталі 20 ГС проведені відповідні дослідження. Сталь 20 ГС використовують при виготовленні валів гідротурбін, тому встановивши закономірності зміни швидкості акустичної хвилі від величини пластичної деформації на зразках можна буде оцінити стан металу на реальному об'єкті. Для кожного матеріалу характерним є відповідна швидкість поширення ультразвукової хвилі в залежності від властивостей: густини ρ та характеристики пружності E - модуля Юнга, яка має наступний вигляд

$$V_0 = V(0) = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.30)$$

де індекс 0 відповідає вихідному недеформованому стану матеріалу.

В процесі деформування матеріалу відбуваються структурні зміни, що впливає на значення його густини ρ , що в кінцевому результаті змінить швидкість проходження ультразвукової хвилі в деформованому стані матеріалу $V(\varepsilon)$ за наступною залежністю

$$V(\varepsilon) = V_0 + \Delta V(\varepsilon), \quad (2.31)$$

де $\Delta V(\varepsilon)$ – характеристика зміни швидкості ультразвуку в залежності від ступеня деформованості матеріалу ε від'ємною за своїм значенням.

Встановлення характеру зміни та величини залежності $\Delta V \sim \varepsilon$ реалізували на основі результатів експериментальних досліджень за розтягу плоских зразків

різного ступеня деформування з фіксацією швидкості поширення ультразвукової хвилі.

Зокрема на рис. 2.19 наведено ескіз плоского зразка, який розтягували на випробувальній установці EUS – 20 за різного ступеня деформування.

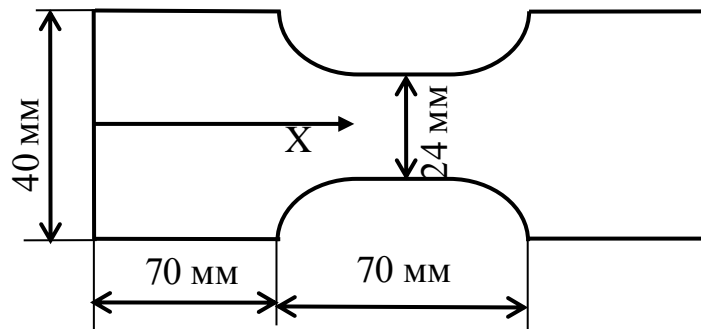


Рис. 2.19 Форма досліджуваних зразків.

Враховуючи симетричний розподіл поздовжньої деформації $\varepsilon(x)$ по довжині шийки, а також близький до симетричного розподіл спаду швидкості ультразвукової хвилі $\Delta V(x)$ у зоні пластичних деформацій в області шийки, що встановлені експериментально, отримані величини можна апроксимувати подібними якісно аналітичними співвідношеннями типу

$$f_i(x) = (a_i + b_i \cdot x^{2 \cdot c_i})^{-1} \quad (2.32)$$

де

$$\varepsilon(x) = f_1(x) = (a_1 + b_1 \cdot x^{2 \cdot c_1})^{-1}, \quad (2.33)$$

$$\Delta V(x) = f_2(x) = (a_2 + b_2 \cdot x^{2 \cdot c_2})^{-1} \quad (2.34)$$

Коефіцієнти у формулах a_i , b_i , c_i встановлюють на підставі

експериментально визначених величин деформації і швидкості поширення хвилі в межах шийки зразка.

Залежність зміни величини деформації від значень швидкості ультразвукової хвилі в області максимальних деформацій у зразку подано на рис. 2.20.

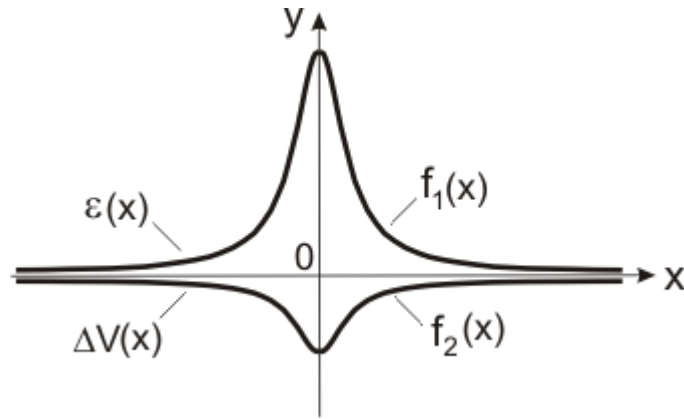


Рисунок 2.20 – Розподіл швидкості поширення ультразвукової хвилі від величини пластичних деформацій за розтягу зразка.

Початок координат т.о для даної схеми розміщено в центрі зразка.

Із розв'язку рівнянь (2.35) і (2.36) відносно x та порівнюючи між собою встановлено безпосередній зв'язок між зменшенням швидкості ультразвукової хвилі ΔV при зростанні величини пластичної деформації ϵ .

$$\Delta V(\epsilon) = \left(a_2 + b_2 \cdot \left(\frac{\epsilon^{-1} - a_1}{b_1} \right)^{\frac{c_2}{c_1}} \right)^{-1}. \quad (2.35)$$

Або

$$\epsilon(\Delta V) = \left(a_1 + b_1 \cdot \left(\frac{\Delta V^{-1} - a_2}{b_2} \right)^{\frac{c_1}{c_2}} \right)^{-1} \quad (2.36)$$

За встановленою величиною швидкості ультразвукової хвилі ΔV згідно отриманої залежності, в процесі технічної діагностики ділянки об'єму елемента конструкцій при його експлуатації можна визначити ступінь деформованості і пошкодження внутрішнього та встановити термін безпечного використання.

2.6.1 Проведення досліджень для сталі 20 ГС.

Дослідження проводили на плоских зразках із сталі 20 ГС підданих різним ступеням пластичної деформації за одновісного розтягу. В процесі зміни ступеня пластичного деформування визначали просторовий розподіл зміни швидкості поздовжньої акустичної хвилі. Після кожного етапу навантаження вимірювали просторовий розподіл швидкості поздовжньої АХ. Випробування розтягом реалізували на універсальній розривній машині EUS-20 за незмінних умов навантаження вздовж осі X. Ступінь деформування перевищував границю пружності і знаходився у пружно-пластичній зоні з чітко вираженою шийкою. За результатами досліджень на основі отриманих діаграм деформування зразків розраховували механічні характеристики сталі 20 ГС:

Границю міцності $\sigma_b=533$ МПа, границю текучості $\sigma_T=277$ МПа, відносне видовження $\delta=24\%$.

Після пластичного деформування зразки шліфували для отримання плоскої поверхні та забезпечували паралельність двох протилежних поверхонь з метою коректного визначення швидкості поздовжньої АХ.

Для зменшення залишкових механічних напружень та густини дислокації в пластично-деформованому матеріалі проводили відпал при температурі 650°C з витримкою 4 год.

Швидкість поздовжньої АХ встановлювали луно-імпульсним методом [134]. За величиною часу проходження акустичного імпульсу за його багаторазове відбивання від протилежних поверхонь. Визначивши товщину

зразка у напрямку проходження акустичних імпульсів і за результатами визначали швидкість акустичної хвилі.

Визначення швидкості та проведення вимірювань здійснювали за схемою показаною на рис. 2.21.

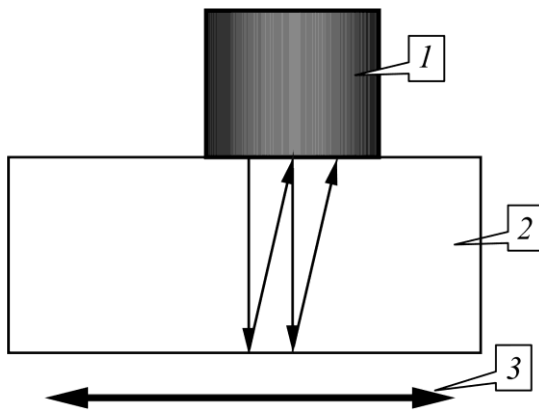


Рис. 2.21 Схема експерименту з визначення швидкості акустичної хвилі:
1 – перетворювача; 2 – зразок; 3- напрям деформування.

Збудження та реєстрацію акустичних імпульсів реалізували з допомогою п'єзоелектричного перетворювача з резонансною частотою 10 MHz.

Тривалість імпульсів становила декілька мікросекунд. Зареєстровані сигнали оцифровували з допомогою осцилографа TDS1012 і записували в пам'ять комп'ютера. В результаті оброблення даних вимірювань встановлювали час між відбитими акустичними імпульсами на основі кореляційного методу. Похибка визначення зміни швидкості акустичної хвилі становила 0,03 %. Поздовжня хвиля поширювалася в перпендикулярному напрямку до деформування (розтягу) зразка. П'єзоелектричний перетворювач закріплювали на ширшій поверхні зразка, а зміну просторового розподілу швидкості акустичної хвилі встановлювали шляхом його послідовного переміщення вздовж напрямку прикладання сили розтягу. Беручи до уваги, що область пластичного деформування відповідає робочій зоні, а місця закріплення зразка в захоплювачах машини EUS-20 прилеглі ділянки деформовані лише пружно. При знятті зусилля розтягу залишкові деформації будуть лише в області

пластично-деформованого матеріалі, а решту відповідають початковому стану який був до розтягу, тобто структура металу не була порушена.

У такому випадку є можливість порівняти зміни швидкості хвилі в області пружно-пластичного деформування у порівнянні з вихідним станом металу.

Для оцінювання впливу ступеня пластичного деформування на зміну швидкості акустичної хвилі у сталі 20 ГС використовували плоскі зразки типу І згідно ГОСТ 1497-84 з номінальними розмірами робочої частини 70x24x12 мм. Зразки виготовляли із листової сталі товщиною 15 мм у стані поставки. Дослідження проводили на зразках із різним ступенем пластичного деформування робочої частини за розтягу на 23% (рис. 2. 22a) та 29 % (рис. 2.22b).

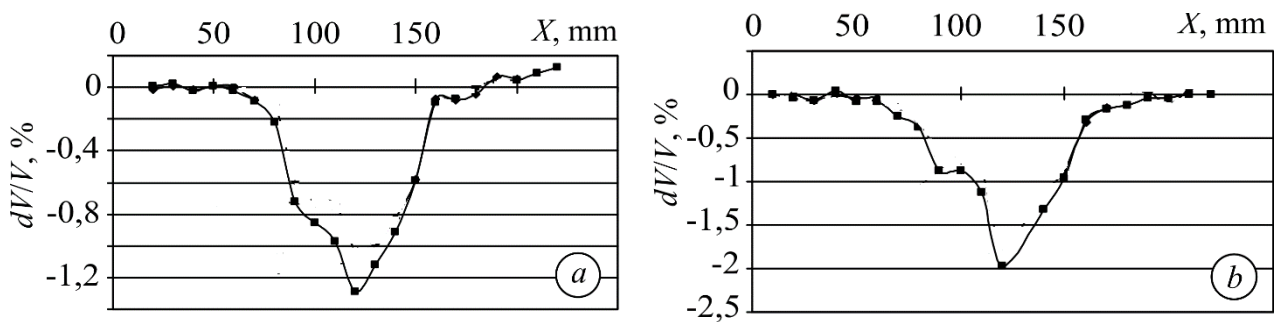


Рис.2.22 Просторовий розподіл поздовжньої хвилі підданих пластичній деформації: *a*- 23%; *b*- 29%.

Зміна величини пластичної деформації зразка І, що визначена на локальній базі 10 мм уздовж його робочої довжини подано на рис. 2.23.

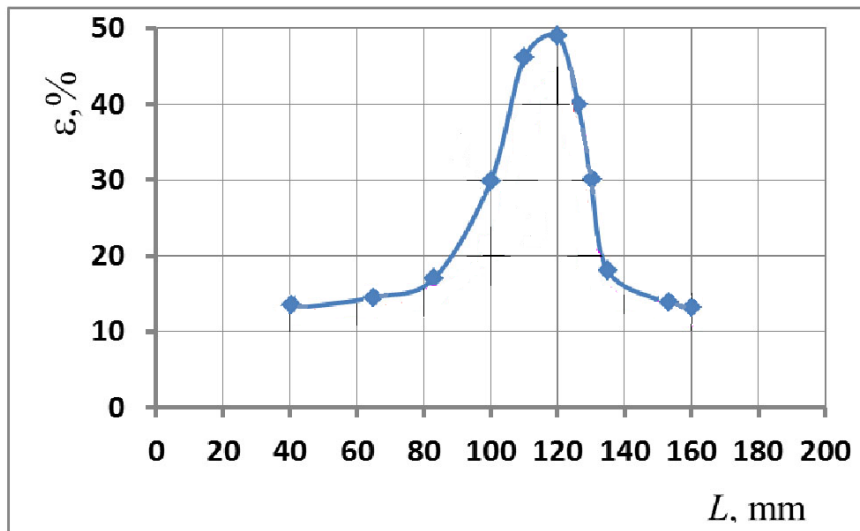


Рис. 2.23 Зміна деформації по довжині зразка I (без врахування захватної частини), розрахованої на базі 10 мм.

2.6.2. Аналіз результатів випробувань

За нульове значення швидкості АХ приймали швидкість визначену на відстані 15 мм від краю зразка ($X=15$ мм), де відсутні залишкові деформації. Тому для встановлення зміни швидкості АХ від ступеня деформування порівнювали дані визначені на різних ділянках, тобто із залишковою деформацією і без неї. Для кожного зразка після пластичної деформації в просторовому розподілі спостерігали такі мінімуми I-1,3% (рис. 2.22a) та II-2% (рис. 2.22b), що відповідає пластичній деформації 23% і 29% відповідно. Просторова зміна швидкості АХ характеризується випадковим розподілом локальної пластичної деформації.

Результати наведених даних (рис 2.22) вказують, що пластична деформація призводить до зміни просторового розподілу швидкості АХ. На першому етапі, тобто за низького ступеня пластичного деформування, зразки піддані неоднорідній пластичній деформації розтягом, що спричинило виникнення просторово неоднорідної залежності швидкості АХ, яка є індивідуальною. Ця залежність пов'язана з неоднорідним розподілом залишкової деформації, по ширині зразка.

Зокрема, на краях зразка, де деформація є найменшою зміна швидкості АХ є мінімальною. Пластична деформація зразка супроводжується змінами структури в матеріалі. Таким чином після неоднорідної пластичної деформації отримуємо зразок із просторовою неоднорідністю.

Залишкова деформація зменшує швидкість поздовжньої акустичної хвилі (рис.2.23), що поширюється в напрямку перпендикулярному до розтягу зразка. Зменшення швидкості АХ за пластичної деформації в металах досліджено в [129,132] також показано, що вона змінюється внаслідок появи мікротріщин і мікропор [132], збільшенням густини дислокацій [131,132] з утворення текстури в металі, а також із виникненням внутрішніх залишкових напружень [131,132].

За результатами досліджень зміни просторової залежності зменшення швидкості АХ від величини пластичної деформації можна оцінити залишкову деформацію в елементі конструкції і визначити ділянку де досягається максимальне її значення на підставі якої встановити залишковий ресурс роботи (рис. 2.22).

Проведені дослідження на пластично-деформованих зразках та відпалених при температурі 650°C показують, що залишкові механічні напруження також зменшуються. Таке зменшення напружень змінює швидкість поширення АХ. Тому можна вважати, що термічна обробка в значній мірі вирівнює властивості ділянки із залишковими деформаціями та недеформованої ділянки щодо густини дислокації та залишкового механічного напруження. Основною відмінністю ділянки із залишковою пластичною деформацією і недеформованої частини полягає у наявності в ній мікротріщини і мікропор.

Таким чином внаслідок появи мікротріщин і мікропор та збільшення дислокація у zdeформованій ділянці шийки зразка значно зменшується швидкість поширення хвилі. Для встановлення причин цього явища провели вимірювання густини матеріалу у zdeформованій ділянці шийки зразка.

Визначення густини zdeформованого пластично проводили з використанням приладу HYDRO ADG1000. Для цього із розірваного зразка в

зоні руйнування відрізали елемент висотою 1-1,5 мм від поверхні зламу. Таким чином отримували фрагмент (частину) зразка з пластичною деформацією матеріалу наближеною до критичного значення $\epsilon=23\%$. Для цієї зони фрагменту швидкість поширення поздовжньої акустичної хвилі знижувалась до 2% у порівнянні з недеформованою частиною матеріалу. Отриманий фрагмент зважували на приладі у повітрі та при зануренні у воду. За допомогою лабораторних ваг обладнаних спеціальною функцією «Гідро» здійснювали математичні розрахунки. Прилад оснащений інтерфейсом RS-232C за допомогою якого отримували результати розрахунку.

В результаті оброблення отриманих даних встановили факт зміни густини локального об'єму пластично - деформованого матеріалу, і тому важливо досліджувати зону у якій відбувається початок і завершення руйнування.

Залежність зміни швидкості акустичної хвилі від деформації уздовж зразка (рис. 2.24) та від густини матеріалу визначену у прилеглий до руйнування зоні подано на рис.2.25.

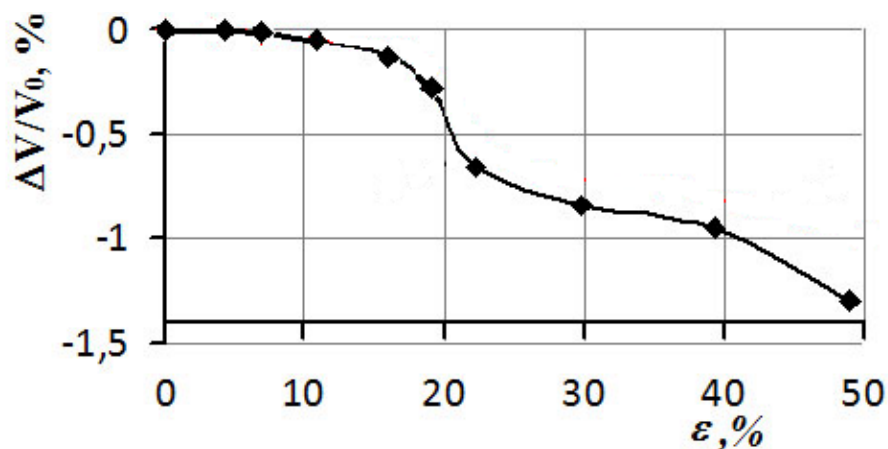


Рис. 2.24 Залежність швидкості поширення акустичної хвилі від деформації.

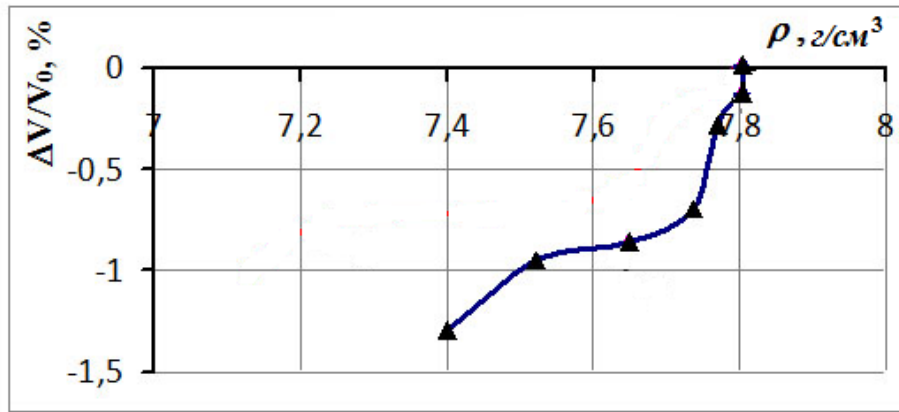


Рис. 2.25 Залежність швидкості поширення хвилі від густини матеріалу.

Таким чином механізм зміни швидкості АХ для пластично-деформованого матеріалу, а також підданого термічній обробці після пластичного деформування пов'язаний з утворенням мікропор та мікротріщин.

2.7. Основні результати та висновки до розділу 2

1. Розроблено критерій руйнування пружно-пластичного тіла в локальному об'ємі за складного навантаження на основі енергетичного балансу.
2. Розроблено методику з визначення питомої енергії руйнування за розтягу і кручення з використанням методу ЦКЗ. Величина істинної деформації e для сталі 65 перевищує відносну деформацію у 2,1 рази. Істинні напруження S перевищують границю міцності за стандартами на 38%.
3. Розроблено пристрій для розтягу циліндричних зразків за силовою схемою контрольованого жорсткого навантаження та побудовано повні рівноважні діаграми деформування.
4. Обґрунтований вибір величини бази вимірювань видовження локального об'єму для встановлення істинної деформації руйнування, яка є постійною для матеріалу.
5. Побудовано істинні діаграми руйнування матеріалу та встановлено величину енергії руйнування сталі 20ГС.

6. Розроблено методику побудови істинних діаграм при крученні циліндричних зразків на основі визначення істинних деформацій зсуву.

7. Встановлено зміну швидкості поширення поздовжньої хвилі в матеріалі від величини пластичної деформації.

8. Встановлено, що густина пластично-деформованого матеріалу знижується до 20%.

РОЗДІЛ 3.

ВСТАНОВЛЕННЯ ДОПУСТИМОГО ТИСКУ У ПАЛИВНОМУ БАКУ РАКЕТИ - НОСІЯ ЗА ЕНЕРГЕТИЧНИМ ПІДХОДОМ

Високі вимоги, щодо конструкції паливних баків ракет носіїв та їх несучої здатності вимагає достовірної оцінки їх міцності та прогнозованого робочого тиску.

Зокрема паливний бак повинен забезпечити експлуатаційні навантаження при мінімальній вазі. При проектуванні бака для ракети необхідно вибирати оптимальні характеристики матеріалу та його конструкцію. Конструкція баку передбачає наявність технологічних люків, які є своєрідними концентраторами напружень. Стінка бака виготовлена із листового алюмінієвого сплаву, який з однієї сторони має плоску поверхню, а з протилежної має ребристу форму, тобто шпренгелі поздовжні і поперечні. Такі листи формують у відповідну конструкцію (конічну або циліндричну) та зварюють стики. Для зменшення концентрації напружень зокрема у місцях розташування люків виконують спеціальне підсилення. З'єднання циліндричної поверхні зі сферичним днищем має також свої особливості. Тому конструкції баків для ракет носіїв мають багато особливостей і вимагають достовірного визначення напружено-деформованого стану з метою встановлення оптимального допустимого тиску палива. Враховуючи особливі вимоги до зменшення ваги конструкцію бака його виготовляють з мінімальним коефіцієнтом запасу міцності. Після виготовлення проводять сертифікаційні випробування, тобто визначають напружено-деформований стан за допомогою тензометрування. На зовнішню поверхню бака наклеюють за відповідною схемою тензодавачі, які розташовані на певній відстані один від одного, що обмежує реєстрацію деформації по всій поверхні, а лише в строго визначених місцях, а також в одному напрямку. Разом з тим бак виготовлений з тонколистового прокату де матеріал працює за умов двовісного навантаження. Тензодавачі наклеєні на поверхню можуть реєструвати видовження на базі давача лише в одному напрямку. Для

навантаження, що відповідає деформуванню матеріалу у пружній області напруження в перпендикулярному напрямку до давача можна встановити за відповідними співвідношеннями теорії пружності і вони становлять половину поздовжніх. За пружнопластичного деформування встановити залежність деформацій визначеної за показами тензодавачів в одному напрямку не зовсім коректно. За двовісного напружено-деформованого стану наявність шпренгелів змінює співвідношення між напруженням та деформаціями. Проведення досліджень з визначення допустимого робочого тиску на основі моніторингу деформацій методом ЦКЗ реалізують за розробленою схемою поданою на рис. 3.1. Для встановлення робочого тиску в баку в ДП «КБ «Південне» проводили випробування за методикою, яка передбачає виготовлення двох однакових конструкцій одну з яких руйнували та встановлювали величину тиску. Такий підхід значно здорожчує конструкцію. Для розрахунку напружено-деформованого стану в паливному баку використовують метод скінченних елементів. Разом з тим для встановлення граничного тиску необхідно визначити інваріантні граничні характеристики опірності руйнуванню. В роботі пропонується новий підхід, який передбачає декілька етапів при проведенні дослідної роботи по встановленню допустимого робочого тиску в баку.

Для цього використовують комплексний підхід який реалізується в декілька етапів.

В першу чергу це пошук інваріантного критерію, який адекватно описує напружено-деформований стан в матеріалі, як зразка так і в елементі конструкції. Зокрема в стінці паливного бака ракети при його навантаженні виникає двовісний напружений стан, тому необхідно встановити істинні напруження та деформації в локальному об'ємі за такої силової схеми навантаження. На цій підставі встановити величину енергії деформування та при порівнянні її з величиною енергії руйнування матеріалу АМГ-6 встановити допустимий робочий тиск із врахуванням коефіцієнта запасу міцності.



Рис. 3.1 Схема визначення допустимого робочого тиску у паливному баку

Для цього проведено комплекс досліджень при випробуванні зразків за одновісного та двовісного навантажень, а також випробування моделі у вигляді труби під дією внутрішнього тиску. При цьому у всіх випадках контроль та величину деформацій в околі концентраторів напружень визначали з використанням методу ЦКЗ.

3.1. Визначення енергії руйнування сплаву АМГ-6

Сплав АМГ-6 на алюмінієвій основі з підвищеним вмістом легуючого елемента магнію. Його перевага висока пластичність антикорозійна стійкість, у нього середні показники міцності. У сплаву є низька густина $2,65 \text{ г/см}^3$. Враховуючи, що паливний бак ракети носія виготовляють із тонкого листового прокату експериментальні дослідження проводили на плоских зразках, ескізи яких наведено на рис. 3.2.

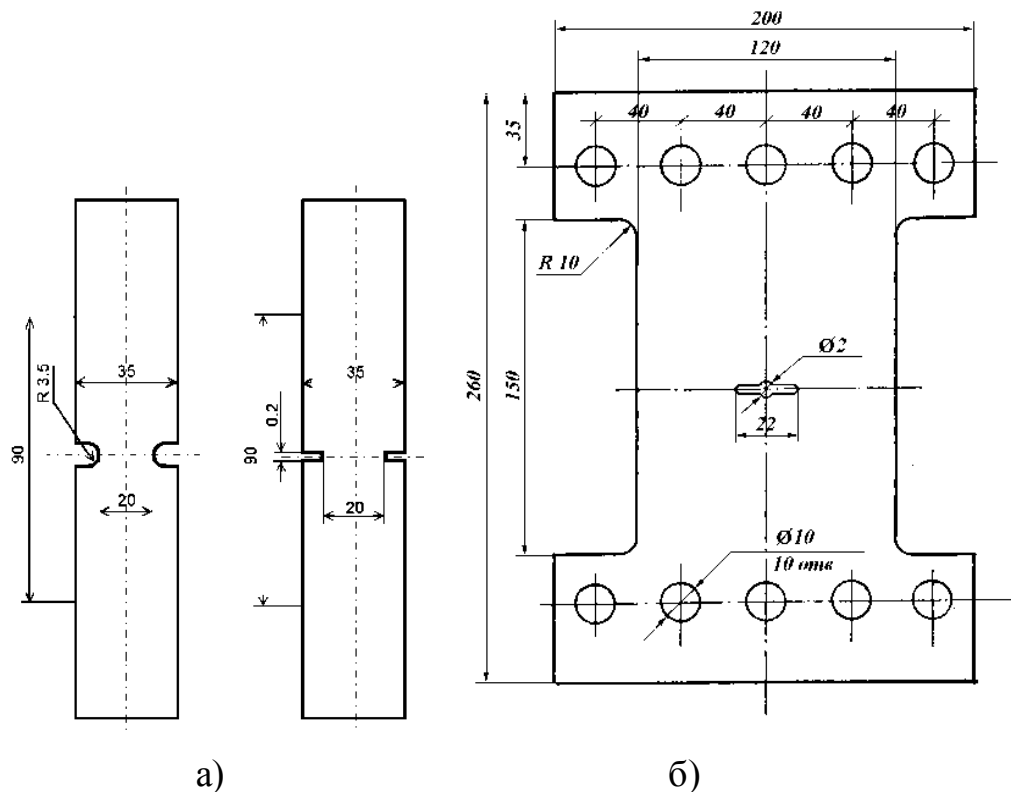


Рис. 3.2 Зразки для визначення механічних характеристик сплаву АМГ-6 за одновісного розтягу.

Для випробування використовували стандартні п'ятикратні плоскі зразки шириною 35 мм з боковими надрізами (концентраторами) радіусами заокруглення 3,5 мм і 0,2 мм (рис. 3.2а), а також шириною 120 мм з центральним концентратором напружень (надрізом) (рис. 3.2б). Зразки виготовляли із листового алюмінієвого сплаву, АМГ-6, що відповідає матеріалу бака ракети-носія. Спершу визначали стандартні механічні характеристики сплаву АМГ-6 згідно [135] в результаті будували діаграму руйнування. Другу партію зразків випробовували, використовуючи метод ЦКЗ, для реєстрації розподілу переміщень та визначення істинної деформації в околі концентраторів напружень [135]. Для цього використовували зображення зареєстровані при розтягу зразків за допомогою оптичної системи, яка складається з цифрової камери Olympus E-300 з роздільною здатністю 8 Мр (3264x2448) і мікроскопа МБС-10, що жорстко закріплений до нерухокої траверси випробувальної машини FP-100. Масштаб отриманих зображень 400 рехел/мм, що забезпечує діапазон баз визначення деформації від 2,5 мм до 6,12 мм.

Зразки розтягували на розривній машині FP-100 за швидкості переміщення рухомої траверси 2 мм/мін у стандартних лабораторних умовах. При випробуванні плоских зразків (рис. 3.2) з центральним надрізом спершу наводили втомну тріщину згідно вимог [135] за асиметрії циклічного навантаження $R=0,3$ дотримуючи вимогу максимального зусилля циклу $P_{max}=0,4 P_c$ (де P_c статичне руйнівне навантаження для зразка із сплаву АМГ-6. В процесі випробувань реєстрували рівень навантаження динамометром машини, сигнали якого записували у комп'ютер за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та відповідного програмного забезпечення.

Для побудови істинної діаграми руйнування сплаву необхідно встановити величину оптимальної бази вимірювання переміщень для визначення істинної деформації та напружень. З фізичної точки зору це означає встановити величину області деформування матеріалу в околі концентратора напружень у якій напружено-деформований стан практично є однорідний. Вважаємо, що в

цьому об'ємі встановлена величина енергії деформування в граничному випадку є рівна енергії руйнування матеріалу і буде інваріантною, щодо умов навантаження та розмірів тіла.

В процесі навантаження зразків з гострим надрізом та гладкого зразка реєстрували зображення та обчислювали величину істинної деформації. Зміна величини деформації для різних баз вимірювання переміщень подана на рис. 3.3.

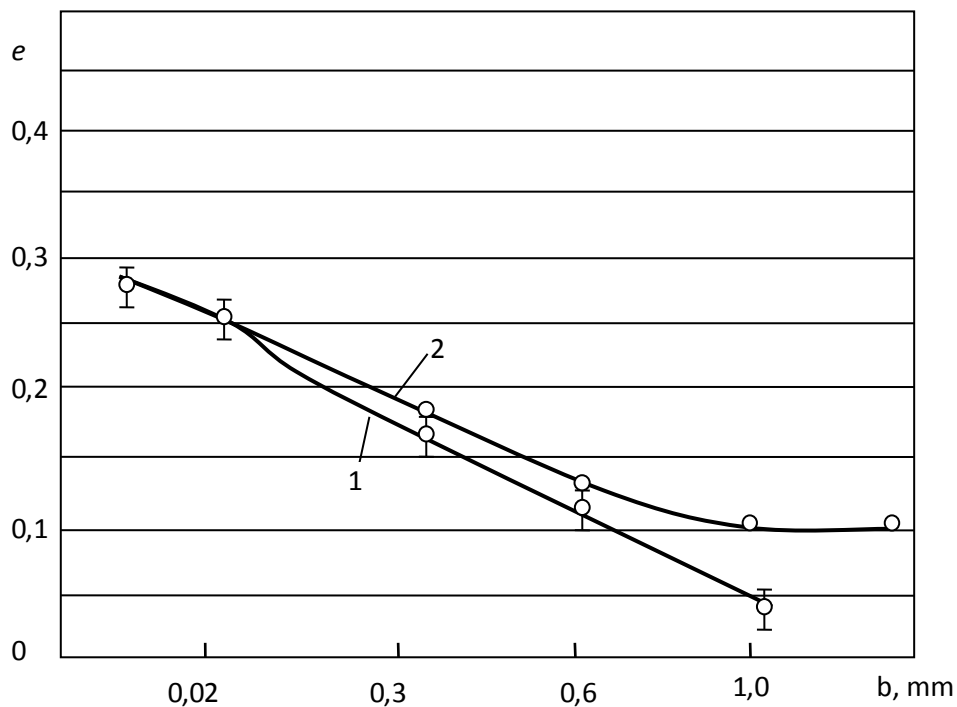


Рис. 3.3 Зміна локальної критичної деформації для сплаву АМГ-6 у шийці гладкого зразка 1, та перед вершиною гострого надрізу 2.

При визначенні інваріантної бази вимірювання переміщень існує діапазон де критична деформація рівна істинному відносному видовженню.

Величину істинних деформацій у шийці гладкого зразка e визначали за аналітичною залежністю

$$e = \ln \frac{1}{1 - \psi} \quad (3.1)$$

де ψ - відносне звуження в шийці зразка:

$$\psi = \frac{F - F_i}{F} \quad (3.2)$$

де F – початкова площа поперечного перерізу зразка; F_i – біжуча площа поперечного перерізу зразка.

В процесі навантаження зразка кроково фотографували поверхню зразка (рис. 3.4)

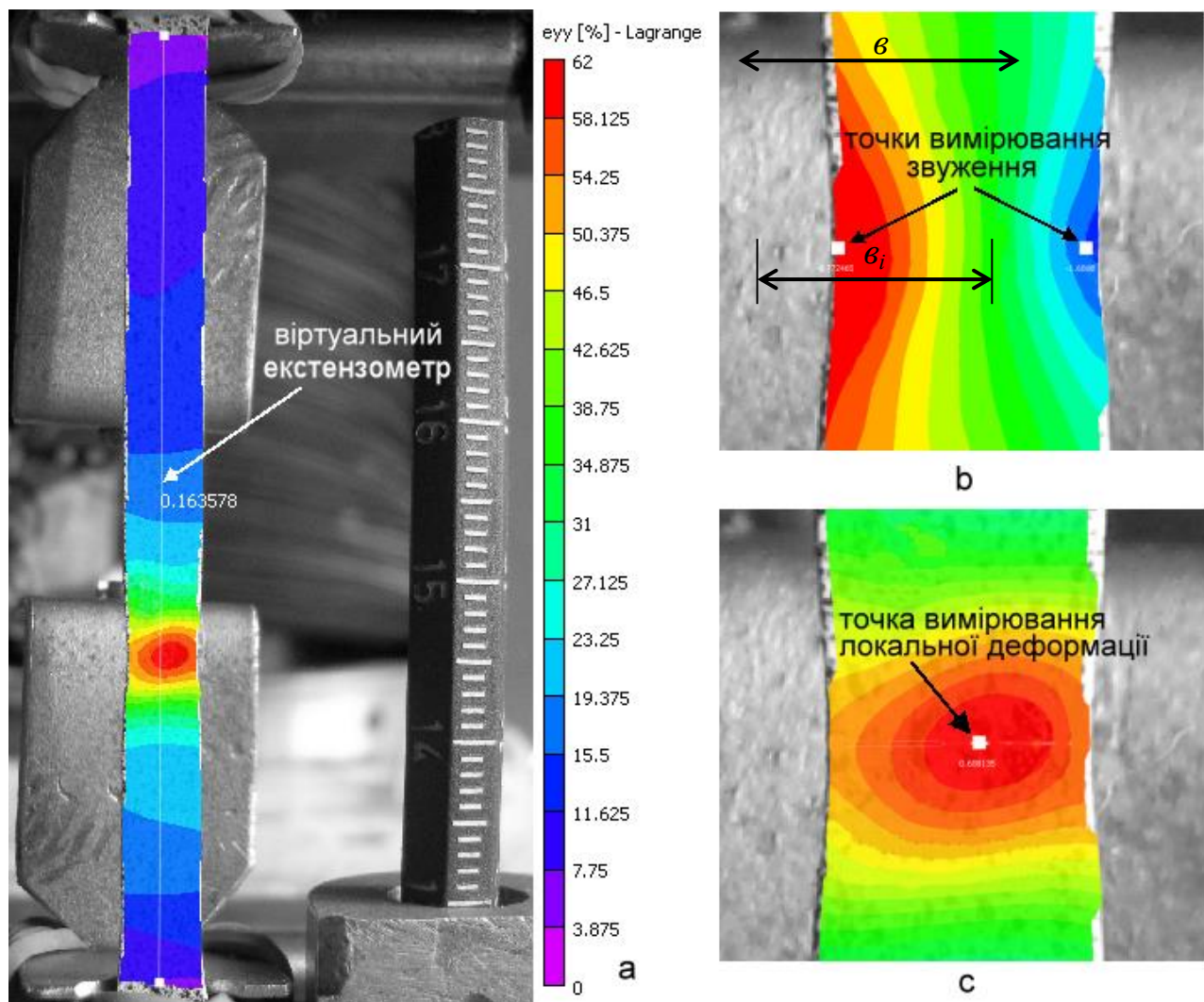


Рисунок 3.4 Визначення переміщень та деформацій методом ЦКЗ: для а сплаву АМГ-6: а – розподіл локальної деформації e_y на поверхні зразка та визначення відносного видовження віртуальним екстензометром; б – вимірювання зміни ширини зразка; с – область максимальної деформації в

“шийці” зразка, яку використано для побудови локальної деформації за різних баз.

Перший кадр відповідав моменту початку навантаження, при цьому частота зйомки $ffps$ рівна частоті реєстрації з використанням АЦП. Такий підхід дозволяє синхронізувати реєстрацію величини зусилля та розподіл зміщень одномоментно. Протягом періоду навантаження було зареєстровано 320 кадрів, та побудовано гладку лінію деформування.

За величиною зусилля навантаження P_i , та видовження зразка Δ_i визначали умовні напруження σ_i , а також відносні видовження e_i за величиною яких будували діаграму « $S \sim e$ ».

Метод ЦКЗ у своєму програмному забезпеченні дає можливість вимірювати переміщення при деформуванні зразка шляхом використання опції «віртуальний екстензометр». Згідно цієї опції можна вимірювати видовження зразка між довільними точками, а також розраховувати відносну деформацію. За величинами деформацій, що визначені віртуальним екстензометром на базі робочої зони зразка побудовано діаграму (крива 1), яка практично є однаковою як і за даними двох консольного давача.

Для побудови повної істинної діаграми необхідно встановити проміжні значення площі поперечного перерізу у найбільш деформованому місці утвореної шийки. В процесі навантаження методом ЦКЗ визначено проміжні значення звуження зразка, в процесі його деформування, між двома точками, що розташовані на протилежних краях (гранях у шийці (рис. 3.4б)). Таким чином отримано біжучі значення зміни ширини зразка b_i . Враховуючи, що при розтягу тонкого листового зразка формується плоский напружено-деформований стан зміну товщини не враховували, тобто розмір a є постійним.

Площа перерізу зразка в перерізі шийки F_i визначається за формулою

$$F_i = a \cdot b_i \quad (3.3)$$

Величина відносного звуження Ψ

$$\Psi = (F - F_i) / F \quad (3.4)$$

де F – початкова площа поперечного перерізу.

Величину істинного напруження в шийці можна встановити

$$S_i = P / F_i \quad (3.5)$$

Отримані результати досліджень показують, що при зміні деформацій у вказаному діапазоні деформацій на гладкому зразку її величина є приблизно у 3 рази менша за величину локальної деформації. Деформація зразків з гострим надрізом на великих базах є меншою, а для малих баз зокрема для $b \leq 0,2$ мм вона стає рівною деформації гладкого зразка на тих же базах. Такий результат пояснюється тим, що використання великих баз для визначення деформацій на зразку з надрізом вказує на те, що матеріал в цьому об'ємі деформується нерівномірно. Зокрема в околі площини надрізу деформування значно інтенсивніше аніж у прилеглих ділянках. Відношення приросту переміщення до початкової довжини бази дає можливість усереднювати деформацію, тоді як деформація у площині надрізу буде значно більшою. При цьому величина деформації на малих базах у площині надрізів є близькою до деформації в шийці гладкого зразка. Величина цієї деформації обрахована з врахуванням змін поперечного перерізу, який виражається через коефіцієнт поперечної деформації Ψ є близькою до встановленої експериментальним шляхом з використанням методу ЦКЗ. Цей факт є доказом доцільності використання даного підходу до оцінювання міцності елементів конструкцій, які працюють за умов одновісного або складного навантаження, оскільки передбачає проводити моніторинг зміни деформацій в реальних умовах експлуатації.

Необхідно зауважити, що використання малих баз розміром у кілька мікрометрів впливає на вимірних переміщень і знижує точність отриманих даних. Це в першу чергу пов'язано із структурою самого локального об'єму

матеріалу. Зокрема зміна деформацій в поперечному перерізі плоских зразків при досягненні критичного значення в шийці для сплаву АМГ-6 показано на рис. 3.5.

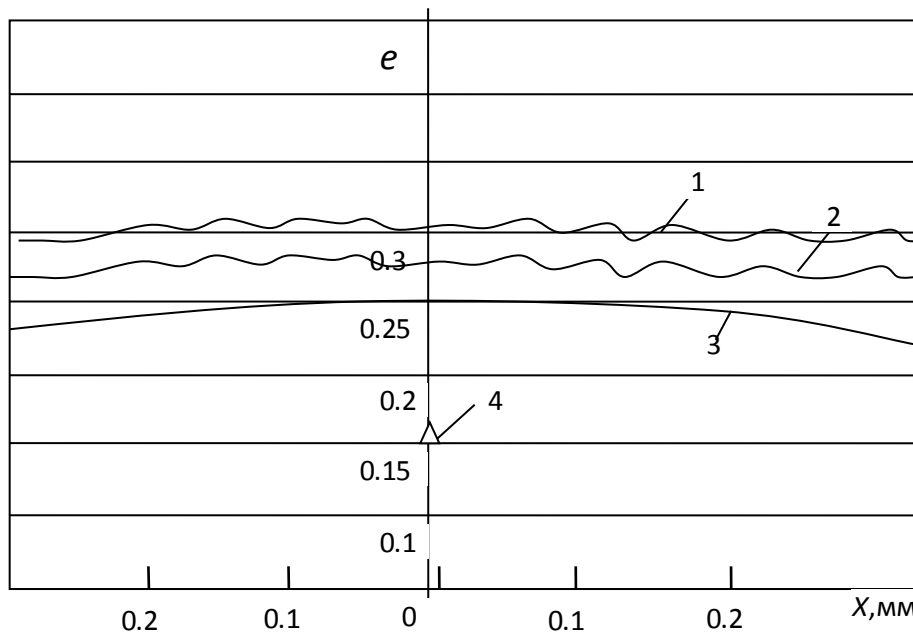


Рис. 3.5 Розподіл деформацій по ширині зразка (АМГ-6) за критичного навантаження: 1 база 0,2 мм; 2 – база 0,4 мм; 3- база 0,6 мм; Δ - 4- стандартний метод ϵ_4 .

Результати експериментальних досліджень отримані при випробуванні зразків за одновісного розтягу із використанням методу ЦКЗ за стандартним та локальними підходами наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2.

Механічні характеристики за стандартним і локальним підходами.

Характеристики міцності Спосіб розрахунку	σ_{02} , 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 побудована діаграма руйнування сплаву АМГ-6 в координатах «S-e» виражає поведінку матеріалу в локальному об'ємі встановлює взаємозв'язок напружень і деформацій на всьому проміжку пружного, пружно-пластичного і пластичного деформування, аж до руйнування.

Значення істинної деформації розраховане через відносне поперечне звуження визначимо за формулою

$$e = \ln 1/(1-\Psi) \quad (3.6)$$

За отриманими значеннями « $\sigma \sim \varepsilon_y$ » (рис. 3.6), а також «S-e» (рис. 3.7) побудовано діаграми для сплаву АМГ-6

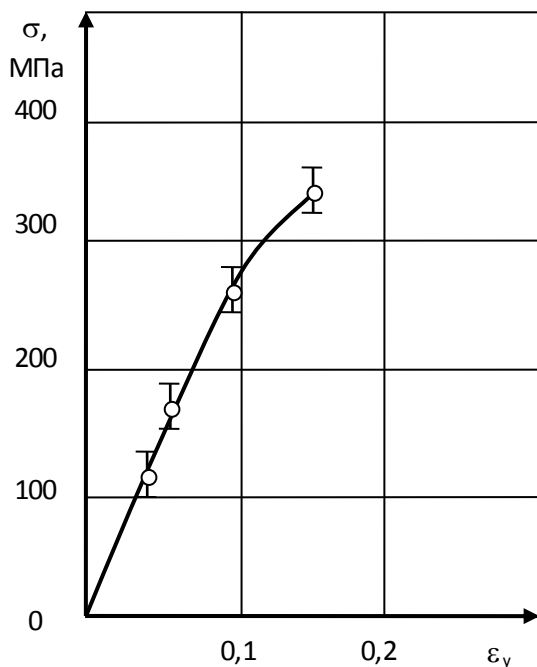


Рис. 3.6 Діаграма деформування сплаву АМГ-6 визначена за розтягу (стандартна

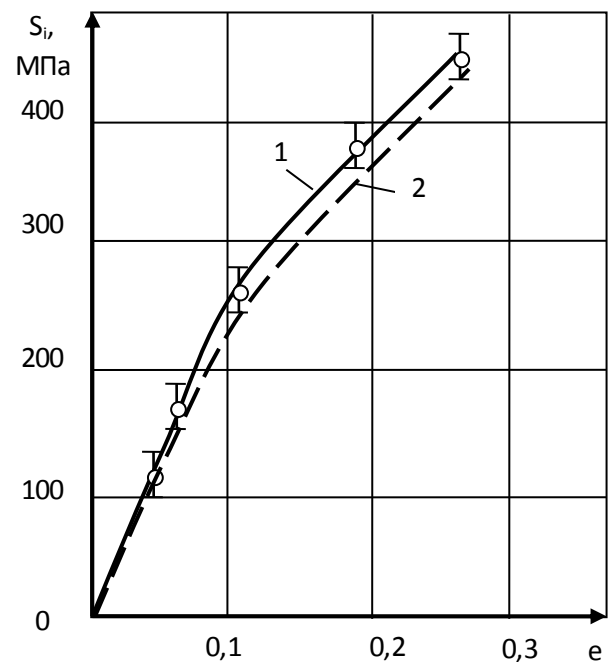


Рис. 3.7 Діаграма деформування 1 - істинна «S-e», 2 - врахування локальної деформації

методика)

в шийці зразка

Як показує експеримент характеристики локального напружено-деформованого стану досить точно відтворюють поведінку матеріалу і можуть бути використані для оцінювання міцності елементів конструкцій. Площа під діаграмою «S-e» виражає енергію руйнування матеріалу і може використовуватись для оцінювання міцності і несучої здатності елементів конструкцій.

Для зручності розрахунку енергії деформування в процесі експлуатаційних навантажень елементів конструкцій і становить частину від енергії руйнування можна апроксимувати степеневою залежністю виду:

$$S(e)=m(e)^{1/n} \quad (3.7)$$

де S – істинні напруження, e – істинна деформація; n, m – коефіцієнти, що характеризують поведінку матеріалу при пружно-пластичному деформуванні.

Зокрема для сплаву АМГ-6 встановлено, що коефіцієнт $m=602$, а коефіцієнт $n=0,21$.

Тоді аналітичний вираз для опису істинної діаграми руйнування для сплаву АМГ-6 набуде виду

$$S(e)= 715 e^{0,27} \quad (3.8)$$

Таким чином, визначивши величину деформацій методом ЦКЗ на оптимальній базі вимірювання переміщень для даного матеріалу при навантаженні зразка з концентратором напружень, або елемента конструкцій в максимально напруженому місці можна встановити величину енергії деформування.

Для забезпечення надійної роботи елемента конструкції в експериментальних умовах необхідно дотримувати умову, щоб величина

енергії деформування W була завжди меншою за енергію руйнування даного матеріалу W_c . Величину енергії деформування обчислюють за формулою та відповідними граничними умовами.

$$W = \int_0^e 715e^{0,27} de \quad (3.9)$$

Встановивши величину енергії деформування за даних експлуатаційних умов навантаження можна визначити ступінь пошкодження елемента АМГ-6 конструкції виготовленого з сплаву АМГ-6. Для цього необхідно визначити величину деформації e_i в найбільш напруженому місці елемента конструкції методом ЦКЗ, а з істинної діаграми руйнування сплаву АМГ-6 встановити напруження S_i , за формулою (3.9) обчислити енергію деформування W_i . Величина пошкодження ω елемента конструкції визначиться за формулою

$$\omega = \frac{W_i}{W_c} \quad (3.10)$$

Величина обернена до пошкоженості ω виражає коефіцієнт запасу міцності K_M при даних умовах експлуатації

$$K_M = \frac{1}{\omega} \quad (3.11)$$

3.2 Вплив жорсткості напружено-деформованого стану на міцність елементів конструкцій

Оцінювання міцності і довговічності елементів конструкцій базується на використанні характеристик матеріалу, які встановлені за одновісного навантаження. Такий підхід справедливий за умови коли напруження і деформації в матеріалі елемента конструкції знаходяться у пружній області. Однак за умов складного напруженого стану процес настання течіння та

характеристики пластичності і руйнування змінюється. Тому важливим в плані оцінювання міцності елементів конструкції за складного напруженого стану є встановити різницю та реальний режим і термін експлуатації. Процес втрати міцності конструкції включає три етапи: нагромадження пошкоджень дефектів, початок руйнування та спонтанне поширення тріщин. Процес нагромадження пошкоджень відбувається при мікрозсувах структури металу внаслідок яких утворюються мікротріщини або порожнини. Визначальним при цьому є пластична деформація, яка на початковій стадії охоплює зону мікротріщин і стримує їх розвиток, зменшуючи при цьому локальні максимальні напруження. Умови процесу течіння матеріалу пов'язані з швидкістю деформації, структури матеріалу, напруженого стану. В умовах тривісного напруженого стану відбувається пластичне течіння і доля руйнування зсувом зменшується, а посилюється відривний механізм. Тому при оцінюванні залишкової міцності або ресурсу роботи необхідно враховувати зміну міцнісних характеристик матеріалу та вибирати інваріантний критерій, який враховує ці зміни.

Дослідження процесу зміни механічних властивостей в умовах складного напружено-деформованого стану проводять при випробуванні зразків за різними силовими схемами. Зокрема трубчасті зразки випробовують за сумісної дії внутрішнього тиску і поздовжньої сили. Випробування лише внутрішнім тиском не дає можливості змінювати співвідношення, яке є постійне між головними поздовжніми і поперечними напруженнями і становить $\sigma_x / \sigma_y = 0,5$ [135,136].

Силова схема двовісного навантаження хрестоподібних зразків [136], що виготовлені із листового матеріалу, дає можливість створювати широкий діапазон відношень головних напружень.

Для проведення досліджень за двовісного напружено-деформованого стану на процес руйнування та встановлення характеристик міцності, які достовірно будуть оцінювати напружено-деформований стан і на підставі яких можна встановити реальну міцність та довговічність елемента конструкції за умов складного навантаження розроблено відповідну методикау та проведено

дослідження. Навантаження зразка за двовісного розтягу (розтягу-стиску) імітує роботу паливних баків авіакосмічної техніки, обшивки літаків, транспортні трубопроводи і ін.. елементів конструкцій.

Навантаження хрестоподібних зразків (рис. 3.8) здійснювали від незалежних приводів. Зокрема зусилля P1 забезпечує серійна випробувальна установка EUS-40, а P2 реалізують за допомогою додаткового пристрою, що встановлений на установці.

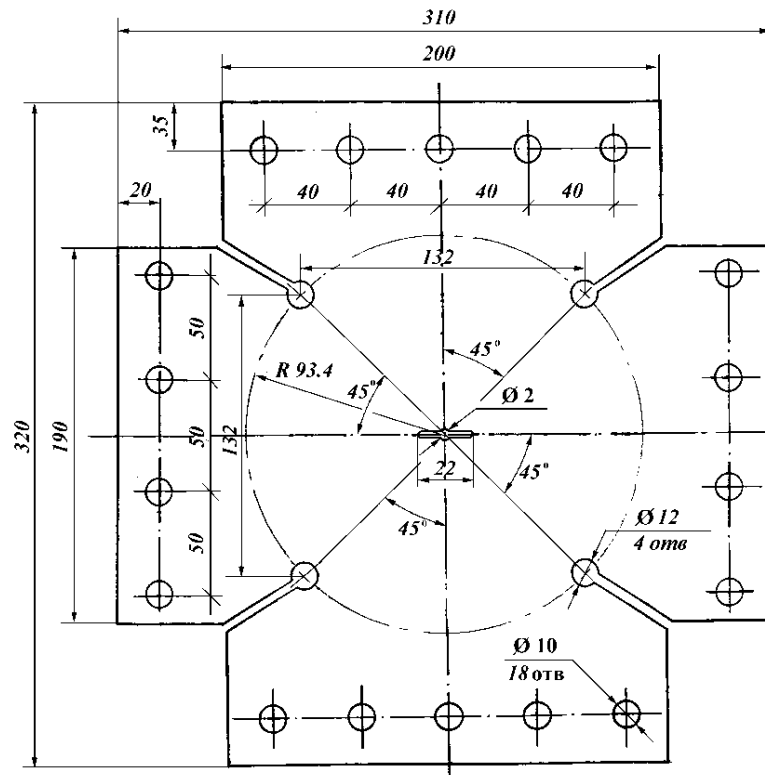
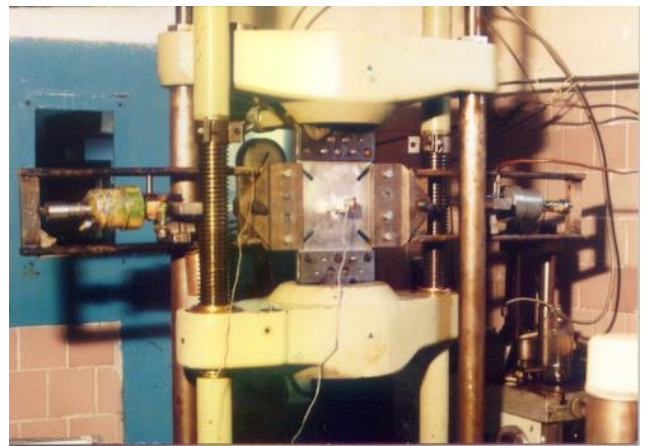
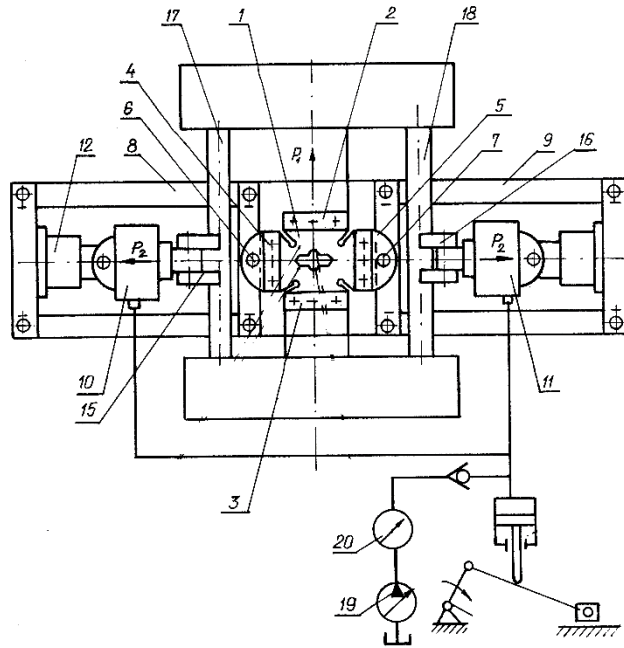


Рис. 3.8 Хрестоподібний зразок для реалізації двовісного навантаження.

Посередині зразка виконано отвір $\varnothing 4$ мм від якого симетрично у дві сторони прорізано паз шириною 2 мм і довжиною 40 мм, що закінчується гострим надрізом з кутом при вершині 60° і радіусом $\rho \leq 0,1$ мм. Схема випробувальної установки наведена на рис. 3.9.

Хрестоподібний зразок 1 встановлюють у захоплювачі 2,3 які жорстко закріплені безпосередньо на установці EUS-40. В перпендикулярному напрямку до осі машини встановлені захоплювачі пристрою 4 і 5, що через осі 6,7 з'єднані з силовою рамою 8,9 і передають зусилля P2 на зразок від гідравлічних

циліндрів 10,11 через динамометри 12,13. Циліндри 10,11 контактують із упорами 15,16, які закріплені до колон 17,18 машини EUS-40. Статичне навантаження P_2 передається циліндрами, які переміщуються від гідравлічної станції 19 і контролюється манометрами 20.



а)

б)

Рис. 3.9 Схема навантаження хрестоподібного зразка за двовісного розтягу а) та випробувальна установка б).

Установка з випробувальним пристроєм забезпечує проводити дослідження за зміни жорсткості навантаження $\chi = P_2/P_1$ в діапазоні від +0,5 до -0,5. Силова схема навантаження «розтяг-розтяг» відповідає додатнім значенням а «розтяг-стиск» від'ємним.

Реєстрацію сигналів сили від динамометра машини EUS-40 (навантаження P_1) і давач тиску МИДА-13 (навантажень P_2) проводили на ПК через системи на базі модуля. АЦПЕ-440 з інтерфейсом підключення USB 1,1 і програмного забезпечення Power graph (рис. 3.10).

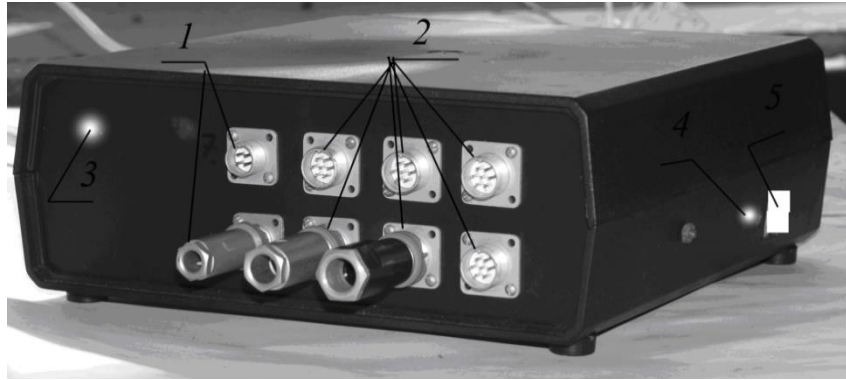


Рис. 3.10 Пристрій для реєстрації сигналів.

Програмне забезпечення Power graph дає можливість реєструвати зміну вимірюваних параметрів в процесі випробування у реальному часі.

В процесі випробувань зразків проводили реєстрацію зображень поверхні зразка в околі концентратора. Оптична система на базі камери Tourson була закріплена безпосередньо до зразка на продовженні лінії концентратора. Таке закріплення забезпечує незмінність розташування площадки реєстрації на зразку відносно камери, що підвищує точність розрахунку розподілу деформацій. Реєстраційна оптична система кріпиться безпосередньо до поверхні зразка через спеціальну регульовану платформу (рис. 3.11). На платформі встановлено джерело світла на основі білого світлодіода потужністю 3 Вт.



Рис. 3.11 – Оптична система для ЦКЗ на установці для двовісного навантаження хрестоподібних зразків на основі промислової цифрової камери TourTek UCMOS 10000KPA.

З допомогою механізму регулювання платформу можна переміщати для точного встановлення та фокусування камери в зоні концентратора напружень, а також здійснювати регулювання фокусної віддалі. За такою схемою встановлення камери і регулювання її положення досягли масштабу 3 мкм/піксель.

Установка реалізує випробування зразків при їх навантаженні зусиллями P_1 і P_2 синхронно за різних співвідношень, яку визначали до моменту навантаження відношенням

$$\chi = \frac{P_2}{P_1}. \quad (3.12)$$

Для проведення випробувань зразок встановлювали в захоплювачі машини, і додаткового пристрою де і закріплювали. До зразка безпосередньо на лінії розташування надрізів закріплювали платформу з оптичною системою.

Відеокамеру під'єднують до ПК і за допомогою стандартного ПЗ вибирають необхідні параметри для регулювання реєстрації зображень. Зокрема величину витримки і діафрагми світлочутливість матриці камери, частоту реєстрації кадрів. Це дає можливість забезпечувати необхідну яскравість, контрастність та глибину різкості зареєстрованих зображень.

Динамометр вимірювання зусилля навантаження машини EUS-40 і давач тиску додаткового пристосування за двовісного навантаження під'єднують до системи реєстрації аналогових сигналів та у ПЗ Power graph вводять тарувальні коефіцієнти і створюють відповідний файл для запису показів від сигналів, що зареєстровані пристроями.

Процес навантаження зразка проводять синхронно із початком реєстрації зображень контрольованої ділянки поверхні зразка, запису сигналів динамометра зусилля та давача тиску.

Швидкість навантаження машиною EUS-40 (зміна зусилля P_1) реалізується в автоматичному режимі від самої установки. Подача масла від гідростанції УНГР-2000 в циліндри пристрою забезпечують ручним регулюванням.

За наведеною методикою проведено дослідження зразків із сплаву АМГ-6 за різних співвідношень σ_x/σ_y . результати досліджень у вигляді графічної залежності подано на рис. 3.12 , а також у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3.

Механічні характеристики сплаву АМГ-6

№	Схема навантаження	Зусилля P_1 , кН	χ	e_x	e_y	σ_x МПа	σ_y МПа	S_i МПа
1	Розтяг-розтяг	77,5	0,5	0,028	0,18	190	340	450
2	Одновісний розтяг	70,0	0	00,049	0,237	160	315	430
3	Розтяг-стиск	5,5	-0,5	-0,046	0,29	195	305	380

Зміна жорсткості навантаження на граничні згинання напружень, а відтак і на граничний стан, що відповідає руйнуванню подано на рис. 3.12. Жорсткість навантаження за силової схеми «розтяг-розтяг» підвищує границю течіння сплаву АМГ-6, а також величину істинних напружень руйнування S_i . Істинна деформація при цьому знижується на 15% (див. рис. 3.12) у порівнянні з одновісним розтягом.

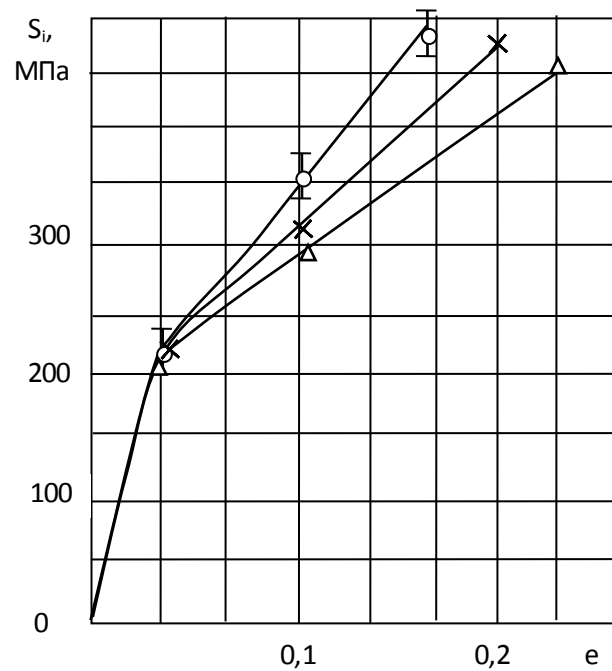


Рис. 3.12 Істинні діаграми руйнування сплаву АМГ-6 за двовісного розтягу: o— розтяг – розтяг, x – розтяг, Δ- розтяг – стиск

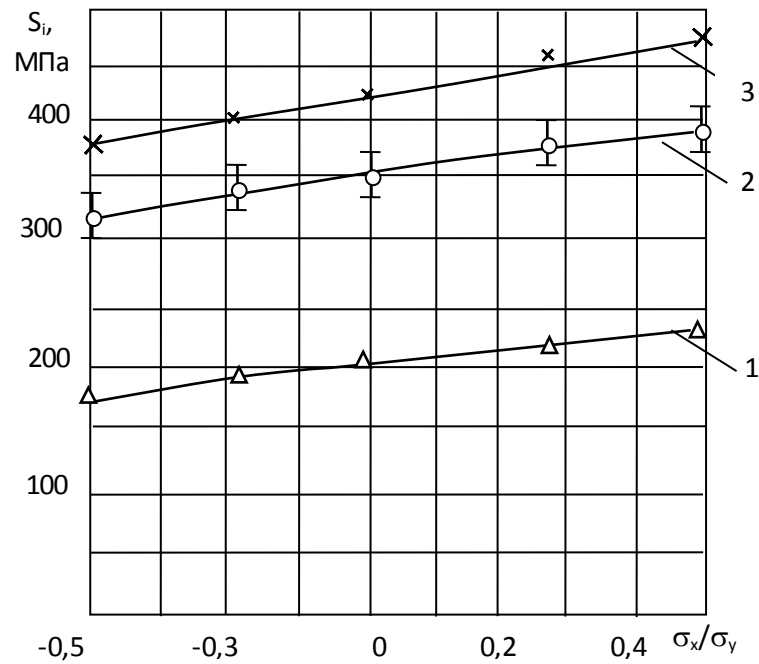


Рис. 3.13 Зміна напружень: течіння σ_{02} (крива 1), границі міцності σ_b (крива 2), істинні локальні напруження S_i (крива 3) від жорсткості напруженого стану в околі концентратора.

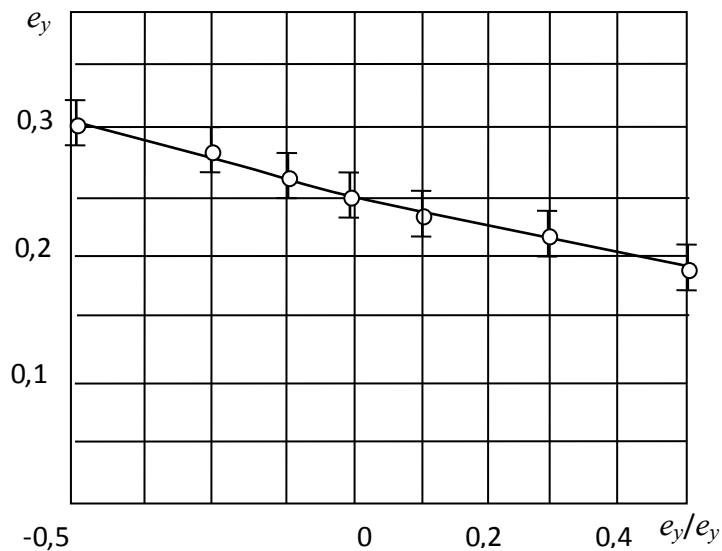


Рис. 3.14 Зміна деформації руйнування e_y від жорсткості напруженого стану e_x/e_y за двовісного навантаження.

За силовою схемою «розтяг-стиск» спостерігається зменшення істинних напружень руйнування S_i при зростанні істинної деформації руйнування e_y . При цьому величина енергії руйнування, яка виражається графічно рис. 3.15, а

також обчислено за формулою $W_c = \int_0^{\varepsilon_c} S(e) \cdot de$ (рис.3.15) залишається практично незалежною від жорсткості напружено-деформованого стану. При цьому вплив енергії деформування в напрямку осі ОХ і ОУ змінюється. Разом з тим величина енергії руйнування яка визначається сумою $W_c = W_x + W_y$ залишається постійною. Такі зміни можна пояснити впливом на формування локальної зони пластичних деформацій в матеріалах на основі аналізу з використанням методу ЦКЗ (таблиця 3.4).

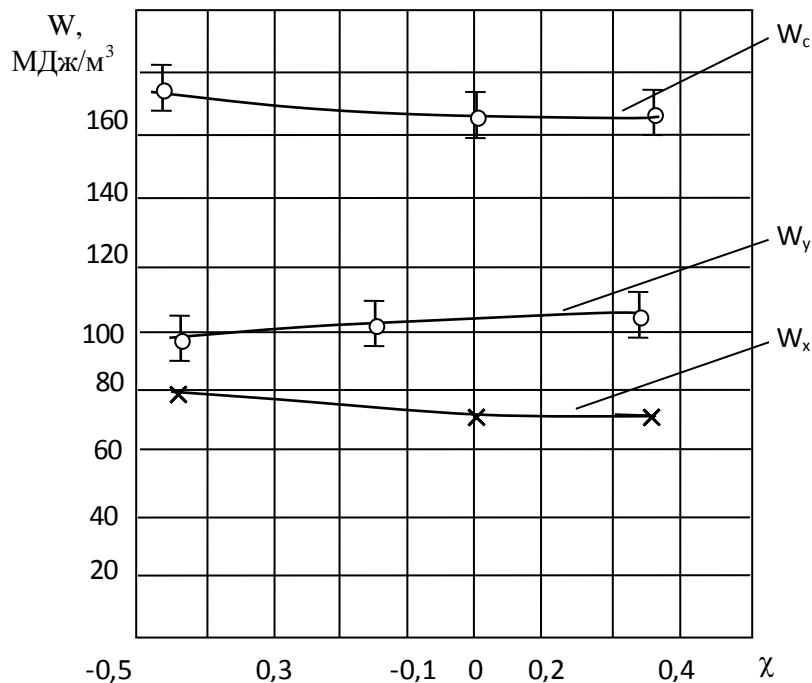
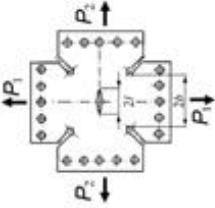
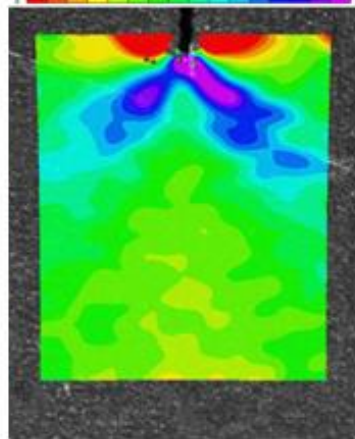
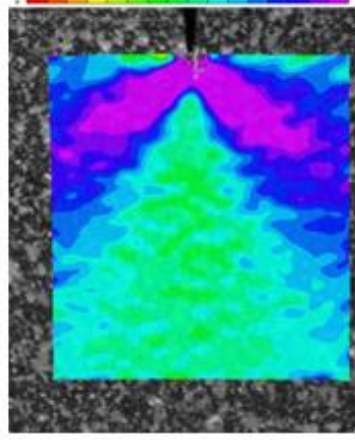
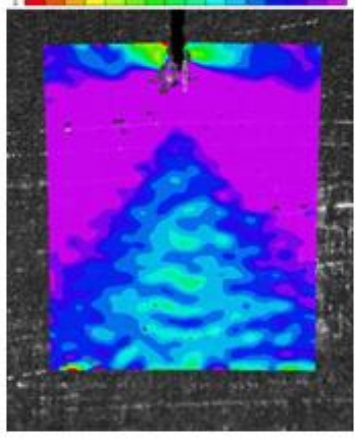
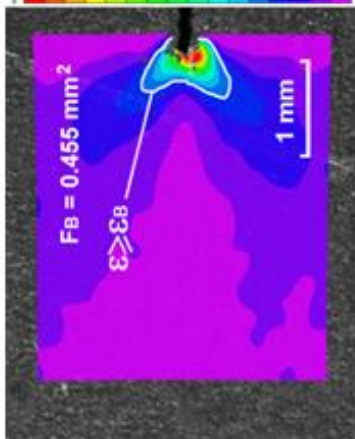
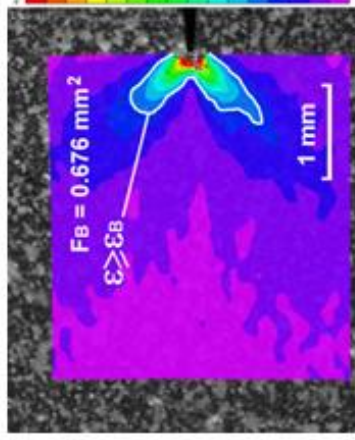
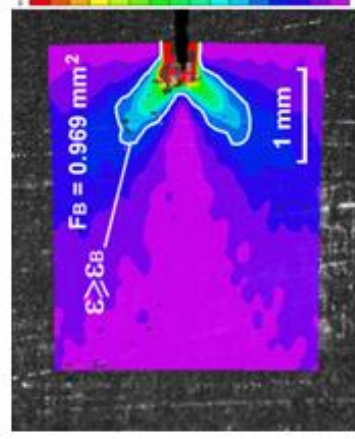


Рис. 3.15 Залежність питомої енергії руйнування W_c сплаву АМГ-6 в залежності від жорсткості напруженого стану.

Зокрема у таблиці 3.4 подано розподіл компонентів деформацій за різної жорсткості навантаження

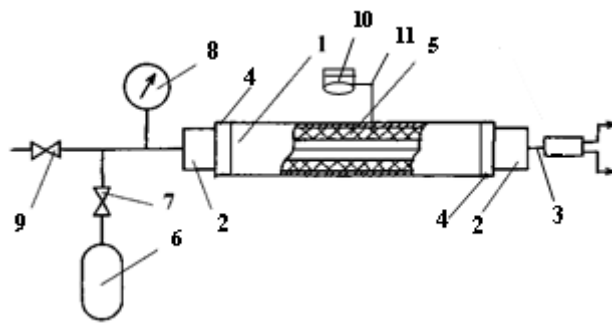
Таблиця 3.4. Розподіл компонентів деформації ϵ_{xx} та ϵ_{yy} на момент досягнення гранично-рівноважного стану за різної жорсткості зовнішнього двовісного навантаження

<p>Силовa схема</p>		<p>розтяг + розтяг</p>	<p>розтяг + стиск</p>
<p>Жорсткість навантаження</p>	<p>$\alpha = 0.7$</p>	<p>$\alpha = 0$</p>	<p>$\alpha = -0.5$</p>
<p>Розподіл горизонтальних деформацій ϵ_{xx}</p>			
<p>Розподіл вертикальних деформацій ϵ_{yy}</p>			

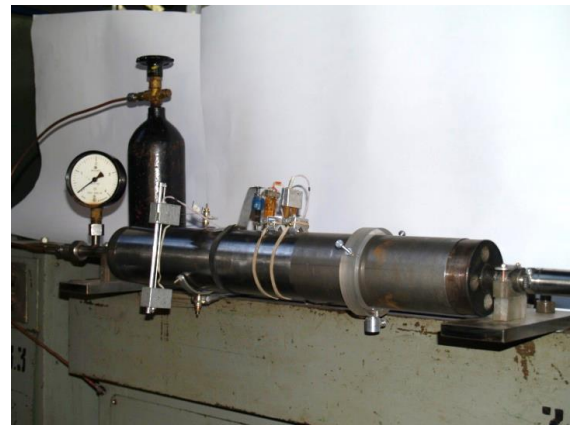
На підставі встановленої зони інтенсивних деформацій з допомогою ЦКЗ показано, що площа цих зон змінюється в залежності від жорсткості напружено-деформованого стану. За результатами цих досліджень можна стверджувати, що збільшення жорсткості напруженого стану, тобто зростання співвідношення χ до 0,5 зменшує площу зони інтенсивних пластичних деформацій. Внаслідок цього пластичний матеріал стає крихкішим. З іншої сторони зменшення жорсткості навантаження χ знижує міцнісні характеристики матеріалу σ та збільшує деформаційні. Тому при оцінюванні міцності і довговічності елементів конструкцій необхідно враховувати, що досягнення границі течіння матеріалу, коли напружений деформований стан відповідає схемі «розтяг-стиск» настає за менших значень, як для випадку одновісного розтягу, коли встановлені механічні характеристики матеріалу. Експериментальні залежності зміни міцнісних і деформаційних характеристик матеріалу АМГ-6 підтверджують аналітичні співвідношення, які встановлені на основі інтенсивності деформацій та напружень [120].

3.3. Визначення руйнівного тиску трубчастого макету з концентратором напружень

Для верифікації підходу щодо визначення напружено-деформованого стану та встановлення несучої здатності в циліндричній оболонці з використанням методу ЦКЗ проведено напівнатурні випробування та дослідження на трубчастому макеті. Виготовляли макет із листової сталі –Ст3 у вигляді труби звареною по твірній зовнішнього діаметра 120 мм та довжиною 800 мм. Схематично випробувальна установка представлена на рис. 3.16.



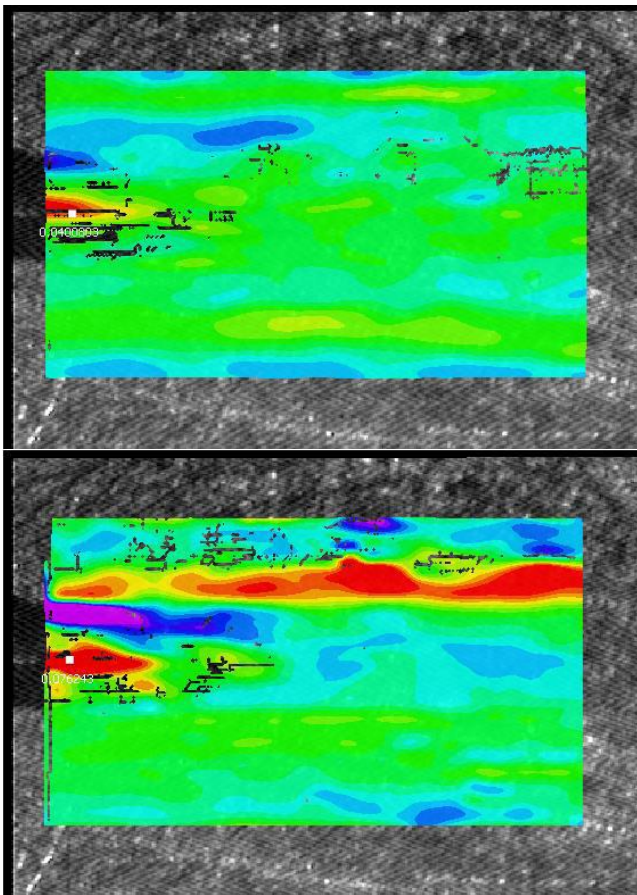
а)



б)

Рис. 3.16 – Установка для натурних випробувань макету: а) схема; б) конструкція

Установка включає трубчатий елемент 1, який заглушений з двох сторін фланцями 2 за допомогою стяжного болта 3, та ущільнений прокладками 4. Всередину трубчастого елемента встановлено гумовий рукав 5. Для створення внутрішнього тиску використовують балок з газом 6 та напускний вентиль 7, а також манометр 8 контролю тиску. Випуск газу установки здійснюють за допомогою випускного вентиля 9. Контроль переміщень в околі концентраторів напружень, які виконані на зовнішній поверхні труби здійснюють з допомогою цифрової камери 10, яка закріплена на кронштейні 11. Вимірювання переміщень в околі концентраторів при збільшенні тиску в трубі проводили з використанням камери Goipcam UCMOS 1000 KPA та об'єктивом Xepolan з роздільною здатністю 3584x2748. Розмір ділянки для вимірювання переміщень поверхні труби становив 210x157 мм. Зареєстровані камерою зображення обробляли з допомогою спеціальної програми та розраховували переміщення і деформації в околі концентратора напружень. Розподіл деформацій в околі концентратора напружень за різних тисків подано на рис. 3.17.



а)

б)

Рис. 3.17 – Розподіл деформацій в околі концентратора напружень на поверхні труби: а – тиск 10 МПа; б – тиск 12,5 МПа.

Для визначення енергії руйнування сталі Ст3 проводили випробування плоских зразків рис. 3.2 аналогічно як для сплаву АМГ-6 (див. 3.1).

При випробуванні на розтяг реєстрували З «зусилля навантаження Р-величина переміщення Δ » з використанням методу ЦКЗ. За результатами досліджень будували істинну діаграму руйнування « S_i - e » для сталі Ст 3 (рис. 3.18). Дані досліджень зразків за одновісного навантаження подано в табл. 3.5.

Таблиця 3.5.

Механічні характеристики сталі Ст.3.

Матеріал	σ_T , МПа	σ_b , МПа	e	S_i , МПа	W_c , МДж/м ³
Ст. 3	162	340	0,78	580	720

Апроксимаційна функція діаграми руйнування для сталі Ст. 3 має вигляд

$$S(e)=598,2 \cdot e^{0,255} \quad (3.13)$$

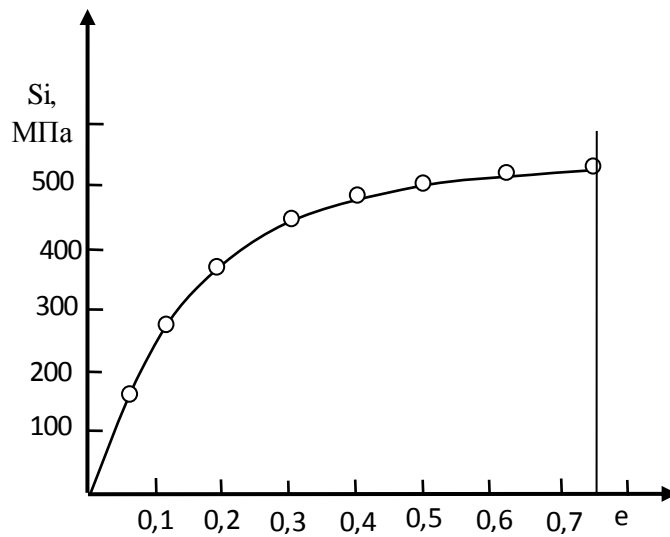


Рис. 3.18 Істинна діаграма руйнування сталі Ст.3

На основі енергетичного підходу прогнозували величину руйнівного тиску наступним чином. В роботі [138]. Встановлено, що залежність зміни тиску від питомої енергії деформування є подібною до істинної діаграми руйнування. Тому було побудовано істинну діаграму деформування для сталі Ст.3 та встановлено значення питомої енергії руйнування W_c . Залежність зміни внутрішнього тиску у трубі p в залежності від величини енергії деформування W можна описати степеневою функцією виду

$$p(W)=M \cdot W^{-1/n} \quad (3.14)$$

де p – тиск газу в трубі;

W – енергія деформування;

M, n – коефіцієнти які залежать від матеріалу та розмірів труби.

Навантаження макету здійснювали поетапно при цьому реєстрували величину переміщення та розраховували деформацію. За величиною деформації розрахованою в околі концентратора напружень, де вони є

максимальні на основі істинної діаграми руйнування встановлювали величину напружень.

Величину енергії деформування для кожного етапу навантаження визначали за формулою

$$W_i = \int_0^{e_i} S_i(e_i) de_i \quad (3.15)$$

За даними експериментальних досліджень побудовано залежність зміни енергії деформування від величини тиску та встановлено граничне його значення $p_* = 15,8$ МПа, що відповідає початку руйнування труби (рис. 3.19).

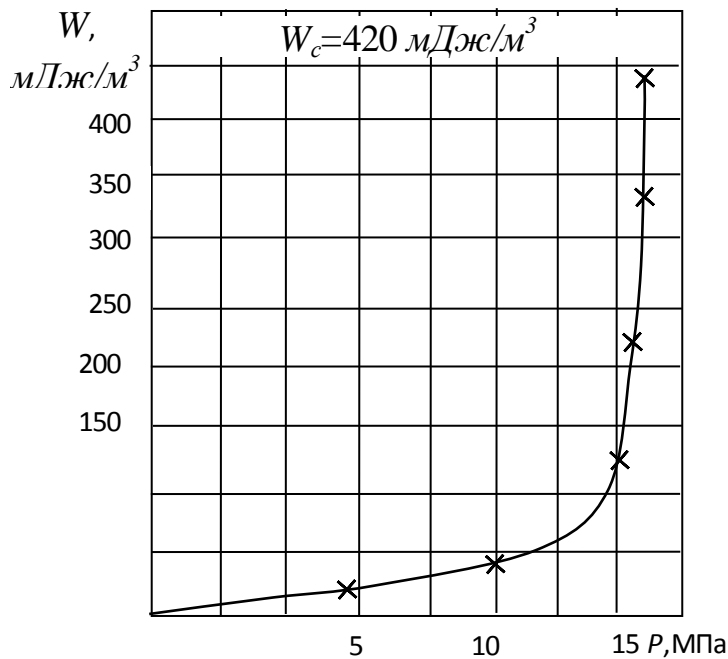


Рис. 3.19 Зміна енергії деформування трубчатого макету від величини внутрішнього тиску.

Таким чином за даним підходом та отриманими експериментальними даними встановлено залежність зміни енергії деформування від тиску для макету труби сталі Ст.3.

Отже за таким підходом можна проводити прогнозування граничного робочого тиску у елементах конструкцій трубчатої форми попередньо побудувавши істинну діаграму руйнування для матеріалу, з якого виготовлено

елемент. При цьому немає необхідності доводити конструкцію до граничного стану і не руйнуючи її.

3.4. Встановлення напруженого стану і допустимого робочого тиску в паливному баку ракети носія методом цифрової кореляції зображень

Паливний бак є важливим і досить складним в конструктивному плані та у виготовленні елементом ракети-носія. Для підтвердження правильності розрахунково - конструкторських робіт, а також технологічних аспектів при виготовленні бака перед запуском проводять ресурсні випробування. Для цього на поверхню бака наперед у визначених місцях наклеюють тензорезисторні давачі.

За результатами вимірювань тензодавачів з відповідним обладнанням реєстрації електричних сигналів встановлюють величину деформацій. Тензометрія забезпечує необхідну точність і достовірність даних проте деформації на поверхні фіксуються в одному напрямку та окремих точках.

Для контролю деформацій всієї поверхні бака необхідно встановити велику кількість давачів. Також при використанні підходу на основі технології тензометрування наявний контакт тензоперетворювачів з досліджуваною поверхнею матеріалу, що буде впливати на покази під дією зовнішнього середовища і температури. Тому важливо є сформулювати підхід та розробити технічні засоби контролю на основі безконтактної оптико-цифрової системи (ОЦС). В результаті таких досліджень можна отримати просторовий розподіл та зміну переміщень і деформацій, встановити найбільш напружені місця та спрогнозувати допустимий робочий тиск паливного бака без його руйнування.

Для безконтактного визначення розподілу поверхневих деформацій крупно габаритних конструкцій та елементів ракетної техніки використовують методи фотограмметрії та цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) [135-139]. За цими методами можна дистанційно визначити поля переміщень на ділянці поверхні конструкції з високою точністю. В роботі [139] метод ЦКЗ

використано для моніторингу деформацій елементів великогабаритних конструкцій. Не високі вимоги до апаратурного забезпечення, відсутність контакту та широкий діапазон вимірювань ОЦС широко використовують для вирішення багатьох практичних задач технічної діагностики елементів конструкцій. Разом з тим для кожного конкретного випадку застосування необхідно уточнити робочі аспекти досліджень.

Для практичної реалізації вимірювань з допомогою ОЦС розроблено нові алгоритми обробки зображень, які дозволяють визначати розподіл переміщень поверхні об'єкта з допомогою однієї цифрової камери. Вирішення такого питання є дуже важливим при випробуванні великогабаритних об'єктів з можливістю одночасного контролю деформацій у багатьох місцях з врахуванням переміщення об'єкта контролю, тобто визначати переміщення досліджуваної ділянки у просторі.

Відомі підходи коли використовуючи одну відеокамеру отримують розподіли деформацій поверхні в трьох напрямках. При цьому використовують властивості частотного спектру крос-кореляційного сигналу двох лазерних зображень [140]. Однак цей спосіб має вузький діапазон вимірювання, а також є чутливий до шумів зображення, зміщення та повороту об'єкта контролю. У розробленому підході [140] для встановлення відносних геометричних зображень використовують статистичні характеристики розподілу інтенсивності зображень (моменти нульового, першого і другого порядків) [141]. Разом з тим визначення геометричних трансформацій зображень за такого підходу є недостатньою, середні значення похибок встановлення зміни масштабу в межах ($\leq 20\%$), кута ($\leq 30^\circ$) і зміщення ($\leq 10\%$) становлять відповідно $6 \cdot 10^3$, 0,35 і 0,4 пікселя [140].

Використавши швидке перетворення Фур'є (ШПФ) та інваріантне перетворення Фур'є-Меліна (ПФМ) [142,143] коли зображення представлені у частотній площині можна оцінити геометричні трансформації зображень з меншою кількістю обчислювань та затрат. Зокрема підхід, який базується на основі ПФМ широко використовують у випадку виявлення і розпізнавання

об'єктів для відокремлення повороту переміщення і зміни масштабу зображень [144]. Для таких випадків перетворення легко адаптується до алгоритму ЦКЗ, тому що в процесі його реалізації використовують НПФ і частотну площину для крос-кореляції зображень.

Згідно з програмою сертифікаційних випробувань було реалізовано розроблену методику з розрахунку максимального робочого тиску в паливному баку на підприємстві «ДП «КБ Південне». Для цього проведено вимірювання переміщень поверхні паливного бака дистанційно за допомогою розробленої оптико-цифрової системи з використанням модифікованого алгоритму ЦКЗ. Згідно розрахунків, що виконані на підприємстві було вибрано ділянку поверхні бака, де є максимальні напруження та деформації. Деформації стінки бака розраховували за зареєстрованими переміщеннями на ділянці 200 на 150 мм, яка розташована біля тензоперетворювача А1.

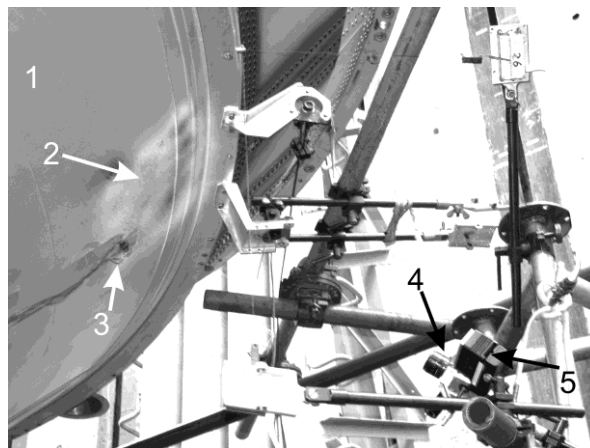


Рис. 3.20 Фото ОЦС закріпленої на стійці біля паливного баку 1 - паливний бак, 2 - контрольована ділянка, 3 - тензоперетворювач 4 - відеокамера, 5 - світлодіодний освітлювач.

На досліджувану ділянку наносили випадковий крапковий малюнок білою фарбою. Реєстрацію зображень в процесі деформування поверхні бака проводили з допомогою відеокамери Toycam UC MOS 10000 KPA з об'єктивом Xenoplan 1 7/17, яка закріплена на вертикальній стійці поблизу контрольованої ділянки бака. На стійці також було закріплено освітлювач.

Відстань від передньої лінзи об'єктива відеокамери до поверхні бака становила 0,57 м. підсвічування досліджуваної ділянки 2 поверхні бака, для забезпечення необхідного контрасту зображень, здійснювали світлодіодним джерелом світла 5. На рис. 3.21 зображено блок схему вимірювання.

При ступеневому змінюванні внутрішнього тиску в баку встановлювали зміни у деформаційному полі на контрольованій ділянці 2 з допомогою відеокамери 4 реєстрували зображення на кожному етапі навантаження. Таким чином зареєстровані зображення передавали по кабелю в персональний комп'ютер (ПК), у якому накопичувались на жорсткому диску. Блок схема вимірювання показана на рис. 3.21. По завершенню всіх ступенів навантаження за розподілами переміщень визначали деформації.

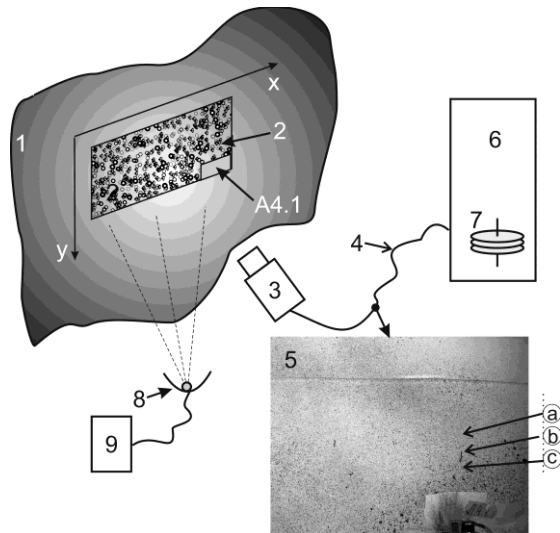


Рис. 3.21 Блок схема вимірювання 1 - поверхня паливного бака, 2 - контрольована ділянка з випадковим малюнком, (x, y) - локальна система координат, 3 - відеокамера з об'єктивом, 4 - кабель USB, 5 - зображення поверхні об'єкта захоплене відеокамерою, 6 - ПК, 7 - жорсткий диск, 8 - світлодіодний освітлювач, 9 - акумулятор, (a; b; c) - точки на поверхні бака де визначали локальні деформації, A4.1 - тезоперетворювач.

На першому етапі шляхом кореляційного порівняння фрагментів зареєстрованих зображень встановлювали відносні поля переміщень, розраховували поля деформацій використовуючи розроблені алгоритми і програмні засоби [140,141].

За вихідний стан при розрахунках деформацій прийняли незаповнений бак. При заповненні бака на 40% його об'єму, що відповідало зареєстрованому другому зображенні 2. Взявши це положення за вихідне відносно нього розраховували зміни переміщень та деформацій у стінці бака, які зумовлені зміною навантаження (тиску). Зокрема розподіл деформацій або переміщень отриманий на основі зображення 21 відповідає змінам, які відбулись внаслідок деформацій стінки бака від моменту початку реєстрації першого зображення до моменту реєстрації зображення 21.

На основі проведеного аналізу конструктивної схеми бака, умови його закріплення та силову схему навантаження і зареєстровані зображення встановлено, що в процесі випробувань паралельно з деформацією поверхні бака проходить його просторове зміщення.

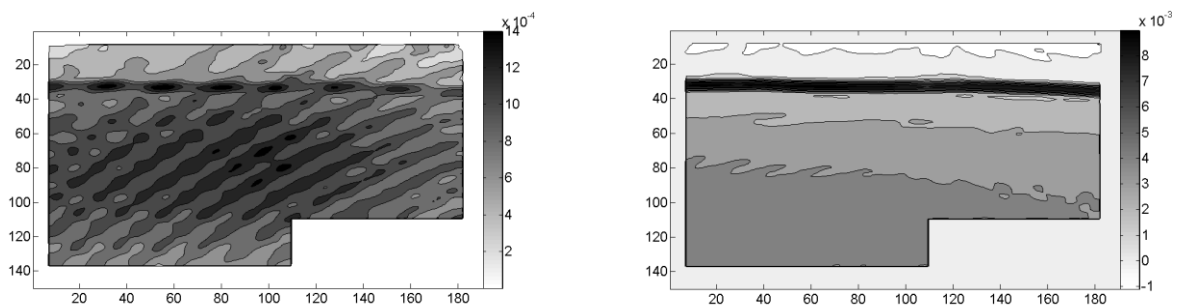
Враховуючи, що система реєстрації встановлена на нерухомій стійці при навантаженні бака відбувається взаємне зміщення бака відносно камери. Величина цього зміщення є неконтрольованою, тому в процесі випробувань відбуваються геометричні трансформації зображень (зміни масштабу, зміщення і відносні повороти), які при обробці методом ЦКЗ дають спотворені деформації поверхні. Геометричні трансформації зображень виникають додаткові деформації поверхні, які є прямо пропорційні, тому це спотворює дійсний розподіл деформацій. Зокрема відносні повороти зображень виникають додаткові зсувні зміщення поверхні. Зміна масштабу збільшує постійну радіальну деформацію направлену від центра до краю. Величину дійсних деформацій стінки баку встановлювали наступним чином. На першому етапі проводили корекцію геометричних спотворень зображень, що викликані просторовим переміщенням, а в наступному здійснювали розрахунок переміщень та деформацій в контрольованій ділянці поверхні бака.

Використавши П ФМ розроблено алгоритм визначення переміщень ділянки поверхні бака відносно відеокамери. На підставі алгоритму можна визначити геометричні трансформації зображень внаслідок переміщень поверхні бака, а також зміну масштабу, лінійне зміщення і відносні повороти

зображень. У всьому об'ємі розрахунку та оцінці його похибок проведено у роботі [143], де показано, що для реальних зображень розміром 2000 на 2000 пікселів залишкові похибки визначення зміни масштабу в межах 0,5% становить $\leq 1 \cdot 10^{-3}$, а відносного повороту в діапазоні $\pm 5^\circ\text{C}$ не більше 0,01. На основі розробленого алгоритму і програмних засобів проведена відповідна корекція зареєстрованих зображень перед визначенням полів деформацій у стінці баку.

Проведення корекції дає можливість суттєво зменшити вплив неконтрольованих переміщень паливного бака на точність вимірювань. Зареєстровані цифрові зображення оброблялися програмними засобами, які розроблені на основі алгоритму ЦКЗ і ПФМ [140,141,143,145] при проведенні статичних сертифікаційних випробувань паливного відсіку третьої ступені РКН «Циклон-4» отримані такі результати поля переміщень стінки паливного бака в області контролю за різного навантаження з просторовою дискретністю $(0,6 \times 0,6 \pm 0,01)$ мм. Ділянка для контролю переміщень і деформацій з використанням дистанційного вимірювання була вказана «Замовником», як місце досягнення максимального значення напружено-деформованого стану в стінці бака. Дослідна ділянка розміром 150×200 мм розташована в околі наклеєного тензорезистора дані вимірювань якого порівнювали із значенням деформацій методом ЦКЗ.

Використовуючи поля вертикальних переміщень розраховували зміни поздовжніх ε_y і горизонтальних ε_x деформацій стінки бака з дискретністю $(2 \times 2 \pm 0,1)$ мм. Отримані поля деформацій для різних етапів навантаження, які відповідають зареєстрованим зображенням 21 і 29 показані на рис. 3.22.



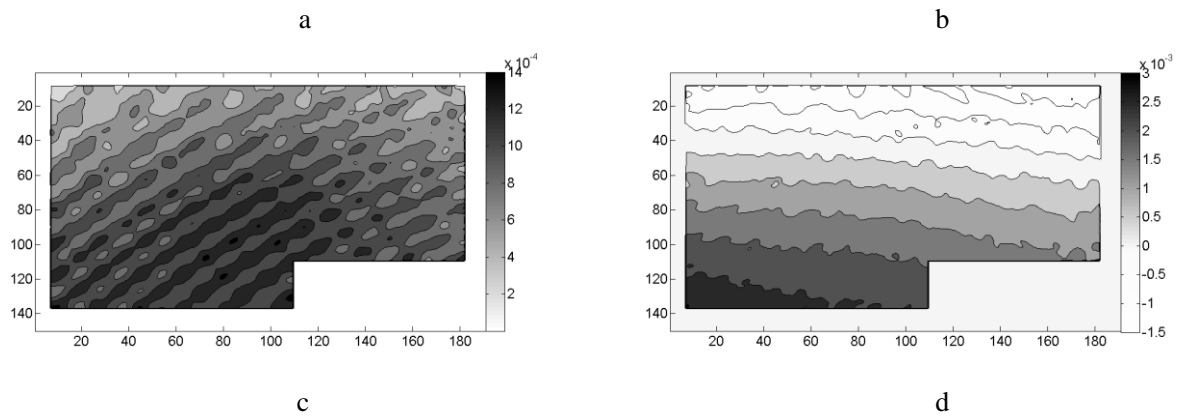


Рис. 3.22 – Вертикальні e_y (a, b) і горизонтальні e_x (c,d) поля деформацій стінки бака одержані для зображень 21 (a, c) і 29 (b, d). На осях позначено локальні координати в міліметрах.

Абсолютна похибка визначення переміщень не перевищувала ± 1 мкм, а відносна похибка обчислених деформацій становила менше 0,01%.

Порівняння значень переміщень отриманих ОЦС встановлених тензометричним способом з вертикальними переміщеннями визначених на однаковій базі, яка відповідає довжині тензорезистора 20 мм є рівні (рис. 3.23).

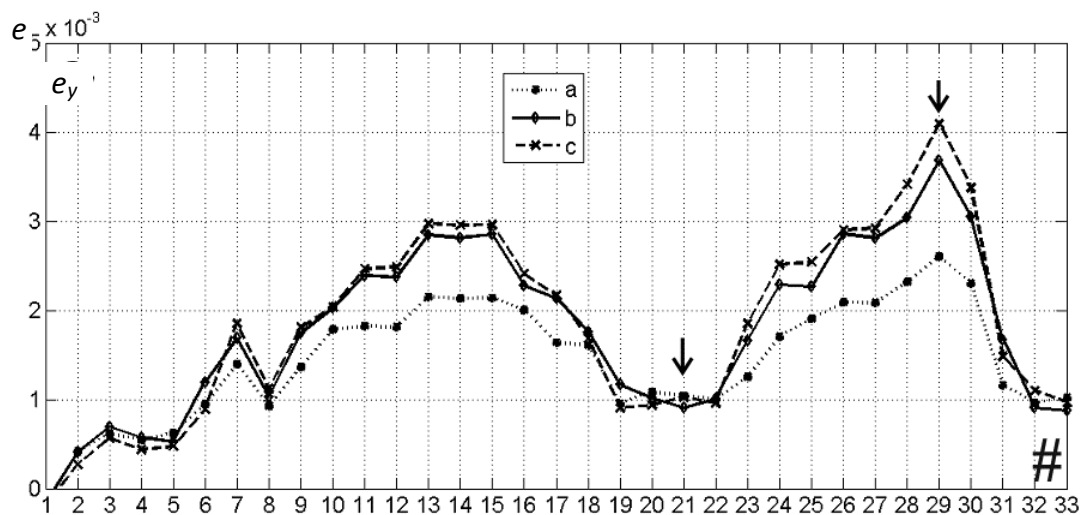


Рис. 3.23 – Зміна локальних деформацій поверхні баку під час випробувань e_y в точках (a, b, c).

Разом з тим метод ЦКЗ дає можливість встановити локальну деформацію зокрема на базі 200 мкм, яка є інваріантною (незалежною) для сплаву АМГ-6.

Тому величина отримана на базі 200 мкм є більш інформативною за деформацію встановлену з допомогою тензорезистора на базі 20 мм. При цьому визначення деформацій методом ЦКЗ дає можливість визначити горизонтальну (поперечну) складову e_x . Результати для деформації e_x в точці С подано на рис. 3.24.

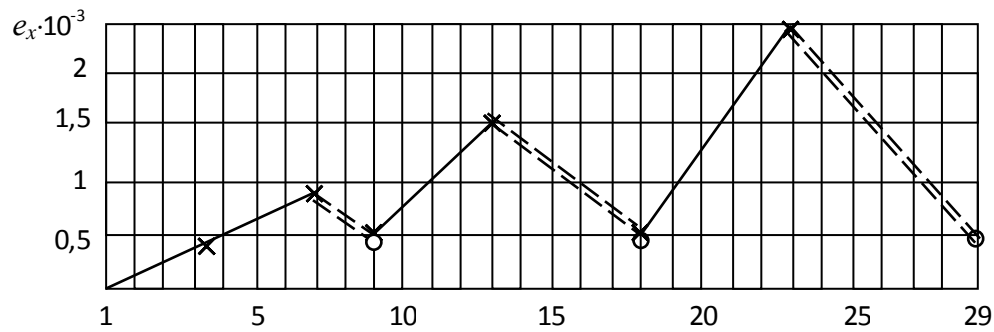


Рис. 3.24 – Зміна локальних деформацій e_x в точці С на поверхні бака під час випробувань х- навантаження (суцільна); о- розвантаження (штрихова)

На основі розробленого алгоритму з використанням ПФМ, а також зареєстрованих зображень під час експерименту даних визначали просторові переміщення досліджуваної ділянки бака щодо відеокамери (рис. 3.25).

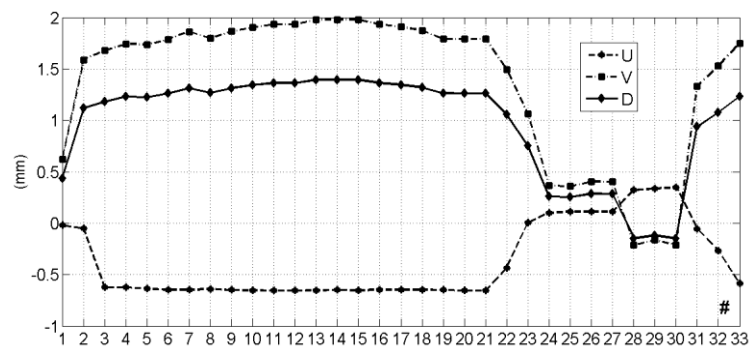


Рис. 3.25 – Переміщення контрольованої ділянки поверхні паливного бака U і V - поперечні переміщення, D - поздовжні переміщення в напрямку відеокамери.

За величиною деформацій e_y і e_x із істинної діаграми руйнування визначають величину істинних напружень для сплаву АМГ-6. Зокрема ці дані

подано для найбільш навантаженої точки С. Схема визначення напружень S_y і σ_x для точки С подано на рис. 3.26.

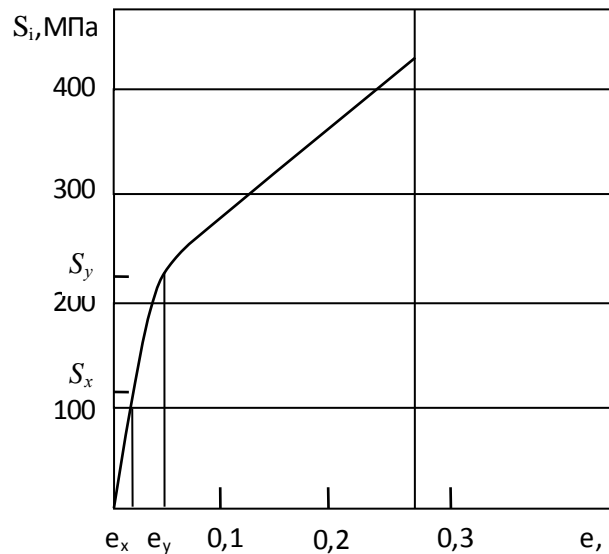


Рис. 3.26 – Визначення локальних напружень S_y і S_x в точці С для сплаву АМГ-6 за даними локальних деформацій e_y і e_x із істинної діаграми

Знаючи величину напружень S_y і S_x та деформацій e_y і e_x визначимо енергію деформування стінки бака в точці С за навантаження внутрішнім тиском 4,66 МПа (зображення 29).

Величину енергії деформування визначали, як суму енергії в напрямку $O_y - W_y$, а також $O_x - W_x$

$$W = W_x + W_y \quad (3.16)$$

Енергія деформування

$$W_y = \int_0^{e_y} S e(e_y) d\varepsilon \quad (3.17)$$

$$W_x = \int_0^{e_x} S e(e_x) d\varepsilon \quad (3.18)$$

Використавши аналітичний опис діаграми руйнування для сплаву АМГ-6 (3.9) будували залежність «енергія деформування W - тиск в баку p » (рис. 3.27). суцільна лінія відповідає результатам, що отримані при натурних випробуваннях паливного баку ракети-носія «Циклон-4». Штрихова лінія відповідає прогнозованому (розрахунковому) результату аж до граничного стану баку.

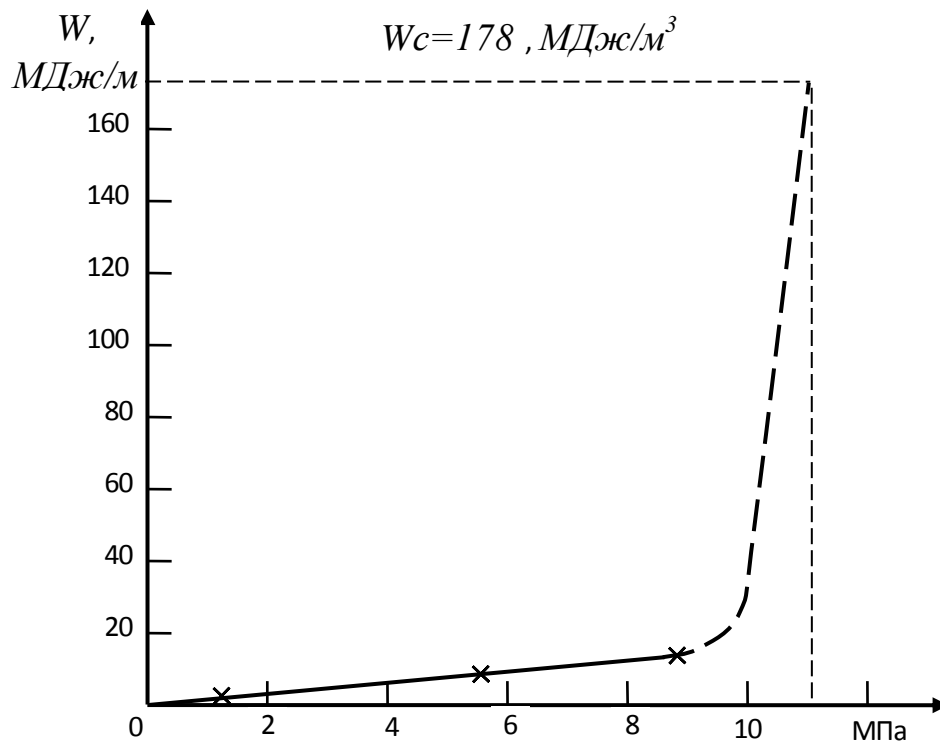


Рис. 3.27 – Зміна енергії деформування в паливному баку х- експериментальні дані ЦКЗ - розрахунок.

Висновки до розділу 3

1. Розроблено методику та визначено енергію руйнування для сплаву АМГ-6 за одновісного та двовісного розтягу. Істинні деформації для сплаву АМГ-6 перевищують стандартні значення на 19%, а істинні напруження на 20%.
2. Встановлено, що енергія руйнування визначена з використанням методу ЦКЗ є незалежною характеристикою опірності руйнуванню сплаву АМГ-6 від жорсткості зовнішнього навантаження.

3. Встановлено, що збільшення жорсткості напружено-деформованого стану за двовісного розтягу в околі концентратора напружень зменшує площу зони інтенсивних пластичних деформацій.
4. Проведено дослідження з визначення напружено-деформованого стану при навантаженні трубчастого макету з концентратором внутрішнім тиском. Побудовано залежність зміни величини енергії деформування для трубчастого макету від внутрішнього тиску.
5. Розроблено методику та визначено величини деформацій в стінці паливного бака ракети-носія з використанням методу ЦКЗ при проведенні натурних сертифікаційних випробувань на ДП «КБ» «Південне».
6. Побудовано діаграму, яка встановлює зміну величини енергії деформування від внутрішнього тиску в баку. Встановлено граничну величину тиску у паливному баку.
7. Розроблено алгоритми визначення робочого тиску у паливному баку ракети-носія який базується на основі теоретико-експериментальних досліджень.

РОЗДІЛ 4

ВИЗНАЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ТА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ДЛЯ ВАЛА РАТОРА ГІДРОТУРБИНИ КИЇВСЬКОЇ АЕС

Враховуючи, що значна частина устаткування гідроелектростанцій функціонує за межами нормативного терміну експлуатації настає питання щодо модернізації та заміни зношеного обладнання. Разом з тим при модернізації постають питання про можливість продовження терміну безпечної експлуатації вузлів та деталей при виконанні вимог по потужності і ККД [146].

Для цього необхідно розробити ефективні методики для оцінювання міцності і динаміки вузлів гідротурбін за різних режимів.

В цьому плані вал гідротурбіни є відповідальним і високонавантаженим елементом гідротурбіни, який передає крутий момент від робочого колеса до генератора.

Розрахунок довговічності елементів конструкцій здійснюють на основі встановленого напружено-деформованого стану, аналітичним або числовим методами. Для цього використовують силові або деформаційні критерії згідно, яких необхідно встановити граничні умови (характеристики матеріалу) що визначають на основі експерименту. Враховуючи, що силова схема навантаження металевих конструкцій по різному впливає на зміну міцнісних і деформативних характеристик, тому для встановлення їх довговічності необхідно використовувати критерії та характеристики опірності матеріалу руйнуванню за якими можна отримати достовірну оцінку несучої здатності та безпечного ресурсу роботи елементів конструкцій.

Особливістю пошкодження матеріалу, як за циклічного та статичного тривалого навантажень є втрата міцнісних і деформативних властивостей металу що проходить за різних механізмів. В зоні пружних деформацій, що на макрорівні характеризується модулем Юнга, відбуваються зсувні мікропластичні деформації, в обмежених об'ємах, які приводять до появи внутрішніх дефектів та втрати міцнісних характеристик металу.

При деформаціях, які перевищують границю течіння $\sigma_{0,2}$ при циклічному або статичному тривалому навантаженні в локальному об'ємі проходять процеси зародження та розвиток макродефектів, що призводять до повного руйнування металу. Разом з тим існуючі підходи щодо побудови повних діаграм руйнування за циклічного навантаження не реєструють зміну напружено-деформованого стану, які викликані появою та розвитком дефектів. Тому при оцінюванні процесу виникнення та розвитку внутрішніх дефектів в металі під дією зовнішнього навантаження необхідно вибирати критерії на основі яких можна отримати достовірну оцінку про стан металу в конструкції.

Зокрема дослідженнями [29,34,119] показано, що найбільш достовірну характеристику опірності деформуванню та руйнуванню можна отримати на підставі енергетичного підходу. Згідно цього підходу в процесі циклічного деформування відбувається виникнення та розвиток пошкоджень матеріалу, тобто втрата енергетичних запасів. Цей процес має локальний характер, тобто зародження і розвиток дефектів (тріщин) відбувається в обмеженому локальному об'ємі де присутні концентратори напружень, або дефекти структури металу. З огляду на це найбільш повну оцінку опірності матеріалу циклічному деформуванню та руйнуванню можна отримати на основі аналізу енергетичних втрат в локальному об'ємі матеріалу за зміною питомої енергії деформування, яка є інваріантною характеристикою до умов навантаження. Розвиток новітніх підходів та технічних засобів контролю, зокрема методу цифрової кореляції зображень дає можливість реєструвати зміни деформацій в локальному об'ємі. Для цього розроблена спеціальна методика з визначення питомої енергії деформування за циклічного навантаження.

За умов циклічного навантаження пластинчастого зразка з центральним надрізом довжини $2l$ в умовах плоского напруженого стану в околі вершини концентратора формується зона статичної деформації l_p , величина якої є пропорційною до величини навантажень. Напруження, що при цьому виникають у цій зоні перевищують умовну границю течіння $\sigma_{0,2}$. Якщо напруження в довільному перерізі, що знаходиться поза зоною концентратора

напружень досягнуть величини $0,5\sigma_{0,2}$ то в околі концентратора вони досягнуть величини в k раз більшу

$$\sigma_k = k \cdot 0,5\sigma_{0,2} \quad (4.1)$$

де $k > 3$ – коефіцієнт концентрації напружень.

При циклічному деформуванні у статичній пластичній зоні формується циклічна пластична зона l_{pf} , де матеріал підданий реверсивному деформуванню.

Таким чином процес пружно-пластичного деформування матеріалу є наступний. При циклічному навантаженні об'єм металу, що знаходиться за межею статичної пластичної зони деформується пружно, тобто за відсутності активного навантаження повертається у вихідне положення. При тривалому циклічному навантаженні матеріал, що знаходиться в околі концентратора напружень у циклічній пластичній зоні підданий дії реверсивного пружно-пластичного деформування в півциклі розвантаження мають місце залишкові пластичні деформації, при якому відбувається зародження та розвиток дефектів з наступним поширенням тріщини за відповідної кількості циклів. Таким чином за умову руйнування згідно енергетичного критерію, постулюється, що при досягненні енергією пружно-пластичних деформацій у циклічній пластичній зоні величини енергії руйнування матеріалу в локальному об'ємі відбуваються енергетичні втрати у цьому перерізі, що викликає розвиток дефекту (ріст тріщини).

Для даного виду навантаження особливістю контролю за поведінкою матеріалу у циклічній пластичній зоні є реєстрація деформації за максимального і мінімального зусиль циклу. За величиною розмаху деформацій можна встановити величину напружень використавши побудовану істинну діаграму деформування для даного матеріалу, тобто розрахувати значення питомої енергії, що затрачена за один цикл навантаження і відповідає енергетичним втратам матеріалу при його деформуванні. Зареєструвавши кількість циклів за які матеріал зруйнується можна побудувати залежність

величини енергії деформування за один цикл від кількості циклів навантаження. Така діаграма буде аналогом кривої Велера, що побудована в координатах « $\sigma \sim N$ ». Разом тим позитивним при побудові таких діаграм є те, що в процесі експерименту реєструють величину деформацій та її розмах в локальному об'ємі, тобто визначають реальний напружено-деформований стан де безпосередньо матеріал зазнає максимальних енергетичних втрат.

4.1. Існуючі методики оцінки ресурсу елементів конструкцій гідротурбін

Найбільш поширеним підходом до встановлення довговічності використовують підходи, які передбачають побудову кривих Велера. Згідно цього вхідними даними для виконання розрахунку ресурсу деталей і вузлів гідротурбіни є амплітудні σ_a і середні σ_m напруження циклу. Кількість циклів до руйнування N визначають з рівняння [146-148]:

$$N = \frac{\sigma_{-1\vartheta}^m \cdot N_0}{\sigma_a^m}, \quad (4.2)$$

де m - кут нахилу кривої втоми; N_0 - базове число циклів навантаження; $\sigma_{-1\vartheta}$ - межа витривалості металу за базового числа циклів навантаження, яку можна визначити із залежності:

$$\sigma_{-1\vartheta} = \frac{\gamma \cdot \varepsilon_\sigma \cdot \beta_\sigma}{k_\sigma} \sigma_{-10} \sqrt{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_B}} \quad (4.3)$$

Тут σ_{-10} - межа витривалості зразка для базового числа симетричних циклів в повітрі; γ , ε_σ , β_σ , k_σ - коефіцієнти впливу води, масштабного фактора, стану поверхні і концентрації напружень відповідно; σ_B - границя міцності матеріалу.

Середнє значення напруження циклу σ_m визначається наступним чином [149-151]:

$$\sigma_m = \sigma_{mз} + \sigma_{mm} \quad (4.4)$$

де $\sigma_{mз} = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$ - експлуатаційні середні напруження для симетричного циклу; σ_{mm} - залишкові напруження від зварювання.

Таким чином, формула (4.2) з урахуванням (4.3) і (4.4) набуде вигляду:

$$N = N_0 \left(\frac{\gamma \cdot \varepsilon_\sigma \cdot \beta_\sigma}{k_\sigma \cdot \sigma_a} \sigma_{-10} \sqrt{1 - \frac{\sigma_{mз} + \sigma_{mm}}{\sigma_B}} \right). \quad (4.5)$$

Залишковий ресурс визначають як кількість циклів до руйнування за формулою:

$$n = \left(\frac{N}{N_s} - 1 \right) \cdot L \quad (4.6)$$

де L - кількість років роботи конструкції; N_s - кількість циклів навантаження за період експлуатації.

4.2. Визначення довговічності елементів конструкції з урахуванням наявності дефектів типу тріщин

Завдання визначення довговічності конструкції з урахуванням тріщиностійкості полягає у визначенні часу (числа циклів $N = N_*$), після закінчення якого тріщина підростає до критичного розміру l_* після чого відбувається руйнування [147,148]. З результатів експериментальних досліджень відомо, що характеристична функція втомного руйнування $\Phi(\lambda)$ монотонно зростає і представляється графічно S-подібною кривою в координатах Φ, λ . Функцію $\Phi(\lambda)$ можна досить добре апроксимувати за допомогою елементарних функцій, якщо використовувати залежність Періса.

Для сталі марки Ст3 ця функція апроксимується наступним чином:

$$\Phi(\lambda) = 400(1 - \lambda)^{-3,96} \text{ цикл/см.}$$

Число циклів до руйнування визначається за формулою:

$$\int_{l_0}^e \Phi \left(\sqrt{\frac{l}{l^*}} \right) dl = N_* \quad (4.7)$$

Визначення кінетики втомної тріщини здійснюємо, вважаючи виконаними наступні умови:

а) розглянута тріщина є макроскопічною, тобто рівень напружень біля її вершини визначається лише коефіцієнтами інтенсивності напружень K_I , K_{II} , K_{III} .

б) протягом кожного циклу зовнішнє навантаження має пульсуючий характер, і його частота є низькою, менше 2Гц, тобто інерційними ефектами нехтуємо;

в) поширення тріщини в будь-якій точці її контуру відбувається уздовж поверхонь, які проходять через дотичну до контуру тріщини.

Для обчислення кількості циклів до руйнування використовуємо залежність Періса:

$$\frac{dl}{dN} = \frac{1}{N_G} \left(\frac{\Delta K}{\Delta K^*} \right)^m \quad (4.8)$$

Тут l - довжина тріщини; N - кількість циклів до руйнування;

N_G , m - постійні, що характеризують матеріал;

$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ - розмах коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) за один цикл навантаження;

ΔK^* - пороговий або критичний коефіцієнт інтенсивності напружень.

Показник степені m для різних матеріалів знаходиться в інтервалі від 2 до 7 (найчастіше $m = 3-4$). Чим вищий показник степені m , тим крихкіший стан матеріалу спостерігається при випробуванні.

З (4.8) отримаємо формулу для обчислення кількості циклів, за яку тріщина підростає від початкового розміру l_0 до недопустимого розміру l_* :

$$N = N_G \int_{l_0}^{l_*} \left(\frac{\Delta K^*}{\Delta K} \right)^m dl. \quad (4.9)$$

Загальна схема обчислення КІН наступна:

1. Якщо в наявності є одна ізольована тріщина, то розв'язується плоска задача теорії пружності для пластини, послабленої центральною тріщиною, яка розтягується заданими зусиллями. В цьому випадку КІН може бути обчислений за наближеною формулою:

$$K_1 = F\sigma\sqrt{\pi l}. \quad (4.10)$$

Тут σ - величина заданого навантаження (розтягувальні зусилля); l - довжина тріщини; F - емпіричний коефіцієнт.

2. Якщо в наявності є ряд тріщин, то розв'язується плоска задача теорії пружності для пластини, ослабленої періодичною системою тріщин, яка розтягується заданими зусиллями.

В цьому випадку КІН може бути обчислений за формулою:

$$K_1 = \sigma \sqrt{\frac{s+2l}{\pi} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi l}{s+2l} \right)}. \quad (4.11)$$

Тут σ - величина заданого навантаження (розтягувальні зусилля); $2l$ - довжина тріщини; s - відстань між тріщинами.

Час до руйнування елемента конструкції в роках визначається за формулою:

$$t = \frac{N}{3600 \cdot 24 \cdot 365 f} \cdot \quad (4.12)$$

Тут N - кількість циклів навантаження до руйнування; f - частота навантаження.

4.3. Методика моделювання та оцінювання НДС і довговічності валу ротора гідротурбіни

Одним з відповідальних елементів ротора гідроагрегату є вал турбіни. Вали, що виробили проектний ресурс, при модернізації в заводських умовах проходять вхідний контроль, який включає ряд досліджень: визначення хімічного складу, механічних властивостей, макроструктури і контроль неруйнівними методами - кольорової дефектоскопії, що дозволяє виявити і потім усунути зовнішні дефекти, і ультразвуковий контроль (УЗК), що фіксує наявність або відсутність внутрішніх дефектів або дефектних зон, які можуть мати різноманітну форму і протяжність. За результатами контролю приймається рішення про можливість його подальшої експлуатації.

Методика оцінювання НДС та довговічності валу гідротурбіни включає наступні етапи:

- побудова скінченно-елементних моделей, що дозволяють детально змоделювати напружено-деформований стан валу гідротурбіни з урахуванням всіх навантажувальних факторів;
- аналіз напружено-деформованого стану валу гідротурбіни, встановленої на Київській АЕС;
- визначення експлуатаційного ресурсу, можливість тимчасового продовження термінів експлуатації чи заміни вузлів та елементів енергетичного обладнання з пошкодженнями.

Конструкція валу гідротурбіни в тривимірному вигляді (рис.4.1а) та її розбиття на скінченні елементи (рис.4.1б) проводилося програмою нелінійного

аналізу кінцевих елементів MSC Marc Mentat 2016.0.0, яка використовується для моделювання поведінки елементів конструкцій за складного навантаження та враховує зміни в матеріалі при значних пружно-пластичних деформаціях і напруженнях.

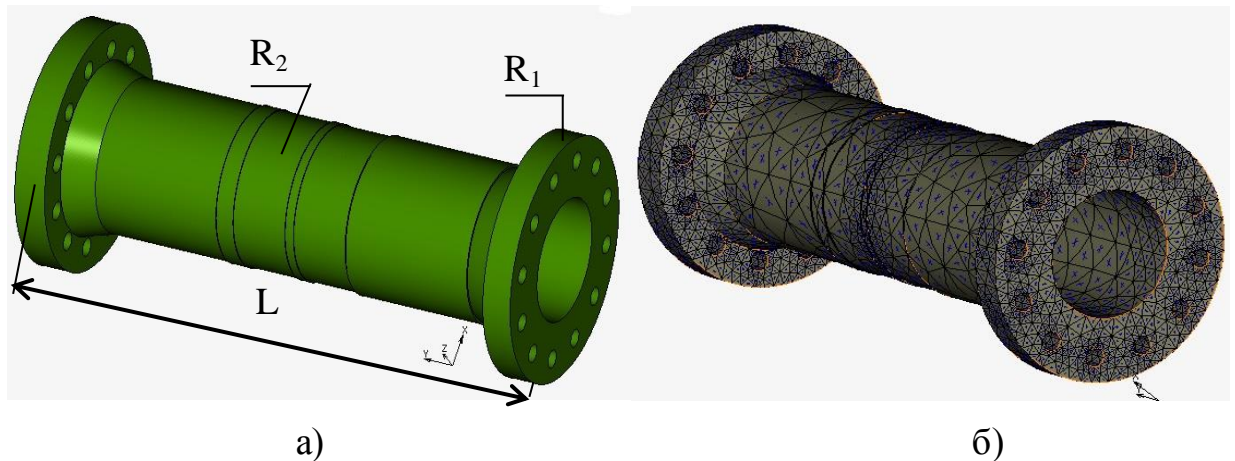
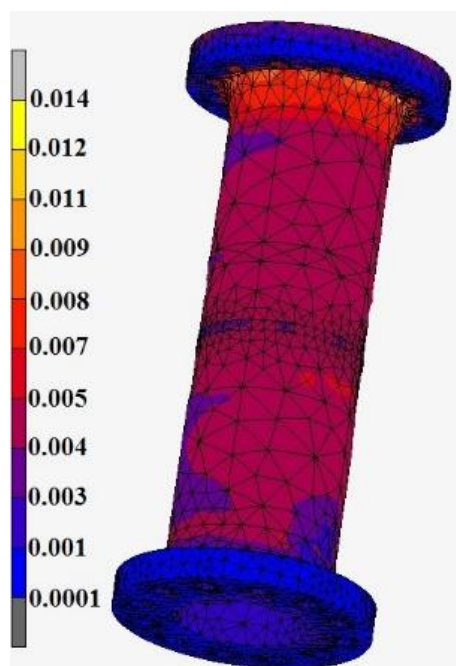


Рис.4.1 Зовнішній вигляд валу гідротурбіни (а) та розбиття на скінченні елементи (б).

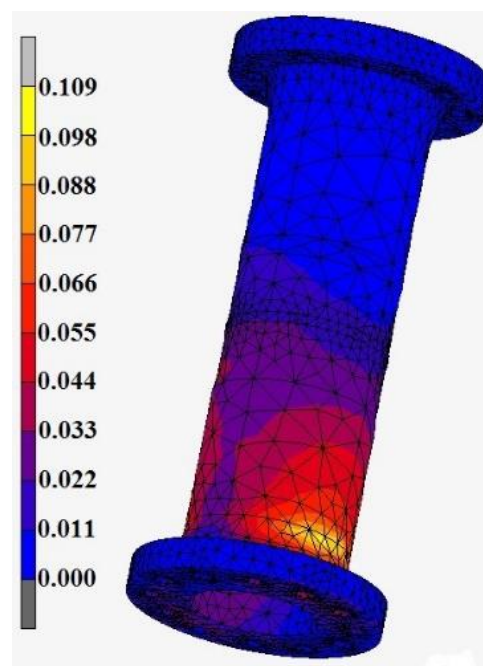
Розрахунки проводили для валу гідротурбіни Київської ГАЕС виготовленого зі сталі 20ГС, з такими розмірами: $R_1=1270$ мм, $R_2=800$ мм, $l=2781$ мм. Умови навантаження наступні: максимальне осьове гідравлічне зусилля 1275 кН, вага робочого колеса з обтічником 163 кН, вага валу 59,8 кН та крутний момент 2768,4 кН·м.

Результуюча скінченно-елементна модель валу містила 30103 вузли та 17518 елементів тетраїдоподібної форми.

У результаті було визначено напружено-деформований стан у матеріалі валу. На рис. 4.2 – 4.5 подано результати розрахунків. На рис. 4.2 представлені пружні еквівалентні мінімальні (а) та максимальні деформації (б) при дії навантаження від власної ваги, ваги робочого колеса з обтічником, осьового гідравлічного зусилля та крутного моменту, а на рис. 4.3 та 4.4 подано значення еквівалентних напружень по Мізесу [148] при тому ж навантаженні на початку та в кінці навантаження. На рис. 4.5 представлено розподіл загальних деформацій в кінці навантаження.

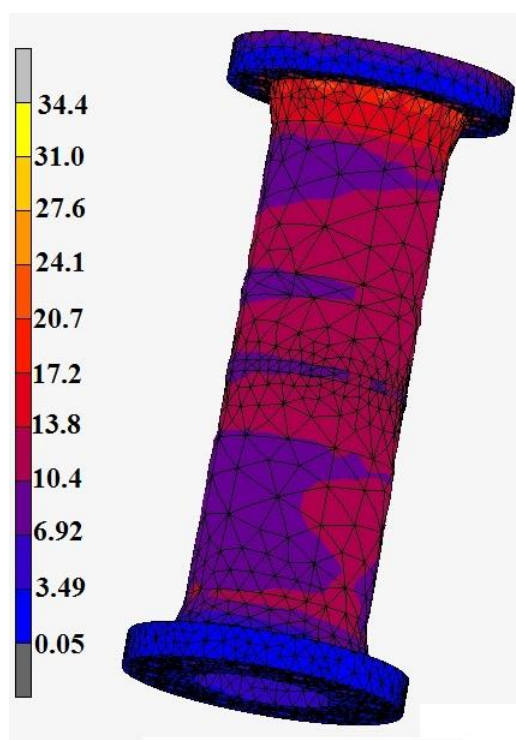


а)

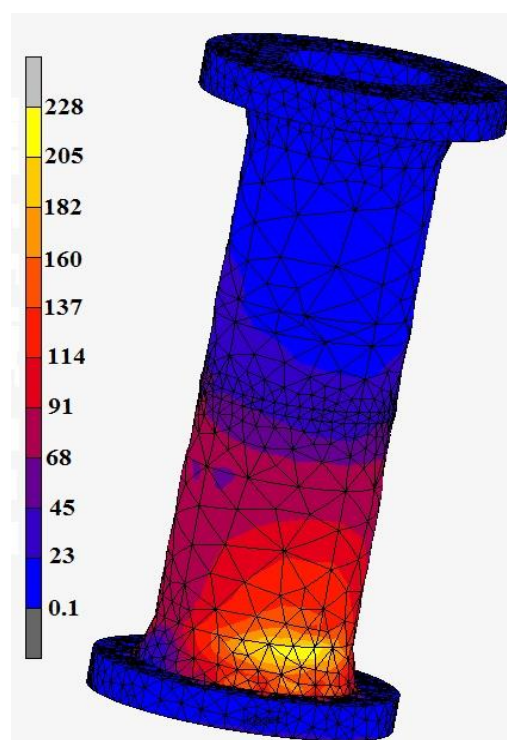


б)

Рис.4.2 Розподіл пружних еквівалентних мінімальних (а) та максимальних деформацій (б).



а)



б)

Рис.4.3 Розподіл еквівалентних мінімальних (а) та максимальних напружень (б) на початку навантаження.

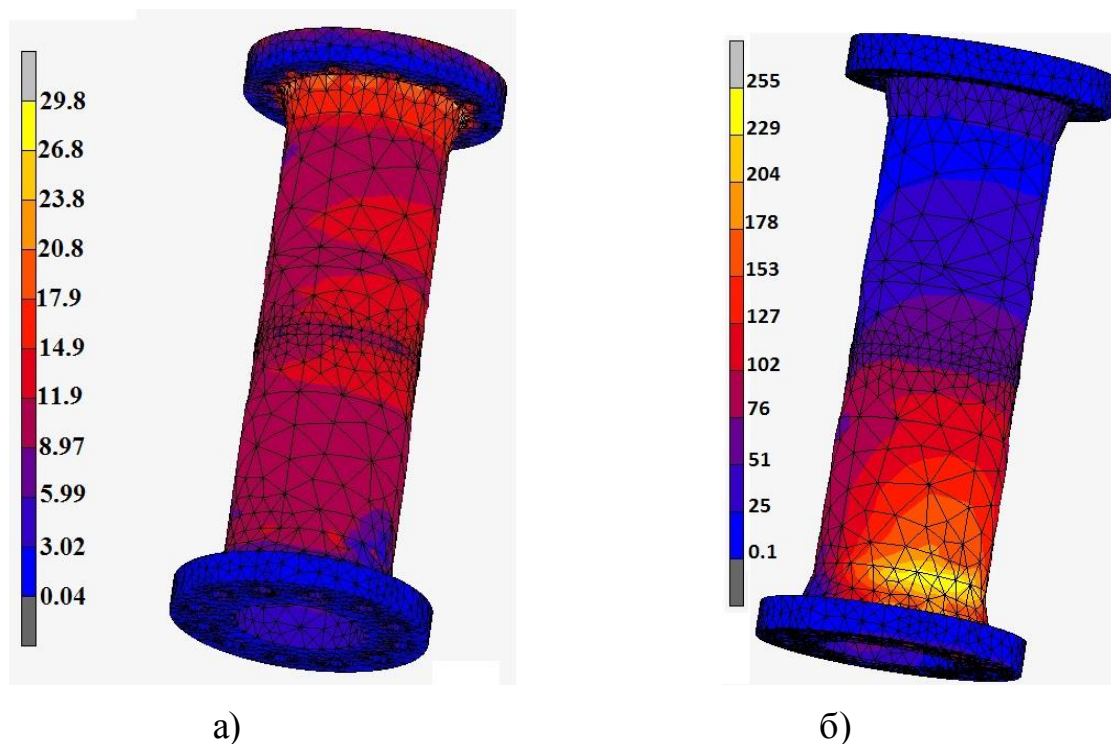


Рис.4.4 Розподіл еквівалентних мінімальних (а) та максимальних напружень (б) в кінці навантаження.

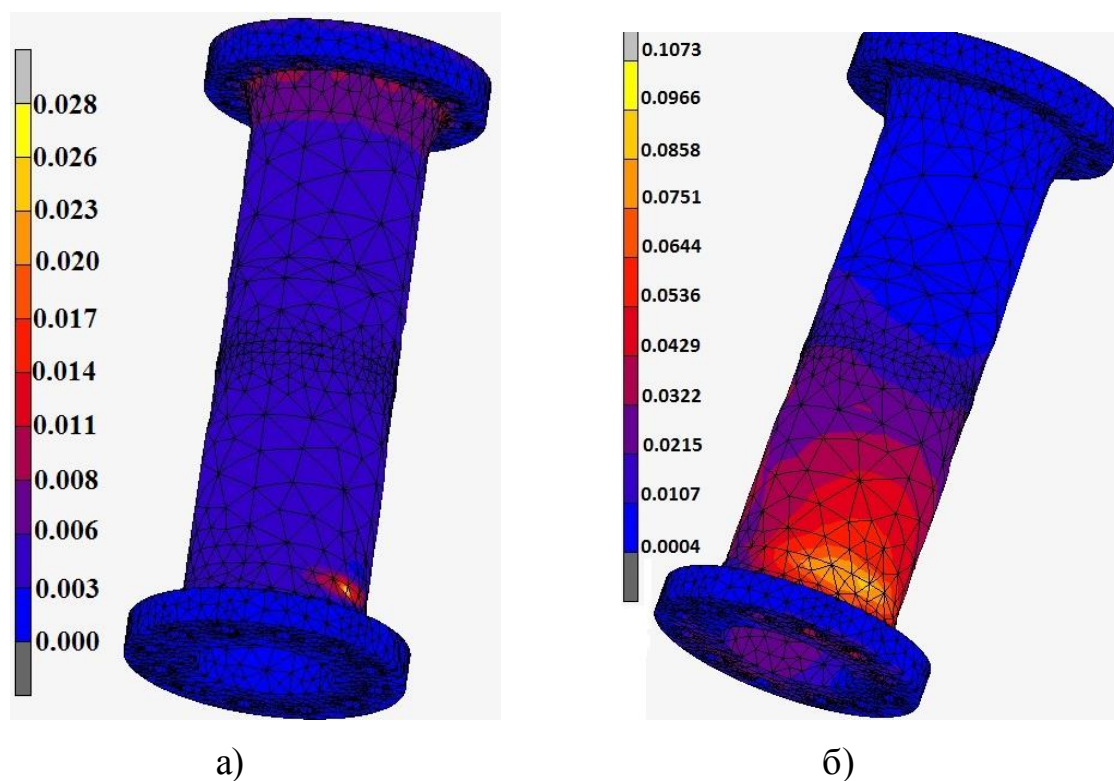


Рис.4.5 Розподіл загальних еквівалентних мінімальних (а) та максимальних деформацій (б) в кінці навантаження.

Як видно з цих рисунків максимальні деформації та максимальні напруження спостерігаються в районі другого підшипника ротора. Максимальні напруження в кінці навантаження досягають 255 МПа і не перевищують межу текучості ($\sigma_T=290$ МПа) для сталі 20.

На рис. 4.6 подано зміну напружень та деформацій під час навантаження.

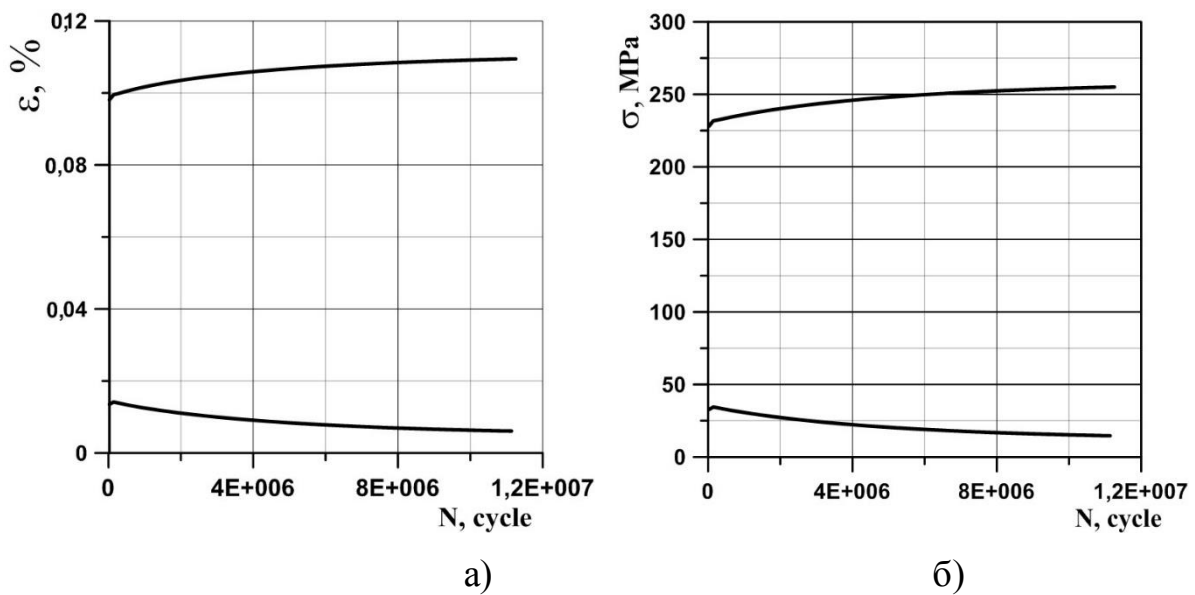
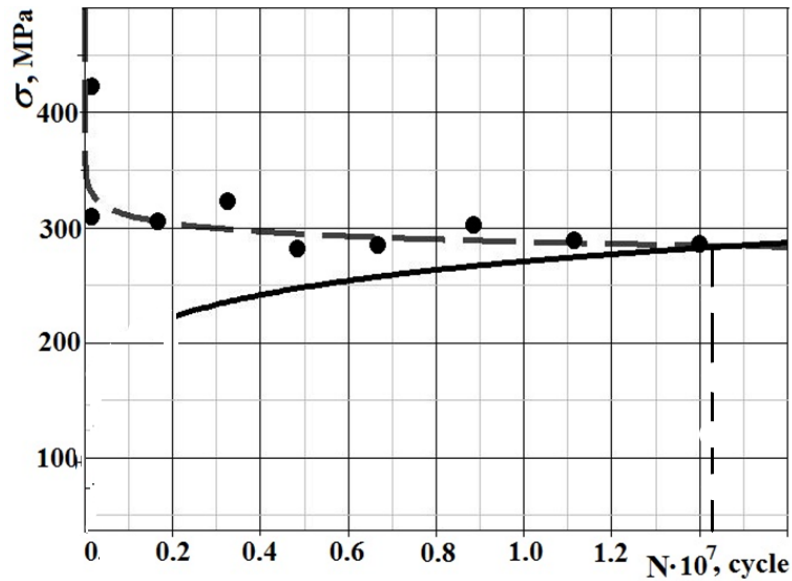


Рис.4.6 Залежність еквівалентних мінімальних та максимальних деформацій а) та напружень б) від кількості циклів навантаження.

Залишковий ресурс валу ротора гідротурбіни Київської ГАЕС визначено з урахуванням втомних характеристик марки сталі 20ГС [149]: границя витривалості зразка при базовому числі симетричних циклів $\sigma_{-10} = 285$ МПа, базове число циклів $N_0 = 10^7$, кут нахилу кривої втоми $m = 3,78$, межа міцності $\sigma_B = 490$ МПа.

Залишковий ресурс ротора гідротурбіни з урахуванням фактичних даних про напрацювання агрегатів за весь період експлуатації визначено відповідно до [7].



a)

b)

Рис.4.7 Крива Веллера для сталі 20ГС (точки) та максимальне еквівалентне напруження, яке виникає в найбільш критичній точці валу (суцільна лінія).

В результаті отримано, що кількість циклів до руйнування становитиме $1.5 \cdot 10^7$.

4.4. Методика побудови діаграм циклічного деформування і руйнування

Дослідження втомної міцності сталі 20ГС з використанням енергетичного критерію проводили на циліндричних зразках за силовою схемою три точкового згину. Із сталі 20ГС виготовлений вал гідротурбіни Київської ГАЕС, яка за співвідношенням механічних характеристик $\sigma_{\theta}/\sigma_{0,2}$ відноситься до деформаційно зміцнювальних металів. Циліндричні зразки виготовлені із сталі 20 навантажували за асиметрії синусоїдального циклу $R=-1$ з частотою 12 Hz. Змінювали швидкість руйнування зразка шляхом збільшення поперечного зусилля P_n за однакової асиметрії $R=-1$. Величину деформації при згині зразка реєстрували камерою Таур Tech UCMOS 1000 RPA з роздільною здатністю

360x2800 pixels, та обчислювали за відповідною програмою методом ЦКЗ. Цифрова камера закріплена на одній платформі із навантажувальною вилкою. Таким чином при згині зразка з допомогою навантажувальної вилки віддаль від поверхні зразка до об'єктиву камери є постійною, що забезпечує однакову різкість поверхні.

На рис. 4.8 показана схема згину зразка та реєстрацію величини видовження розтягнутої зони на базі 0,5 мм при його навантаженні.

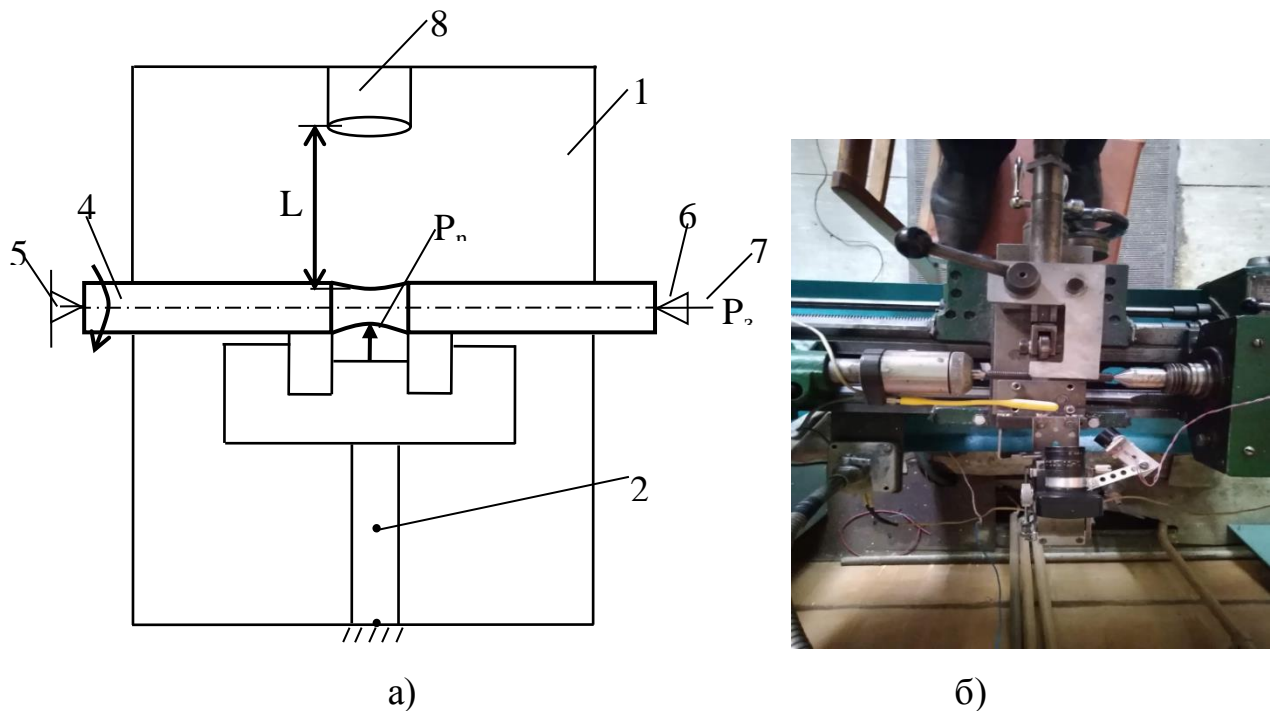


Рис. 4.8 Силова схема а) і загальний вигляд пристрою для навантаження циліндричного зразка круговим згином б)

На супорті станка встановлена платформа 1 на якій з однієї сторони від центральної осі закріплена навантажувальна вилка 2 (рис.4.8а), а з протилежної сторони закріплено цифрову камеру 8. Зразок циліндричний 4 встановлений у центрах токарного верстата 5 і 6. Задній центр 6 оснащений динамометром 7 для вимірювання осьової сили затиску зразка P_z .

Для згину зразка поперечним зусиллям P_n використовують навантажувальну вилку (рис. 4.9), яка закріплена на платформі і має можливість поперечного переміщення разом із супортом верстата відносно зразка, що встановлений у центрах.

На протилежній стороні від навантажувальної вилки до платформи 1 закріплена цифрова камера 8 з можливістю регулювання віддалі L , яка реєструє ділянку деформування при згині зразка.

Навантажувальна вилка (рис.4.9) в своєму складі має корпус 1, що з'єднаний із платформою. В корпус 1 по ковзній посадці встановлений шток 2, який контактує з динамометром, що реєструє поперечне зусилля P_n на зразку і регулюється гайкою 4. Навантаження зразка поперечним зусиллям P_n здійснюються через контакт з двома парами підшипників 5 і 6.

Таким чином закріпивши зразок в центрах та зареєструвавши камерою вихідне положення поверхні ділянки на зразку проводять його навантаження зусиллям P_n до досягнення заданої деформації e_z . За величиною деформації e_z для даного матеріалу із істинної діаграми руйнування «S-e» визначають величину істинних напружень S_i . Після цього вмикають токарний верстат, реєструють оберти з відповідною частотою і слідкують за моментом, коли зразок зруйнується. В результаті навантаження зразок підданий круговому згину, що відповідає симетричному циклу для якого асиметрія $R = -1$. Схема деформування зразка в координатах « $S_i \sim e_i$ » показана на рис.4.10.

Навантаження зразка при першому циклі в розтягнутій зоні проходить по лінії 01. При обертанні зразка матеріал буде проходити стадії розвантаження аж до стиску по траєкторії 1-2-3. При подальшому обертанні відбувається наступне навантаження за траєкторією 3-4-1. Площа, що обмежена лініями 1-2-3-4-1 відповідає енергії деформування за один цикл навантаження. Таким чином встановивши кількість циклів навантаження до руйнування для різних величин деформацій можна побудувати діаграму енергетичних втрат міцності матеріалу за циклічного деформування в координатах « $W-N$ » (енергія одного циклу W – кількість циклів N). За таким підходом можна реєструвати зміну величини деформації за допомогою цифрової камери для фіксованого положення зразка в процесі його випробування і простежити динаміку зміни пошкодження.

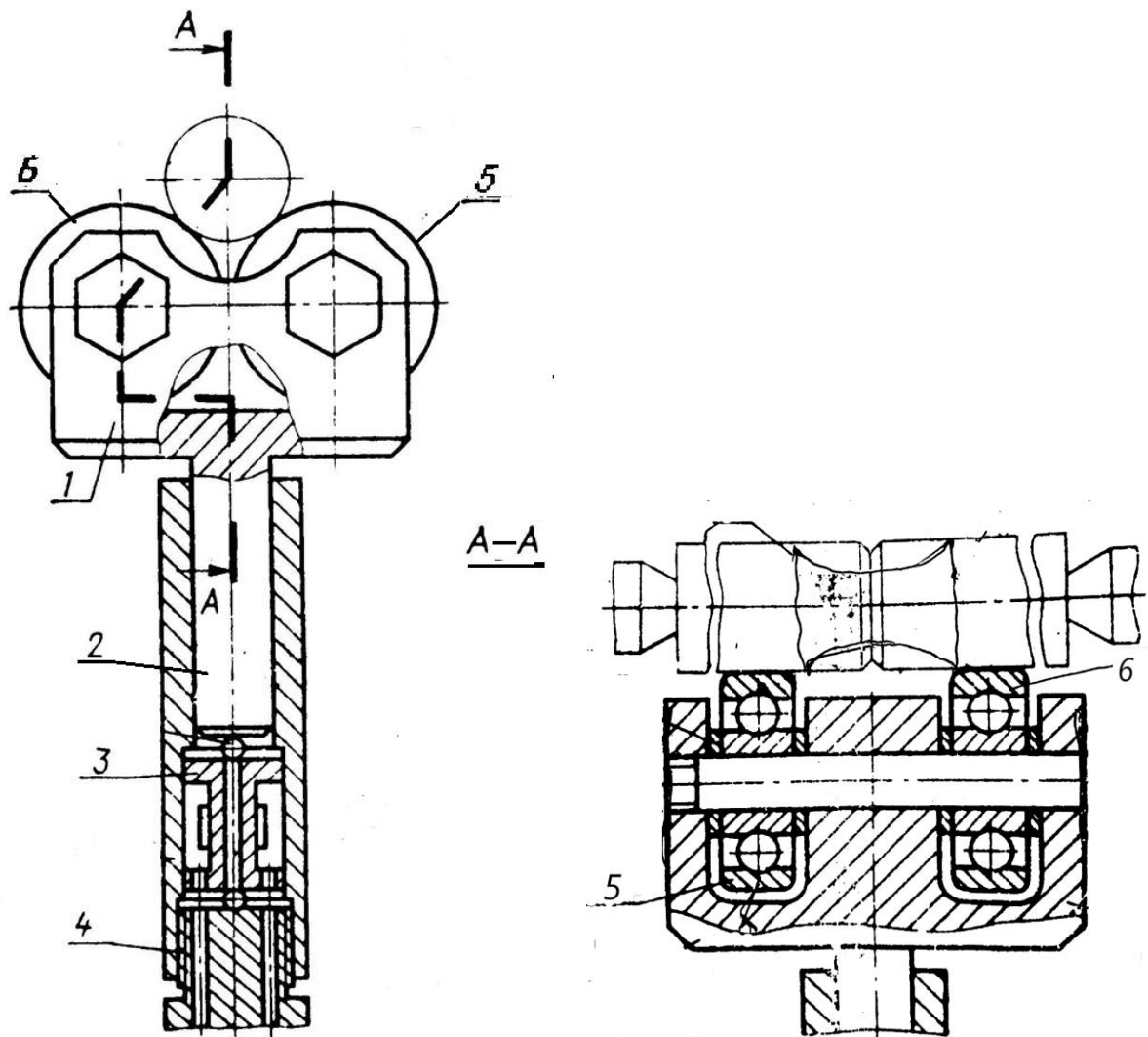


Рис. 4.9 Навантажувальна вилка для випробування циліндричних зразків на втомну міцність.

В результаті пружно-пластичного деформування металу виникає складова пластичної деформації яка є основною причиною появи петель гістерезису. Площа, що обмежена петлею є пропорційна енергії, яку поглинає матеріал за час одного циклу навантаження. Зміна характерної для кожного матеріалу петлі гістерезису в залежності від кількості циклів за постійної амплітуди деформації або напруження встановлює макроскопічні зміни в металі.

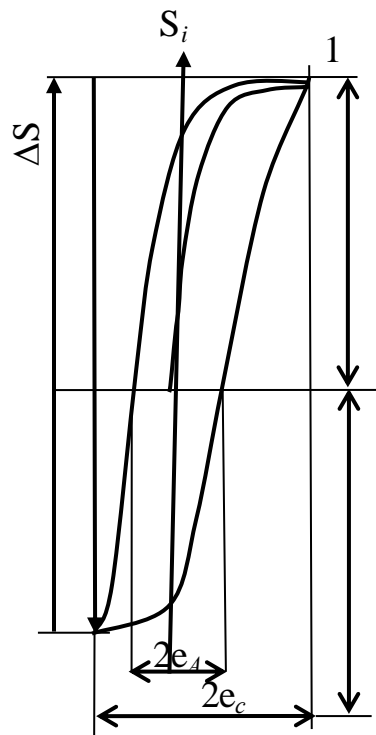


Рис. 4.10 Схема деформування циклічно зміцнювального матеріалу.

На рис. 4.10 показано хід петлі циклічної деформації від S на фоні діаграми деформування за статичного розтягу (крива 1). Для цього випадку величина $2e_{nl}$ – відповідає амплітуді пластичної деформації, $2e_c$ – відповідає повній амплітуді деформації. Величину пружної складової можна визначити, як різницю $2e = 2e_c - 2e_{nl}$. Встановлено, що характерним для циклічно-зміцнювальних матеріалів є те що при збільшенні кількості циклів навантаження амплітудні напруження S_a зростають за постійної амплітуди деформацій.

Якщо при постійній амплітуді деформацій амплітудні напруження ΔS із збільшенням кількості циклів зменшуються то матеріал відноситься до циклічно знеміцнених.

Також дослідженнями [151] встановлено, що на основі співвідношень статичних механічних характеристик можна встановити приналежність до якого типу відноситься матеріал. Зокрема при співвідношенні границі міцності матеріалу σ_b до границі течіння σ_m встановлено якщо співвідношення $\sigma_b/\sigma_m > 1,4$ виконується, то матеріал циклічно зміцнювальний.

Для випадку $\sigma_g/\sigma_m < 1,2$ – матеріал циклічно зміцнювальний.

Для матеріалів проміжного діапазону $1,2 < \sigma_g/\sigma_m < 1,4$ в процесі циклічного деформування можуть переважати одна або друга тенденція. Зокрема сталь 20 в якій механічні характеристики $\sigma_{0,2}=290$ МПа, $\sigma_b=490$ МПа відноситься до циклічно зміцнювальних, тобто при однаковій амплітуді деформацій $2e_c$ напруження σ_i в циклі зростають у порівнянні з початковим значенням. Петля гістерезису для цього випадку має вигляд 2 (рис. 4.10)

4.4.1 Розрахунок енергетичних затрат при циклічному навантаженні.

Розрахунок енергетичних затрат на пошкодження сталі 20 ГС при згині зразка за один цикл навантаження визначали, як площу, що обмежена петлею діаграми пружно-пластичного деформування (рис. 4.10).

Враховуючи, що величина напружень та деформацій за експлуатаційних умов навантаження у найбільш напруженій ділянці вала отримали на основі розрахунку МСЕ досягає 250 МПа та 0,12%, що відповідає області макропружних деформацій. Область пружного деформування металу вала гідротурбіни обмежена діапазонами

$$e_R \leq e_e \leq e_T \quad (4.13)$$

де e_R - величина деформації, що відповідає нижній границі руйнування за $2 \cdot 10^6$ циклів,

e_T - деформація, що відповідає границі течіння сталі 20 ГС,

e_e - розрахована МСЕ величина деформації що виникає в процесі експлуатаційного навантаження.

Для визначення напружень, що відповідають встановленій величині деформації використовували апроксимаційні функції криволінійних ділянок істинних діаграм руйнування. Зокрема для сталі 20ГС функція що описує

діаграму і побудовану за методикою викладеною в розділі 2 має вигляд

$$S(e) = A \left(\frac{e_c}{e_t} \right)^n \quad (4.14)$$

де e_t - деформація течіння;

e_c - істинна деформація

$S(e)$ - істинні напруження;

A – коефіцієнт для матеріалу сталь 20ГС який рівний границі течіння $S_T=290$ МПа.

n - коефіцієнт, що враховує деформаційні зміни при циклічному деформуванні по відношенню до статичного за умов пружно-пластичного навантаження

$$\frac{S_c}{S_T} = \left(\frac{e_c}{e_T} \right)^n; \quad (4.15)$$

За відомим значенням істинних напружень руйнування S_e , а також напружень течіння S_T та відповідно критичної деформації e_c і течіння e_T коефіцієнт n визначається із співвідношення (4.16) та (4.17)

$$S_c = S_T \left(\frac{e_c}{e_T} \right)^n \quad (4.16)$$

$$n = \ln \left(\frac{S_c}{S_T} \right) / \ln \left(\frac{e_c}{e_T} \right) \quad (4.17)$$

Враховуючи дані механічних характеристик для сталі 20ГС зокрема

$S_T=290$ МПа ; $e_T = 1,381 \cdot 10^{-3}$; $S_c = 700$ МПа; $e_c=0,75$; коефіцієнт $n=0,14$.

Таким чином в процесі експерименту з допомогою навантажувальної вилки зразок деформували до деформації e_i , яку реєстрували камерою. За

величиною деформації на основі побудованої істинної діаграми руйнування (рис. 4.11) встановлювали значення істинних напружень. Дані досліджень наведено у (табл. 4.1).

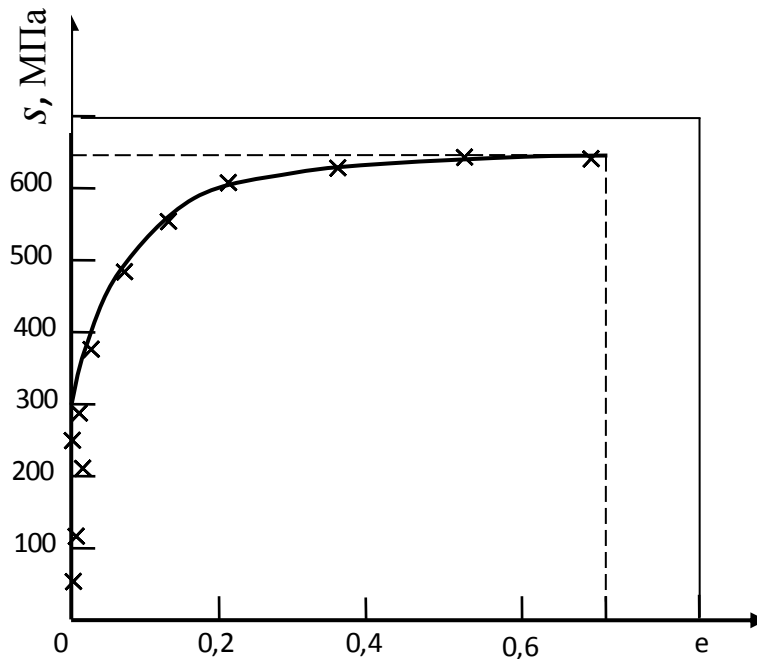


Рис. 4.11 Істинна діаграма руйнування сталі 20ГС

Таблиця 4.1

Експериментальні дані для побудови істинної діаграми для сталі 20ГС

№ п/п	σ , МПа	ϵ ,	S , МПа	e ,
1	2	3	4	5
1	50	0,0008	50	0,0008
2	150	0,0015	150	0,0015
3	210	0,0017	210	0,0017
4	290	0,002	290	0,0025
5	370	0,04	390	0,05
6	490	0,16	490	0,18
7	500	0,18	520	0,23
8	-	-	650	0,38
9	-	-	680	0,56

10	-	-	730	0,71
----	---	---	-----	------

Величину енергії одного циклу навантаження визначають за формулою

$$W_m = 2 \int_{e_{\min}}^{e_{\max}} S(e) de \approx \Delta S_m \cdot \Delta e_m \quad (4.18)$$

Дані експериментальних досліджень при випробуванні циліндричного зразка за циклічного згину наведено. За даними побудовано діаграму втомного руйнування для сталі 20 ГС за симетричного циклу навантаження в координатах енергія одного циклу W_m - кількість циклів навантаження $\ln N$ (рис.4.12).

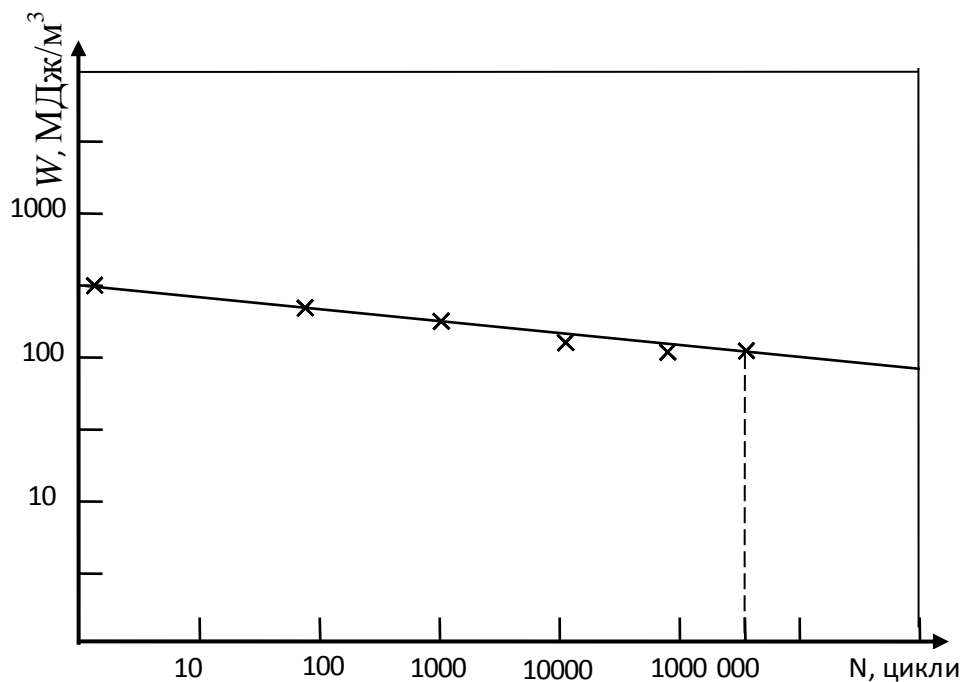


Рис. 4.12 Діаграма втомного руйнування сталі 20 ГС в координатах «енергія циклу W – кількість циклів N »

За енергетичним підходом кількість циклів до руйнування становить $1,8 \cdot 10^7$ циклів, що на 300 тис. циклів більше ніж за силового критерію обчисленого з використанням МСЕ. Таким чином це підтверджує правильність оцінки довговічності. Збільшення незначне кількості циклів за енергетичним

підходом пов'язане із більш точним визначенням напружено-деформованого стану при пружно-пластичному деформуванні.

Висновки до розділу 4

1. Розраховано МСЕ напружено-деформований стан для валу гідротурбіни Київської ГАЕС.
2. Розроблено методику побудови діаграм втомного руйнування за силовою схемою кругового згину циліндричного зразка на основі енергетичного підходу.
3. Побудовано істинну діаграму руйнування сталі 20ГС.
4. Побудовано діаграму втомного руйнування сталі 20ГС в координатах «енергія одного циклу W - кількість циклів N »
5. Визначено кількість циклів до руйнування валу гідротурбіни Київської ГАЕС з силовим та енергетичним підходом. За енергетичним підходом гранична кількість циклів на 28% більша, ніж за силовим.

Список використаних джерел

1. *K. N. Smith, P. Watson and T. H. Topper* A stress-strain function for the fatigue of metals// J. Materials 5(4), 1970, – pp. 767-776.
2. *Godman J.* Mechanics applied to engineering.- London: Green and Company, 1899.-103 p.
3. *Артим В.І* Підвищення експлуатаційної надійності трубних і штангових колон для буріння та видобування нафти і газу: автореф. Дис.. докт. Техн. наук. Івано-Франківськ, 210, 36 с.
4. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посібник. у 10 т. Т.10 Міцність та довговічність нафтогазового обладнання. Львів -Івано-Франківськ. 2006. 1193 с.
5. *Василишин В.Я.* Підвищення працездатності різьбових з'єднань труб нафтового сортаменту: автореф. дис. ... канд. техн. наук Івано-Франківськ, 2013. 20 с.
6. *Vaisberg O., Vincke O., Perrin G. etc.* Fatigue of drillstring: state of the art. Oil & Gas Science and Technology. 2002. №1 (Vol.57). P.7-37.
7. *Veidt M. Berezovski A.* Design and application of a drill pipe fatigue test facility. SIF2004 Structural Integrity and Fracture. (Brisbane, 26-29 September 2004). Brisbane,2004. P. 367-375.
8. *Vinske O., Averbuch D., Tollet S.* A new drillstring fatigue supervision system. SPE/ IADC Drilling conference. (Amsterdam,20-22 February 2007). Amsterdam, 2007.P1-8.
9. *Braun M.* Fatigue assessment of threaded riser connections. Trondheim, 2014.78p.
10. *Филиппов В.Ю., Щурин К.В., Рассоха В.И.* Влияние нестационарности факторов сопротивления усталости на долговечность сварных узлов транспортных средств. Вестник ОГУ. 2003. №2, С. 140-144.
11. *Барышников А.И.* Влияние циклического нагружения на долговечность резьбовых соединений буровой колонны. Труды ВНИИБИТ. 1983. Вып. 57. С. 142-148.

12. *Козак Я.М.* Навантаженість і довговічність бурильних труб під час спуско-піднімальних операцій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.12/Івано-Франківськ, 2005.
13. *Почтенный Е.К.* Кинематическая теория механической усталости и ее приложение, Минск, 1973. 216 с.
14. *Почтенный Е.К.* Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей. Минск, 1983.246 с.
15. *Почтенный Е.К., Ракицкий А.А., Кулеш А.П.* Исследование кинетики роста усталостных повреждений в листовых ресорах. Известия Академии наук БССР. 1978. №1. С.10-14.
16. *Почтенный Е.К., Рыжков Е.П.* исследование кинетики повреждения листових образцов стали 45. Заводская лабораторія, 1973, №1. С. 93-97.
17. *Копей Б.В.* Науково-технологічні методи комплексного підвищення ресурсу деталей нафтогазового обладнання дис. ...д-ра техн. наук.: 05.15.07/ Івано-Франківськ . 1996.
18. *Пушкар П.В.* Оцінка довговічності насосних штанг з урахуванням експлуатаційних факторів дис.. ... канд.. техн.. наук: 05.05.12/ Івано-Франківськ, 2007.
19. *Горбацевич М.И., Панов А.Н., Минюкович С.М.* Проектирование транспортных средств: нагруженность, повреждение, ресурс, Минск, 2005. 264 с.
20. *Копей В.Б.* Підвищення ресурсу штангової колони при видобутку парафіністих нафт.: дис. ... канд. техн. наук:05.05.12/ Івано-Франківськ, 2004.
21. *Льницький М.К.* Розробка методів попередження втомних руйнувань морських трубопроводів: дис. ... канд. техн. наук:05.05.13/ Івано-Франківськ, 2001.
22. *Jiahao Zheng* Fatigue estimation of drill-string and drill-pipe threaded connection subjected to random loading. Newfoundland, 2015.125 p.

23. *Ивасив В.М. Лисканич М.В., Турчин В.А., Хома Д.И.* Исследование кинетики усталостного повреждения крупных резьбовых соединений. Прикладная механика. 1985. Т. 21, №10. С. 130-131.
24. ГОСТ 25.502-79 Методы механических испытаний металлов. Методы механических испытаний на усталость.
25. *Усталостное разрушение металлов.* Коцаньда С. Пер. с польск. М., «Металлургия», 1976. 456 с.
26. *Frost N.E., Marsh K.J., Pook L.P.* Metal fatigue – Oxford^ Glarendon press, 1974-500p.
27. *Одинг И.А.* Допускаемые напряжения в машиностроении.- М.: Машгиз, 1962.- 260 с.
28. *Троценко В.Т.* Усталость и неупругость металлов.- Киев: Наук. Думка, 1971.- 268 с.
29. *Shindler H.J.* Strain energy density as the link between global and local approach to fracture/ Proc. Of 10th Int. Conf. on Fracture/- Honolulu.- 2001.
30. *Date, K., Shoji, T., Takahashi, H. and Suzuki, M.,* "Crack Tip Blunting, the J-Integral and Cleavage Fracture Toughness in Low Strength Steels", IIW Doc. X-876-77.
31. *Stowell, E. Z.,* Nuclear Engineering and Design, Vol. 3, pp. 32-40, 1966.
32. *Pankaskie, P. J.,* "Strain Energy Absorption as a Failure Index for Materials Sensitive to Interstitial-Dislocation Interactions", Proc. Int. Symp. on Absorbed Specific Energy and/or Strain Energy Density, Budapest, 1980. To be published by Sijthoff and Noordhoff, 1981.
33. *Sih, G. C.,* A Special Theory of Crack Propagation, Methods of Analysis and Solution to Crack Problems, edited by G. C. Sih, Wolters-Noordhoff, 1973.
34. *Gillemot, L.F.* Criterion of crack initiation and spreading/ L.F. Gillemot // Engineering Fracture Mechanics.-1976.-V.8.-P.239-253.
35. *Разрушение.* – Т. 3./ Перевод с англ. под ред. Г. Либовица.: Мир, 1976.

36. *W. N. Findley* Combined stress fatigue strength of 78S-T61 aluminium alloy with superimposed mean stresses and corrections for yielding. NACA-TN-3495, Washington, Nov. 1955, 69 pages.
37. *G. Sines* Failure of materials under combined repeated stresses with superimposed static stresses. NACA-TN-3495, Washington, Nov. 1955, 69 pages.
38. *H. Majors, D. D. Mills and C. W. McGregor* Fatigue under combined pulsating stresses *J. Appl. Mech.* September, 1949, p. 269-276.
39. *J. Marin*. Interpretation of strengths for combined stresses. In: Proceedings International Conference on Fatigue of Metals, London, 1956, pp.184-194.
40. *T. Palin-Luc and S. Lasserre*. High cycle multiaxial fatigue energetic criterion taking into account the volumes distribution of stresses// In: Proceedings 5th International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture (Edited by E. Macha and Z. Mroz), TU Opole, Poland, – 1997. – Vol.1, pp.63-79.
41. *H. J. Gough and H. V Pollard*. The strength of metals under combined alternating stresses. *Proc. Inst. Mech. Engng* 131, – 1935.– pp. 3-103.
42. *Y. S. Garud*. A new approach to the evaluation of fatigue under multiaxial loadings. *Trans. ASME JEMT* 103, 1981, – pp. 118-125.
43. *K. Kanazawa, K. J. Miller and M. W. Brown*. Low cycle fatigue under out-of-phase loading conditions. *Trans. ASME JEMT* 99(3), 1977, – pp. 222-228.
44. *R. M. Andrews and M. W. Brown*. Elevated temperature out-of-phase fatigue behaviour of a stainless steel// In: Biaxial, Multiaxial Fatigue (Edited by M. W. Brown and K. J. Miller), EGF (ESIS) Publication 3, MEP, London, 1989. – pp. 641-658.
45. *X. Chen, A. Gao, A. Abel and S. Wu*. Evaluation of low cycle fatigue under nonproportional loading// In: Fourth International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue, St. Germain en Laye, France, 31 May-3 June 1994, Vol.1., pp.283-292.
46. *S. M. Tipton and J. W. Fash*. Multiaxial fatigue life predictions of the SAE specimen using strain based approaches// In: Multiaxial Fatigue: Analysis and

- Experiments, AE-14 (Edited by G. E. Leese and D. Socie), Society of Automotive Engineers, Warrendale, USA, – 1989, – pp. 67-80.
47. *F. Allying*. A criterion for fatigue under multiaxial states of stress// In: Mechanics Research Communications, 1974. – Vol. 1, No. 4, pp.219-224.
48. *F. Ellyin and D. Kujawski*. A multiaxial fatigue criterion including mean-stress effect// In: Advances in Multiaxial Fatigue, ASTM STP 1191 (Edited by D. L. McDowell and R. Ellis), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1993, – pp.55-66.
49. *B. N. Leis*. An energy-based fatigue and creep-fatigue damage parameter// Trans. ASMEJPT 99, – 1977, – pp. 524-533.
50. *F. Ellyin*. Cyclic strain energy as a criterion for multiaxial fatigue failure// In: *Biaxial, Multiaxial Fatigue* (Edited by K. J. Miller and M. W. Brown), EGF (ESIS) Publication 3, MEP, London, – 1989, – pp.571-583.
51. *F. Ellyin and K. Golos*. Multiaxial fatigue damage criterion// Trans. ASMEJEMT 110, 1988, – pp. 63-68.
52. *H. Holdstain and T. Seeger*. Stress-strain analysis and life predictions of a notched shaft under multiaxial loading// In: Multiaxial Fatigue: Analysis and Experiments, AE-14 (Edited by G. E. Leese and D. Socie), Society of Automotive Engineers, Warrendale, USA, 1989, – pp. 81-99.
53. *D. F. Socie*. Multiaxial fatigue damage models// Trans. ASMEJEMT 109, 1987, – pp. 293-298.
54. *C. C. Chu, E A. Conie and J. Bonnen*. Multiaxial stress-strain modelling and fatigue life prediction of SAE axle shafts// In: Advances in Multiaxial Fatigue, ASTM STP 1191 (Edited by D. L. McDowell and R. Ellis), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1993, – pp. 37-54.
55. *K. C. Liu*. A method based on virtual strain-energy parameters for multiaxial fatigue life prediction// In: Advances in Multiaxial Fatigue (Edited by D. L. McDowell and R. Ellis), ASTM STP 1191, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, – 1993, – pp. 67-84.

56. *Andreykiv O.Ye., Lysak M.V., Serhienko O.M., Skalsky V.R.* Analysis of acoustic emission caused by internal crack// Eng. Fract. Mech. – 2001.– Issue 11. – 68, N7.– P. 1317-1333.
57. *Андрейків О.Є., Сергієнко О.М., Скальський В.Р.* Актуальні питання відбору і передачі сигналів акустичної емісії апід час росту внутрішніх тріщин// Відбір і обробка інформації.– 2001.– № 15 (91).– С. 51-59.
58. *Скальський В.Р.* Залежність суми амплітуд сигналів акустичної емісії від справжньої деформації кристалічних тіл// Фіз. хім. механіка матеріалів. – 2002. – № 2.– С. 91-96.
59. *Скальський В.Р.* Зв'язок між деформацією та амплітудами сигналів акустичної емісії у кристалічних тілах // Машинознавство. – 2001.– № 10.– С. 31-37.
60. *Скальський В.Р.* Методологія оцінки розвитку дефектоутворення у сплавах Д16-Т та 1201-Т методом акустичної емісії// Машинознавство. – 2001.– № 3.– С. 13-18.
61. *Відомості* про кількість об'єктів котлонагляду і підйомних споруд в Україні станом на 01.01.2003р. // Подъемные сооружения. Специальная техника. — 2003. — № 12. — С. 16.
62. *Попов В.А.* Мифы и реальность применения магнитной структуроскопии при оценке напряженно-деформированного состояния металлоконструкций подъемных сооружений / В.А. Попов, В.А. Гудошник // Подъемные сооружения. Специальная техника. — 2012. — № 12. — С. 20–21.
63. *Теория и практика* магнитной диагностики и контроля остаточного ресурса металлокон-струкций подъемных сооружений в России и Украине / В.С. Котельников, Б.Е. Попов, Г.Я. Безлюдько, Е.А. Левин, В.В. Зарудный // Проблемы производства и безопасной эксплуатации подъемных сооружений в Украине и России: сб. тр. науч.-практ. конф. — Одесса, 2002. — С. 232–238.

64. *Паспорт магнитного контроля* / В.С. Котельников, Л.И. Янов, В.А. Попов, Б.Е. Попов [и др.] // *Безопасность труда в промышленности (Россия)*. — 2004. — № 6. — С. 20–21.
65. *Патон Б.Е.* Современные направления повышения прочности и ресурса сварных конструкций// *Автомат. сварка*.- 2000.- №9-10.- С. 3-9.
66. Недосека А.Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. - Киев: Индпром. 1987.- 640 с.
67. *Патон Б.Е., Троцкий В.А.* Развитие неразрушающего контроля ответственных металлоконструкций // *Автомат. сварка*.- 2000.- №10.- С. 100-106.
68. *Лобанов Л.М., Пивторак В.А.* Развитие голографической интерферометрии для исследования напряженно-деформированных состояний и контроля качества сварных конструкций/ *Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя* – Київ: Наук. думка, 1998.- С 620-636.
69. *Rastogi P.K. Inaudi D.* Trends in optical non- destructive testing and inspection.- Oxford: Elsevier, 2000.- P.633.
70. *Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савиций В.В., Олейник Е.М.* Автоматический компьютерный анализ голографических интерферограмм при неразрушающем контроле качества материалов и элементов конструкций// *Автомат. сварка*.- 2002.- №10.- С.8-14.
71. *Попов Б.Е., Безлюдько Г.Я., Елкина Е.И., Соломаха Р.Н.* Контроль усталости металла неразрушающим магнитным (коэрцитиметрическим) методом как объективная первооснова диагностики оборудования и конструкций // *В мире неразруш. контроля*.— 2009.— **44**, № 2.— С. 26–29.
72. *Безлюдько Г.Я., Долбня В.Е., Попов Б.Е., Соломаха Р.Н.* Оперативный контроль напряженного и усталостного состояния сварных соединений неразрушающим методом по магнитной характеристике металла – коэрцитивной силе. — Там же.— 2006.— № 1.— С. 58–59.
73. *Безлюдько Г.Я., Елкина Е.И., Попов Б.Е.* Радикальное улучшение оценки текущего состояния кислородных баллонов применением метода

- коэрцитивной силы (по результатам исследований 1990–2000 гг.). — Там же. 2011. — № 3. — С. 34–35.
74. *Стрельникова Е.А., Сирота И.Г. Линник А.В., Калембет Л.А., Зорхина В.Н., Зайденварг О.Л.* Вероятностная оценка долговечности вала гидротурбины при наличии трещин//Пробл. Машиностроения. — 2017. Т.20.№1- С. 28-35.
75. *Determination of displacements using an improved digital correlation methods / Sutton M.A., Wolters W.J., Peters W.H., et al. // Image Vision Comput. — 1983. — Vol. 1, N 3. — P. 133-139.*
76. *Sjödahl M. Some Recent Advances in Electronic Speckle Photography // Opt. Las. Eng. — 1998. — Vol. 29. — P. 125-144.*
77. *Yamaguchi I. Speckle displacement and decorrelation - theory and applications // In: Trends in Optical Nondestructive Testing / Ed. by P. Rastogi and D. Inaudi. - Amsterdam: Elsevier. — 2000. — P. 151-170.*
78. *Sjödahl M. Digital Speckle Photography // In: Digital speckle pattern interferometry and related techniques / Ed. by P.K. Rastogi. — Chichester: John Wiley and Sons, 2001. — P. 289-336.*
79. *Jones R., Wykes C., Holographic and Speckle Interferometry. — Cambridge: Cambridge University Press, 1989.*
80. *Digital speckle pattern interferometry and related techniques / Ed. by P.K. Rastogi. — Chichester: John Wiley and Sons, 2001.*
81. *Speckle Metrology 2003 / Ed. by K. Kastinger, O.J. Løkberg, S. Winther // SPIE Proceedings. — SPIE: Bellingham, 2003. - Vol. 4933. — 390 p.*
82. *Розробка методів і систем формування, обробки та інтерпретації кореляційних електронних спекл-інтерферограм для контролю стану поверхні конструкційних матеріалів (НД-24/226). Заключний звіт про НДР / Керівник НДР Муравський Л.І. // № держреєстрації 0101U004856. — Львів: ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2003. — 221 с.*
83. *Schreier H.W., Braasch J.R., Sutton M.A. Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation // Opt. Eng. — 2000. — Vol. 39, N 11. — P. 2915-2921.*

84. *Chen D.J., Chiang F.P.* Computer-aided speckle interferometry using spectral amplitude fringes // *Appl. Opt.* – 1993. – Vol. 32. – P. 225-236.
85. *Максименко, О. П.* Вимірювання деформацій циліндричних зразків методом цифрової кореляції спекл-зображень [Електронний ресурс] / О. П. Максименко. – Режим доступу: <http://dspace.nbuiv.gov.ua>.
86. *Two-dimensional* digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement [Electronic resource] / B. Pan, K. Qian, H. Xie, A. Asundi. – Mode of access: <http://www.opticsinfobase.org>.
87. *Schreier, H. W.* Investigation of two and three-dimensional image correlation techniques with applications in experimental mechanics / H. W. Schreier. – University of South Carolina, 2003. – 348 p.
88. *Digital Imaging* for Bridge Deflection Measurement of a Steel Girder Composite Bridge [Electronic resource] / Erin Santini-Bell, Philip Brogan, Paul Lefebvre, Jason Peddle, Brian Brenner, Masoud Sanayei // TRB 2011 Annual Meeting. – Mode of access: / <http://amonline.trb.org>.
89. *Digital Image* Correlation. Science Daily (Apr. 18, 2011) [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.sciencedaily.com>.
90. *Методические рекомендации.* Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик сопротивления распространению трещин продольного сдвига. – Львов: ФМИ им. Г. В. Карпенко, 1987. – 22 с.
91. *Чижик А. А.* О локальных критериях разрушения при наличии трещин в условиях сложного напряженного состояния. – Энергомашиностроение, 1975. - №10. – с. 31-34.
92. *Жилюкас А. Ю.* Разрушение конструктивных элементов. – Вильнюс.: Монслое, 1988. – 109 с.
93. *Backer W. and Gloss D.* About the mode II Dugdale crack solution // *Int. J. Fract.* – 1987. – 34, №1. – P. 65 – 70.

94. *Muravsky L. I., Maksymenko O. P., and Sakharuk O. M.* Use of a joint transform correlator architecture for study of speckle displacements // *Opt. Commun.* – 2004. – 240, Issues 4–6. – P. 275–291.
95. *Increase of reliability of surface displacement field recovery by optical speckle-displacement correlation technique / L. I. Muravsky, O. M. Sakharuk, N. V. Fityo, P. V. Yezhov // Opt. Lasers Eng.* – 2007. – **45**, Issue 10. – P. 993–1000.
96. *Бургер И. А., Мавлютов Р. Р.* Сопротивление материалов: Учеб. пос. – М.: Наука, 1986. – 560 с.
97. *Influence of 65G steel microstructure on crack faces friction factor under mode II fatigue fracture / Y. L. Ivanytskyj, T. M. Lenkovskiy, Y. V. Molkov, V. V. Kulyk, Z. A. Duriagina // Archives of Mat. Sci. and Engng.* – 2016. – 82/2. – P. 49–56.
98. *Андрейкив А. Е.* Пространственные задачи теории трещин. – К.: Наук. думка, 1982.– 346 с.
99. *Іваницький Я.Л., Кунь П.С., Ленковський Т.М., Мольков Ю.В., Штаюра С.Т.* Вибір розміру бази вимірювання переміщень для визначення деформацій методом оптико-цифрової кореляції зображень// *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2017. – 53, № 6. – С. 94–98.
100. *Lindley T. C., Richards C. E., Ritchie R. O.* Mechanics and mechanisms crack growth in metals: a review// *Metallurgia and Metal Forming.* – 1976. – 43, № 9. – P.268-274.
101. *Yokobori T., Kamei A., Yokobori A.* Fatigue crack propagation under mode II loading// *Int. J. Fracture* – 1976. – 12. – P. 158-160.
102. *Liu H. W., Chen Qi, Lai D.* Shear fatigue crack growth and its analysis// *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 1993. – 29, № 3. – P. 124-132.
103. *Панасюк В. В., Бережницький Л. Т.* Определение предельных усилий при растяжении пластины с дугообразной трещиной // *Вопросы механики реального твёрдого тела.* – 1984. – Вып. 3. – С. 3 – 19.

104. *Chisholm D. B.* An elastostatic analysis of the second fracture mode. – Prog. Riots 4 and 5 submitted to the Director Office of Personal and training Federal Highway Administration, Washington, 1973.
105. *А. с. 1435996(СССР) МКИ⁴G01N3/00* Образец для определения характеристик трещиностойкости материалов при поперечном сдвиге// А. Е. Андрейкив, Я. Л. Иваницкий, В. А. Зазуляк и др. – Б. И. 1988 - №2.
106. *Иваницкий Я. Л., Андрейкив А. О., Король В. Р.* Визначення КІН для трубчатого зразка при його розтязі та крученні // Там же. – 2000 – № 6. - С. 113–114.
107. *Иваницкий Я. Л., Андрейкив А. О.* Гранично-рівноважний стан тіл з тріщинами за змішаних макромеханізмів руйнування// Фіз.-хім. механіка матеріалів. - 2003. - №4. - С. 12-18.
108. *Determination of displacements using an improved digital correlation methods / Sutton M.A., Wolters W.J., Peters W.H., et al. // Image Vision Comput. – 1983. – Vol. 1, N 3. – P. 133-139.*
109. *Yamaguchi I.* Speckle displacement and decorrelation - theory and applications // In: Trends in Optical Nondestructive Testing / Ed. by P. Rastogi and D. Inaudi. - Amsterdam: Elsevier. – 2000. – P. 151-170.
110. *Schreier H.W., Braasch J.R., Sutton M.A.* Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation // Opt. Eng. – 2000. – Vol. 39, N 11. – P. 2915-2921.
111. *Monitoring of civil engineering structures using Digital Image Correlation technique [Electronic resource] / M. Malesa, D. Szczepanek, M. Kujawińska, A. Świercz, P. Kołakowski // 14-th International Conference on Experimental Mechanics. – Mode of access: <http://smart.ippt.gov.pl>.*
112. *Chu T., Ranson W. and Sutton M.* Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics // Experimental Mechanics 1985. 25(3), p 232-244.

113. *Sutton M. A., Cheng M., Peters W. H et al.* Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis // *Image and Vision Computing* 1986. Volume 4, Issue 3, August, p 143–150.
114. *Pan B., Qian K. M., Xie H. M. and Asundi A.* Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review // *Measurement Science & Technology* 2009. 20(6), p 062001–062007.
115. *VIC-2D Image Analysis* software, Correlated Solutions, incorporated, West Columbia, SC 29169.
116. *Wang Z.* On the accuracy and speed enhancement of digital image correlation technique // *Journal of Experimental Mechanics* 2011, Vol. 26, No. 5, p 632-638.
117. *Luu L., Wang Z., Vo M., Hoang T., and Ma J.* Accuracy enhancement of digital image correlation with B-spline interpolation // *Optics Letters* 2011, Vol. 36, No. 16, p 3070-3072.
118. *Іваницький Я. Л.* Оцінка тріщиностійкості матеріалів при двовісному навантаженні / Я. Л. Іваницький, С. Т. Штаюра, Р. Б. Костів, Ю. В. Мольков // *Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій. Під заг. ред. В. В. Панасюка* – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2004. – С. 697–702.
119. *Локощенко А. М.* Эквивалентные напряжения в расчетах длительной прочности металлов // *Изв. Сарат. Ун-та. 2009. Т. 9. Сер. Математика. Механика. Информатика, вып. 4, ч. 2.* – С. 128-135. Андрейкив А. Е. *Пространственные задачи теории трещин.* – Наук. думка, 1982. – 346 с.
120. *Іваницький Я. Л., Кунь П. С., Ленковський Т. М., Мольков Ю. В., Штаюра С. Т.* Вибір розміру бази вимірювання переміщень для визначення деформацій методом оптико-цифрової кореляції зображень // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2017. – № 6. – С. 94–98.
121. *Бургер И. А., Мавлютов Р. Р.* Соппротивление материалов: Учебное пособие. – М.: Наука Гл. Ред. Физ.-мат. Лит., 1986. – 560 с.
122. *Y.L. Ivanytskyj, T.M. Lenkovskiy, Y.V. Molkov, V.V. Kulyk, Z.A. Duriagina,* Influence of 65G steel microstructure on crack faces friction factor under mode II

- fatigue fracture, Archives of Materials Science and Engineering 82/2 (2016) 49-56.
123. *Maruschak P.O., Salo U.V., Bishchak R.T., Poberezhnyi L.Y.*, Study of Main Gas Pipeline Steel Strain Hardening After Prolonged Operation, Chemical and Petroleum Engineering 50/1-2 (2014) 58-61.
124. *Панасюк В. В., Іваницький Я. Л., Максименко О. П.* Аналіз пружно-пластичного деформування матеріалу зони передруйнування// Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – № 5. – С. 67-72.
125. *Фридман Я.Б.* Механические свойства металлов. В двух частях. Часть первая. Деформация и разрушение. - М.: Машиностроение, 1974. - 472 с.
126. *Белл Дж.Ф.* Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. В 2-х частях. Часть 1. Малые деформации: Пер. с англ. / Под ред. А.П. Филина. - М.: Наука, 1984.- 600 с.
127. *Белл Дж.Ф.* Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. В 2-х частях. Часть 2. Конечные деформации: Пер. с англ. / Под ред. А.П. Филина. - М.: Наука, 1984.- 432 с.
128. *Чижик А. А.* Трещиностойкость материалов энергомашиностроения в условиях продольного сдвига// Новые методы оценки служебных свойств материалов и сварных соединений энергетического оборудования: Тр.ЦКТИ. – 1980. – Вып. 177. – С. 3-17.
129. *Спивак Л.В.* Синергетические эффекты деформационного отклика в термодинамически открытых системах металл-водород // Успехи физических наук.-2008.- т.178.-№9. – С.897-923.
130. *Скальський В.Р., Назарчук З.Т., Гірний С.І.* Вплив електролітично поглиненого водню на модуль Юнга конструктивної сталі // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. - №4.- С. 68-75.
131. *Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л.* Скорость звука и структура сталей и сплавов. – Новосибирск: Наука, 1996, - 184 с.
132. *Никитина Н.Е.*, Акустоупругость. Опыт практического применения. – Н.Новгород: ТАЛАМ, 2005. – 208 с.

133. Труэл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела.-М.:Мир, 1972, - 307 с.
134. *Stashchuk M., Dorosh M.* Evaluation of hydrogen stresses in metal and redistribution of hydrogen around crack-like defects // International journal of hydrogen energy.-2012.-37. -p.14687-14696.
135. *Мольков Ю.В.* Застосування методу цифрової кореляції до побудови діаграм деформуванням // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – № 6. – С. 136–140.
136. *Писаренко Г. С., Лебедев А. А.* Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – К.: наук. Думка, 1976. – 45 с.
137. *Лебедев А. А., Музыка Н. Р.* Несущая способность пластины с трещиной при двухосном растяжении// Пробл. Прочности. – 2001. - № 2. – С. 20-27.
138. *Визначення довговічності залізобетонних мостових балок, підсилених композитними стрічками.* /Панченко О. В., Іваницький Я. Л., Кунь П. С., Журавський О. Д. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017.– № 5. – С. 73–77.
139. *Панасюк В.В. Іваницький Я.Л., Максименко О.П.* Аналіз пружно-пластичного деформування матеріалу зони передруйнування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004.– № 5. – С. 67–72.
140. *Максименко О.П., Франкевич Л.Ф., Сахарук О.М.* Алгоритм обробки цифрових зображень для визначення деформаційних характеристик матеріалів Електроніка та інформаційні технології. – 2013. – Випуск 3. – С. 156–168.
141. *Ivanyts'kyi Ya. L., Maksymenko O. P., Zapotochnyi R. M., Mol'kov Yu. V.* Optical-digital method for the determination of strain fields in local areas of reinforced-concrete bridges/ Materials Science, Vol.51,No.2. Septembr 2015 P.261-266 [doi: 10.1007/s11003-015-9838-4].
142. *Chen Q., Defrise M., and Deconinck E.* Symmetric phase-only matched filtering of fourier-mellin transforms for image registration and recognition. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 16(12):1156-1168, December 1994.

143. *Maksymenko O. P, Sakharuk O.M* Improving the reliability of 2D DIC by using fourier-mellin transform// Digital image correlation advanced methods and applications/Ed: David Chambers// Chapter 1, P.1-36 © 2017 Nova Science Publishers, Inc. ISBN: 978-1-53611-859-9
144. *Zokai S. and Wolberg G.* Image Registration Using Log-Polar Mappings for Recovery of Large-Scale Similarity and Projective Transformations//IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, VOL. 14, NO. 10, OCTOBER 2005 P. 1422-1434 .
145. 231Д Лебедев А. А., Музыка Н. Р. Конструкции крестообразных образцов для испытаний на трещиностойкость при двухосном растяжении (обзор)//Пробл. прочности. – 1998. - №3. – С. 5-21.
146. *Медведовская Т.Ф.* Оценка прочности и ресурса рабочего колеса и несущей конструкции насосной турбины киевской ГАЭС / *Т.Ф. Медведовская, И.Е. Ржевская, А.В. Медведовский, Е.В. Ганчин* // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 8 (95). – С. 178-183.
147. *Медведовская Т.Ф.* Анализ напряженно-деформированного состояния и динамика элементов конструкций гидротурбин / *Т.Ф. Медведовская, И.Е. Ржевская* // Вібрації в техніці та технологіях. – 2012. – № 2 (66). – С. 76 – 81.
148. *Зеленская О. Н.* Анализ динамических характеристик тонкостенных элементов проточного тракта гидротурбин / *О. Н. Зеленская, Т. Ф. Медведовская, Е. В. Еселева* // Пробл. машиностроения. – 2003. – Т. 6, № 2. – С. 121–130.
149. *Серенсен С. В.* Несущая способность и расчет деталей машин на прочность: руководство и справочное пособие / *С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович.* – М. : Машиностроение, 1975. – 488 с.
150. *Бате К.* Численные методы анализа и метод конечных элементов / *К. Бате, Е. Вилсон.* – М. : Наука, 1982. – 448 с.

151. *Троценко В. Т.* Сопротивление усталости металлов и сплавов : справочник в 2-х ч. / *В. Т. Троценко, Л. А. Сосновский*. – Киев : Наук. думка, 1987. – Ч.1. – 504 с. – Ч.2. – 1302 с.