

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОБУДУВАННЯ ІМ. А.М. ПІДГОРНОГО
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Метельов Володимир Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 539.3

(індекс)

ДИСЕРТАЦІЯ

Короткочасна ортотропна повзучість при плоскому напруженому стані

(назва дисертації)

Спеціальність 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

(шифр і назва спеціальності)

Технічні науки

(галузь знань)

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

 В.О. Метельов
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Бреславський Дмитро Васильович, доктор технічних наук, професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Харків – 2018

АНОТАЦІЯ

Метельов В.О. Короткочасна ортотропна повзучість при плоскому напруженому стані. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла. – Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, Харків, 2018.

Дисертаційна робота присвячена створенню методу чисельного розрахунку та експериментальному дослідженню короткочасної ортотропної (трансверсально-ізотропної) повзучості в тонких листах при плоскому напруженому стані.

Деформування й приховане руйнування матеріалів та конструкцій може істотно обмежувати ресурс у різних галузях промисловості. Для поширеного випадку повзучості, що супроводжується накопиченням прихованих пошкоджень, є важливим оцінювання поточного стану напружено-деформованого стану конструктивного елементу та на його основі формулювання висновків щодо довговічності. Багато матеріалів, включно з конструкційними сталями, виявляє властивості повзучості й при кімнатних температурах. При цьому її перебіг є короткочасним, й рівень набутих деформацій є співмірним з отриманим миттєво. Для багатьох листових матеріалів притаманна анізотропія властивостей повзучості, найбільш часто має місце трансверсальна ізотропія чи ортотропія. Таким чином, отримання закономірностей перебігу процесів тривалого анізотропного деформування листових матеріалів та розробка методу його розрахункового аналізу при плоскому напруженому стані є важливим та актуальним завданням механіки деформівного твердого тіла, розв'язання якого надає можливості аналізу довговічності тонкостінних елементів.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в наступному: запропоновано нове рівняння стану ортотропної повзучості при періодичному

навантаженні для матеріалів, що виявляють суттєву першу ділянку неусталеної повзучості; розроблено нову форму кінетичного рівняння для випадку періодичного навантаження з тензорним параметром пошкоджуваності, запропонованим О.К. Морачковським; отримані нові експериментальні дані та закономірності короткочасної ортотропної повзучості одновісних зразків та пластин з отворами зі сталі 3 при кімнатній температурі та статичному й періодичному змінюванні навантаження; на випадок деформування з початковими деформаціями пластичності та для кінетичного рівняння з тензорним параметром пошкоджуваності розвинуто розрахунковий метод та програмний комплекс для визначення напружено-деформованого стану та пошкоджуваності у двовимірних задачах теорії повзучості; шляхом порівняння чисельних та експериментальних результатів проведено верифікацію модернізованого програмного забезпечення; встановлено нові закономірності деформування з урахуванням деформацій короткочасної повзучості при прокатці сталевих листів.

У першому розділі дисертаційної роботи надано результати огляду наукової літератури за напрямком досліджень фізично нелінійних процесів – пластичності, повзучості та пов'язаного з нею прихованого руйнування внаслідок накопичення пошкоджень. Проаналізовано підходи до опису короткочасної та анізотропної повзучості. Розглянуто процеси деформування, в яких суттєву роль відіграють механізми пластичності та повзучості, в тому числі в задачах механіки формоутворення. На основі аналізу публікацій з континуальної механіки пошкоджуваності, виконаних у напрямку застосування тензорних моделей для параметру пошкоджуваності, зроблено висновки щодо типу й параметрів моделі, яка є придатною для моделювання анізотропних процесів прихованого руйнування. Для випадку періодичного, чи циклічного, навантаження розглянуто методи отримання спрощених та усереднених рівнянь стану, в тому числі й таких, що отримуються шляхом застосування методів багатьох масштабів. За літературним оглядом зроблено висновок щодо недостатньої розробленості методів оцінювання повзучості, яка характеризується анізотропним характером

протікання, та кількості проведених відповідних експериментальних досліджень при простому та складному напруженому стані. Наголошується, що потребують подальшого розвитку методи розрахунку повзучості та пошкоджуваності при періодичному навантаженні.

Змістом другого розділу є розроблення рівнянь стану, які застосовуються до опису ортотропної повзучості матеріалів, що супроводжується накопиченням прихованої пошкоджуваності. Розглянуто варіант рівнянь, що описують ділянку неусталеної повзучості. Отримано узагальнення закону зміцнення (закону первісної повзучості) для ортотропії при повзучості матеріалів. До опису пошкоджуваності, яка супроводжує ортотропну повзучість, залучено кінетичне рівняння для тензору пошкоджуваності другого рангу. Отримано рівняння стану повзучості та пов'язаної з нею пошкоджуваності при плоскому напруженому стані. Розглянуто випадок періодичного навантаження при простому та складному напруженому стані. Для отримання рівнянь для швидкості деформації повзучості та міри пошкоджуваності застосовано асимптотичне розкладання по ступеням малого параметру в двох масштабах часу (повільному і швидкому) та метод усереднення на періоді. За допомогою запропонованих рівнянь стану та значень констант, що отримані за обробкою експериментальних даних з короткочасної повзучості сталі 3 при кімнатній температурі, проведено розрахункове визначення залежності деформації повзучості від часу при статичному та періодичному навантаженні для трьох напрямків відносно прокатки сталевих листів. Зроблено висновок, що запропоновані рівняння повзучості описують експериментальні криві з задовільною якістю. Встановлено межу застосування усереднених рівнянь.

У третьому розділі надано математичну постановку задачі повзучості та пошкоджуваності при статичному та періодичному навантаженні. Розглянуто випадок плоского напруженого стану. Для розв'язання задачі застосовано дві системи рівнянь, отримані при використанні методу двох масштабів часу та усереднення на періоді для розв'язання загальної задачі повзучості тіл, які піддані спільній дії статичного та періодичного навантаження. Поставлену задачу

розв'язано методом скінченних елементів у поєднанні з різницевими методами інтегрування за часом. До чисельного моделювання залучено розроблений в НТУ «ХПІ» програмний комплекс *FEM CREEP*, модернізований у роботі для розв'язання задач повзучості та пошкоджуваності елементів, виготовлених з матеріалів з ортотропними властивостями повзучості та при початковому навантаженні, яке призводить до пластичних деформацій. Працездатність модернізованого комплексу доведено шляхом порівняння отриманих за його допомогою чисельних результатів з розв'язками тестових задач. Розглянуто задачі пружно-пластичного деформування пластини при розтязі; розтягу прямокутної пластини з центральним отвором, виготовленої з титанового сплаву, який має ортотропні властивості повзучості та пошкоджуваності; повзучості пластин зі сталі 3, що їх вирізано у трьох різних напрямках зі сталевого листу.

В четвертому розділі надано результати проведених в роботі експериментальних досліджень. Досліджувалось деформування при кімнатній температурі 293 К плоских зразків зі сталі 3 при статичному й періодичному навантаженні розтягом. Шляхом випробувань на установці Heckert FP-100/1 визначено діаграму деформування та встановлено ізотропію властивостей пружності та пластичності сталі, що розглядається. За допомогою випробувальної машини АІМА-5-2 виконано експерименти на повзучість зразків при трьох рівнях напружень. Дані вимірів зберігалися за допомогою відеофіксації. Для кожного напруження та напрямку прокатки досліджувалось по три зразки. Для встановлення достовірності результатів, що отримуються при застосуванні запропонованих рівнянь стану при розрахунках у програмному комплексі *FEM CREEP*, виконано експериментальне дослідження деформування при осьовому розтязі пластин з п'ятьма отворами зі сталі 3. Проведено випробування при статичному та періодичному навантаженнях. На пластини наносилась мірна сітка, після експерименту пластини сканувались, зображення оброблялись за допомогою розробленої програми на мові C++. За даними випробувань отримано криві повзучості сталі 3 та залежності осьових переміщень від часу у пластинах з отворами при статичному та періодичному навантаженні.

П'ятий розділ містить опис отриманих чисельних даних при розрахунках короткочасної повзучості пластин при навантаженні у їхній площині. Розв'язано задачу про періодичний осьовий розтяг до руйнування пластини з титанового сплаву ВТ1-0 при температурі 773 К. Отримано розподіли міри та компонентів тензору пошкоджуваності для різних моментів часу деформування. Проведено чисельне скінченноелементне моделювання повзучості пластин з п'ятьма отворами при статичному й періодичному навантаженнях, яке було задано у виконаних в роботі експериментах. За всіма результатами порівнянь чисельних та експериментальних даних зроблено висновок щодо задовільного, на рівні досягнутого у теорії повзучості ступеню відповідності розрахункових та експериментальних даних. Приведено результати чисельного моделювання короткочасної повзучості прямокутних листів зі сталі 3 після прокатки через одну та дві кліті з прокатними валками. До розрахунків залучено розроблені та експериментально перевірені в роботі рівняння стану з визначеними константами та програмний комплекс *FEM CREEP*. Як початкові умови, до моделювання залучено залишковий напружений стан листів після їхнього проходження через кліті. Шляхом аналізу низки прорахованих варіантів визначено максимально можливі зусилля розтягу, які не викликать деформацій повзучості. Встановлено, що для схеми з двома клітями залишковий напружений стан є більш сприятливий для реалізації максимально потрібних зусиль витяжки.

Модернізований при виконанні дисертаційної роботи програмний комплекс для розрахункового аналізу повзучості та пошкоджуваності при плоскому напруженому стані може бути застосованим при чисельному моделюванні та проектуванні в енергетичному, авіаційно-космічному, хімічному машинобудуванні та у металургійній промисловості. Робота виконана у відповідності до держбюджетних тем «Розробка методів, алгоритмів та програм для оцінювання динаміки, міцності і точності управління ракетної техніки» (Д.Р. № 0113U000448, 2013-2014 р.р.) та «Розробка методів та алгоритмів розрахунку впливу теплових полів на працездатність приладів та елементів ракетно-космічної техніки» (Д.Р. № 0117U0004891, 2017 р.). Рекомендації щодо

вибору потрібних режимів при прокатці листів труб зі сталі 3 використано в Публічному акціонерному товаристві «Дніпропетровський металургійний завод ім. Комінтерну» (м. Дніпро).

Ключові слова: *короткочасна повзучість, ортотропні властивості, пошкоджувальність, рівняння стану, плоский напружений стан, метод скінченних елементів, експериментальні дослідження.*

Список публікацій здобувача:

1. Breslavskii D.V., Metelev V.A., Morachkovskii O.K. Anisotropic creep and damage in structural elements under cyclic loading. *Strength of Materials*. 2015. Vol. 47, № 2. P. 235-241.

2. Breslavsky D.V., Mitielov V.O. Consideration the influence of residual stresses and creep strains on rolling the steel sheets. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин*. Харків, 2016. № 46 (1218). С. 77-80.

3. Бреславський Д.В., Конкін В.М., Метельов В.О. Пластичність та повзучість сталі 3 при кімнатній температурі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин*. Харків, 2015. № 57 (1166). С. 14-19.

4. Метельов В.О. Пружнопластичне деформування при виготовленні трубчатих заготовок. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин*. Харків, 2015. № 55 (1164). С. 50-53.

5. Бреславский Д.В., Метелев В.А., Морачковский О.К., Татарина О.А. Расчеты динамической ползучести и повреждаемости элементов конструкций из анизотропных материалов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин*. Харків, 2013. № 58 (1031). С. 23-31.

6. А. с. № 64660. Україна. Комп'ютерна програма "Розрахунки повзучості методом скінченних елементів" ("FEMCreep v 1.3") / Д.В. Бреславський,

Ю.М. Коритко, В.О. Метельов. № 65155 ; заявл. 02.02.16 ; опубл. 29.04.16, Бюл. № 40. С. 492

7. Breslavsky D., Mietielov V., Morachkovsky O., Tatarinova O., Pashchenko S. Asymptotic solution of anisotropic cyclic creep problem. *Nonlinear dynamics - 2016: Proceedings of 5th International Conference, Kharkov, 27-30 September 2016. Kharkov, 2016. P. 276.*

8. Бреславський Д.В., Метельов В.О. Рівняння стану трансверсально-ізотропної повзучості сталі 3. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXIV міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 18-20 травня 2016 р.: у 4 ч. Харків: НТУ «ХП», 2016. Ч. 1. С. 51.*

9. Breslavsky D.V., Mietielov V.O., Morachkovsky O.K., Pashchenko S.O., Tatarinova O.A. Asymptotic methods and finite element method in cyclic creep-damage problems. *Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики. Зб. наук. праць, Львів, 24-25 вересня 2015 р. Львів: Львівський національний університет ім. Івана Франка, 2015. С. 19-20.*

10. Бреславський Д.В., Метельов В.О., Конкін В.М., Макогон О.А. Деформування сталевих пластин при високих напруженнях. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези XXIII міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 20-22 травня 2015 р.: у 4 ч. Харків: НТУ «ХП», 2015. Ч. 1. С. 39.*

11. Бреславский Д.В., Метелев В.А., Морачковский О.К. Анизотропия ползучести и повреждаемости в элементах конструкций при циклическом нагружении. *Проблемы динамики и прочности в турбомашиностроении: тезисы пятой междунар. науч.-техн. конф., Киев, 27-31 мая 2014 г. Киев: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2014. С. 29-30.*

12. Метельов В.О. Короткочасна повзучість та руйнування тонкостінних елементів літальних апаратів. *До 100-річчя з дня народження академіка В.Г. Сергєєва та 50-річчя створення в ХП спеціальності «Динаміка польоту та управління»: матеріали доповідей наук.-техн. конф. «Сергєєвські читання», Харків, 11-12 вересня 2014 р. Харків: НТУ «ХП», 2014. С. 48-49.*

13. Бреславський Д.В., Конкін В.М., Метельов В.О. Деформування та руйнування сталевих матеріалів при дії напружень, близьких до границі міцності. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези XXII міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 21-23 травня 2014 р.: у 4 ч.* Харків: НТУ «ХПІ», 2014. Ч. 1. С. 40.

14. Breslavsky D., Korytko Yu., Mietielov V., Morachkovsky O., Tatarinova O. Numerical calculations of creep damage at cyclic loading by use of tensor damage parameter model. *Nonlinear dynamics - 2013: proceedings of the Fourth International Conference, Sevastopol, 19-22 June 2013.* Kharkov: «Tochka», 2013. P. 379-384.

15. Бреславский Д.В., Метелев В.А., Морачковский О.К., Татарина О.А. Расчеты динамической ползучести и повреждаемости элементов конструкций из анизотропных материалов. *Математическое моделирование в естественных науках: тезисы докладов XXI Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов, Пермь, 2-5 октября 2013 г.* Пермь: ПНИПУ, 2013. С. 28-29.

16. Бреславський Д.В., Метельов В.О., Татарінова О.А. Анізотропія повзучості та пошкоджуваності в пластинах з отвором. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXI міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 29-31 травня 2013 р.: у 4 ч.* Харків: НТУ «ХПІ», 2013. Ч. 1. С. 34.

17. Метелев В.А., Наумов И.В. Моделирование упруго-пластического деформирования тонкостенных конструкций. *Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXV междунар. науч. конф.: в 10 т.* Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. Т. 3. Секция 5. С. 74-76.

18. Бреславський Д.В., Метельов В.О. Розрахунки напружено-деформованого стану коробчастої конструкції. *До 50-річчя першого пілотованого польоту людини у космос: матеріали X наук.-практ. конф. студентів та аспірантів інженерно-фізичного факультету НТУ «ХПІ», Харків, 12 квітня 2011 р.* Харків: НТУ «ХПІ», 2011. С. 80-81.

ABSTRACT

Mietielov V.O. Short-term orthotropic creep at plane stress state. Qualification scientific work as the manuscript.

The dissertation for a degree of Candidate of Technical Sciences (Philosophy Doctor) on specialty 01.02.04 – Mechanics of Deformable Solids. – Podgorny institute for mechanical engineering problems NAS of Ukraine, Kharkiv, 2018.

Dissertation work is devoted to development of a method of numerical calculation and experimental study of short-term orthotropic (transversally isotropic) creep in thin sheets at a plane stress state.

Deformation and hidden damage of materials and structures can significantly limit a resource in various industrial applications. The estimation of current stress-strain state of a structural element for a widespread case of creep which is followed by accumulation of the hidden damage and on its basis to make conclusions about durability can be considered as important task. Many materials, including structural steels, show creep properties even at room temperatures. At the same time their change is short-term and the level of the acquired strains is comparable with initial ones. The anisotropy of creep properties is inherent for many sheet materials, the transversal isotropy, or orthotropy, most often takes place. Thus, obtaining the regularities of a processes of anisotropic deformation behaviour of sheet materials and development of the method of its calculation analysis at a plane stress state is an important and relevant problem of solid mechanics, which solution gives possibilities of the durability analysis of thin-walled elements.

The scientific novelty of dissertation work consists in the following: the new state equation of orthotropic creep under periodic loading is offered for the materials showing the essential first stage of an unsteady creep; the new form of the kinetic equation is developed for a case of periodic loading with the tensor damage parameter offered by O.K. Morachkovsky; new experimental data and regularities of short-term orthotropic creep are obtained for uniaxial specimens and plates with holes made from

steel 3 at room temperature and both static and periodic loading varying; in case of deformation with initial plastic strains and for the kinetic equation with the tensor damage parameter the calculation method and program complex for determining the stress-strain state and damage in two-dimensional problems of creep theory were developed. By comparison of numerical and experimental results the verification of the modified software were done; new regularities of deformation taking into account short-term creep strains during the rolling of steel sheets are determined.

In the first chapter of dissertation work the results of the scientific literature review on the direction of research of physically non-linear processes, such as plasticity, creep and the related hidden damage accumulation are presented. Approaches to the description of short-term and anisotropic creep are analysed. Deformation processes in which an essential role takes place mechanisms of plasticity and creep are considered, including in problems of shaping mechanics. On the basis of the analysis of publications on continuum damage mechanics, which were completed in the field of tensor models application for damage parameter, the conclusions concerning the type and parameters of model, which is suitable for anisotropic processes of the hidden damage modeling, were made. For the case of periodic, or cyclic, loading the methods of deriving the simplified and averaged state equations including those obtained by applying multi-scale methods are considered. According to the literature review the conclusions about insufficient readiness of the assessment methods for creep which is characterized by anisotropic flow character, and the number of relevant experimental studies in a uniaxial and complex stress state were made. It is stressed that computational methods for the analysis of creep-damage processes under periodic loading demand further development.

The content of the second chapter is the development of state equations which applied to the description of orthotropic creep of materials which is followed by accumulation of the hidden damage. The variant of the equations describing the stage of primary unsteady creep is considered. A generalization of the hardening law (the law of primary creep) is obtained for material creep orthotropy. The kinetic damage equation for tensor of the second rank is used for the description of hidden damage which

accompanies orthotropy creep. Creep-damage state equations at a plane stress state are obtained. The case of a periodic loading is considered at uniaxial and complex stress state. Asymptotic expansions on degrees of small parameter in two time scales (slow and fast) and an averaging method on the period are applied for deriving the equations for the creep strain rate and scalar damage measure. With the help of derived state equations as well as the values of constants, which were obtained by creep experiments on steel 3 at room temperature, the laws of creep strain versus time are determined under static and periodic loading for three directions concerning to the steel sheet rolling. The conclusion about satisfactory quality of proposed creep equations for the description the experimental curves was made. The limits of the averaged equations application were established.

The third chapter contains the mathematical problem statement of the creep-damage problem under static and periodic loading. The case of the plane stress state is considered. For the solution of the problem two sets of equations obtained using a method of two time scales and averaging on the period are applied for solution of the general creep problem of solids that subjected to the combined action of static and periodic loading. The stated problem was solved using finite element method in combination with the finite difference methods of time integration. The developed in NTU «KhPI» program complex *FEM CREEP* modernized in work for creep-damage problems solution of the elements made of materials with orthotropic creep properties and under an initial loading which leads to plastic strains was used for numerical simulation. Operability of the modernized complex is proved by comparison of the numerical results have been obtained by its help with solution of test tasks. Problems of elastic-plastic deformation of a plate at tension; tension of the rectangular plate with the central hole made from titanium alloy which has orthotropic creep-damage properties; creep of plates made from steel 3 which are cut out in three different directions from a steel sheet are considered.

The fourth chapter presents the results of the experimental investigations carried out in the work. Deformation at room temperature of 293 K of plane specimens made from steel 3 under static and periodic tension was investigated. By tests on the

Heckert FP-100/1 testing unit the stress-strain diagram was obtained and isotropy of an elasticity and plasticity properties of considered steel was confirmed. By use of testing unit AIMA-5-2 the experiments on creep of specimens under three stress levels were done. Data measurements were stored using video fixing. For each stress value and the direction of rolling three specimens were tested. In order to verify the results obtained by use of the proposed state equations in the calculations using program complex *FEM CREEP* an experimental study of deformation in the case of axial tension of plates with five holes made of steel 3 was made. Tests under static and periodic loading were carried out. The measuring grid was applied on plates, after the experiment the plates were scanned, the images were processed using the program developed in C++. By use the test data the creep curves for steel 3 as well as the dependence of axial displacements on time in plates with holes under static and periodic loading were obtained.

The fifth chapter contains the description of the obtained numerical data of short-term creep of plates under loading in their plane. The problem of periodic axial tension up to fracture of a plate made from the titanium alloy VT1-0 at a temperature of 773 K was solved. The distributions of measure and components of a damage tensor for various time steps of deformation were obtained. Numerical finite-element creep modeling of plates with five holes under static and periodic loading, which was applied in the performed experiments, was carried out. Based on all the results of comparisons of numerical and experimental data, there was concluded that the degree of agreement between the calculated and experimental data can be considered as satisfactory due to existing in the creep theory level. The results of numerical modeling of short-term creep of rectangular sheets made of steel 3 after rolling through 1 and 2 stands with rolling rolls are presented. The calculated and experimentally verified state equations with determined constants and the program complex *FEM CREEP* are involved for the calculations. The residual stress state of the sheets after they have passing through the stands was used in the simulation as initial conditions. By analysing a number of calculated variants, the maximum possible tensile forces that will not cause creep strains

are determined. It is established that for the scheme with two stands a residual stress state is more favorable for realization of the maximum necessary drawing forces.

The modernized during performing dissertation work program complex for calculation analysis of creep and damage at a plane stress state can be applied in numerical modeling and design in energy, aerospace, chemical engineering and in metallurgical industry. The work was performed in accordance with the state budget themes «Development of methods, algorithms and software for estimating dynamics, strength and precision control of space missiles» (S.R. № 0113U000448, 2013-2014 years) and «Development of the calculation methods and algorithms of a thermal fields influence on operability of the devices and the elements of rocket and space equipment» (S.R. № 0117U0004891, 2017 year). Recommendations about choice of the necessary modes when rolling sheets of pipes made of steel 3 are used in Joint Stock Company «Dnipropetrovsk steel works Comintern» (с. Dnipro).

Keywords: *short-term creep, orthotropic properties, damage, state equation, plane stress state, finite element method, experimental studies.*

References:

1. Breslavskii D.V., Metelev V.A., Morachkovskii O.K. Anisotropic creep and damage in structural elements under cyclic loading. *Strength of Materials*. 2015. Vol. 47, № 2. P. 235-241.
2. Breslavsky D.V., Mitielov V.O. Consideration the influence of residual stresses and creep strains on rolling the steel sheets. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин*. Харків, 2016. № 46 (1218). С. 77-80.
3. Бреславський Д.В., Конкін В.М., Метельов В.О. Пластичність та повзучість сталі 3 при кімнатній температурі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин*. Харків, 2015. № 57 (1166). С. 14-19.
4. Метельов В.О. Пружнопластичне деформування при виготовленні трубчатих заготовок. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*.

Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин. Харків, 2015. № 55 (1164). С. 50-53.

5. Бреславский Д.В., Метелев В.А., Морачковский О.К., Татарина О.А. Расчеты динамической ползучести и повреждаемости элементов конструкций из анизотропных материалов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ».* *Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин.* Харків, 2013. № 58 (1031). С. 23-31.

6. А. с. № 64660. Україна. Комп'ютерна програма "Розрахунки повзучості методом скінченних елементів" ("FEMCreep v 1.3") / Д.В. Бреславський, Ю.М. Коритко, В.О. Метельов. № 65155 ; заявл. 02.02.16 ; опубл. 29.04.16, Бюл. № 40. С. 492

7. Breslavsky D., Mitielov V., Morachkovsky O., Tatarinova O., Pashchenko S. Asymptotic solution of anisotropic cyclic creep problem. *Nonlinear dynamics - 2016: Proceedings of 5th International Conference, Kharkov, 27-30 September 2016.* Kharkov, 2016. P. 276.

8. Бреславський Д.В., Метельов В.О. Рівняння стану трансверсально-ізотропної повзучості сталі 3. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXIV міжнар. наук.-практ. конф.,* Харків, 18-20 травня 2016 р.: у 4 ч. Харків: НТУ «ХПІ», 2016. Ч. 1. С. 51.

9. Breslavsky D.V., Mitielov V.O., Morachkovsky O.K., Pashchenko S.O., Tatarinova O.A. Asymptotic methods and finite element method in cyclic creep-damage problems. *Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики.* Зб. наук. праць, Львів, 24-25 вересня 2015 р. Львів: Львівський національний університет ім. Івана Франка, 2015. С. 19-20.

10. Бреславський Д.В., Метельов В.О., Конкін В.М., Макогон О.А. Деформування сталевих пластин при високих напруженнях. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези XXIII міжнар. наук.-практ. конф.,* Харків, 20-22 травня 2015 р.: у 4 ч. Харків: НТУ «ХПІ», 2015. Ч. 1. С. 39.

11. Бреславский Д.В., Метелев В.А., Морачковский О.К. Анизотропия ползучести и повреждаемости в элементах конструкций при циклическом нагружении. *Проблемы динамики и прочности в турбомашиностроении*: тезисы пятой междунар. науч.-техн. конф., Киев, 27-31 мая 2014 г. Киев: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2014. С. 29-30.

12. Метельов В.О. Короткочасна повзучість та руйнування тонкостінних елементів літальних апаратів. *До 100-річчя з дня народження академіка В.Г. Сергєєва та 50-річчя створення в ХПІ спеціальності «Динаміка польоту та управління»*: матеріали доповідей наук.-техн. конф. «Сергєєвські читання», Харків, 11-12 вересня 2014 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2014. С. 48-49.

13. Бреславський Д.В., Конкін В.М., Метельов В.О. Деформування та руйнування сталевих матеріалів при дії напружень, близьких до границі міцності. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези ХХІІ міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 21-23 травня 2014 р.: у 4 ч. Харків: НТУ «ХПІ», 2014. Ч. 1. С. 40.

14. Breslavsky D., Korytko Yu., Mietielov V., Morachkovsky O., Tatarinova O. Numerical calculations of creep damage at cyclic loading by use of tensor damage parameter model. *Nonlinear dynamics - 2013*: proceedings of the Fourth International Conference, Sevastopol, 19-22 June 2013. Kharkov: «Tochka», 2013. P. 379-384.

15. Бреславский Д.В., Метелев В.А., Морачковский О.К., Татарина О.А. Расчеты динамической ползучести и повреждаемости элементов конструкций из анизотропных материалов. *Математическое моделирование в естественных науках*: тезисы докладов ХХІ Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов, Пермь, 2-5 октября 2013 г. Пермь: ПНИПУ, 2013. С. 28-29.

16. Бреславський Д.В., Метельов В.О., Татарінова О.А. Анізотропія повзучості та пошкоджуваності в пластинах з отвором. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доповідей ХХІ міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 29-31 травня 2013 р.: у 4 ч. Харків: НТУ «ХПІ», 2013. Ч. 1. С. 34.

17. Метелев В.А., Наумов И.В. Моделирование упруго-пластического деформирования тонкостенных конструкций. *Математические методы в технике и технологиях*: сб. трудов XXV междунар. науч. конф.: в 10 т. Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. Т. 3. Секция 5. С. 74-76.

18. Бреславський Д.В., Метельов В.О. Розрахунки напружено-деформованого стану коробчастої конструкції. *До 50-річчя першого пілотованого польоту людини у космос*: матеріали X наук.-практ. конф. студентів та аспірантів інженерно-фізичного факультету НТУ «ХПІ», Харків, 12 квітня 2011 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2011. С. 80-81.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ	11
1.1 Короткочасна повзучість матеріалів	11
1.2 Завдання виготовлення листових заготовок як задачі механіки	13
1.3 Рівняння стану, що враховують повзучість та пошкоджуваність матеріалу	19
1.4 Розрахунки на повзучість при складному напруженому стані та метод скінченних елементів	28
1.5 Постановка нових задач досліджень	30
1.6 Висновки за розділом	31
РОЗДІЛ 2 РІВНЯННЯ СТАНУ ДЛЯ ВИПАДКУ ОРТОТРОПНОЇ ПОВЗУЧОСТІ ТА ПОШКОДЖУВАНОСТІ МАТЕРІАЛІВ	33
2.1 Рівняння стану та пошкоджуваності матеріалів з властивостями ортотропії повзучості	33
2.2 Повзучість та пошкоджуваність при циклічному навантаженні	45
2.3 Висновки за розділом	51
РОЗДІЛ 3 МЕТОД РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПЛАСТИН З УРАХУВАННЯМ ДЕФОРМАЦІЙ ПЛАСТИЧНОСТІ ТА ПОВЗУЧОСТІ	52
3.1 Математична постановка задачі	52
3.2 Розв'язання задачі методом скінченних елементів	55
3.2.1 Скінченноелементний алгоритм розв'язання двовимірної задачі теорії повзучості	55
3.2.2 Метод розрахунку НДС з урахуванням початкових пластичних деформацій	58
3.3 Опис програмного засобу	61
3.4 Дослідження з достовірності розрахункового методу	63

3.4.1 Скінченноелементне моделювання пружно-пластичного деформування зразку	63
3.4.2 Повзучість пластини з центральним отвором	64
3.4.3 Перевірка достовірності скінченноелементних розв'язків при застосуванні рівнянь стану ортотропної повзучості	67
3.5 Висновки за розділом	73
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМУВАННЯ ПРИ ПРОСТОМУ ТА ДВОВИМІРНОМУ НАПРУЖЕНОМУ СТАНІ	75
4.1 Методика та результати експериментів на плоских зразках	75
4.2 Дослідження деформування пластин з отворами	85
4.3 Програма для обробки експериментальних даних	97
4.4 Висновки за розділом	100
РОЗДІЛ 5 РОЗРАХУНКИ КОРОТКОЧАСНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ПЛАСТИН У ЇХНІЙ ПЛОЩИНІ	102
5.1 Повзучість та приховане руйнування титанових пластин	102
5.2 Повзучість пластин з отворами при початковому пружно-пластичному деформуванні	105
5.2.1 Порівняння чисельних та експериментальних результатів для статично навантаженої пластини з 5ма отворами	105
5.3 Врахування деформацій короткочасної повзучості при моделюванні листової прокатки	119
5.4 Висновки за розділом	132
ВИСНОВКИ	134
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	137
ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	158
ДОДАТОК Б. АКТ ПРО ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА ПАТ «ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ МЕТАЛУРГІЙНИЙ ЗАВОД ІМ. КОМІНТЕРНУ»	161
ДОДАТОК В. АКТ ПРО ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ	

ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ ПРИ ВИКОНАННІ ДЕРЖБЮДЖЕТНИХ НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ ТЕМ В НТУ «ХПІ».....	162
--	-----

ВСТУП

Деформування й приховане руйнування матеріалів та складних об'єктів, якими є елементи конструкцій, є важливими чинниками, кількісні та якісні характеристики яких можуть істотно обмежувати ресурс у авіаційно-космічному, енергетичному, хімічному машинобудуванні, металургійній промисловості тощо. У багатьох випадках властивості матеріалу є такими, що обумовлюють не лише короточасний, миттєвий відгук на прикладене навантаження, але й довготривалу реакцію на нього. У цьому випадку мова йде про повзучість матеріалів, з якою пов'язане накопичення прихованих пошкоджень. Отримання знань щодо закономірностей плинності процесів повзучості та накопичення прихованих пошкоджень надає можливість оцінювання поточного стану напружено-деформованого стану конструкції, та на його основі робити висновки щодо її довговічності.

Актуальність теми. Значний обсяг металевих матеріалів, включно з конструкційними сталями, виявляє властивості повзучості й при кімнатних температурах. Часто її перебіг, особливо у технологічних процесах виробництва металевих листових заготовок, є обмеженим у часі та складає лічені хвилини. При цьому рівень набутих деформацій є співмірним з отриманим миттєво. Таке деформування отримало назву короточасної повзучості. При аналізі фізико-механічних властивостей листових матеріалів, наприклад отриманих прокаткою, часто виявляють їхню істотну анізотропію у формі трансверсальної ізотропії чи ортотропії. Це саме стосується повзучості та пов'язаної з нею пошкоджуваності, які можуть йти з різними швидкостями у різних напрямках матеріалу навіть при початковій ізотропії інших властивостей. Отримання закономірностей процесів тривалого анізотропного деформування листових матеріалів та розробка методу його розрахункового аналізу при плоскому напруженому стані є важливим та актуальним завданням механіки деформівного твердого тіла, розв'язання якого надає можливості аналізу довговічності тонкостінних елементів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі комп'ютерного моделювання процесів та систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») при виконанні держбюджетних тем МОН України «Розробка методів, алгоритмів та програм для оцінювання динаміки, міцності і точності управління ракетної техніки» (Д.Р. № 0113U000448, 2013-2014 рр.) та «Розробка методів та алгоритмів розрахунку впливу теплових полів на працездатність приладів та елементів ракетно-космічної техніки» (Д.Р. № 0117U0004891, 2017 р.), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження.

Метою роботи є створення методу чисельного розрахунку та експериментальне дослідження короткочасної ортотропної (трансверсально-ізотропної) повзучості в тонких листах при плоскому напруженому стані.

Для досягнення сформульованої мети в роботі поставлені такі задачі:

- розробка рівнянь стану ортотропної повзучості з урахуванням пошкоджуваності при плоскому напруженому стані та навантаженні, що змінюється стало та періодично;
- створення методу розв'язку та модернізація програмного забезпечення для розрахункового оцінювання деформування та рівня пошкоджуваності при повзучості за умов початкового пружно-пластичного напружено-деформованого стану та періодичного змінювання навантажень;
- експериментальне дослідження короткочасної повзучості сталі 3 при кімнатній температурі при простому і двовимірному напруженому стані та статичній й періодичній дії навантаження;
- встановлення закономірностей впливу ортотропії властивостей повзучості та періодичного навантаження на процес деформування;
- оцінювання впливу повзучості матеріалу на формоутворення листових матеріалів в технологічному процесі прокатки.

Об'єкт дослідження – ортотропна повзучість при плоскому напруженому стані та спільній дії статичного та періодичного навантаження.

Предмет дослідження – тонкостінні елементи при плоскому напруженому стані та спільній дії статичного та періодичного навантаження.

Методи дослідження. Роботу побудовано з використанням методів механіки деформівного твердого тіла, насамперед теорії повзучості та континуальної механіки пошкоджуваності. Для отримання виду рівнянь стану при періодичному змінюванні навантажень застосовано асимптотичні методи. Початково-крайова задача повзучості розв'язується методом скінченних елементів, що застосовується на кожному кроці інтегрування за часом методом Ейлера чи прогнозу-корекції. Для отримання розв'язку задачі теорії пластичності метод скінченних елементів застосовано разом з інкрементальним методом «приріст-початкова деформація». Отримані при цьому системи лінійних алгебраїчних рівнянь розв'язуються методом Холецкого. Для отримання кривих повзучості застосовано експериментальні методи – розтягу зразків на машині для досліджень АІМА-5-2, вимірювання переміщень за допомогою екстензометрів, мірних сіток та відеофіксації.

Наукова новизна одержаних результатів:

- запропоновано нове рівняння стану ортотропної повзучості при періодичному навантаженні для матеріалів, що виявляють суттєву першу ділянку неусталеної повзучості;
- розроблено нову форму кінетичного рівняння для випадку періодичного навантаження з тензорним параметром пошкоджуваності, запропонованим О.К. Морачковським;
- отримані нові експериментальні дані та закономірності короткочасної ортотропної повзучості одновісних зразків та пластин з отворами зі сталі 3 при кімнатній температурі та статичному й періодичному змінюванні навантаження;
- на випадок деформування з початковими деформаціями пластичності та для кінетичного рівняння з тензорним параметром пошкоджуваності розвинуто розрахунковий метод та програмний комплекс для визначення напружено-деформованого стану та пошкоджуваності у двовимірних задачах теорії

повзучості. Шляхом порівняння чисельних та експериментальних результатів проведено верифікацію модернізованого програмного забезпечення;

- встановлено нові закономірності деформування з урахуванням деформацій короткочасної повзучості при прокатці сталевих листів.

Практичне значення одержаних результатів. Модернізований при виконанні дисертаційної роботи програмний комплекс для розрахункового аналізу повзучості та пошкоджуваності при плоскому напруженому стані може бути застосованим при чисельному моделюванні та проектуванні в енергетичному, авіаційно-космічному, хімічному машинобудуванні та у металургійній промисловості.

Рекомендації щодо вибору потрібних режимів при прокатці листів труб зі сталі 3 використано в Публічному акціонерному товаристві «Дніпропетровський металургійний завод ім. Комінтерну» (м. Дніпро), про що свідчить відповідний акт (додаток Б). Результати дисертаційної роботи використано при виконанні держбюджетних тем МОН України «Розробка методів, алгоритмів та програм для оцінювання динаміки, міцності і точності управління ракетної техніки» (Д.Р. № 0113U000448, 2013-2014 рр.) та «Розробка методів та алгоритмів розрахунку впливу теплових полів на працездатність приладів та елементів ракетно-космічної техніки» (Д.Р. № 0117U0004891, 2017 р.), де здобувач був виконавцем окремих розділів (додаток В).

Особистий внесок здобувача. Основні результати, які надано в дисертації, отримані здобувачем самостійно. Ним запропоновано рівняння стану ортотропної повзучості та пошкоджуваності при періодичному навантаженні для матеріалів, що виявляють суттєву першу ділянку неусталеної повзучості. Створено метод розрахунку ортотропної повзучості при плоскому напруженому стані з урахуванням початкових пластичних деформацій. Отримано експериментальні результати з короткочасної ортотропної повзучості одновісних зразків та пластин з отворами зі сталі 3 при кімнатній температурі. Проведено чисельне моделювання як при аналізі достовірності результатів, так й для встановлення закономірностей деформування та прихованого руйнування.

В роботах написаних у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у наступному. В роботах [1, 8, 10, 14] авторів належать метод розрахунку та отримані результати. В роботах [2, 7] здобувачеві належить метод розрахунку двовимірних задач. В [3] здобувачу належить розробка програмних модулів розв’язання пружно-пластичних задач та задач ортотропної повзучості з застосуванням тензорного параметру пошкоджуваності. В роботах [4, 13, 16] автором розроблено рівняння стану та отримані результати. В роботах [5, 9, 12] автором розроблено експериментальне устаткування, рівняння стану та отримано результати експериментів. В роботах [15, 17, 18] здобувачу належать розробка алгоритмів розрахунку та отримані результати.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися на X науково-практичній конференції студентів та аспірантів інженерно-фізичного факультету НТУ «ХПІ» «До 50-річчя першого пілотованого польоту людини у космос» (Харків, 2011 р.); міжнародній науковій конференції «Математические методы в технике и технологиях» (Харків, 2012 р.); 4-й міжнародній конференції «Nonlinear dynamics» (Севастополь, 2013 р.) та 5-й міжнародній конференції «Nonlinear dynamics» (Харків, 2016 р.); XXI Всеросійській школі-конференції молодих вчених та студентів «Математическое моделирование в естественных науках» (Перм, 2013 р.); 5-й міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми динаміки та міцності у турбомашинобудуванні» (Київ, 2014 р.); XXI, XXII, XXIII та XXIV міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я» (м. Харків, 2013-2016 рр.); науково-технічній конференції «До 100-річчя з дня народження академіка В.Г. Сергєєва та 50-річчя створення в ХПІ спеціальності «Динаміка польоту та управління» (Харків, 2014 р.); науковій конференції «Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики» (Львів, 2015 р.).

Робота, в тому числі і в повному обсязі, розглядалась та обговорювалась в НТУ «ХПІ» на семінарах кафедри комп’ютерного моделювання процесів та систем НТУ «ХПІ» (2014-2017 рр.) та на засіданні НТПР ІПМаш НАН України.

Публікації. Основні наукові положення і результати досліджень за темою дисертаційної роботи опубліковані в 18 наукових працях [1-18], серед яких 4 статті у фахових виданнях за переліком ДАК МОН України, 1 одна стаття у закордонному виданні, що індексується науково-метричною базою Scopus, 1 свідоцтво на авторське право на програмний комплекс та 12 матеріалів конференцій, в тому числі й міжнародних.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ

У розділі розглянуто стан розробки проблеми, як він є відображеним у класичних та сучасних публікаціях у вітчизняній та світовій науковій літературі. Проаналізовано підходи до опису короткочасної повзучості матеріалів, розглянуто матеріали, що виявляють анізотропні властивості повзучості. Приділено увагу методам та результатам розрахунків деформування та міцності при такому напружено-деформованому стані, коли фізичні співвідношення є нелінійними. Розглянуто процеси деформування, в яких суттєву роль відіграють механізми пластичності та повзучості, в тому числі в задачах механіки формоутворення.

1.1 Короткочасна повзучість матеріалів

При вивченні повзучості матеріалів та елементів конструкцій традиційно розглядають великі проміжки часу, за які набуваються суттєві деформації та відбувається перерозподіл напружень. У парових та газових турбінах, корпусних елементах ядерних та хімічних реакторів деформування відбувається при підвищених температурах (0.3 від температури плавлення та вище) протягом десятків років. Але, як відзначають Ж. Леметр та Ж.-Л. Шабош [19], деякі сплави демонструють в'язкопластичність (повзучість) при кімнатних температурах (300 K), незважаючи на те, що їхні температури плавлення можуть сягати 1400 K.

З іншого боку, достатньо часто зустрічаються такі умови навантаження, в яких деформування відбувається за достатньо короткий проміжок часу. Таке явище отримало назву короткочасної повзучості. Ю.М. Работнов зі своїм співавтором С.Т. Милейко [20] визначають короткочасну повзучість як такий процес повзучості металів, коли значна деформація, що порушує конструктивну функцію витвору, накопичується за відносно короткий проміжок часу. Автори наголошують, що під такою значною деформацією розуміють деформацію до 5%,

та що при короткочасній повзучості час деформування складає від десятків до 1000 с.

М.М. Малінін [21] узагальнює визначення короткочасної повзучості та розуміє під ним процес повзучості, що відбувається протягом секунд та хвилин при високих напруженнях та температурах, але, як вже відмічалось [19], значення температур можуть бути й невисокими.

Підходи до розв'язання задач короткочасної повзучості мають бути застосованими, як відзначають Ю.М. Работнов та С.Т. Милейко [20], в тих випадках, коли можливо припустити дію досить значних навантажень, але протягом невеликого часу, та набуті деформації повзучості є співмірними з миттєвими пружно-пластичними деформаціями.

Приклади результатів експериментального дослідження короткочасної повзучості та методів її опису наведено в роботах Ю.М. Работнова та С.Т. Милейко [20, 22], М.М. Малініна [21], Н. Хоффа [23], М. Касснера [24], В.О. Стрижала [25, 26], В.С. Гудрамовича, В.П. Пошивалова [27, 28] та інших. Як підкреслюють автори [20], моделі й методи, що традиційно застосовуються при розрахунках повзучості, також можуть бути застосованими й при описі короткочасних процесів. При цьому практично в усіх випадках виникає необхідність у використанні чисельних методів розрахунку.

В багатьох випадках короткочасна повзучість має місце й при циклічному деформуванні та при невисоких, кімнатних температурах [29-34]. В роботах О.В. Сосніна та А.Ф. Нікітенка [29], В.О. Стрижала [30] розглянуто результати експериментального дослідження циклічної повзучості при кімнатних температурах титанових сплавів, а у роботах А.А. Лебедева зі співавторами [31, 32] – вуглецевих сталей. Короткочасна повзучість при вібраційному навантаженні, яке призводить до процесів динамічної повзучості в матеріалах [22], вивчалась у роботах [33-35] – як для сплавів кольорових металів та припоїв [33, 35-36], так й для жароміцних [34].

Однією з важливих областей, в якій врахування короткочасної повзучості є важливим, є так звані технологічні задачі механіки деформівного твердого тіла, де

моделюються процеси деформування металевих заготовок з метою отримання необхідних характеристик профілів прокату. Розглянемо їх більш детально.

1.2 Завдання виготовлення листових заготовок як задачі механіки

Традиційно завдання незворотного, пластичного деформування при складному напруженому стані розглядались в рамках теорії пластичності [37-40, 21]. У більшості випадків постановка задачі проводилась на базі загального підходу теорії скінченних деформацій [41], що пов'язано з необхідністю опису формоутворення елементів. На перших етапах задачі розв'язувались аналітичними, приблизними методами, часто у спрощеній постановці: так, наприклад робота В.В. Соколовського [39] містить підсумкове викладення розроблених до початку 70-х років минулого сторіччя методів розв'язання задач пластичного деформування тонкостінних листових панелей, волочіння труб, штампування тощо.

Успіхи, що були досягнуті у розвитку як континуальної механіки (насамперед у постановках так званої раціональної механіки [42] з застосуванням термодинамічного обґрунтування рівнянь стану), так й чисельних методів, насамперед методу скінченних елементів [43-45], ініціювали бурхливий розвиток нового напрямку, що отримав назву Metal Forming (формування металу) [46], але українською більш часто вживають назву «технологічні задачі механіки деформівного твердого тіла». В роботах Р. Вагонера та Дж. Ченота [47], С. Кобаяші зі співавторами [48], С. Чинести та Е. Куето [49] надано основні постановки задач та методи їхнього розв'язання.

Великий внесок у розвиток методів теорії пластичності при великих деформаціях стосовно до задач формування металу зроблено у роботах японської школи під керівництвом Ф. Йошиди [50-52], в яких представлено нові постановки задач, алгоритми розв'язання та рівняння стану матеріалів, що деформуються. Розглянуто задачі витягування металевих листів, ковальської обробки заготовок тощо. Створену Ф. Йошидою спільно з Т. Уеморі модель циклічної пластичності [52] імплементовано до деяких комерційних скінченноелементних пакетів.

Ця модель досить широко використовується при моделюванні деформування листових матеріалів. В роботах [53, 54] досліджено поведінку сталевих листів при кімнатній температурі в квазістатичних умовах при різних траєкторіях деформацій: одновісне розтягання, простий зсув і двухвісне розтягання. Мета полягала в тому, щоб охарактеризувати анізотропію й зміцнення для визначення матеріальних параметрів визначальних рівнянь, здатних відтворювати механічну поведінку. Використовується модель зміцнення Йошиди-Уеморі спільно з критерієм ортотропної плинності Брон-Бессона. Представлені результати показують задовільну збіжність між чисельними даними та експериментами; встановлено що модель Йошиди-Уеморі зменшує швидкість зміцнення.

В роботах вчених з Масачузетського технологічного інституту (MIT) під керівництвом К.-Ю. Бате [56-57] розроблено чисельні методи та алгоритми для розв'язання технологічних задач теорії пластичності при великих деформаціях. В [55] наведено моделі розв'язання для скінченноелементного термо-пружно-пластичного аналізу і аналізу повзучості з залежними від температури властивостями матеріалу, розроблені основні ітераційні рівняння. В роботі [56] показано, що ефективне і точне моделювання деформацій в анізотропних металевих листах вимагає побудови визначальної моделі й супроводжуючого алгоритму для великих деформацій, які враховують анізотропію пружної і пластичної поведінки матеріалів. Для розв'язання задач великих деформацій в роботі [57] застосовано пряме інтегрування на базі методу Ньюмарка.

Напрямок, що розглядається, викликає значну увагу дослідників: останнім часом у ньому виконуються сотні робіт. Розглянемо декілька останніх за часом, що безпосередньо пов'язані з процесом формування листових матеріалів. Зазначимо, що практично в усіх з них використовується МСЕ.

Взаємозв'язок між механізмом деформації і холодною прокаткою досліджений у роботах [58-59]. Проведено аналіз [59] впливу багатьох факторів, таких як вібрації на прокатному стані, швидкість протягування заготовки, вплив коефіцієнту тертя і т. ін. при прокатці на товщину заготовки на виході.

Розрахункові результати показують, що вплив зазору на вході має велике значення для товщини заготовки і мало змінюється з різними методами контролю натягу.

Розрив смуги під час холодної прокатки є однією з проблем в прокатній промисловості [60, 61]. У роботі [60] застосовано спеціальний скінченний елемент в поєднанні з поліпшеною моделлю пошкоджень Леметра для прогнозування розривання смуги в п'ятисекційному прокатному стані.

В роботі [62] виконано чисельне моделювання прокатки з використанням методу скінченних елементів в комерційному пакеті *Abaqus/Explicit* для вивчення розвитку залишкових напружень. Показано, що високі зсувні деформації мають місце не тільки в поздовжньому, але і в поперечному перерізі.

В роботі [63] досліджується вплив швидкості деформації на властивості формування металу. Використовувалась феноменологічна модель Джонсона-Кука для моделювання процесів формування сталевих заготовок. Результати ясно показують, що вплив швидкості деформації на силові фактори, що діють у процесі формування, не є незначним, і сильно залежить від матеріалу.

Ефективний алгоритм чисельного інтегрування нової моделі пластичності і руйнування металу описано в роботі [64]. Визначальні рівняння моделі матеріалу враховують вплив тиску і ефект третього інваріанту девіатору напруження через кут навантаження. Моделювання розтягування циліндричного зразка з надрізом представлено для ілюстрації надійності запропонованого алгоритму.

Наступним етапом розвитку задач механіки прокатки було застосування у розглянутих вище підходах методів континуальної механіки пошкоджуваності [19]. Найбільш детально вони були розроблені у роботах Ж.Л. Шабоша та К. Саануні [65-68] та їхніх співробітників. Після успіху застосування концепції параметру пошкоджуваності [19, 22] у задачах теорії повзучості у роботах цієї групи французьких вчених, її було використано у задачах теорії пластичності.

Цей розділ механіки деформівного твердого тіла продовжує інтенсивно розвиватись й в останнє десятиліття. Так, наприклад у роботі Е. Комеллас, Ф. Белломо та С. Оллера [69] надано нову узагальнену модель пошкодження для

квазі-нестисливої гіперпружності в рамках загального лагранжіану деформації. Декілька тривимірних прикладів представлено для ілюстрації основних характеристик моделі пошкодження.

В монографії В.М. Кукуджанова [70] розглянуто основні підходи до опису деформування, пошкоджуваності та руйнування матеріалів та конструкцій, що працюють за межою пружності, в тому числі й в технологічних задачах. Докладно проаналізовано різні моделі пошкоджуваності, насамперед модель Гарсона-Твергаарда-Нидлмана, яку широко застосовують у задачах формування металів. В роботі розглянуто математичні методи та алгоритми, які є необхідними при розв'язанні пружно-пластичних задач пошкоджуваності, в тому числі й при великих деформаціях.

У роботі [71] модель Гарсона-Твергаарда-Нидлмана застосовано для опису трьох етапів пластичного руйнування: зародження, зростання і зрощування мікро пустот в матеріалі. Вивчається взаємозв'язок між об'ємними пустотами і граничними деформаціями руйнування. Схожу пружно-пластичну модель анізотропної поведінки матеріалу при великих деформаціях надано в роботі [72].

Утворення тріщин в кутах заготовки спостерігається в процесі холодної прокатки кременистої сталі, це може привести до розриву заготовки в прокатному стані. У роботах [73-75] утворення та поширення тріщин при холодній прокатці було також досліджено за допомогою моделі пошкодження Гарсона-Твергаарда-Нидлмана. Константи рівняння для параметру пошкоджуваності були отримані з даних випробувань на розтяг. Проводилися параметричні дослідження, які показали, що поширення тріщини зростає зі збільшенням коефіцієнта тертя. Також чисельним моделюванням встановлено, що більша кількість робочих валків є необхідною для зменшення росту тріщин у кутах.

Чисельний підхід для прогнозування відмов при формуванні металічних листів представлено в роботах [76-78]. Підхід заснований на поєднанні при побудові визначальних співвідношень рівнянь стану анізотропної пластичності та кінетичних рівнянь для параметру пошкоджуваності, що описується іншим дуже розповсюдженим кінетичним рівнянням - законом Леметра [79], в рамках

континуальної механіки пошкоджуваності. Розробку обчислювальної моделі було реалізовано у скінченноелементному пакеті *Abaqus/Explicit*, за допомогою порівняння чисельних та експериментальних даних проведено оцінку можливостей застосування визначальних співвідношень.

В роботі [80] розглянуто розробку та чисельну реалізацію визначальної моделі пошкоджуваності при великих пластичних деформаціях. Для моделювання пружності приймається гіперпружний потенціал вільної енергії Генкі в поєднанні з нелокальним пошкодженням. Термодинамічна узгодженість моделі забезпечується за рахунок застосування першого і другого принципів термодинаміки в глобальній формі, нерівність для функції дисипації переписана в локальній формі. В роботі застосовано метод Ньютона-Рафсона для розв'язання геометрично та фізично нелінійної задачі.

Пошкодження і руйнування є важливими критеріями при аналізі технологічних процесів. Моделі пошкодження можуть бути використані для прогнозування пластичного руйнування в процесах обробки металів тиском. Нелокальні моделі дозволяють уникнути проблем залежності сітки від локальних пошкоджень. Така модель пошкоджень була реалізована в роботі [81] за допомогою скінченноелементної програми *LS-DYNA* [82], використовуючи призначені для користувача підпрограми *UMAT* і *UCTRL*. Розглянуті переваги і недоліки різних реалізацій. Проаналізовані результати моделювання моделі пошкодження на прикладі процесів згину та штампування листового металу.

Отже, завдяки значній актуальності та практичній цінності теми, велику кількість робіт присвячено пружно-пластичному деформуванню у технологічних задачах, в тому числі при великих деформаціях. Увагу дослідників також привертає інший достатньо поширений технологічний процес – формування металів, що знаходяться в умовах повзучості.

Перші задачі механіки гарячого формування металічних заготовок в умовах повзучості розглянуто в роботах А.А. Ільюшина [37], Г. Генкі [83], М.М. Малініна та К.І. Романова [84-86]. В останніх роботах сформульовано загальний підхід до чисельного дослідження повзучості при гарячому формозмінюванні металу, в

тому числі й за допомогою МСЕ. В цих роботах також закладено основи експериментальної методології вивчення повзучості при високих температурах для формулювання відповідних рівнянь стану. В роботі К.І. Романова [86] викладено методи дослідження процесів вільного формування при повзучості мембран та за допомогою штампів, об'ємного штампування, тонкостінних та товстостінних колових циліндричних труб у жорстких конічних матрицях.

Дослідженням повзучості металів у технологічних процесах присвячено роботи вчених новосибірської школи Ін-та гідродинаміки РАН О.В. Сосніна та А.Ф. Нікітенка з співавторами [87-88]. З застосуванням енергетичного варіанту теорії повзучості проведено опис експериментальних даних, що є необхідними при моделюванні гарячого формозмінювання.

Роботи Д.В. Бреславського та О.К. Морачковського [89, 90] присвячено формуванню металів в умовах повзучості. В роботі [89] розглянуто загальні математичні постановки та методи розв'язання задач, термодинамічне обґрунтування відповідних рівнянь стану, описано особливості застосувань МСЕ в завданнях такого типу. Особливий наголос [89, 90] зроблено на моделюванні формування тонкостінних панелей у режимі динамічної повзучості. Отримані експериментальні дані з повзучості дуралюмініу та титанового сплаву застосовано для розрахункового аналізу формування листових заготовок. Підкреслюється, що максимальна пошкоджуваність в них у режимі, що розглядається, є значно меншою, ніж та, що отримується при звичайному пластичному деформуванні.

Останнім часом опубліковано низку робіт, присвячених формуванню металевих листів при повзучості [91-94], огляд сучасного стану в експериментальних дослідженнях та математичному моделюванні таких процесів, які в англійській літературі отримали назву *warm* чи *creep forming*, представлено в роботі Т. Діна зі співавторами [91]. Роботу [92] присвячено моделюванню процесу відходів від заданого положення товстих алюмінієвих листів, що формуються завдяки повзучості їхнього матеріалу. Дж. Янагімото та К. Оямада [93] досліджували це ж явище відходу при формуванні високоміцних сталевих листів.

Процеси формування при повзучості потребують побудови повної системи визначальних співвідношень: до законів повзучості мають бути доданими ще кінетичні рівняння для параметру пошкоджуваності. Це необхідно для оцінювання рівня набутих пошкоджень в листах та, при необхідності, розрахункового визначення режимів з мінімальною пошкоджуваністю. Так, наприклад, у роботі М. Джі, С.Л. Чоу та К. Ву [94] проведено дослідження розповсюдження пошкоджуваності при формуванні металевих листів. Розглянуто випадок непропорційного навантаження.

Самі ж ці визначальні закони плинності, як й в інших областях механіки, де потрібен розрахунок з урахуванням деформацій повзучості, мають бути знайдені після експериментальних досліджень. Стаття А. Олерта та А. Атренса [95] містить дані таких досліджень, що застосовані для отримання законів повзучості при кімнатній температурі. Роботи, підготовлені за останні п'ятнадцять років [96-100], присвячено даним експериментальним випробувань повзучості різних сталей при кімнатних температурах, які є потрібними при чисельному моделюванні технологічних процесів.

Як видно з проведеного огляду, більшість задач математичного моделювання технологічних процесів формування металічних матеріалів, проведено для випадків пружно-пластичного характеру деформування. Між іншим, у низці робіт показано, що у багатьох випадках при таких процесах істотну роль відіграють й деформації повзучості – як при підвищених, так й при кімнатних температурах. Математичний опис деформування з урахуванням незворотних деформацій пластичності та повзучості, пошкоджуваності матеріалу потребує вірного формулювання відповідних визначальних відношень.

1.3 Рівняння стану, що враховують повзучість та пошкоджуваність матеріалу

Роботи з побудови визначальних рівнянь для розв'язання фізично нелінійних задач механіки деформівного твердого тіла розпочались з двадцятих-тридцятих років минулого століття. Це було пов'язано з необхідністю створення

апарату для розрахунків повзучості роторів та лопаток турбін, а потім й інших високонавантажених при підвищених температурах конструктивних елементів. Завдяки роботам Г. Генкі [83], А. Надаї [101], Е. Орована, К. Содерберга [102], Ю.М. Работнова [22], Л.М. Качанова [103], М.М. Малініна [21], Ф. Одквіста [104], Ю.М. Шевченка [105], Г.С. Писаренка та М.С. Можаровського [106], Д. Бойла та Д. Спенса [107], К.-Ю. Бате [55-57], А.В. Бурлакова, А.М. Підгорного, О.К. Морачковського та Г.І. Львова [108-110] і багатьох інших дослідників к середині 80-х років минулого сторіччя було побудовано основний апарат розв'язання задач при складному напруженому стані з застосуванням математичної теорії повзучості, яка включала й відповідні рівняння стану, основані насамперед на теорії плинності [21, 22]. Детальний огляд наукових публікацій, виконаних до цього часу у напрямку експериментальних досліджень повзучості матеріалів, побудови визначальних рівнянь та методів розв'язання початково-крайових задач, зроблено у роботі С.О. Шестерикова та О.М. Локощенко [111].

Новий етап у розвитку теорії повзучості пов'язаний з бурхливим розвитком континуальної механіки пошкоджуваності [19]. Цей розділ механіки деформівного твердого тіла, започаткований роботами Л.М. Качанова [103] та Ю.М. Работнова [22] саме в задачах теорії повзучості, отримав своє продовження й в інших розділах, насамперед у теорії пластичності [19]. Іншою основою його розвитку була так звана раціональна механіка [42, 19], яка додала до початкових підходів механіки пошкоджуваності суворе термодинамічне обґрунтування рівнянь стану та кінетичних рівнянь для параметру пошкоджуваності [112].

Після Л.М. Качанова та Ю.М. Работнова концепції континуальної механіки пошкоджуваності розроблялись у роботах Д. Крайчиновича [112], Ж.Л. Шабоша та Ж. Леметра [19, 79, 114, 115], Й. Беттена [116], С. Мураками [117, 118], Дж. Джу [119], Ф. Ціглера [120], Я. Скрипека [121] та багатьох інших.

Саме до цього етапу відноситься розуміння обмеженості підходу, що використовує скалярний параметр пошкоджуваності. Спочатку для матеріалів з анізотропними властивостями повзучості [114, 117], а потім й для більш

широкого їхнього класу було розроблено підхід, що використовує тензорний параметр пошкоджуваності. Він базувався, по-перше, на даних металографічних досліджень виникнення дефектів при повзучості матеріалів, яке має суттєво виражений анізотропний характер, а по-друге, – на тензорній природі компонентів вектору напружень, з яким й був тоді пов'язаний параметр пошкоджуваності через величину ефективного напруження [115].

Застосування цілісної з математичної точки зору концепції тензорного параметру пошкоджуваності зустріло у теорії повзучості величезні труднощі при визначенні констант, що входять до кінетичних рівнянь: для кожного напрямку необхідно було проведення експериментів, які до того ж мали дуже довгу тривалість, що відповідала часу експлуатації проєктованих конструкцій. У зв'язку з цим досить широке використання тензорний параметр пошкоджуваності знайшов у задачах теорії пластичності, де тривалість експериментів є значно меншою [65, 66], та до того ж у багатьох випадках вивчались плоскі задачі, тензори напружень та пошкоджуваності для яких мають менше ненульових компонентів.

У задачах повзучості разом з використанням розглянутих моделей отримав певний розвиток підхід, пов'язаний з застосуванням кількох скалярних параметрів пошкоджуваності. Визначені у роботах Б. Дайсона та Мак-Лінна [122, 123] металофізичні закономірності прихованого руйнування при повзучості та встановлені ефекти впливу різних внутрішніх факторів на криву довготривалої міцності дозволили Д. Хейхерсту з його співавторами І. Перрінім та З. Ковалевським [124-126] побудувати так звані ‘mechanism-based’ (тобто засновані на фізичних механізмах) кінетичні рівняння, до яких увійшло декілька параметрів пошкоджуваності. Не зважаючи на те, що ця концепція дає цілком задовільні результати при аналізі повзучості та руйнування при складному напруженому стані, її застосування також, на жаль, обмежується необхідністю попередніх металофізичних досліджень для кожного матеріалу.

Отже, анізотропна поведінка металів при повзучості та прихованому руйнуванні потребує розробки окремих рівнянь стану, що її враховують. Їхній

розробці, на перших етапах – для матеріалів, що мали анізотропію усіх фізико-механічних властивостей чи залежність від виду напруженого стану, включно з властивостями пластичності та повзучості, були присвячені роботи О.В. Сосніна [127], М.М. Малініна та Г.М. Хажинського [128, 21], Ж.Л. Шабоша [19, 129], Й. Беттена [116], А. Бертрама [130], О.К. Морачковського та О.О. Золочевського [110, 131-133], Н. Оно та Т. Такеючі [134] та багатьох інших. Більшість підходів, розроблених для розрахунку при складному напруженому стані з урахуванням анізотропії повзучості, сформульовано виходячи з аналізу експериментальних даних, отриманих на зразках, вирізаних у відповідних напрямках, та застосування теорій інкрементального типу. Аналіз робіт у цьому напрямку, надрукованих до початку-середини 2000 рр., міститься у оглядах О.К. Морачковського [135] та Ж.Л. Шабоша [136].

Таке явище, як анізотропія пошкоджуваності в анізотропних матеріалах, вивчалась у багатьох роботах, серед яких слід відмітити дослідження Й. Беттена [137], В. Твергаарда та А. Нідлмана [138], Я. Скжипека та А. Ганчарського [139], Г. Вояджиса та П. Каатана [140], І. Вей та С. Чоу [141], В.Н. Кукуджанова [70], А. Драгона та Д. Халма [142]. В цих публікаціях описано тензорні та скалярні моделі для параметру пошкоджуваності, в тому числі й для високотемпературних процесів. Відмітимо, що після роботи Ж. Шабоша [129], досліджень та математичного обґрунтування, виконаного Й. Беттеном [116], більшість кінетичних рівнянь пошкоджуваності будуються з застосуванням тензору четвертого рангу для її опису, що призводить до труднощів у визначенні констант. Огляд та аналіз моделей пошкоджуваності, розроблених до кінця 90-х років, знаходиться у роботі Ж.Л. Шабоша та Ф. Галерню [143].

Розглянемо більш детально роботи, в яких останнім часом представлено ефективні моделі включно з рівняннями стану, що можуть бути застосованими при розрахунках повзучості та пошкоджуваності, яка її супроводжує та має анізотропний характер. Підсумки досліджень за напрямом були підбиті монографіями Й. Беттена [144], Ж. Леметра та Р. Десмора [79], Т. Хайда, В. Сана та С. Хайда [145], Х. Альтенбаха та К. Науменка [146, 147], В.І. Астафьева,

Ю.М. Радаєва й Л.В. Степанової [148] та інших. Найбільше розповсюдження серед багатьох моделей для опису анізотропної пошкоджуваності при повзучості отримали, як відзначає Ж.Л. Шабош у своїй роботі «Механіка пошкоджуваності» [115], модель Муракамі-Оно, що застосовує тензор другого рангу, та модель Ж.Л. Шабоша [129] з тензором пошкоджуваності, що має четвертий ранг. Обидві моделі, крім традиційних для механіки повзучості експериментів на зразках, потребують знання мікромеханічних характеристик матеріалу. Це, безперечно, суттєво ускладнює їхнє використання при застосуванні на практиці.

Для опису анізотропії повзучості та пошкоджуваності О.К. Морачковським [135, 149] створено рівняння стану, що на додаток до тензорного параметру пошкоджуваності вводять ще скалярну міру пошкоджуваності, яка підраховується за компонентами тензора. Для визначення значень констант матеріалу, що входять до визначальних рівнянь, у випадку трансверсальної ізотропії, якою характеризуються властивості повзучості та пошкоджуваності листових матеріалів, є необхідним проведення експериментів на одновісних зразках тільки у трьох напрямках (вздовж, поперек та під кутом 45 до прокатки). Цей підхід надає змогу для використання розроблених рівнянь стану при розрахунках повзучості та прихованого руйнування при двовимірному напруженому стані.

Анізотропний характер деформування та накопичення пошкоджень досліджено у роботах Х. Альтенбаха, К. Науменка та їхніх співавторів [150-153]. Для знаходження значень констант використано т. зв. підхід «мікро-макро», коли за даними металографічних досліджень отримують інформацію щодо структури RVE (елементу представницького об'єму матеріалу), а потім виконують пряме чисельне моделювання реакцій цього елемента на стандартні навантаження – розтяг, стискання, крутіння тощо. Визначені при цьому характеристики матеріалу вважаються тотожними знайденим при дослідженнях стандартних зразків. Перевагою такого підходу є можливість проведення розрахунків для матеріалів з високим ступенем анізотропії, а недоліками – необхідність дуже великого обсягу спочатку фізичних, а потім й чисельних експериментів. Потребують також

подальшого дослідження та уточнення границі припустимості застосування МСЕ для т. зв. «мезо-рівня» [19].

В роботах В.І. Астаф'єва та Ю.М. Радаєва [148, 154] окреслено теоретичні рамки застосування тензорних моделей для опису пластичності та повзучості. Слідом за С. Мураками [117], автори застосовують тензор другого рангу. Розвинуто так званий геометричний підхід, коли на основі представлення щодо еквівалентної конфігурації континуума як сукупності елементів з певною пошкоджуваністю вводиться анізотропна міра для континуума. Для задач пошкоджуваності при повзучості за допомогою тензорного аналізу виконано координатне визначення тензору другого рангу, знайдено екстремальні властивості головних пошкоджуваностей.

Монографія Г.М. Хажинського [155] містить опис розробленої автором спільно з М.М. Малініним [21] теорії повзучості з анізотропним зміцненням. Разом з класичними припущеннями (нестисливості матеріалу, плинністю повзучості за другим інваріантом тензору напружень тощо) автор використовує гіпотезу про те, що приріст додаткового напруження визначається різницею процесів зміцнення та повернення за достатньо малий проміжок часу. Для опису пошкоджуваності застосовано скалярний параметр. Розглянуто процеси взаємодії початкових пластичних деформацій та деформацій повзучості, обговорюється характер впливу перших на другі в залежності від їхнього співвідношення та знаку при одновісних навантаженнях. Для цього автором застосовано класичні, перевірені моделі для опису процесів деформування. Ю.М. Работнов та С.Т. Милейко [20] також відмічають припустимість застосовування класичних моделей до моделювання короткочасної повзучості при початкових пластичних деформаціях.

У статтях К. Стьюарта зі співавторами [156, 157] представлено анізотропну модель повзучості та пошкоджуваності для третьої стадії процесу деформування анізотропних матеріалів. Застосовано тензорне визначення для параметру пошкоджуваності, основане на визначенні орієнтації осей анізотропії матеріалу до напрямку навантаження та ступеню анізотропії пошкоджуваності. Для опису

повзучості використано закон Нортону, модифікований моделлю анізотропії Хилла.

Монографія О.О. Золочевського та співавторів [158] містить опис побудованих авторами визначальних рівнянь повзучості матеріалів з різними властивостями нелінійного деформування при різних видах навантажень та анізотропії. Застосовано скалярне та векторне визначення для параметру пошкоджуваності. Створені рівняння стану імплементовано до розроблених програм, призначених для розрахунків напружено-деформованого стану при повзучості та пов'язаної з нею пошкоджуваності за допомогою методу R-функцій. В роботі С.М. Склепуса [159] представлено розробки автора у царині застосування створених автором методу та визначальних співвідношень при скінченних деформаціях.

Останнім часом доволі інтенсивно продовжуються дослідження з експериментального визначення анізотропних властивостей повзучості та прихованого руйнування [153, 160-165]. Роботу Ф. Латіфа, К. Какеї та Х. Муракамі [160] присвячено дослідженню анізотропії повзучості до руйнування нікелевого сплаву TMS 75 при температурі 900°C на зразках, що було вирізано у різних напрямках. Вивчено впливи спеціалізованих заходів з обробки металу на анізотропію властивостей.

У роботі [161] вивчено анізотропну повзучість суперсплаву DD6 при температурі 980°C на зразках, що було вирізано у різних напрямках. Встановлено, що анізотропія для даного матеріалу проявляється лише на перших двох стадіях повзучості. За допомогою металографічних досліджень встановлено закономірності деформування та руйнування на «мезо» рівні.

Авторами статті [162] після обробки експериментальних даних, отриманих при дослідженнях повзучості нікелевих суперсплавів, створених за допомогою різних термообробок, встановлено закономірності змінювання швидкості деформацій повзучості, часу до руйнування тощо. Виконано дослідження з пошуку кореляції між значеннями границі міцності та характеристиками повзучості та руйнування в залежності від напрямку анізотропії матеріалу.

Багато уваги дослідниками високотемпературної міцності матеріалів та конструкцій приділяється аналізу анізотропії властивостей зварних швів [163-167]. В цьому напрямі виконано дослідження науковими групами Д. Хейхерста [163], Т. Хайда [164-165], Х. Альтенбаха та К. Науменка [166-167] та інших. Особливості створення зварних швів призводять до суттєвої анізотропії фізико-механічних властивостей матеріалів швів. Для їхнього визначення застосовують дані як металофізичних досліджень, так й традиційних методів випробування матеріалів. Завдяки побудованим у розглянутих роботах рівнянням стану, що враховують особливості структури матеріалу у зварних швах, вдається провести аналіз деформування та міцності конструкцій, в яких вони присутні.

Розглянуті до цього визначальні співвідношення були створені для випадків незмінних, статичних навантажень. Між іншим, велика кількість конструктивних елементів, причому у найвідповідальніших галузях промисловості, таких як авіаційно-космічна, енергетична, металургійна, працюють в умовах періодичного, чи, інакше, циклічного навантаження, коли до незмінної його складової додається амплітудна частина. При цьому у багатьох випадках високотемпературного навантаження в матеріалі елементів конструкцій розвиваються деформації пластичності та повзучості, йде його приховане руйнування [19, 20, 40, 168]. Як відомо [20, 169, 170], додавання циклічної складової у більшості випадків призводить до прискорення процесів зростання деформацій та прихованого руйнування, тому прямі методи інтегрування за часом крім того, що є неефективними з обчислювальної точки зору, призводять до занижених оцінок [171]. У зв'язку з цим увагу дослідників було привернуто до розробки методів розв'язання фізично нелінійних завдань механіки деформівного твердого тіла, що придатні до розрахунків задач з періодичним змінюванням температур та напружень. Це завдання потребувало й розробки спеціальних рівнянь стану.

Розвиток напрямку циклічного деформування та пов'язаного з ним руйнування матеріалів та конструктивних елементів з урахуванням фізичної нелінійності пов'язано з роботами таких науковців, як Х. Альтенбах та К. Науменко [146, 147], М.І. Бобир [172-174], М.В. Бородій [175],

Д.В. Бреславський та О.К. Морачковський [171, 176-177], В.П. Голуб [170, 178], Ж. Леметр та Ж.Л. Шабош [19, 79, 115, 136, 143], М.С. Можаровський [106, 172], В.В. Москвітін [179], Р. Пенні та Д. Маріотт [180], Ю.М. Работнов [20], Д. Хейхерст [181], С. Тайра [169], Ю.М. Шевченко [40], С.М. Шукаєв [182] та багатьох інших.

Найбільшу кількість досліджень виконано для побудови ефективних методів розрахунку малоциклового пластичного деформування, в тому числі й у високотемпературній області, коли необхідно враховувати дію деформацій повзучості. Опис застосованих при цьому методів та підходів може бути знайдено у роботах [19, 106, 147, 172, 180]. Значно менше робіт виконано з метою розробки методів аналізу повзучості матеріалів та елементів конструкцій при циклічному навантаженні з частотами, які відповідають вимушеним коливанням (більше 1-2 Гц). Така повзучість отримала назву динамічної [20].

Експериментальні дослідження динамічної повзучості та початкові підходи до її опису за допомогою спеціальних одновимірних рівнянь стану описано у роботах В.П. Голуба [170, 178], Ю.М. Работнова [20], С. Тайри [169]. В роботах Д.В. Бреславського та О.К. Морачковського [176-177] викладено створений ними метод розрахунку повзучості та пов'язаної з нею пошкоджуваності при спільній дії статичних навантажень та вимушених коливань. Ними застосовано метод двох масштабів часу та усереднення на періоді змінювання циклічної складової. Також на базі цих ідей розроблені рівняння стану, що можуть бути застосовані для моделювання як динамічної повзучості, так й взаємодії повзучості та багатоциклової втоми. У подальшому розглянуті підходи були застосовані Д.В. Бреславським та О.К. Морачковським у співавторстві з Ю.М. Коритко [183] та О.А. Татаріною [171] для отримання рівнянь стану при повільних змінах температур та навантажень, які відповідають малоцикловому деформуванню.

Наряду з розглянутими вище добре відомими роботами, слід звернути увагу на результати нещодавно виконаних важливих досліджень, в яких розробляються питання аналізу циклічного деформування та втомного руйнування також за допомогою асимптотичних методів.

В роботах Я. Фиша зі співавторами [184-186] метод багатьох масштабів застосовано для отримання визначальних рівнянь та методу розв'язання задач малоциклової втоми. Розв'язано задачі про розподіл параметру пошкоджуваності у балці при згині, у заслонці сопла, виготовленого зі сталі 316, яка проявляє властивості повзучості при кімнатній температурі.

Методи багатьох масштабів застосовано в роботах Д. Обрі, А. Девульд'є та Ж. Пуеля [187-189] для розв'язання модельних задач про коливання стрижня, в матеріалі якого розвиваються деформації пластичності та повзучості, визначення деформованого стану у лопатках газових турбін тощо.

Розглянуті у даному підрозділі рівняння стану мають бути застосованими при аналізі складного напруженого стану, який реалізується в елементах різних конструкцій. Для цього застосовуються спеціальні розрахункові методи.

1.4 Розрахунки на повзучість при складному напруженому стані та метод скінченних елементів

При самому початку проведення досліджень повзучості в конструктивних елементах, в яких реалізовується складний напружений стан, до розрахунків залучались методи теорії пластичності та на їхній основі розроблялись нові [20]. Як правило, до сімдесятих-вісімдесятих років минулого сторіччя використовувались аналітичні, приблизні методи для аналізу найбільш розповсюджених, типових елементів конструкцій у вигляді стрижнів, балок, товстостінних труб, пластин, оболонок тощо [20, 103, 106]. Наряду з ефективними можливостями при якісному аналізі результатів, такі підходи були обмежені можливістю їхнього використання для класу канонічних, чи простих, геометричних форм елементів, та не давали можливості точного врахування геометрії об'єктів та крайових умов. Огляд подібних підходів та методів розрахунку міститься в роботі [111].

Остання проблема знайшла своє рішення при застосуванні методу скінченних елементів (МСЕ) для розрахунків фізично нелінійних задач механіки, які виявилось можливим проводити після успішного досвіду його застосування в

задачах теорії пружності. В роботах таких вчених, як Дж. Аргирис [190], К.-Ю. Бате [191], О. Зенкевич [192], В.А. Постнов та І.Я. Хархурім [193], О.С. Сахаров та І. Альтенбах [194] й багатьох інших було розроблено працездатні алгоритми та необхідне програмне забезпечення для МСЕ. У подальшому підґрунтя для розв'язання задач теорії пластичності та повзучості з використанням схем МСЕ було створено завдяки дослідженням Дж. Одена [195], О. Зенкевича та І. Кормю [192, 196], Дж. Бонета [43], М. Крісфілда [44], Т. Белушко [45], С.Е. Уманського [197] та інших. У 90-х роках минулого сторіччя на базі МСЕ було створено достатню кількість спеціалізованих комплексів інженерного аналізу, серед яких найбільше поширення отримали такі як *NASTRAN* [198], *ANSYS LS-DYNA* [199], *ABAQUS* [200], *COSMOS Works* [201] та інші. Завдяки своїй алгоритмічності, універсальності та простоті подальшого застосування при побудові розрахункових моделей МСЕ у теперішній час практично став стандартом при розрахунках складних задач механіки [202].

Більшість робіт на сучасному етапі розвитку механіки деформівного твердого тіла виконуються за допомогою розробки та використання різних скінченноелементних програмних засобів. В Україні розвиток МСЕ відбувається роботами В.А. Баженова, О. Гуляра, С.О. Піскунова, О.С. Сахарова [203], К.М. Рудакова [204], В.В. Чехова [205] та інших.

Поширене застосування МСЕ й у задачах теорії повзучості. Він успішно використовується в роботах Х. Альтенбаха та К. Науменка [146, 147, 150-153], Д.В. Бреславського, О.К. Морачковського та О.А. Татарінової [171, 183, 202, 206], Ф. Ленглера, Т. Мао й А. Шольца [207], Т. Хайда зі співавторами [208] та багатьох інших.

Не зважаючи на дуже добре розроблені сервісні та якісні обчислювальні можливості різних комплексів та пакетів програм скінченноелементного аналізу, для складних задач теорії повзучості, що характеризуються анізотропією властивостей деформування та прихованого руйнування, циклічністю дії зовнішніх теплових та силових полів, їхнє застосування зустрічає багато труднощів через відсутність у такому програмному забезпеченні відповідних

розрахункових процедур. Необхідність у розв'язанні розглянутих задач призводить до проектування та розробки спеціалізованого скінченноелементного програмного забезпечення [202].

1.5 Постановка нових задач досліджень

Проведений огляд літературних джерел за напрямком деформування та прихованого руйнування при повзучості матеріалів та елементів конструкцій свідчить про актуальність даної теми: в дослідників є постійний інтерес до неї, який обумовлено вимогами промисловості. З кожним роком зростають обсяги виробництва листових металічних матеріалів, які виявляють анізотропію фізико-механічних властивостей, в тому числі й пластичності та повзучості. Час виробничих процесів є обмеженим завдяки технологічним вимогам. Високий рівень навантажень, та, в багатьох випадках, й температур, призводить до виникнення в матеріалах листових заготовок незворотних деформацій повзучості, яку прийнято називати короткочасною [20]. Незважаючи на великий обсяг наукових публікацій, присвячених нелінійним проблемам механіки, що виникають при виробництві листових матеріалів, переважна більшість з них стосується задач теорії пластичності. Актуальні проблеми повзучості та пошкоджуваності анізотропних матеріалів при підвищених та кімнатних температурах є дослідженими недостатньо. Ще менше робіт, присвячених короткочасній повзучості таких матеріалів та виготовлених з них конструктивних елементів. Це обумовлює вибір напрямку та теми дисертаційного дослідження.

Для комплексного вивчення короткочасної повзучості при простому та складному напружених станах, в роботі є необхідним сформулювати визначальні рівняння, які будуть здатними для застосування у подальших чисельних розрахунках. Як свідчить аналіз джерел за темою роботи, на теперішній час найкращим шляхом для побудови рівнянь стану є використання інкрементальних співвідношень для фізично нелінійних процесів, якими є пластичність та повзучість. Гіпотези повзучості, які застосовуються при формулюванні відповідних потенціалів, необхідно обирати згідно з експериментальними даними

для матеріалу, що вивчається. Такі дані мають бути залучені з відомих літературних джерел, чи, в разі відсутності, отримані самостійно. Для проведення випробувань на повзучість необхідно застосування спеціальної техніки, в якій на сучасному етапі для реєстрації отриманих даних є можливим залучення цифрової апаратури. Для опису анізотропії пошкоджуваності найкращим є застосування тензорного визначення для відповідного параметру. Усім цим вимогам відповідають рівняння стану, запропоновані О.К. Морачковським [135] для матеріалів, які мають трансверсальну ізотропію властивостей повзучості та пошкоджуваності, та в яких практично відсутні перші ділянки в кривих повзучості.

Для аналізу складного напруженого стану в умовах повзучості для розрахунку об'єктів неканонічної, складної геометрії найкращі результати надає метод скінченних елементів. Використання спеціалізованих інженерних програмних комплексів не завжди є можливим (наприклад, в них відсутнє врахування пошкоджуваності, циклічності навантаження тощо). У зв'язку з цим є доречним застосування та модернізація в роботі дослідницького програмного забезпечення, код якого є відомим та припускає суттєве його доповнення. Завдяки необхідності розв'язання плоских задач теорії повзучості, таким ПЗ може бути розроблений в НТУ «ХПІ» програмний комплекс «*FEM CREEP*» [3].

Як слідує з аналізу наукових робіт за темою, лише комплексне поєднання обґрунтованих рівнянь стану, експериментальних випробувань для знаходження необхідних констант до них, чисельне моделювання на базі методу скінченних елементів для крайових та різницевих методів для початкових задач, надає можливість проведення дослідження процесів повзучості, в тому числі й у технологічних задачах механіки.

1.6 Висновки за розділом

У розділі надано огляд наукових джерел за темою дисертаційної роботи. Розглянуто фізично нелінійні процеси, увагу зосереджено на випадку анізотропії властивостей повзучості та пошкоджуваності, короткочасного деформування,

технологічних задачах механіки виробництва листових матеріалів. Виявлено найбільш придатні для подальшого застосування форми рівнянь стану та метод розрахунку, яким є метод скінченних елементів (МСЕ) у поєднанні з чисельним методом інтегрування за часом. Знайдено шлях, яким встановлені за даними наукових публікацій чи прямого експериментального визначення фактичні особливості процесів деформування з урахуванням анізотропії властивостей можуть бути описані у визначальних рівняннях. Розділ містить формулювання теми та напрямків досліджень, які виконано в дисертаційній роботі.

РОЗДІЛ 2

РІВНЯННЯ СТАНУ ДЛЯ ВИПАДКУ ОРТОТРОПНОЇ ПОВЗУЧОСТІ ТА ПОШКОДЖУВАНOSTІ МАТЕРІАЛІВ

Змістом розділу є розроблення рівнянь стану, які застосовуються до опису ортотропної повзучості матеріалів, що супроводжується накопиченням прихованої пошкоджуваності. Розглянуто варіант рівнянь, які описують ділянку неусталеної повзучості. Для випадку періодичного навантаження отримано вирази для рівнянь стану та кінетичного рівняння для параметру пошкоджуваності при простому та складному напруженому стані. Для зразків зі сталі 3 отримано коефіцієнти рівнянь повзучості, надано порівняння розрахункових та експериментальних результатів.

2.1 Рівняння стану та пошкоджуваності матеріалів з властивостями ортотропії повзучості

Надамо опис рівнянь стану для однорідного матеріалу з ізотропією властивостей пружності та пластичності та ортотропними (транверсально - ізотропними) властивостями повзучості. Розглядаємо випадок малих деформацій. Для повної деформації $\underline{\varepsilon}$ приймаємо гіпотезу адитивності її складових: пружної $\underline{e}$ та незворотної деформації $\underline{\varepsilon}^{in}$

$$\underline{\varepsilon} = \underline{e} + \underline{\varepsilon}^{in}. \quad (2.1)$$

У загальному випадку, коли початкове навантаження є таким, що другий інваріант тензору напружень σ_I (інтенсивність напружень за Мізесом) перевищує межу плинності [19], незворотна деформація $\underline{\varepsilon}^{in}$ складається з деформації пластичності $\underline{\varepsilon}^p$ та деформації повзучості $\underline{c}$ [19]

$$\underline{\varepsilon}^{in} = \underline{\varepsilon}^p + \underline{c}. \quad (2.2)$$

Розглядаємо адіабатичні процеси при незмінних температурах. При цьому всі основні невідомі - вектори напружень $\underline{\sigma}$, деформацій $\underline{\varepsilon}$, $\underline{\varepsilon}^{in}$, $\underline{e}$, $\underline{\varepsilon}^p$, переміщень $\underline{u}$ - є функціями, що визначені при заданій температурі.

Для визначення пластичних деформацій застосуємо теорію інкрементального типу - теорію плинності з ізотропним зміцненням [21]. Використаємо умову пластичності Губера-Мізеса

$$f(\sigma_{ij}) = \frac{3}{2} s_{ij} s_{ij} - [\Phi(\int d\bar{p}_i)]^2, \quad (2.3)$$

де $s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_{ii}$ - компоненти девіатора тензору напружень, $\int d\bar{p}_i$ - параметр Удквіста, та інтенсивність деформацій Мізеса: $p_i = \Phi(\int d\bar{p}_i)$

В цьому випадку компоненти приростів пластичних деформацій визначаються таким чином:

$$d\varepsilon_{ij}^p = \frac{3}{2} \frac{d\bar{p}_i}{\sigma_i} s_{ij}. \quad (2.4)$$

Далі розглянемо визначальні співвідношення повзучості. Використовуємо тензорні співвідношення інкрементальної теорії повзучості [21]. Використовуємо визначальні тензорно-лінійні рівняння для матеріалів з анізотропією властивостей повзучості та пошкоджуваності. Рівняння формулюємо в головних осях симетрії повзучості і пошкоджуваності анізотропного тіла. Обмежимося випадком двовимірних задач теорії повзучості. Розглядаємо плоский напружений стан з векторами напружень $\underline{\sigma} = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12})^T$ та швидкостей деформацій повзучості $\underline{\dot{\varepsilon}} = (\dot{\varepsilon}_{11}, \dot{\varepsilon}_{22}, 2\dot{\varepsilon}_{12})^T$.

По-перше розглянемо визначальні співвідношення для закону повзучості. Зв'язок між компонентами вектору деформацій повзучості та напружень приймаємо у вигляді за умов його модифікації для застосування закону зміцнення (за термінологію роботи [19] – закону у формі добутку) [110, 149, 209]:

$$\dot{\underline{\epsilon}} = c_{vM}^{-\alpha} \frac{\dot{D}}{\sigma_V} [B] \underline{\sigma}, \quad (2.5)$$

де $\dot{D} = \dot{D}(\sigma_V; T) = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}$ - потенціал дисипації для швидкостей деформацій повзучості;

$$[B] = \begin{bmatrix} b_{1111} & b_{1122} & 0 \\ b_{1122} & b_{2222} & 0 \\ 0 & 0 & b_{1212} \end{bmatrix} - \text{матриця, що містить матеріальні константи закону}$$

ортотропної повзучості матеріалу при двовимірному напруженому стані, при цьому b_{ijkl} – компоненти тензору, які містять властивості повзучості матеріалу.

$b_{1122} = -0.5 b_{1111}$ [МПа];

$$c_{vM} = \sqrt{\frac{2}{3} c_{ij} c_{ij}} - \text{інтенсивність деформацій повзучості; } \alpha - \text{матеріальна}$$

константа закону зміцнення;

$\sigma_V = \underline{\sigma}^T [B] \underline{\sigma}$ - еквівалентне напруження, яке є спільним інваріантом тензорів напружень та матеріальних констант, $\sigma_V = (b_{1111} \sigma_{11}^2 + 2b_{1122} \sigma_{11} \sigma_{22} + b_{2222} \sigma_{22}^2 + 4b_{1212} \sigma_{12}^2)^{1/2}$ [149].

Потенціал повзучості приймаємо у формі $D = \sigma_V^{n+1}$, де n – значення степені у законі повзучості. При цьому отримуємо узагальнення закону зміцнення (закону первісної повзучості), який є перевіреним для ізотропних та трансверсально-ізотропних матеріалів [19, 209]

$$\dot{\underline{\epsilon}} = c_{vM}^{-\alpha} \sigma_V^{n-1} [B] \underline{\sigma}. \quad (2.6)$$

Як відомо [22], значення матеріальних констант, що входять до співвідношення (2.6), визначаються за експериментальними даними. Застосовуються результати досліджень з одновісної повзучості зразків, що їх вирізано з листового матеріалу. При цьому вже відпрацьованою є методика, згідно з якою визначаються напрямки у сталевому листі, в яких вирізають зразки. Це 0° , 90° та 45° відносно до напрямку прокатки [209].

Наведемо результати, що їх отримано після статистичної обробки даних проведених в роботі експериментальних досліджень з повзучості зразків зі сталі 3.

Аналіз графіків показує, що залежність деформації від часу є характерною для першої ділянки повзучості, чи неусталеної повзучості. Відомо [22], що при цьому найкращі результати з опису експериментальних кривих надає застосування гіпотези зміцнення

$$\dot{c}_i = B_i c_i^{-\alpha_i} \sigma^{n_i}, \quad (2.7)$$

де індексом i , $i=1,2,3$ позначено напрямки орієнтації зразку: 1 відповідає куту до напрямку прокатки $\varphi = 0^\circ$, 2 - $\varphi = 90^\circ$, 3 - $\varphi = 45^\circ$; B_i , n_i , α_i - константи, що визначаються експериментально. За аналізом експериментальних кривих приймаємо: $n_i = n$, $\alpha_i = \alpha$, $i=1,2,3$. Визначення констант ефективно проводити для проінтегрованого співвідношення (2.7)

$$c_i = b_i \sigma^m t^k, \quad (2.8)$$

де $b_i = ((\alpha+1)B_i)^{\frac{1}{\alpha+1}}$, $i=1,2,3$, $m = \frac{n}{\alpha+1}$, $k = \frac{1}{\alpha+1}$.

Обробка експериментальних даних надає можливість визначити значення констант b_i , m , k . Для цього, по-перше, розглядають дані, отримані в експериментах з $\varphi = 0^\circ$ (рис. 4.8). З трьох кривих повзучості, отриманих в дослідках з трьома різними значеннями напруження σ_j , визначають три пари експериментальних даних (c_j, t_j) , $j = 1,2,3$. За розв'язком системи алгебраїчних рівнянь

$$c_j = b_1 \sigma_j^m t_j^k \quad (2.9)$$

визначають значення констант b_1 , m , k , де b_1 – константа у рівнянні неусталеної повзучості, що відноситься до першого напрямку $\varphi = 0^\circ$. Далі, за відповідними кривими, одержаними у двох інших напрямках $\varphi = 90^\circ$ та $\varphi = 45^\circ$, визначають значення констант b_2 та b_3 .

Далі проінтегруємо залежності (2.6) та представимо їх у такому вигляді:

$$\underline{c} = b_{1111}^{\frac{m+1}{2}} \sigma_V^{m-1} [\bar{B}] t^k, \quad (2.10)$$

$$\text{де } [\bar{B}] = \begin{bmatrix} 1 & \beta_{12} & 0 \\ \beta_{12} & \beta_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 4\beta \end{bmatrix},$$

$$\beta_{12} = -\frac{1}{2}b_{1111}, \beta_{22} = \frac{b_{2222}}{b_{1111}}, 4\beta = \frac{b_{1212}}{b_{1111}}.$$

Зіставлення співвідношень (2.9) з рівняннями стану (2.10) надає можливість визначення компонентів тензору властивостей повзучості матеріалу b_{ijkl} . Для напрямків 1 и 2, в яких розтяг зразків співпадає з напрямками головних осей симетрії, отримаємо

$$b_{1111} = b_1^{\frac{2}{m+1}}, b_{2222} = b_2^{\frac{2}{m+1}}. \quad (2.11)$$

Для напрямку 3, де $\varphi = 45^\circ$ та $(\cos\varphi = \sin\varphi = \frac{\sqrt{2}}{2})$, компоненти вектору напружень обчислюються як [210]

$$\sigma_{11} = \frac{1}{2}\sigma_3, \sigma_{22} = \frac{1}{2}\sigma_3, \sigma_{12} = \frac{1}{2}\sigma_3,$$

а еквівалентне напруження $\sigma_v = \sigma_3 \left(\frac{1}{4}(1 + 2\beta_{12} + \beta_{22} + 4\beta) \right)^{\frac{1}{2}}$. З урахуванням цього визначаємо

$$\beta = \frac{1}{4} \left[\frac{1}{\cos^4(\pi/4)} (b_3/b_1)^{\frac{2}{m+1}} - (b_2/b_1)^{\frac{2}{m+1}} \right] \text{ та } b_{1212} = 4\beta b_{1111}. \quad (2.12)$$

Після цього з застосуванням залежностей

$$\tilde{B} = \frac{\left(b_{1111}^{\frac{m+1}{2}} \right)^{\alpha+1}}{\alpha+1}, n = m(\alpha+1), \alpha = \frac{1}{k} - 1 \quad (2.13)$$

виконується зворотний перерахунок констант, що входять до співвідношень типу (2.6). Остаточно отримуємо

$$\dot{\underline{\epsilon}} = \tilde{B} c_{vM}^{-\alpha} \sigma_V^{n-1} [\bar{B}] \underline{\sigma}. \quad (2.14)$$

В дослідженнях з деформування зразків зі сталі 3 було визначено (розділ 4.1), що вони виявляють властивості неусталеної повзучості. Далі наведемо значення констант матеріалу, що отримані після обробки експериментальних даних.

Розглядалися криві 1-ї стадії повзучості, що було отримано у експериментах при трьох значеннях напружень на зразках, вирізаних у трьох напрямках: $0^\circ(1)$, $90^\circ(2)$ та $45^\circ(3)$ відносно до напрямку прокатки. Обробкою кривих з застосуванням співвідношень (2.9) було отримано такі значення констант повзучості:

$$m=18.305, k=0.1887; ((\alpha+1)\tilde{B})^{\frac{1}{\alpha+1}} = b_1 = 3.166 \cdot 10^{-31} (10 \text{ МПа})^{-m}/\text{год}, \\ b_2=0.75 b_1, b_3=0.42 b_1, n=96.99, \alpha=4.3. \quad (2.15)$$

Також для матеріалу, що розглядається, за формулами (2.11), (2.12) отримано значення компонентів тензору b_{ijkl}

$$b_{1111} = 6.9 \cdot 10^{-4}, b_{1122} = -3.45 \cdot 10^{-4}, b_{2222} = 6.7 \cdot 10^{-4}, b_{1212} = 1.85 \cdot 10^{-4}, (10 \text{ МПа})^{-2m/m+1}/(\text{год})^{2/m+1}.$$

Отримані значення констант повзучості матеріалу було застосовано до побудови кривих повзучості та подальшого порівняння їх з експериментальними, які наведені у 4-му розділі (рис. 4.7-4.9). У зв'язку з тим, що за аналізом експериментальних даних було встановлено, що 95% деформації зразки набувають на першій ділянці, ділянці неусталеної повзучості, а після цього повзучість практично припиняється, до обробки залучались дані лише за перші 0.5 години.

На рис. 2.1 наведено криві повзучості зразків, що вирізані вздовж прокатки при напруженні 378.7 МПа (крива 1), 366.8 МПа (крива 2) та 352.3 МПа (крива 3).

Точками позначено експериментальні дані, розрахункові надано суцільними лініями. Обробку дослідних даних виконано за співвідношеннями (2.9), $i=1$.

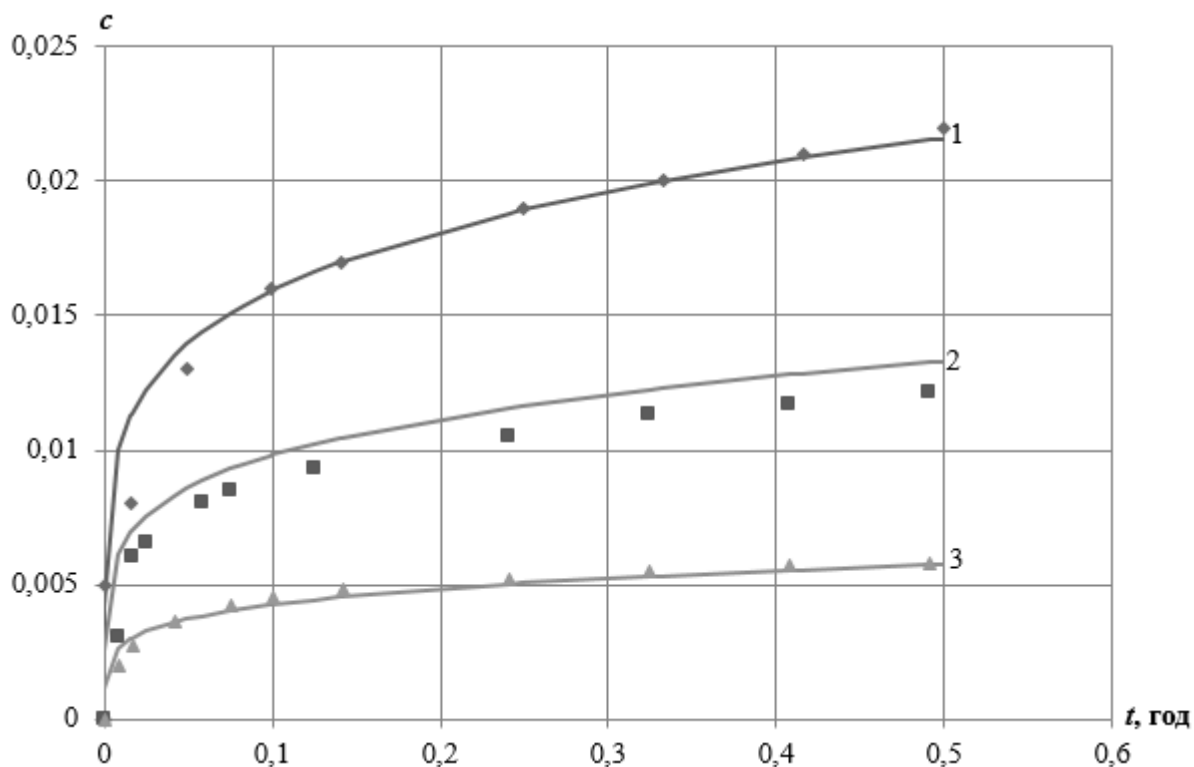


Рис. 2.1. Порівняння чисельних та експериментальних кривих повзучості (зразки, вирізані вздовж прокатки)

Порівняння чисельних та експериментальних результатів, що наведені на рис. 2.1, показує, що запропоноване рівняння (2.9) цілком задовільно надає опис даних повзучості при розтязі. Найбільша відміна є для кривої 2, де різниця між розрахунковими та експериментальними даними не перевершує 15%.

Після отримання значень констант повзучості для рівняння (2.14) було виконано порівняння даних для всіх варіантів. Рис. (2.2)-(2.4) містять такі дані для трьох значень напружень 378.7 МПа, 366.8 МПа та 352.3 МПа відповідно. Тут також точками позначено експериментальні дані, розрахункові надано суцільними лініями, крива 1 відповідає напрямку 1 (вздовж прокатки), крива 2 – 2 (поперек), крива 3 – 3 під кутом 45° до напрямку прокатки.

За аналізом побудованих кривих робимо висновок, що отримані залежності цілком задовільно описують дані експериментальних досліджень з повзучості у

всіх трьох напрямках, відмінність даних не перевершує 15%, причому найгірша відповідність має місце для напружень 366.8 МПа (зразки, вирізані у 1-му напрямі) та 352.3 МПа (зразки, вирізані у 2-му напрямі). Такі відмінності вважаються прийнятними при обробці даних з анізотропними властивостями повзучості [211, 22], та тому отримані значення констант матеріалу можуть бути застосовані у подальших розрахунках.

Як відомо, повзучість матеріалу супроводжується зростанням дефектів кристалічної решітки, яке на макроскопічному рівні описується параметром, чи мірою пошкоджуваності [19, 22, 115]. Як було відмічено у першому розділі, для матеріалів, які характеризуються анізотропними властивостями повзучості та викликаного нею прихованого руйнування, обґрунтованим є застосування тензорної міри пошкоджуваності.

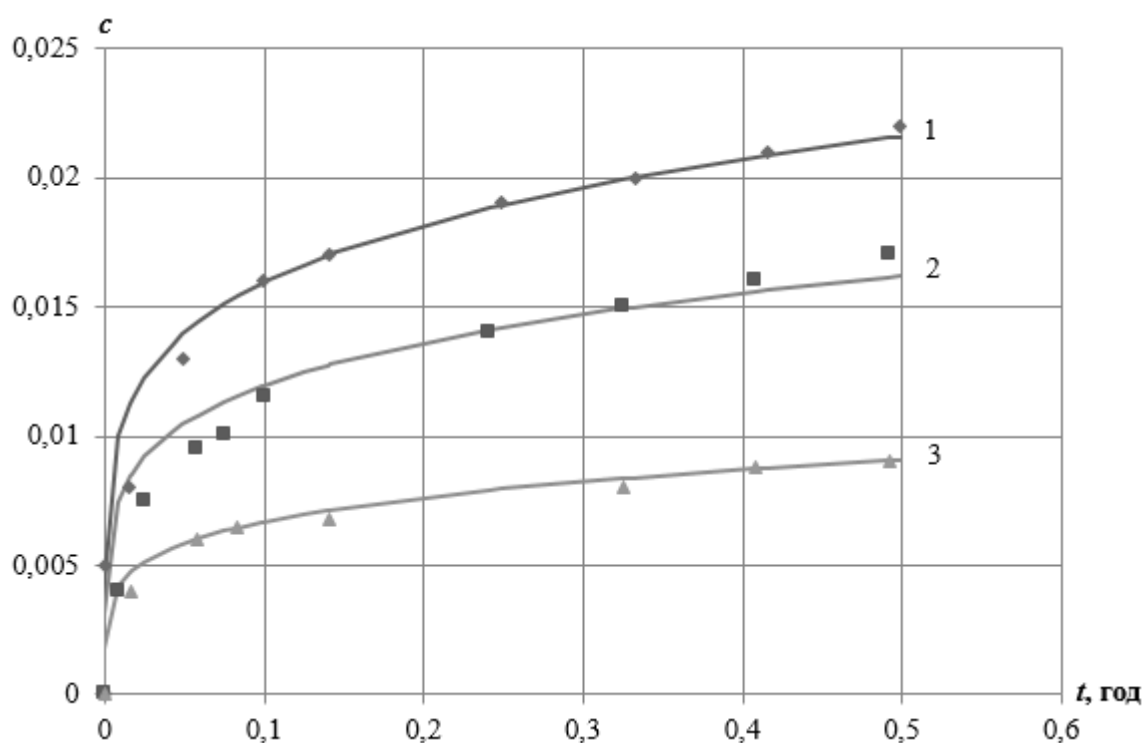


Рис. 2.2. Порівняння чисельних та експериментальних кривих повзучості (зразки, вирізані у трьох напрямках при напруженні 378.7 МПа)

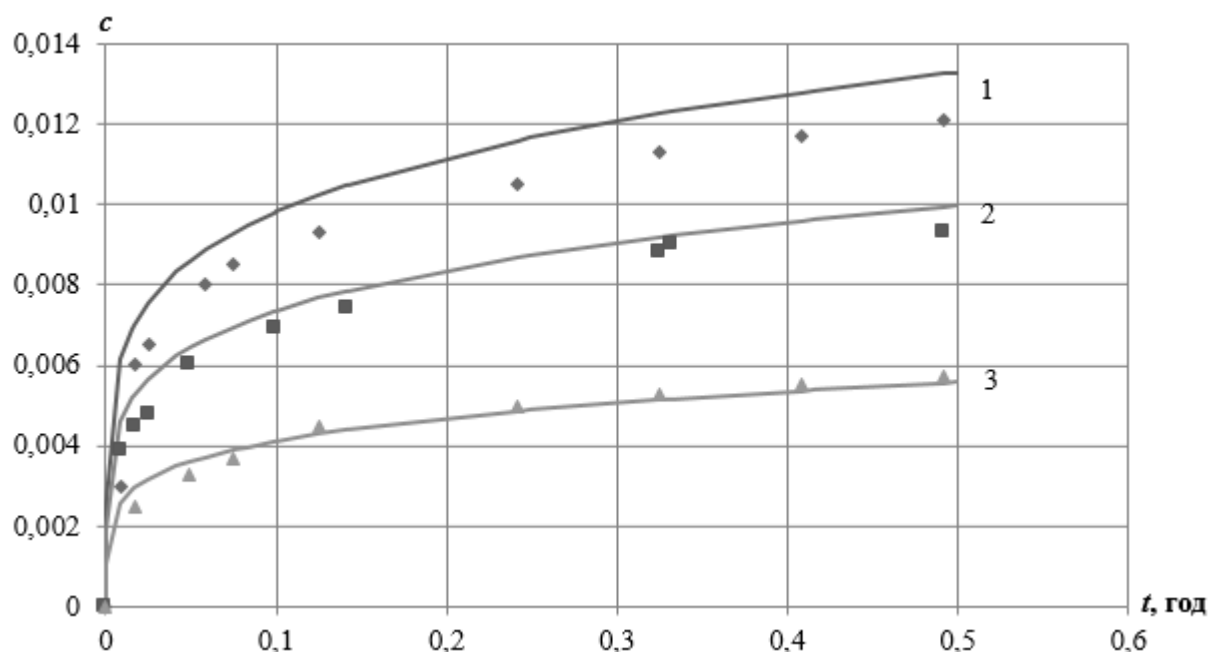


Рис. 2.3. Порівняння чисельних та експериментальних кривих повзучості (зразки, вирізані у трьох напрямках при напруженні 366.8 МПа)

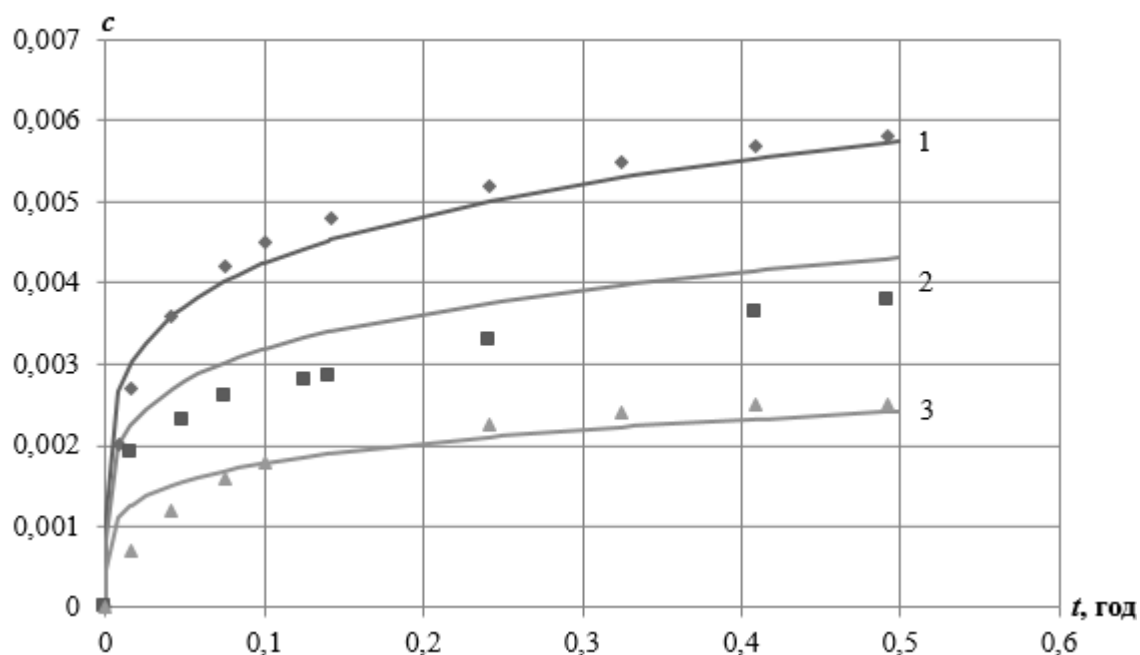


Рис. 2.4. Порівняння чисельних та експериментальних кривих повзучості (зразки, вирізані у трьох напрямках при напруженні 352.3 МПа)

Пошкоджуваність при повзучості опишемо тензором другого рангу ω_{ij} . Надалі припустимо, що тензору пошкоджуваності ω_{ij} , як внутрішньому параметру стану, відповідає асоційований з ним тензор R_{ij} - потік термодинамічних

напружень середовища з пошкодженнями, що викликані повзучістю матеріалу [115]. Еквівалентне напруження σ_v є спільним інваріантом тензора напружень σ_{ij} з тензором b_{ijkl}

$$\sigma_v = \sqrt{b_{ijkl} \sigma_{ij} \sigma_{kl}}. \quad (2.16)$$

Для опису накопичення пошкоджень внаслідок прихованого руйнування вводиться еквівалентне напруження σ_D . Його визначаємо через спільний інваріант тензора R_{ij} з матеріальним тензором d_{ijkl} [149]

$$\sigma_D = \sqrt{d_{ijkl} R_{ij} R_{kl}}. \quad (2.17)$$

Для переходу до спільного опису накопичення деформацій повзучості та пошкоджуваності, що виникає в її наслідок, представимо потенціал дисипації для швидкостей деформацій повзучості D не тільки еквівалентним напруженням для заданої температури, але й позитивною функцією структурного параметру [115] – міри пошкоджуваності η

$$\dot{D} = \dot{D}(\sigma_v, \eta; T) = \sigma_{ij} \dot{c}_{ij}. \quad (2.18)$$

Потенціал дисипації внаслідок пошкоджуваності при повзучості Ω приймаємо в формі такої ж залежності від відповідного еквівалентного напруження σ_D [19]

$$\dot{\Omega} = \dot{\Omega}(\sigma_D, \eta; T) = \sigma_{ij} \dot{\omega}_{ij}. \quad (2.19)$$

Тоді кінетичні рівняння для швидкостей деформацій повзучості і пошкоджуваності з використанням градієнтального закону матимуть вигляд

$$\dot{c}_{ij} = \dot{\lambda} \frac{\partial \dot{D}}{\partial \sigma_{ij}}, \dot{\omega}_{ij} = \dot{\lambda}_* \frac{\partial \dot{\Omega}}{\partial R_{ij}}, \quad (2.20)$$

де скалярні множники $\dot{\lambda}, \dot{\lambda}_*$ визначають з рівностей (2.19)-(2.20) після конкретизації виду кожного з потенціалів.

На похідні від потенціалів $\dot{D}, \dot{\Omega}$ відповідно до другого закону термодинаміки, вираженого нерівністю Клаузіуса-Дюгема [19], мають бути накладені обмеження

$$\dot{D} + \dot{\Omega} \geq 0, \dot{D}(\sigma_v, \eta; T) \geq 0, \dot{\Omega} = \dot{\Omega}(\sigma_D, \eta; T) \geq 0. \quad (2.21)$$

Далі, як й прийнято у континуальній механіці пошкоджуваності [19], [115], формулюємо критерій руйнування в інваріантній скалярній формі. Розглядаємо частину дисипації внаслідок пошкоджуваності, а також її граничне значення Ω_* в момент закінчення прихованого руйнування t_*

$$\Omega(t) = \int_0^t \dot{\Omega} dt, \Omega_* = \int_0^{t_*} \dot{\Omega} dt. \quad (2.22)$$

Граничне значення дисипації внаслідок пошкоджуваності матеріалу при повзучості є характеристикою матеріалу [149]. Як скалярну міру для критерію руйнування приймають величину

$$\eta(t) = \Omega(t) / \Omega_*, \quad (2.23)$$

а критерій руйнування записують у вигляді $\eta(t_*) = 1$ [149].

На підставі термодинамічних припущень для матеріалів з анізотропією властивостей повзучості та пошкоджуваності, отримуємо такі рівняння стану:

$$\dot{c}_{ij} = \frac{\dot{D}}{\sigma_v} \left(\frac{b_{ijkl} \sigma_{kl}}{\sigma_v} \right) \dot{c}_{vM}^{-\alpha}, \quad \dot{\omega}_{ij} = \frac{\dot{\eta}}{\sigma_D} \left(\frac{d_{ijkl} R_{kl}}{\sigma_D} \right), \quad (2.24)$$

де $\dot{\eta} = R_{ij} \dot{\omega}_{ij}$ - потужність дисипації внаслідок пошкоджуваності, віднесена до граничного значення дисипації Ω_* в момент руйнування (міри пошкоджуваності, $0 \leq \eta \leq 1$).

Застосуємо принцип еквівалентності деформацій [19]. Згідно з ним, для того, щоб встановити закон повзучості в матеріалі, що пошкоджується, необхідно в рівняннях стану (2.24) для деформацій повзучості в матеріалі, що не пошкоджується, замінити тензор напружень на тензор напружень, асоційований з пошкоджуваністю. Вплив тензора пошкоджуваності на ефективні напруження врахуємо, використовуючи таку рівність:

$$R_{ij} = \sigma_{ij} / (1 - \eta), \quad (2.25)$$

де $\dot{\eta} = R_{ij} \dot{\omega}_{ij}$, ($0 \leq \eta \leq 1$), $\eta(t_*) = 1$.

За зробленими припущеннями та при збереженні вимоги (2.21) потенціали записують як

$$\dot{D}(\sigma_v, \eta; T) = \dot{D}(R_v), \dot{\Omega}(\sigma_{*v}, \eta, T) = \dot{\Omega}(R_D), \quad (2.26)$$

де $R_v = \sigma_v / (1 - \eta)$, $R_D = \sigma_D / (1 - \eta)$ - інваріанти ефективних напружень.

Як й в роботах [149, 209], вважаємо, що головні напрямки анізотропії властивостей повзучості матеріалу є незмінними до самого руйнування, а поверхні потенціалів дисипації в просторі напружень розширюються з часом пропорційно одному параметру, пов'язаному з прийнятою мірою пошкодження η .

В роботі рівняння стану (2.24) застосуємо до ортотропних (трансверсально – ізотропних) при повзучості матеріалів. Потенціали дисипації (2.26) приймаємо у вигляді степеневих функцій від відповідних інваріантів напружень [19]

$$\dot{D} = R_v^p, \quad \dot{\eta} = R_D^s / (1 - \eta)^s, \quad (2.27)$$

де p, s – константи, що визначаються за даними експериментів на повзучість до моменту руйнування.

Остаточно рівняння стану повзучості трансверсально-ізотропних матеріалів з урахуванням пошкоджуваності в векторно-матричній формі запишуться у такій формі:

$$\dot{\underline{c}} = \tilde{B} \frac{\bar{\sigma}_v^{n-1}}{(1-\eta)^n} [\bar{B}] c_{vM}^{-\alpha} \underline{\sigma}, \quad \dot{\underline{\omega}} = d_{1111}^{p/2} \frac{\sigma_D^{p-2}}{(1-\eta)^{p+s-1}} [\bar{D}] \underline{\sigma}, \quad (2.28)$$

$$\dot{\eta} = d_{1111}^{p/2} \frac{\sigma_D^p}{(1-\eta)^{p+s}}, \quad \eta(0) = 0, \quad \eta(t_*) = 1,$$

де $\dot{\underline{c}} = (\dot{c}_{11}, \dot{c}_{22}, 2\dot{c}_{12})^T$, $\underline{\sigma} = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12})^T$, $\dot{\underline{\omega}} = (\dot{\omega}_{11}, \dot{\omega}_{22}, 2\dot{\omega}_{12})^T$ - вектори швидкостей деформацій повзучості, напружень і швидкостей параметра пошкоджуваності відповідно; до матриці $[\bar{D}]$ входять компоненти тензору, що містять властивості пошкоджуваності матеріалу d_{ijkl}

$$[\bar{D}] = \begin{vmatrix} 1 & \delta_{12} & 0 \\ \delta_{21} & \delta_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 4\delta \end{vmatrix}, \quad \delta_{12} = -\frac{1}{2} d_{1111}, \quad \delta_{22} = \frac{d_{2222}}{d_{1111}}, \quad 4\delta = \frac{d_{1212}}{d_{1111}}.$$

2.2 Повзучість та пошкоджуваність при циклічному навантаженні

Далі використовуємо тензори інкрементальної теорії повзучості та континуальної механіки пошкоджуваності (2.28), які за допомогою методу асимптотичних розкладань по малому параметру і подальшого усереднення на періоді зміни навантаження перетворимо в співвідношення динамічної повзучості анізотропних матеріалів. Застосуємо підходи, запропоновані в роботах [212, 171].

По-перше, розглянемо випадок простого напруженого стану, коли на точку (або зразок) діє комбіноване циклічне навантаження $\sigma = \sigma^0 + \sigma^1$ при одночасній дії сталого напруження σ^0 , напруження σ^1 , що змінюється із циклічною частотою $f_1 = 1/T$ за період робочого циклу T ($f_1 \ll 1$ Гц).

У загальному випадку напруження σ^1 визначається параметрами експлуатаційного циклу з амплітудою, що повільно наростає та зменшується.

Представляючи напруження σ^1 періодичним рядом Фур'є з коефіцієнтами a_k та b_k ($k=1, 2, \dots$)

$$\sigma^1 = \sigma^{\max} \left(\sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos\left(\frac{2\pi k}{T}t\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi k}{T}t\right) \right) \right) = \sum_{k=1}^{\infty} \sigma^{ak} \sin\left(\frac{2\pi k}{T}t + \beta_k\right),$$

$$\sigma^{ak} = \sqrt{(\sigma^{\max} a_k)^2 + (\sigma^{\max} b_k)^2}, \quad \beta_k = \arctg(a_k / b_k),$$

для комбінованого навантаження закон циклічної зміни напруження запишемо в такому вигляді:

$$\sigma = \sigma^0 + \sigma^1 = \sigma^0 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} M_k \sin\left(\frac{2\pi k}{T}t + \beta_k\right) \right), \quad (2.29)$$

де $M_k = \frac{\sigma^{ak}}{\sigma^0}$ - коефіцієнти амплітуд в процесі циклічної повзучості, $\sigma^0 \neq 0$.

Далі використовуємо тензори інкрементальної теорії повзучості та континуальної механіки пошкоджуваності (2.28), які за допомогою методу асимптотичних розкладань по малому параметру і подальшого усереднення на періоді зміни навантаження перетворимо в співвідношення циклічної повзучості анізотропних матеріалів. Перепишемо рівняння (2.28) для простого напруженого стану

$$\dot{c} = \tilde{B} \frac{1}{(1-\eta)^n} c^{-\alpha} \sigma^n, \quad (2.30)$$

$$\dot{\eta} = d_{1111}^{p/2} \frac{\sigma^p}{(1-\eta)^{p+s}}, \quad \eta(0)=0, \quad \eta(t_*)=1.$$

Скористаємося запропонованим у роботах [212, 213] методом багатьох масштабів та асимптотичними розкладаннями основних невідомих по малому параметру $\mu = T/t$.

Застосуємо цей підхід до рівнянь (2.30). Представимо у вигляді асимптотичних розкладань по ступеням малого параметру μ процеси росту деформацій повзучості та накопичення пошкоджуваності в двох масштабах часу (повільному і швидкому $\xi = t/T$, $\tau = t/\mu$)

$$c \cong c^0(t) + \mu c^1(\xi) + \dots, \quad \eta \cong \eta^0(t) + \mu \eta^1(\xi) + \dots, \quad (2.31)$$

де $c^0(t)$, $\eta^0(t)$, $c^1(\xi)$, $\eta^1(\xi)$ - функції, що відповідають основному процесу повзучості з пошкоджуваністю в повільному (0) і швидкому (1) масштабах часу.

Обмежимося лише першим наближенням, вважаючи в (2.31) члени з вищими ступенями параметра μ занадто малими, причому

$$(c^0 + \mu c^1)^\alpha = c^0 \left(1 + \mu \frac{c^1}{c^0} \right)^\alpha \cong c^0.$$

Враховуючи залежність деформації повзучості та параметра пошкоджуваності тільки від «повільного» часу [212, 171], після усереднення на періоді змінювання часу у «швидкому» масштабі отримуємо

$$\langle c^0(\xi) \rangle = \int_0^1 c^0(t) d\xi \cong c^0(t), \quad \langle c^1(\xi) \rangle = \int_0^1 c^1(\xi) d\xi \cong 0, \quad (2.32)$$

$$\langle \eta^0(\xi) \rangle = \int_0^1 \eta^0(t) d\xi \cong \eta^0(t), \quad \langle \eta^1(\xi) \rangle = \int_0^1 \eta^1(\xi) d\xi \cong 0.$$

Таким чином, використовуючи метод асимптотичних розкладань з наступним усередненням на періоді циклічного навантаження (2.32), для випадку простого напруженого стану отримаємо рівняння стану для циклічної повзучості з пошкоджуваністю для сплавів з ортотропними при повзучості властивостями

$$\dot{c} = \tilde{B} \frac{(\sigma^0)^n}{(1-\eta)^n} K(M^{(n)}) c^{-\alpha}, \quad (2.33)$$

$$\dot{\eta} = d_{1111}^{p/2} H(M^{(p)}) \frac{(\sigma^0)^p}{(1-\eta)^{p+s}}, \quad \eta(0) = 0, \quad \eta(t_*) = 1,$$

$$\text{де } K(M^{(n)}) = \int_0^1 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} M_k^{(n)} \sin(2\pi k \xi + \beta_k) \right)^n d\xi, \quad H(M^{(p)}) = \int_0^1 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} M_k^{(p)} \sin(2\pi k \xi + \beta_k) \right)^p d\xi,$$

$M^{(n)} = M^{(p)} = \frac{\sigma^{ak}}{\sigma^0}$ - коефіцієнти асиметрії циклу напружень.

Узагальнимо рівняння стану (2.33) на випадок складного напруженого стану, виходячи із традиційного для теорії повзучості постулату відповідності співвідношень між величинами напружень і швидкостей деформацій при простому напруженому стані й еквівалентних напруженнях - при складному. Тоді перше та третє рівняння формул (2.28), враховуючи (2.16), (2.17) та (2.33), перепишемо у вигляді

$$\dot{\underline{\epsilon}} = \tilde{B} \frac{(\bar{\sigma}_V^0)^{n-1}}{(1-\eta)^n} K(M^{(n)}) [\bar{B}] (c_{vM})^{-\alpha} \underline{\sigma}^0, \quad (2.34)$$

$$\dot{\eta} = d_{1111}^{p/2} H(M^{(p)}) \frac{(\sigma_D^0)^p}{(1-\eta)^{p+s}}, \quad \eta(0) = 0, \quad \eta(t_*) = 1,$$

де $c_{vM} = \sqrt{\frac{2}{3}} c_{ij} c_{ij}$ - інтенсивність деформацій повзучості;

$\sigma_V^0 = \underline{\sigma}^{0T} [B] \underline{\sigma}^0$ - еквівалентне напруження, яке є спільним інваріантом тензорів напружень та матеріальних констант;

$M^{(n)} = \frac{\sigma_V^{ak}}{\sigma_V}$, $M^{(p)} = \frac{\sigma_D^{ak}}{\sigma_D}$ - коефіцієнти асиметрії циклу напружень;

$(\sigma_V^{ak})^2 = (\underline{\sigma}^{ak})^T [\bar{B}] \underline{\sigma}^{ak}$, $(\sigma_D^{ak})^2 = (\underline{\sigma}^{ak})^T [\bar{D}] \underline{\sigma}^{ak}$ - інваріанти циклічних напружень.

Отримаємо друге рівняння формул (2.28) для випадку циклічного навантаження. Тоді підставляючи в друге рівняння (2.24) формули (2.25)-(2.27) та друге рівняння формул (2.34), остаточно отримуємо рівняння стану для циклічної повзучості з пошкоджуваністю для сплавів з ортотропними при повзучості властивостями

$$\dot{\underline{\epsilon}} = \tilde{B} \frac{(\bar{\sigma}_V^0)^{n-1}}{(1-\eta)^n} K(M^{(n)}) [\bar{B}] (c_{vM})^{-\alpha} \underline{\sigma}^0, \quad \dot{\underline{\omega}} = d_{1111}^{p/2} H(M^{(p)}) \frac{(\sigma_D^0)^{p-2}}{(1-\eta)^{p+s-1}} [\bar{D}] \underline{\sigma}^0, \quad (2.35)$$

$$\dot{\eta} = d_{1111}^{p/2} H(M^{(p)}) \frac{(\sigma_D^0)^p}{(1-\eta)^{p+s}}, \quad \eta(0) = 0, \quad \eta(t_*) = 1.$$

У випадку, коли компоненти тензору напружень будуть змінюватися за ступінчастим законом (рис. 2.5), формула (2.29) матиме вигляд

$$\begin{aligned}\underline{\sigma} &= \underline{\sigma}^0 + \underline{\sigma}^1 = \sigma^0 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} M_k \sin \left(\frac{2\pi k}{T_p} t + \beta_k \right) \right), \\ \underline{\sigma}^{ak} &= \sqrt{(\sigma^{\max} a_k)^2 + (\sigma^{\max} b_k)^2}, \quad \beta_k = \arctg(a_k / b_k), \\ a_k &= \frac{1}{\pi k} \sin \left(\frac{2T_s}{T_p} \pi k \right), \quad b_k = \frac{1}{\pi k} \left(1 - \cos \left(\frac{2T_s}{T_p} \pi k \right) \right).\end{aligned}\tag{2.36}$$

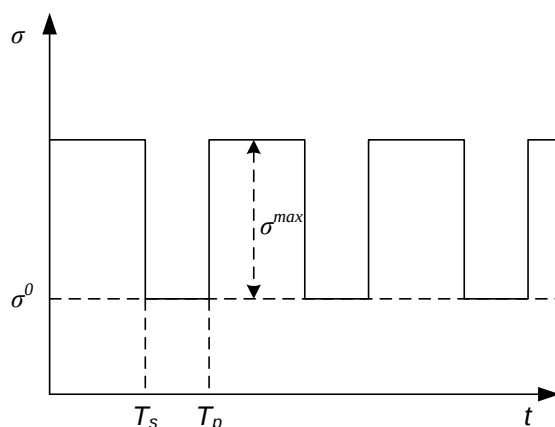


Рис. 2.5. Типовий цикл навантаження

Застосуємо отримані рівняння (2.33) та (2.36) для опису повзучості сталі 3 при періодичному навантаженні, експериментальні дослідження якого наведено у п. 4.1. Розрахунок кривих повзучості, що відповідає застосованому в експерименті циклу навантаження (рис. 4.13, $T_s = 60$ с. (0.0166 год.), $T_p = 240$ с. (0.0066 год.), 10 циклів, $\sigma^0 = 352.3$ МПа, $\sigma^{\max} = 26.4$ МПа), виконано за допомогою складеної програми на мові С. Результати розрахунків наведено на рис. 2.6. Тут крива 1 відповідає даним для зразків, що вирізані у продольному напрямку, крива 2 – у поперечному, крива 3 – під кутом 45° до напрямку прокатки. Точками позначено експериментальні дані, усереднені для трьох зразків, суцільними кривими – розрахункові.

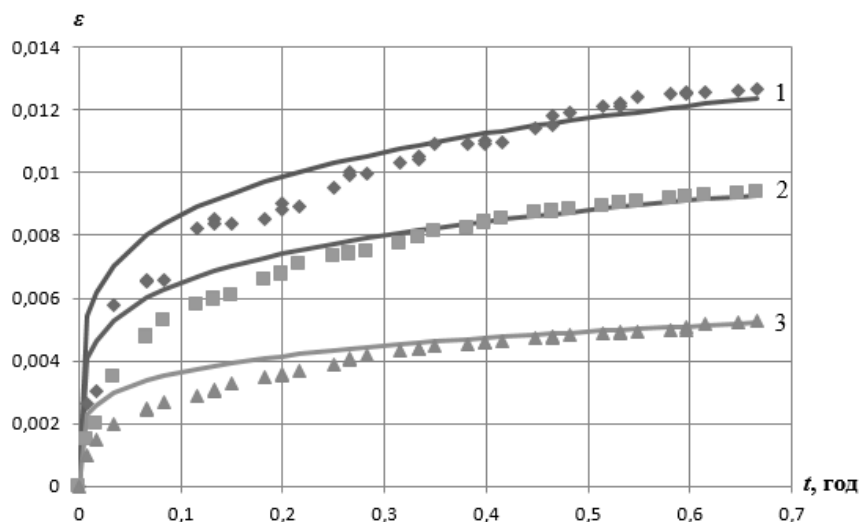


Рис. 2.6. Порівняння розрахункових та експериментальних даних

Аналіз кривих на рис. 2.6 свідчить про те, що запропоновані рівняння для опису повзучості при періодичній зміні напружень добре описують експериментально отримані криві, починаючи з 4-5 циклу. Максимальна похибка має місце для перших циклів та складає 35%. Це пояснюється тим, що для невеликої кількості (1-4) циклів навантаження, де значення параметру μ не може вважатись малим, рівняння стану застосовувати не цілком коректно. Чим більше число циклів навантаження, тим менше похибка – її значення у 4-10 циклах не перевершують 10%. З графіків видно, що для розглянутого часу повзучості застосування створеного рівняння стану є припустимим: починаючи з 5-го циклу навантаження відмінність у експериментальних та чисельних результатах є незначною.

Для ілюстрації якісного вірного оцінювання набутої деформації повзучості за допомогою співвідношень (2.33) та (2.36) наведемо порівняння розрахункових кривих при періодичному та статичному навантаженнях для напрямку поперек прокатки (рис. 2.7). Тут кривою 1 позначено дані для періодичного навантаження, що розглядається, кривою 2 – для статичного. Як видно, має місце якісна відмінність між періодичним та статичним навантаженням.

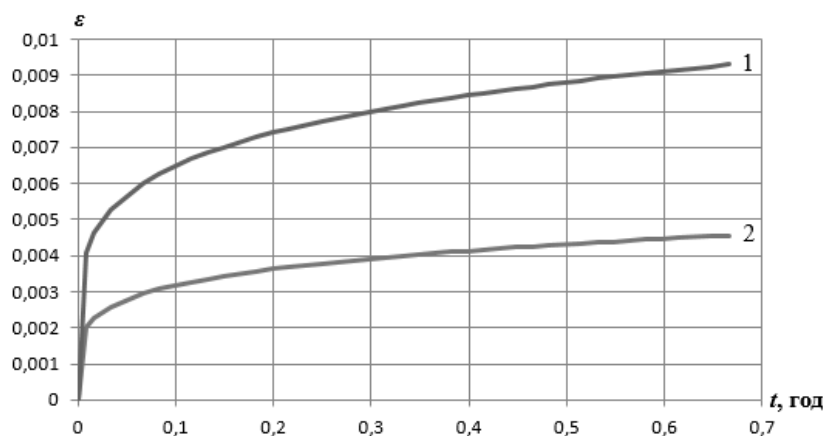


Рис. 2.7. Порівняння розрахункових даних для періодичного та статичного навантаження

2.3 Висновки за розділом

У розділі розглянуто запропоновані в роботі на основі створених О.К. Морачковським [149, 209] рівняння стану повзучості та пошкоджуваності, що її супроводжує, для матеріалів, які виявляють істотну трансверсальну ізотропію властивостей. За допомогою гіпотези зміцнення сформульовано варіант рівнянь, що описують матеріали, криві повзучості яких характеризуються переважно першою ділянкою повзучості. Проведено узагальнення отриманих рівнянь стану на випадок складного (двовісного) напруженого стану. Надано дані перевірки можливості застосування запропонованих рівнянь для опису деформування зразків зі сталі 3 при кімнатній температурі та рівнях напружень, що перевершують межу плинності, за допомогою результатів виконаних в роботі експериментальних досліджень.

З застосуванням методу двох масштабів часу та усереднення на періоді змінення напруження запропоновано нові рівняння для опису повзучості та пошкоджуваності при періодичному навантаженні та простому та двовимірному напружених станах. Достовірність результатів, що одержуються застосуванням створених рівнянь, встановлено шляхом порівняння розрахункових даних з отриманими в роботі експериментальними - кривими повзучості при періодичному навантаженні зразків зі сталі 3.

Основні результати, одержані у розділі, опубліковано у роботах [4-5, 8, 10].

РОЗДІЛ 3

МЕТОД РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПЛАСТИН З УРАХУВАННЯМ ДЕФОРМАЦІЙ ПЛАСТИЧНОСТІ ТА ПОВЗУЧОСТІ

В розділі надано математичну постановку задач повзучості при плоскому напруженому стані. Розглянуто метод та програмний засіб для розв'язання поставленої задачі, що базується на методі скінченних елементів та різницевому методі інтегрування за часом. Для оцінювання початкового пружно-пластичного стану розроблено алгоритм та програму розв'язання задачі. Проведено дослідження з оцінювання достовірності результатів.

3.1 Математична постановка задачі

Розглянемо математичну постановку двовимірної задачі теорії повзучості для області Ω , що є обмеженою кривою Γ . Застосуємо декартову систему координат x_i ($i=1,2$). Вважаємо, що на частині контуру області Γ_1 задано переміщення $u_i|_{\Gamma_1} = \tilde{u}_i$. Частину контуру Γ_2 навантажено поверхневими силами $\tau_i(x,t)$, а об'ємні сили вважаємо відсутніми. Приймаємо пружні та пластичні властивості матеріалу ізотропними, властивості повзучості – трансверсально-ізотропними, що описуються рівняннями стану (2.28). Розглядаємо випадок деформування при сталій температурі.

Застосовуємо підхід Лагранжа, розглядаємо випадок малих деформацій. Приймаємо такі позначення: $\underline{u} = \underline{u}(x_i, t)$ - вектор переміщень; $\underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon}(x_i, t)$ – тензор деформацій; $\underline{\sigma} = \underline{\sigma}(x_i, t)$ – тензор напружень, t - час. Залучаємо гіпотезу адитивності деформацій (2.1).

Записуємо основну систему рівнянь теорії повзучості для двовимірного випадку [22]

$$\sigma_{ij,j} = \gamma \ddot{u}_i; \sigma_{ij} n_j = \tau_i(x); x \in \Gamma_2,$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad x \in \Omega; \quad u_i|_{\Gamma_1} = \tilde{u}_i; \quad x \in \Gamma_1; \quad i=1,2, \\ \sigma_{ij} &= C_{ijkl}(\varepsilon_{ij} - p_{ij} - c_{ij}); \quad u(x_i, 0) = u_0(x); \quad c_{ij}(x_i, 0) = 0,\end{aligned}\tag{3.1}$$

де $n(n_1, n_2)$ позначено одиничний вектор нормалі до контуру тіла; γ - густина матеріалу.

До системи (3.1) необхідно додати рівняння стану (2.28).

Початкові умови – вектор u_0 , визначається розв'язанням системи (3.1) при початковому пружному ($p=c=0$) чи пружно-пластичному ($c=0$) напружено-деформованих станах.

Часто на практиці навантаження на границях змінюються за часом. Найпоширеніший випадок – їхнє періодичне чи циклічне змінювання. У цьому випадку, як відомо [214], найбільш ефективним є розкладання змінюваної за часом складової функції навантаження, що діє на частині контуру Γ_2 , у вигляді ряду Фур'є та представлення $t_i(x, t)$ у вигляді

$$\tau_i(x_i, t) = \tau_i^0(x_i) + \tau_i^{\max}(x_i)\Psi^{(1)}(t), \quad i=1,2,\tag{3.2}$$

де $\tau_i^0(x_i)$ - незмінна за часом складова навантаження;

$$\Psi^{(1)}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \Psi_k = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(\tilde{p}_k t + \beta_k) - \text{складова навантаження, що змінюється за}$$

часом з періодом T ;

$$\Psi_k(t) = a_k \cos\left(\frac{2\pi k}{T}t\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi k}{T}t\right);$$

$$A_k = (a_k^2 + b_k^2)^{1/2}; \quad \tilde{p}_k = \frac{2\pi k}{T}; \quad \beta_k = \arctg(a_k/b_k);$$

a_k, b_k - коефіцієнти ряду Фур'є;

$t_i^{\max}$ – амплітудні значення компонент навантаження.

Слідуючи підходам, запропонованим у роботах [212, 171], розв'язок системи (3.1) з урахуванням діючого змінюваного навантаження (3.2) є шуканим з застосуванням методу багатьох масштабів часу [215] з подальшим усередненням асимптотичних розкладань [216] на періодах змінювання навантаження. Згідно цих підходів, розв'язок системи (3.1) визначається розв'язком такої системи з

урахуванням дії тільки незмінних за часом навантажень. При цьому амплітудні значення компонентів напружено-деформованого стану, визначені дією змінюваної складової $\Psi^{(1)}$, входять до рівнянь стану.

Для визначення компонентів напружено-деформованого стану при повзучості, яка відбувається внаслідок дії сталих та періодично змінюваних навантажень, необхідно розв'язання такої системи рівнянь:

$$\begin{aligned}\sigma_{ij,j} &= 0, \quad x_i \in \Omega; \quad i=1,2 \\ \sigma_{ij} n_j &= \tau_i^0, \quad x_i \in \Gamma_2; \\ \sigma_{ij} &= C_{ijkl} (\varepsilon_{ij} - p_{ij} - c_{ij}); \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}), \quad x \in \Omega; \quad u_i|_{\Gamma_1} = \tilde{u}_i; \quad x \in \Gamma_1; \\ u(x_i, 0) &= u_0(x); \quad c_{ij}(x_i, 0) = 0.\end{aligned}\tag{3.3}$$

Рівняння стану застосуємо прийнятими у розділі 2 у вигляді (2.35).

Компоненти тензорів амплітудних напружень визначають розв'язанням такої системи ($k=1,2,\dots$):

$$\begin{aligned}\sigma_{ij,j}^{ak} &= -\gamma(\tilde{p}_k)^2 u_i^{ak}, \quad x_i \in \Omega; \\ \sigma_{ij}^{ak} n_j &= \tau_i^{\max} A_k, \quad x_i \in \Gamma_2; \\ \varepsilon_{ij}^{ak} &= \frac{1}{2} (u_{i,j}^{ak} + u_{j,i}^{ak}) = C_{ijmn} \sigma_{mn}^{ak}, \quad x_i \in \Omega; \\ u_i^{ak}(0) &= 0, \quad x_i \in \Gamma_1.\end{aligned}\tag{3.4}$$

За розв'язком системи (3.4) знаходять для кожної k -ї гармоніки компоненти тензорів амплітудних напружень, за якими визначають коефіцієнти, що входять до визначальних рівнянь (2.35).

У випадку, коли початкові напруження є такими, що інтенсивність напружень перебільшує межу плинності, для визначення початкових умов у системі (3.1) чи (3.3) є необхідним розв'язання задачі пружно-пластичного деформування тіла

$$\begin{aligned}
\sigma_{ij,j} &= 0_i; \sigma_{ij} n_j = \tau_i(x); x \in \Gamma_2, \\
\varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad x \in \Omega; u_i|_{\Gamma_1} = \tilde{u}_i; x \in \Gamma_1; i = 1, 2, \\
\sigma_{ij} &= C_{ijkl}(\varepsilon_{ij} - p_{ij}); \\
f(\sigma_{ij}) &= \frac{3}{2} s_{ij} s_{ij} - [\Phi(\int d\bar{p}_i)]^2; p_i = \Phi(\int d\bar{p}_i); dp_{ij} = \frac{3}{2} \frac{d\bar{p}_i}{\sigma_i} s_{ij}.
\end{aligned} \tag{3.5}$$

3.2 Розв'язання задачі методом скінченних елементів

3.2.1 Скінченноелементний алгоритм розв'язання двовимірної задачі теорії повзучості. Як метод для пошуку розв'язків систем (3.3), (3.4), (3.5) в роботі застосовано метод скінченних елементів (МСЕ). Як відомо, цей метод потребує варіаційної постановки задач, яка здійснюється застосуванням принципу мінімуму повної потужності [19, 106] для задач повзучості чи повної енергії [210] для інших.

Основному процесу повзучості (3.3) ставимо у відповідність таке варіаційне рівняння [22]:

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} d\Omega + \int_{\Gamma_1} \tau_i \dot{u}_i d\Gamma = 0. \tag{3.6}$$

Рухам у «швидкому» часі, які описуються системою (3.4), ставимо у відповідність варіаційне рівняння

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij}^{ak} \varepsilon_{ij}^{ak} d\Omega + \int_{\Gamma} \tau_i^{\max} A_k u_i^{ak} d\Gamma + \int_{\Omega} \mu_i^{ak} p_k^2 d\Omega = 0. \tag{3.7}$$

Варіаційні рівняння (3.6) - (3.7) доповнюються кінематичними та фізичними рівняннями з систем (3.3), (2.35) відповідно.

Застосовуючи основні підходи МСЕ, приходимо до системи диференціальних рівнянь [202] для скінченного елемента

$$\left(\int_V [B]^T [C] [B] dV \right) \{\dot{u}\} = \int_V [B]^T [C] \{\dot{\varepsilon}\} dV + \int_{S_1} [N]^T \{\dot{\tau}\} dS, \quad (3.8)$$

$$\{\dot{\sigma}\} = [C] \{\dot{\varepsilon}\} - \{\dot{c}\}, \quad (3.9)$$

$$\{\dot{\varepsilon}\} = [B] \{\dot{u}\}, \quad (3.10)$$

де $[B]$ – матриця деформацій елемента;

$[C]$ – матриця, що містить пружні характеристики матеріалу (матриця пружності);

$\{u\}$ – вектор вузлових переміщень елемента;

$\{\sigma\}$, $\{\varepsilon\}$ – вектори напружень та деформацій в елементі;

$[N]$ – матриця, що виражає за допомогою функцій форми значення переміщення будь-якої точки елемента через вузлові;

τ – поверхневе навантаження.

Для аналізу вимушених коливань, як відомо [192], розв'язуємо таку систему рівнянь:

$$\left(\int_V [B]^T [C] [B] dV \right) \{u\} = \int_{S_1} [N]^T \{\tau\} dS - \int_V [N]^T \{\gamma \ddot{u}\} dV, \quad (3.11)$$

$$\{\sigma\} = [C] \{\varepsilon\}, \quad (3.12)$$

$$\{\varepsilon\} = [B] \{u\}. \quad (3.13)$$

Повну систему рівнянь для всієї моделі отримують шляхом збирання матриці жорсткості системи $[K]$ з матриць жорсткостей скінченних елементів та отримання глобального вектору вузлових зусиль $\{F\}$ [217]. Для задач повзучості

$$[K] \{\dot{U}\} = \{\dot{F}\} + \{\dot{F}^c\}, \quad (3.14)$$

де $\{U\}$ – глобальний вектор вузлових переміщень; $\{F^c\}$ – сили, обумовлені деформаціями повзучості.

Розв'язок задачі вимушених коливань для кожної складової полігармонічного навантаження визначається системою рівнянь, одержаних з співвідношень (2.20):

$$[K - \Omega^2 M] \{U^a\} = \{F^a\}, \quad (3.15)$$

де $\{U^a\}$, $\{F^a\}$ – глобальні вектори амплітудних значень вузлових переміщень та сил; Ω – частота вимушених коливань для кожної гармоніки; $[M]$ – матриця мас системи, що одержується аналогічно її матриці жорсткості $[K]$.

Розглянуту скінченноелементну постановку задачі реалізовано в програмному комплексі *FEM CREEP* [3, 202], який був залучений до розрахунків. У комплексі застосовано трикутний трьохвузловий скінченний елемент з лінійною апроксимацією переміщень за елементом.

Отримані системи диференціальних рівнянь типу (3.11)-(3.13) розв'язуються методом прогнозу-корекції третього порядку чи методом Ейлера [214]. Згідно загально прийнятій постановці задачі [191, 57], при інтегруванні фізично нелінійних задач повзучості на кожному кроці інтегрування за часом за отриманим на попередньому кроці вектором напружень в елементі $\{\sigma\} = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12})^T$ та рівняннями стану (2.28) обчислюється вектор швидкостей деформацій повзучості $\{\dot{c}\} = (\dot{c}_{11}, \dot{c}_{22}, 2\dot{c}_{12})^T$

$$\{\dot{c}\} = \tilde{B} \frac{\bar{\sigma}_v^{n-1}}{(1-\eta)^n} [\bar{B}] c_{vM}^{-\alpha} \{\sigma\} \quad (3.16)$$

у випадку статичного навантаження чи (2.35) – у випадку періодичного

$$\{\dot{c}\} = \tilde{B} K(M^n) \frac{\bar{\sigma}_v^{n-1}}{(1-\eta)^n} [\bar{B}] c_{vM}^{-\alpha} \{\sigma\}. \quad (3.17)$$

При цьому значення міри пошкоджуваності η отримують інтегруванням кінетичних рівнянь, що входять до (2.28) чи (2.35), з відповідними початковими умовами. Обчислення першого інтегралу у виразі правих частин (3.8) не викликає

труднощів: завдяки застосованим лінійним функціям форми матриця $[B]$ не залежить від координат [192], $[C]$ містить лише константи.

На кожному кроці при інтегруванні за часом системи лінійних алгебраїчних рівнянь розв'язуються методом Холецкого [218]. Цей метод також застосовується й для розв'язку квазістатичних систем типу (3.15) при малих частотах збурення чи при їхньої достатньої відстані від власних частот коливань.

3.2.2 Метод розрахунку НДС з урахуванням початкових пластичних деформацій. У багатьох випадках миттєве навантаження є таким, що інваріант тензору початкових деформацій перебільшує межу плинності. При цьому деформації у скінченному елементі складаються з пружної та пластичної складових

$$\{\varepsilon\} = \{e\} + \{\varepsilon^p\}, \quad (3.18)$$

Схематизацію діаграми деформування у одновимірному випадку подано на рис. 3.1, де ділянка 1 відповідає пружному деформуванню, ділянка 2 – площадці плинності, ділянка 3 – деформуванню зі зміцненням.

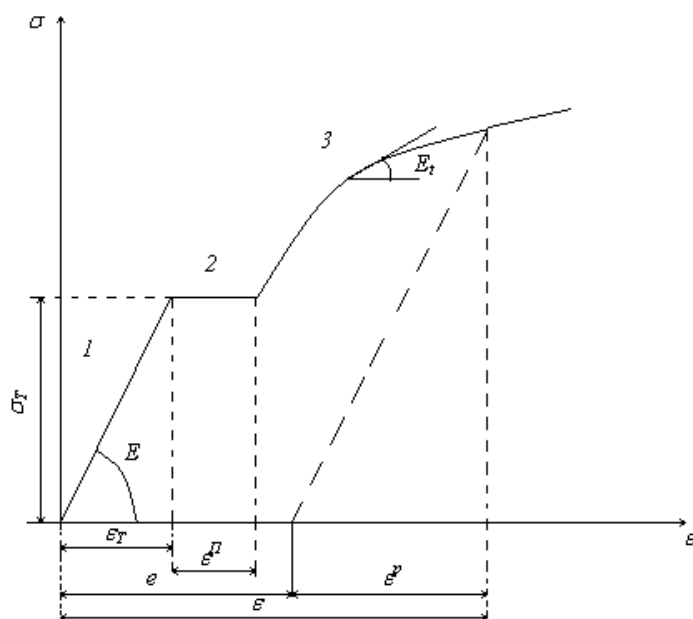


Рис. 3.1. Діаграма деформування («напруження-деформація»)

Для визначення значень компонентів вектору початкових пластичних деформацій застосовано метод, відомий за назвою «приріст-початкова деформація», який був запропонований Дж. Аргірісом та Р. Галлагером, та узагальнений О. Зенкевичем [219].

З початку розглянемо алгоритм для матеріалів зі зміцненням – лінійним чи степеневим, коли площадка плинності відсутня, $\varepsilon^L=0$, й після першої ділянки йде третя [106]. Застосуємо теорію інкрементального типу Прагера-Мізеса [106, 19]. Згідно з нею, вважаємо, що прирости компонентів вектору деформації $\{\varepsilon^p\}$, $\{\Delta\varepsilon\}^p = \{\Delta\varepsilon_x, \Delta\varepsilon_y, \Delta\gamma_{xy}\}$ є пропорційними діючим напруженням (2.4), та загальний множник залежить від приросту ефективного напруження σ_i

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_x^p \\ \Delta\varepsilon_y^p \\ \Delta\gamma_{xy}^p \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \frac{d\bar{p}_i}{\sigma_i} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_{xy} \end{bmatrix}, \quad (3.19)$$

$$\text{де } d\bar{p}_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\Delta\varepsilon_x^p - \Delta\varepsilon_e^p)^2 + (\Delta\varepsilon_x^p)^2 + (\Delta\varepsilon_y^p)^2 + \frac{3}{2}(\Delta\gamma_{xy}^p)^2}.$$

Далі обчислюються вузлові сили, які відповідають розглянутій на етапі порції пластичної деформації $\Delta\varepsilon^p$, та розв'язується система лінійних алгебраїчних рівнянь для скінченного елемента

$$\left(\int_V [B]^T [C] [B] dV \right) \{\Delta u\} = \int_V [B]^T [C] \{\Delta\varepsilon^p\} dV + \int_{S_1} [N]^T \{\Delta\tau\} dS \quad (3.20)$$

$$\{\Delta\sigma\} = [C] \{\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^p\}\}, \quad (3.21)$$

$$\{\varepsilon\} = [B] \{u\}, \quad (3.22)$$

причому на кожному кроці відбувається перерахунок матриці жорсткості елемента згідно з прийнятим за діаграмою деформування (рис. 3.1) для цього діапазону значення дотичного модулю E_t .

Вважається [219], що навантаження додається малими порціями. Співвідношення (3.19) застосовуються починаючи з моменту досягнення інтенсивності напружень за Мізесом σ_i значення межі плинності σ_L , причому

початковими значеннями компонентів девіатору напружень є пружні. З кожним малим кроком за навантаженням обчислюється набуті значення компонентів деформації

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x^p \\ \varepsilon_y^p \\ \gamma_{xy}^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^p \\ \varepsilon_y^p \\ \gamma_{xy}^p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \varepsilon_x^p \\ \Delta \varepsilon_y^p \\ \Delta \gamma_{xy}^p \end{bmatrix}. \quad (3.23)$$

Обчислення відбуваються до «моменту», коли набувається задане умовами задачі значення зовнішнього навантаження.

Далі розглянутий алгоритм можливо модифікувати для матеріалів, діаграма деформування яких має так звану «площадку плинності». У механіці така поведінка описується як ідеально пластичне тіло [106]. Задачею є визначення набутої загальної деформації у твердому деформованому тілі до «моменту», коли за набутим значенням інтенсивності деформацій ε_i почнеться перехід до ділянки 3 зміцнення діаграми деформування (рис. 3.1).

До розрахунків залучено прямий ітераційний метод [219]. Він базується на послідовності наближень, яку для одновісного напружено-деформованого стану представлено таким чином:

$$\begin{aligned} E(\sigma) &= E_0, \sigma < \sigma_T, \\ E(\sigma) &= \frac{E_0 \varepsilon_0}{\varepsilon}, \sigma > \sigma_T, \end{aligned} \quad (3.24)$$

де індексом «0» позначено поточні величини на площадці плинності.

У випадку двовісного напруженого стану поточний (дотичний) модуль $E(E_t)$ залежить від інваріантів тензору деформацій чи напружень (відповідних інтенсивностей, [106]). Алгоритм розв'язання при цьому формулюється таким чином [219]:

1. Розглядається задача «пружного» деформування, що описується системою (3.11) без останнього доданку (сил інерції). Визначаються компоненти

напружено-деформованого стану з застосуванням початкових значень модуля пружності E та коефіцієнту Пуасона ν .

2. Для кожного скінченного елемента визначаються нові величини E та ν , в залежності від значення деформації, отриманої на попередньому етапі (у співвідношеннях (3.24) застосовуються інтенсивності деформацій та напружень).

3. Знов проводиться «пружний» розрахунок, в якому параметри E та ν є визначеними на попередньому кроці.

Кроки 2 та 3 повторюються до досяжності збіжності, коли, наприклад, для n та $n+1$ кроків виконується умова $|\varepsilon_i^{n+1} - \varepsilon_i^n| < \delta$.

Для матеріалів, в яких діаграма деформування після площадки плинності має ознаки матеріалу зі зміцненням (рис. 3.1), розглянуті алгоритми об'єднуються: після обчислень за моделлю ідеально пластичного тіла отриманий розподіл компонентів напружено-деформованого стану застосовується як початковий для обчислень за моделлю зміцнення.

Розглянуті алгоритми реалізовано у вигляді програми для IBM-сумісних комп'ютерів, як модуль *PLASTPL* програмного комплексу *FEM CREEP* [3].

3.3 Опис програмного засобу

До виконання чисельних розрахунків повзучості та пошкоджуваності при плоскому напруженому стані в роботі залучено програмний комплекс *FEM CREEP* [3, 202], в варіанті якого проведено модернізацію. Вона торкнулась двох основних частин роботи, пов'язаних з моделюванням повзучості та пошкоджуваності пластин, виготовлених з матеріалів, які виявляють ортотропію (трансверсальну ізоотропію) відповідних властивостей, та деформування при напруженнях, що перевершують межу пропорційності та плинності.

Програмний комплекс *FEM CREEP* [3] призначений для розв'язання плоских задач теорії повзучості та пошкоджуваності з застосуванням методу скінченних елементів спільно з різницевими методами розв'язання задач за часом. Комплекс написано на мові програмування C++. Він складається з основної

функції, до якої підключено низку сервісних, призначених для взаємодії з файлами препроцесору підготовки вхідних даних, функцій визначення компонентів матриці жорсткості конструкції *MATRGS()*, вектору правих частин *PG()*, розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь *CHOBANDD()* та *CHOBANDS()*, функцій визначення компонентів векторів деформацій та напружень *STRESSPL()*, функції підрахунку вузлових зусиль від деформацій повзучості *CREFORPL()* та функції, яка реалізує інтегрування за часом методом Ейлера *PRE()*.

Коротко торкнемось модернізованих функцій - *CREFORPL()* та *PRE()*. На відміну від описаних у монографії [202], у даній версії реалізовано алгоритми для обчислення на кожному кроці інтегрування за часом значень компонентів тензорів деформацій повзучості та пошкоджуваності за представленими в роботі рівняннями стану (2.35).

При розв'язанні задач, в яких початковий напружено-деформований стан є пружно-пластичним, у функцію *PRE()* завантажуються знайдені в розробленому модулі *PLASTPL* значення вузлових переміщень та напружень й деформацій в елементах. В іншому випадку, як й у стандартному комплексі [3], у функції *PRE()* спочатку послідовно викликаються функції *MATRGS()*, *PG()*, *CHOBANDD()*, *CHOBANDS()* та *STRESSPL()* для розв'язання пружної задачі. Значення компонентів напружено-деформованого стану для скінченноелементної моделі у пружному чи пружно-пластичному випадках є початковими умовами для задач повзучості.

Розроблений модуль *PLASTPL* призначено для розв'язання плоских пружно-пластичних задач МСЕ. У ньому реалізовано алгоритми, що надано залежностями, наведеними у п. 3.2.2. В основній функції модуля, який є окремою програмою, реалізовано алгоритм методу «приріст-початкова деформація». У циклі за прирістом навантаження послідовно викликаються функції *MATRGS()*, модифікована функція *PG()*, *CHOBANDD()*, *CHOBANDS()*, *STRESSPL()* та розроблена для підрахунку значень вузлових зусиль від пластичних деформацій

функція *PLASTFOR()*. Процес продовжується до моменту набуття функцією навантаження повного заданого значення.

Модифіковану версію програмного комплексу *FEM CREEP* в роботі використано спільно з розробленими на кафедрі комп'ютерного моделювання процесів та систем НТУ «ХПІ» препроцесорними програмами для підготовки скінченноелементних сіток та постпроцесорами для відтворення результатів обчислень у вигляді мап розподілів компонентів напружено-деформованого стану та параметру пошкоджуваності [202].

3.4 Дослідження з достовірності розрахункового методу

Розроблені та модернізовані в роботі алгоритми та програмні модулі було піддано перевірці на прикладах розв'язання фізично нелінійних задач повзучості та пластичності. Тестування розв'язків пружних задач виконано на прикладах, перевірених для застосованого скінченноелементного програмного забезпечення, призначеного для розв'язання двовимірних задач повзучості «FEM CREEP» [3].

3.4.1 Скінченноелементне моделювання пружно-пластичного деформування зразку. Аналіз достовірності алгоритмів та програмного забезпечення, призначеного для розв'язання плоских пружно-пластичних задач, було виконано на прикладі одновісного розтягу зразку. Для тестування було залучено експериментально отриману діаграму розтягу плоских зразків зі сталі 3. Діаграму деформування задано по характерних точках: межа плинності $\sigma_T = 295$ МПа, модуль пружності $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, максимальна деформація на площадці плинності $\varepsilon_1 = 2\%$, дотичні модулі: $E_1 = 5000$ МПа при $2\% < \varepsilon < 2.5\%$; $E_2 = 900$ МПа при $2.5\% < \varepsilon < 6\%$; $E_3 = 700$ МПа при $\varepsilon > 6\%$.

Зразок моделювався плоскою прямокутною пластиною, застосовувалась рівномірна сітка з 76 елементів. Розрахунки проводились для змінювання величин пластичних деформацій до від 0 до 7%, що відповідає діапазону значень, які мали місце в експериментах. Використовувались два значення кроку за навантаженням – 10 та 5 МПа, відмінність в результатах при цьому не перевищувала 10%.

Результати розрахунків наведено на рис. 3.2, де надано отримане з застосуванням кроку 5 МПа значення деформації, яке було визначено в різних елементах. Точками позначено експериментальні дані, суцільною кривою – чисельні. У зв'язку з тим, що у зразку реалізовано простий напружений стан, ці значення відрізнялись одне від одного у рамках чисельної похибки (0.1%), тому надане значення деформації у 38 елементі. Порівняння чисельних та експериментальних даних показало, що максимальна відмінність між ними складас 8%, що можливо вважати задовільним для виконання розрахунків.

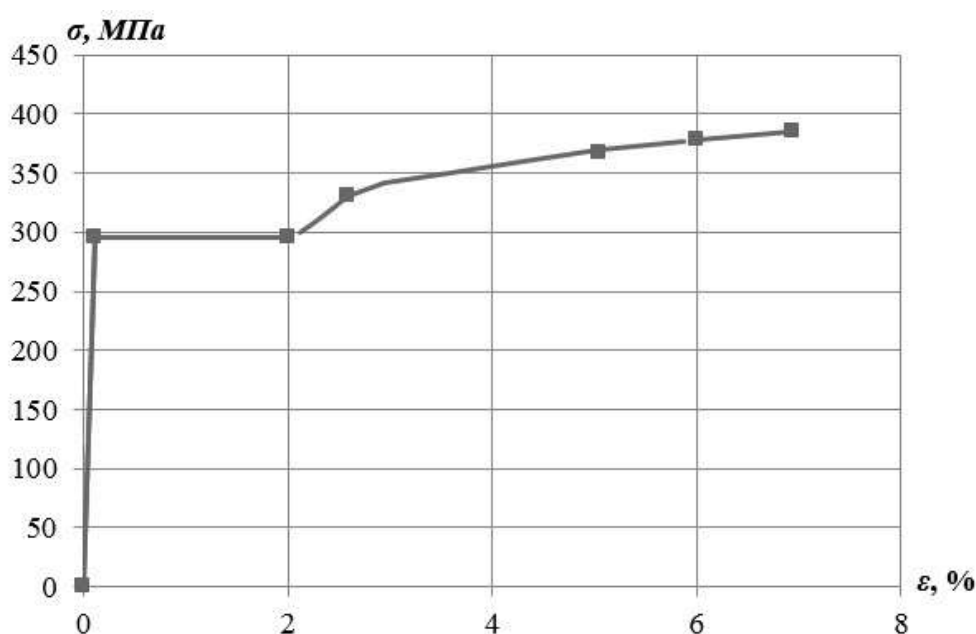


Рис. 3.2. Порівняння чисельних та експериментальних даних для задачі розтягу зразку

3.4.2 Повзучість пластини з центральним отвором. Для перевірки роботи створених алгоритмів та програми, яку призначено для моделювання деформування при повзучості конструктивних елементів, що виконані з матеріалів з трансверсально-ізотропними властивостями повзучості, розглянемо розв'язання т. зв. задачі Кірша. Задача Кірша [220] визначається як розтяг пластини з отвором, радіус якого r є значно меншим за розмір її сторони a , в даному випадку $a=100 \text{ мм}=10r$, рівномірним навантаженням $\tau=30 \text{ МПа}$, що

прикладене з двох протилежних боків пластини. Внаслідок симетрії пластини та граничних умов розглядаємо розрахункову схему для її половини (рис. 3.3).

Таку задачу анізотропної повзучості пластини з центральним отвором було розв'язано у дисертаційній роботі [221]. Як матеріал пластини розглядався титановий сплав

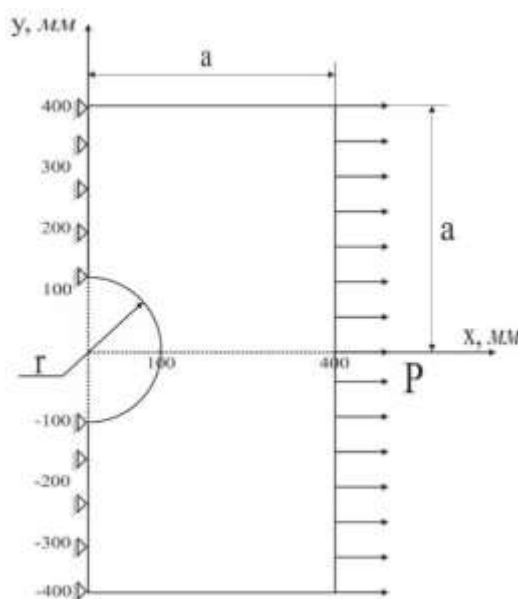


Рис. 3.3. Розрахункова схема для половини пластини

BT1-0 (аналоги – сплави IM125 або T40). Властивості повзучості і довготривалої міцності зразків, вирізаних з плоского листа в трьох напрямках, були експериментально отримані при температурі $T = 773 \text{ K}$ О.К. Морачковським і В.М. Конкіним [133]. Криві повзучості матеріалу, що розглядається, при даній температурі характеризуються відсутністю першої ділянки, тобто у визначальних співвідношеннях (2.28) $\alpha = 0$. Значення інших констант в рівняннях (2.28), отриманих після обробки експериментальних даних, такі: $n=p=5$, $s=1$,

$$b_{1111} = 2,303 \cdot 10^{-4}, b_{1122} = -1,151 \cdot 10^{-4}, b_{2222} = 1,924 \cdot 10^{-4}, b_{1212} = 2,058 \cdot 10^{-4}, (\text{МПа})^{-2m/m+1}/(\text{год})^{2/m+1},$$

$$d_{1111} = 3,542 \cdot 10^{-5}, d_{1122} = -1,771 \cdot 10^{-5}, d_{2222} = 3,324 \cdot 10^{-5}, d_{1212} = 3,127 \cdot 10^{-5}, (\text{МПа})^{-2}/(\text{год})^{2/p}.$$

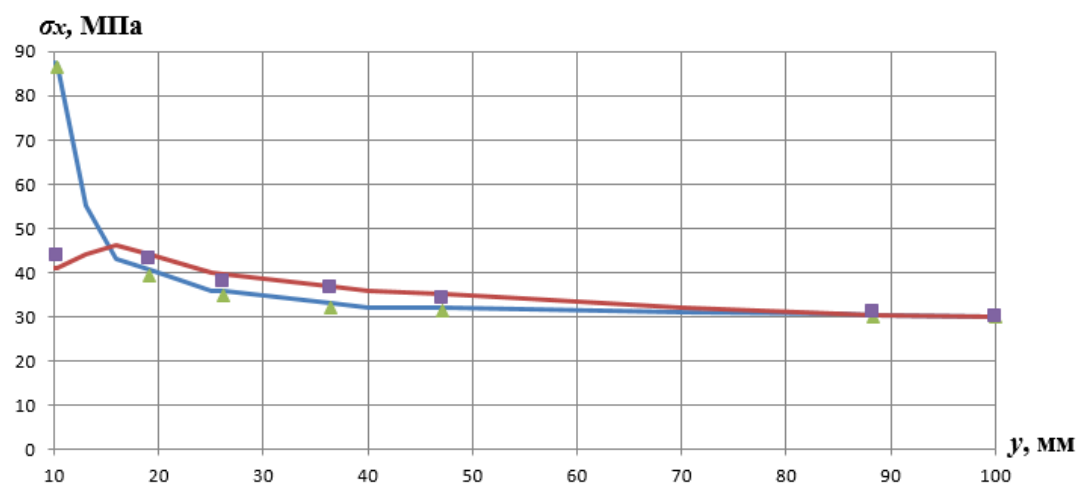
Розглядаємо випадок, коли напрямки двох осей анізотропії повзучості матеріалу співпадають з координатними осями x та y (рис. 3.3). Початковий напружений стан при $t = 0$ відповідає пружному деформуванню, тобто є таким, що

інтенсивності напруження не перевершують межу плинності при даній температурі $\sigma_T = 100$ МПа.

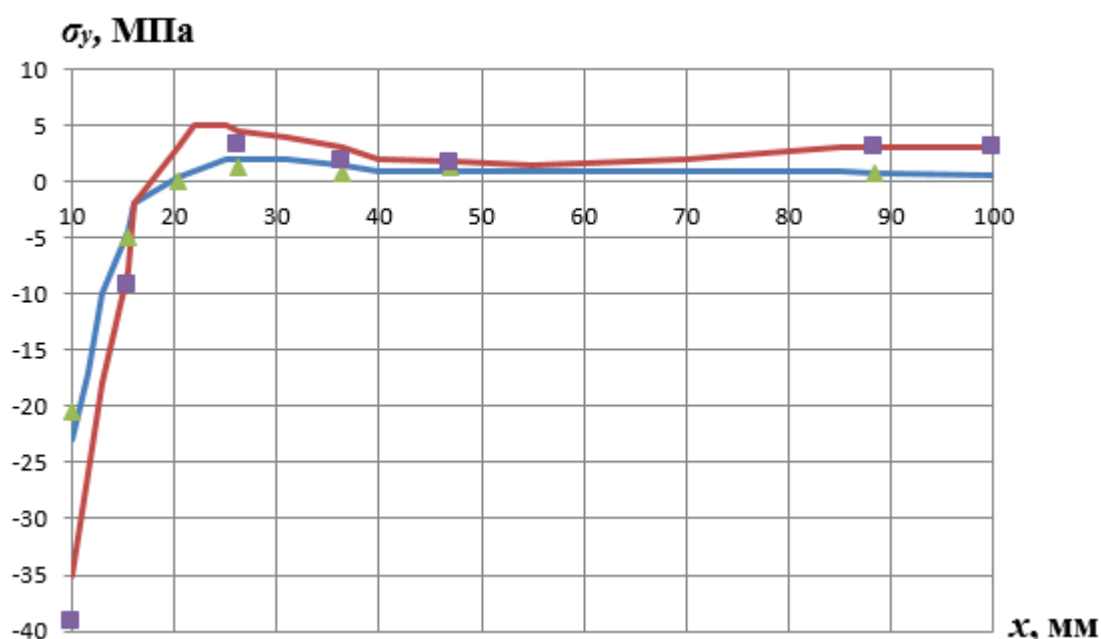
Для розв'язання задачі застосуємо нерівномірну скінченноелементну сітку з 127 вузлів та 204 елементів, що згущується в околі отвору. Сітку побудовано максимально близькою за розташуванням та кількістю елементів до тієї, що було застосовано в роботі [221]. В цій роботі наведено криві розподілу нормальних напружень σ_x та σ_y від отвору вздовж координатних осей $x=0$ та $y=0$ відповідно у межах пружного деформування ($t=0$) та після повзучості, що супроводжується пошкоджуваністю ($t^*=120$ год., при цьому $\omega=0.8$). У даній роботі проведені подібні розрахунки з тими ж параметрами процесу та побудовані такі ж криві. На рис. 3.4 наведено порівняння розрахункових кривих змінювання нормальних напружень вздовж осей $x=0$ (σ_x) та $y=0$ (σ_y). Криві, одержані в роботі [221], надано суцільними лініями, при чому синій колір відповідає даним при пружному деформуванні при ($t=0$), червоний – після 120 годин повзучості. Чисельні результати даної роботи надано точками: трикутниками позначено дані при $t=0$, чотириохкутниками – після 120 годин повзучості.

Як видно з рис. 3.4, дані обох чисельних розрахунків є добре якісно та кількісно узгодженими, відмінність між значеннями напружень у точках порівняння не перевершує 11%. Наприклад, значення коефіцієнту концентрації напружень у роботі [221] визначено як 2.92, у даній роботі на приблизно схожій сітці – 2.88 при теоретичному значенні, що дорівнює 3 [220].

Проведене порівняння демонструє можливості адекватного чисельного моделювання процесів анізотропної (трансверсально-ізотропної) повзучості та пошкоджуваності при двовимірному напруженому стані за допомогою програмного забезпечення, яке застосовується в дисертаційній роботі.



а)



б)

Рис. 3.4. Порівняння чисельних даних (робота [221] – суцільні лінії, дана робота – точки). а) розподіл нормального напруження σ_x вздовж осі $x=0$;
 б) розподіл нормального напруження σ_y вздовж осі $y=0$.

3.4.3 Перевірка достовірності скінченноелементних розв'язків при застосуванні рівнянь стану ортотропної повзучості. Продовжити перевірку працездатності алгоритмів та програми розрахунку трансверсально-ізотропної повзучості при плоскому напруженому стані також можливо, проводячи чисельне моделювання деформування плоских зразків, вирізаних у різних напрямках. При цьому зразки моделюються як плоскі

прямокутники, навантажені рівномірним навантаженням вздовж осі, паралельної їхньому довгому боку. У зв'язку з тим, що для перевірки застосовано результати експериментів, виконаних на плоских зразках зі сталі 3, розглянемо таке ж типове розташування моделей зразків з орієнтацією 0° , 45° та 90° до напрямку прокатки. На рис. 3.5 наведено три скінченноелементних схеми, що відповідають вказаним напрямкам. Наведено сітку з 76 елементів та 60 вузлів, застосування якої продемонструвало достатню збіжність результатів.

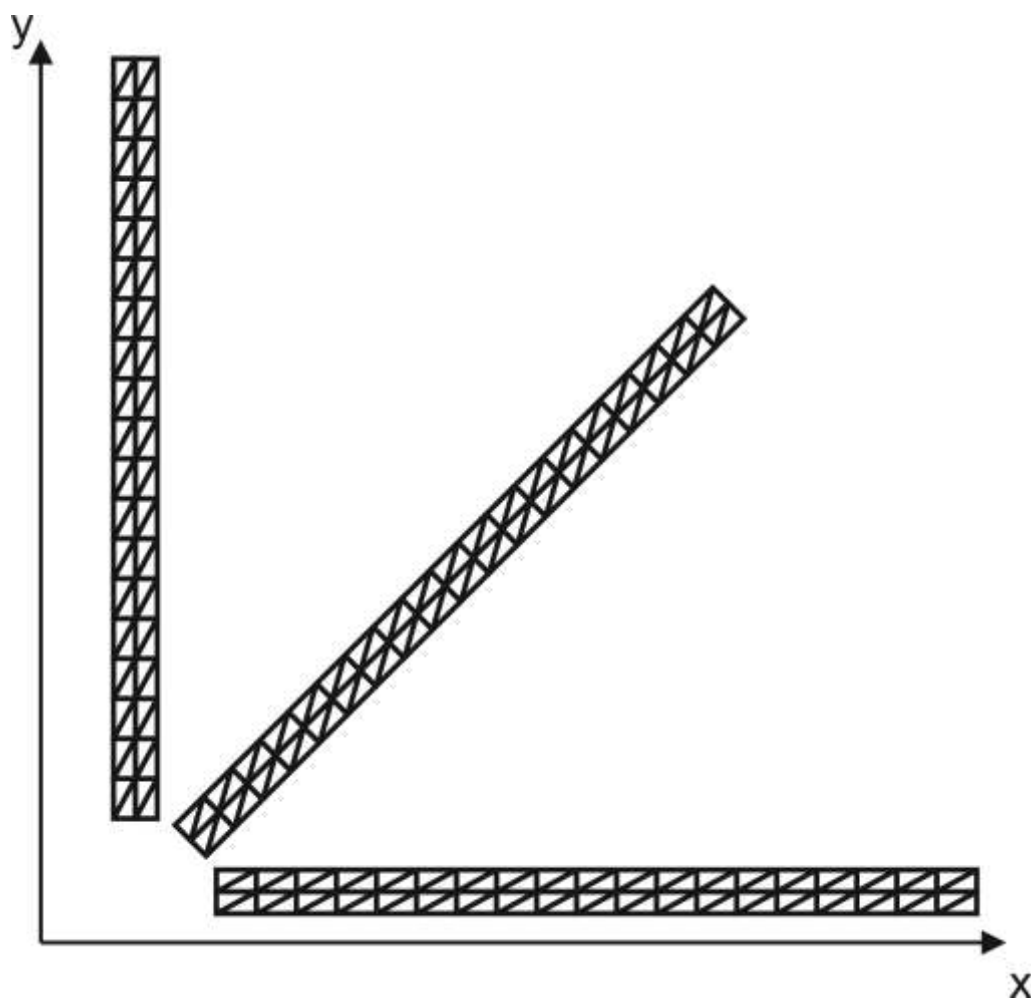


Рис. 3.5. Розташування скінченноелементних моделей зразків при розтязі

На всіх трьох скінченноелементних моделях проводились розрахунки до 0.5 год., що відповідає часу проведених експериментів на зразках. При інтегруванні за часом у зв'язку з сильною нелінійністю застосовувалась різницева схема Ейлера зі змінним кроком інтегрування, який приймав значення від $5 \cdot 10^{-9}$

до $1 \cdot 10^{-4}$. В усіх розрахунках прийнято, що моделі зразків навантажено рівномірно напруженням розтягу 378.7 МПа.

Результати розрахунків наведено на рис. 3.6-3.9. Спочатку в чисельних дослідженнях було застосовано сітку з 36 елементів, але вже при розрахунку зразку, вирізаного у напрямку вздовж прокатки, було отримано суттєві розбіжності з експериментальними та розрахунковими за співвідношенням (2.7). На рис. 3.6 ці дані позначено кривою 2. У зв'язку з цим розмірність сітки було збільшено до 76 елементів. (крива 1 рис. 3.6).

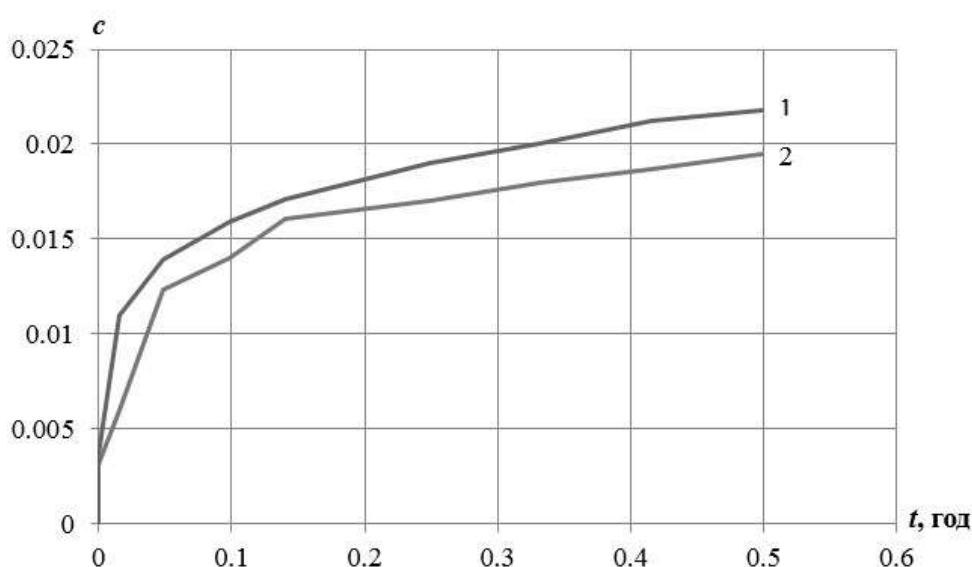


Рис. 3.6. Порівняння розрахунків з різними сітками

На рис. 3.7-3.9 наведено порівняння експериментальних (точки), розрахункових за співвідношенням (2.7) (переривчасті лінії) та скінченноелементних результатів (суцільні лінії). Рис. 3.7 відповідає даним для напрямку вздовж прокатки, 3.8 – поперек прокатки, 3.9 – під кутом 45° до прокатки. Аналіз результатів свідчить, що розрахункові та скінченноелементні дані співпадають з точністю до 1-2%, що демонструє правильність роботи всіх алгоритмів, у тому числі пов'язаних з реалізацією рівнянь стану та інтегруванням за часом, та всього програмного засобу в цілому. Відмінності експериментальних та скінченноелементних даних є такого ж порядку, як й при порівнянні їх з розрахунковими.

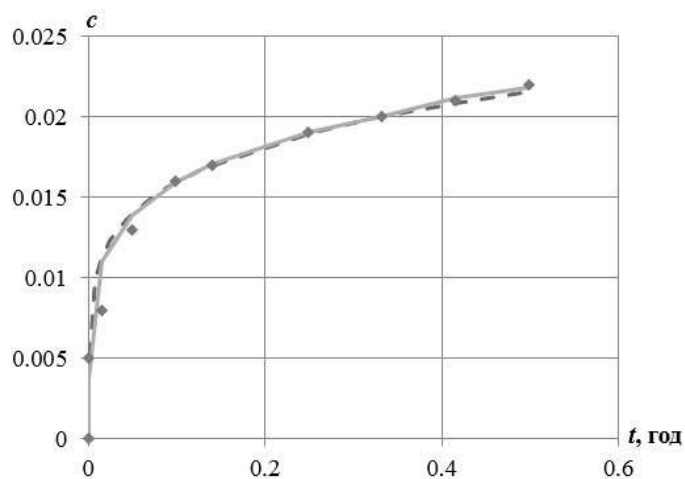


Рис. 3.7. Порівняння експериментальних, розрахункових та скінченноелементних даних (напрямок вздовж прокатки)

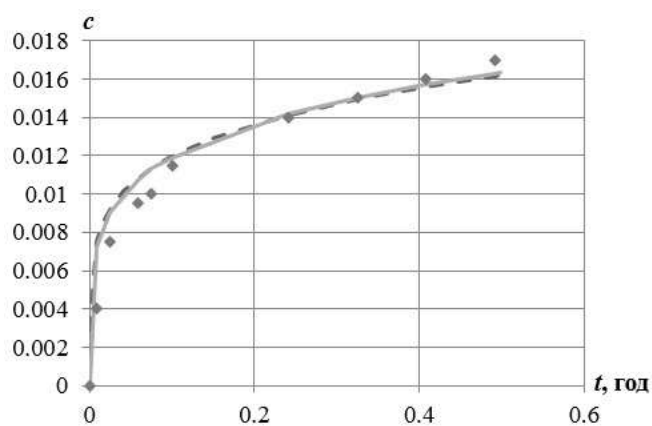


Рис. 3.8. Порівняння експериментальних, розрахункових та скінченноелементних даних (напрямок поперек прокатки)

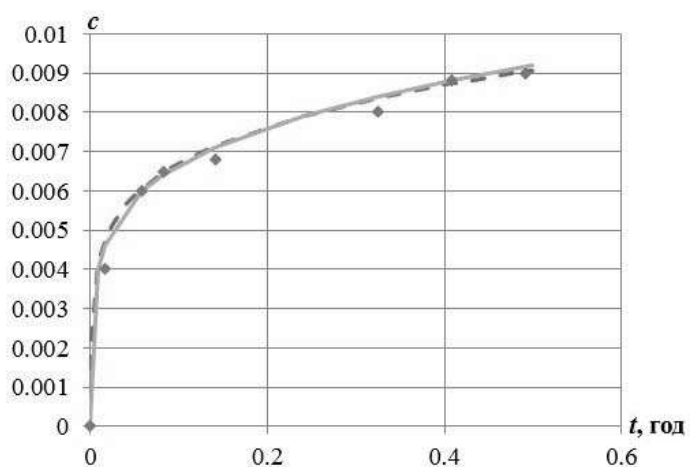


Рис. 3.9. Порівняння експериментальних, розрахункових та скінченноелементних даних (напрямок під кутом 45° до напрямку прокатки)

Далі розглянемо порівняння експериментальних даних та отриманих з застосуванням скінченноелементного програмного засобу результатів для випадку довантаження зразку. Використаємо дані п. 4.1 – перший цикл навантаження зразку, що вирізано вздовж прокатки: 60 с. при дії напруження 352.3 МПа, після цього 180 с. при дії напруження 378.7 МПа. До розрахунків залучено сітку з 76 елементів, зображену на рис. 3.5.

Отримані дані відображено на рис. 3.10, де суцільною кривою позначено розрахункові дані, точками – експериментальні. Як видно, застосування закону зміцнення дозволяє з задовільним ступенем точності описувати довантаження при повзучості: максимальна похибка не перевищує 14%.

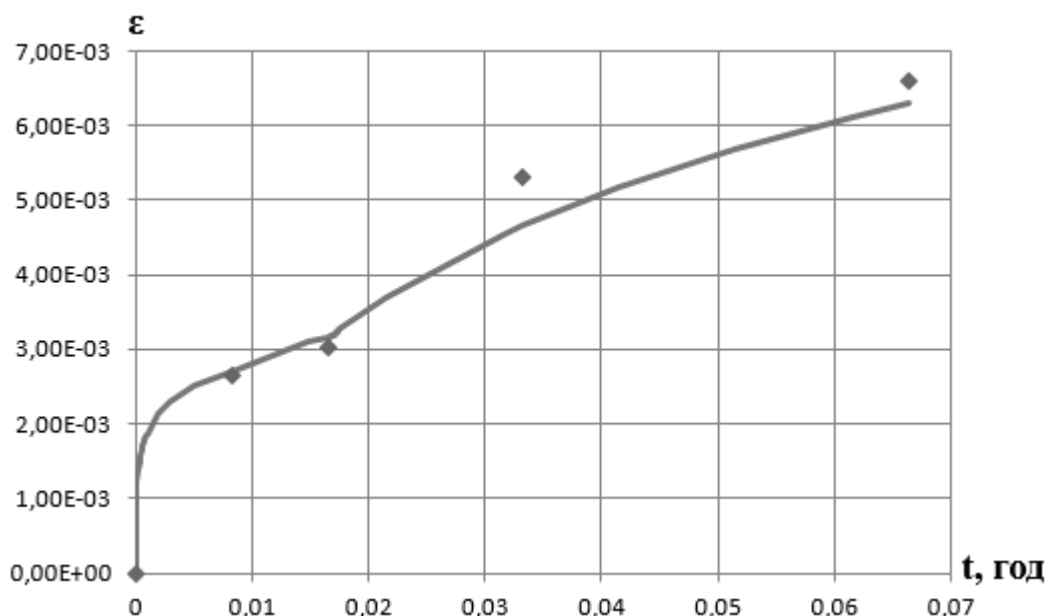


Рис. 3.10. Порівняння експериментальних та скінченноелементних даних (напрямок вздовж прокатки, довантаження зразку)

Далі виконаємо порівняння експериментальних даних з періодичного навантаження зразків з результатами чисельного моделювання повзучості цих же зразків як двовимірних моделей за рівняннями стану (2.35), отриманими за допомогою асимптотичних розкладів та усереднення на періоді. Використовуємо ті ж скінченноелементні моделі (рис. 3.5). Порівняльні дані подано на

рис. 3.11-3.13, де розрахункові результати надано суцільною лінією, експериментальні – точками.

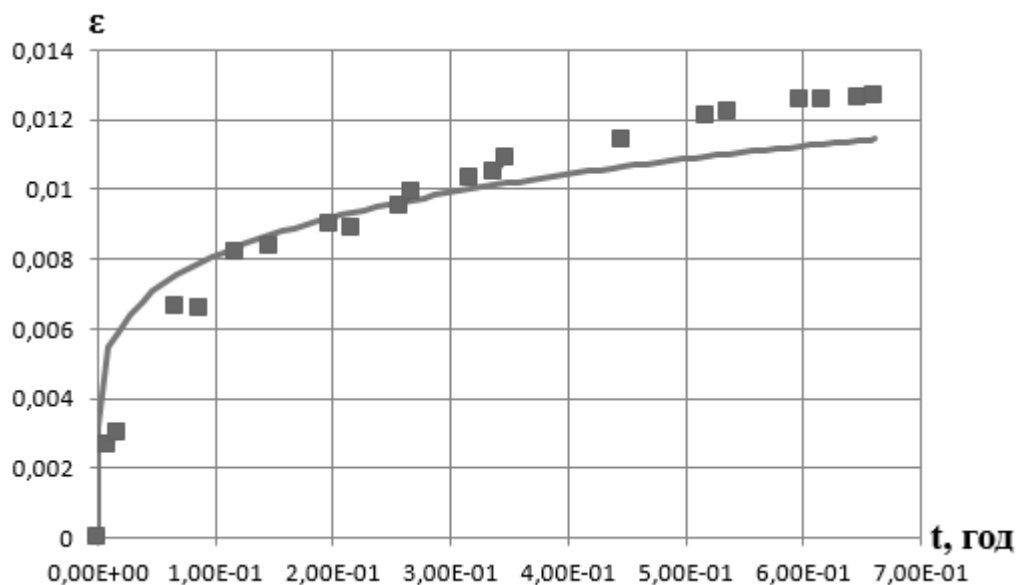


Рис. 3.11. Порівняння експериментальних та скінченноелементних даних (періодичне навантаження, напрямок вздовж прокатки)

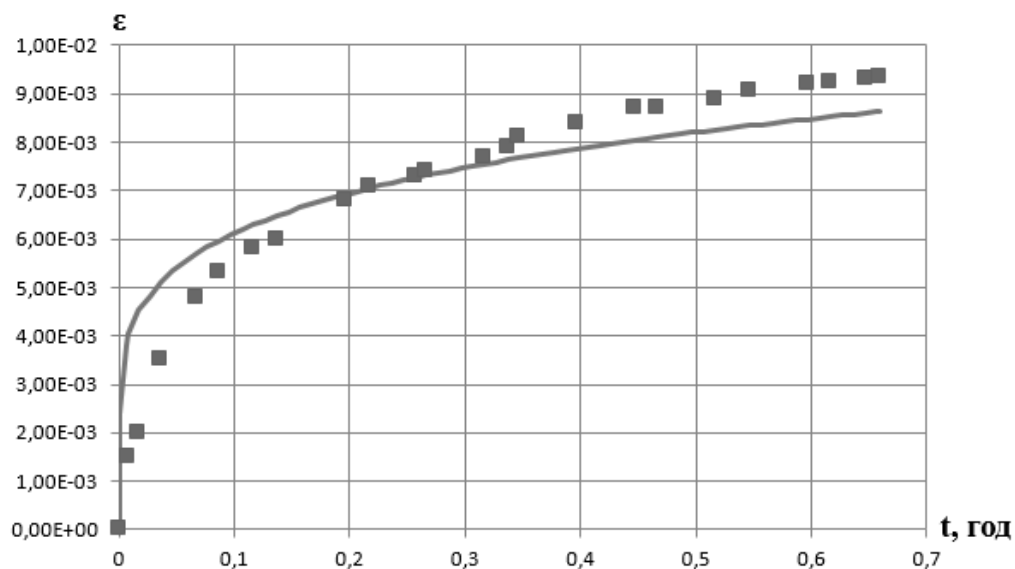


Рис. 3.12. Порівняння експериментальних та скінченноелементних даних (періодичне навантаження, напрямок поперек прокатки)

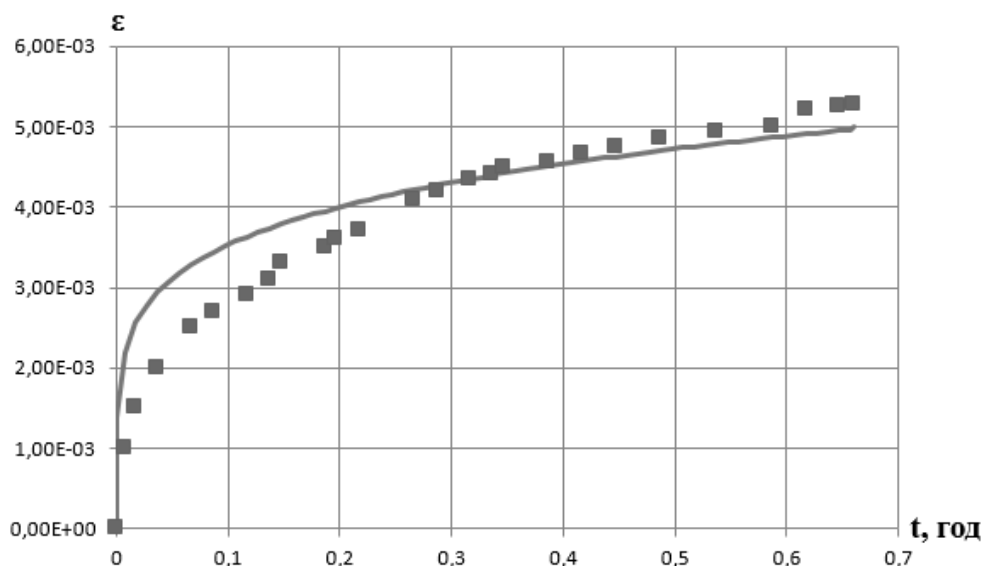


Рис. 3.13. Порівняння експериментальних та скінченноелементних даних (періодичне навантаження, напрямок під кутом 45° до напрямку прокатки)

Аналіз графіків доводить, що розроблений програмний засіб загалом задовільно моделює процеси повзучості при періодичному навантаженні у сталі 3. Відмінність між експериментальними та чисельними результатами не перевершує 10-15% для областей часу за першими чотирма циклами навантаження, як це й мало місце при порівнянні чисельних та розрахункових даних, отриманих для одновимірного випадку за рівняннями стану (2.35). При малому (2-4) числі циклів похибка складає 25-30%. Проведений аналіз для всіх трьох напрямків свідчить про те, що точність моделювання одновимірних експериментів при застосуванні двовимірних розрахункових схем може вважатись цілком задовільною.

Отже, проведені дослідження достовірності надають змогу оцінювання створеного методу розрахунку та програмного засобу в цілому як придатного для моделювання двовимірних задач у разі ортотропної повзучості матеріалів, яка відбувається при початкових напруженнях, що перебільшують межу плинності.

3.5 Висновки за розділом

Розділ містить алгоритм розв'язання двовимірної задачі теорії повзучості з застосуванням методу скінченних елементів та різницевого методу Ейлера. Надано опис створеного алгоритму та програми для розв'язання пружно-

пластичних задач МСЕ. Приводяться результати досліджень з достовірності розв'язків, які отримуються з застосуванням створеного програмного забезпечення. Для цього виконано порівняння з експериментальними даними та чисельними результатами розв'язання задачі повзучості при двовимірному напруженому стані, отриманими в роботі [221]. Проведені перевірки демонструють задовільний ступінь співпадіння результатів та разом з виконаними у другому розділі дослідженнями достовірності розрахункових результатів, що одержуються з запропонованих рівнянь стану, дозволяють зробити висновок щодо можливості застосування використаного та створеного в роботі програмного забезпечення для розв'язання двовимірних задач для елементів конструкцій, виготовлених з матеріалів з ортотропними властивостями повзучості та пошкоджуваності.

Основні результати, одержані у розділі, опубліковано у роботах [2-3, 7-8, 10-11, 13-15].

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМУВАННЯ ПРИ ПРОСТОМУ ТА ДВОВИМІРНОМУ НАПРУЖЕНОМУ СТАНІ

Розділ містить опис проведених експериментальних досліджень розтягу сталевих зразків та пластин з отворами. Надано опис методики експериментів при простому напруженому стані з різними програмами змінювання навантаження за часом. Наведено отримані експериментальні результати: діаграми деформування зразків, криві повзучості зразків, що були вирізані в трьох напрямках з листового матеріалу, криві повзучості при періодичному навантаженні, дані з поздовжніх переміщень пластин та їхнього деформування у районі отворів.

4.1 Методика та результати експериментів на плоских зразках

В роботі виконано дослідження деформування зразків зі сталі 3. Для всіх експериментів було використано сталеві листи однієї партії постачання. Було проведено дві групи експериментів: зняття кривих деформування для встановлення залежності «напруження-деформація» при одновісному розтязі; отримання залежності повної деформації зразків від часу. Всі дослідження було виконано при кімнатній температурі 293К.

Для зняття діаграми деформування зразків з листового матеріалу було вирізано по три зразки: вздовж, поперек напрямку прокатки та під кутом 45° до нього. Зразки виготовлялись фрезеруванням за вимогами ДСТУ 3248-81. На рис. 4.1-4.2 наведено загальний вигляд та основні розміри зразків. До експериментів було залучено випробувальну машину Heckert FP-100/1 кафедри опору матеріалів НТУ «ХПІ».

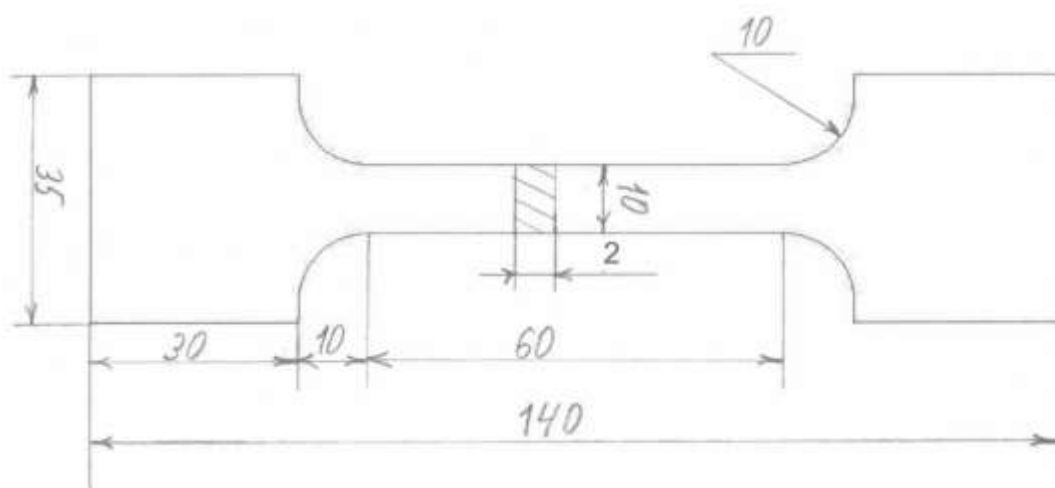


Рис. 4.1. Розміри зразків для випробувань на розтяг

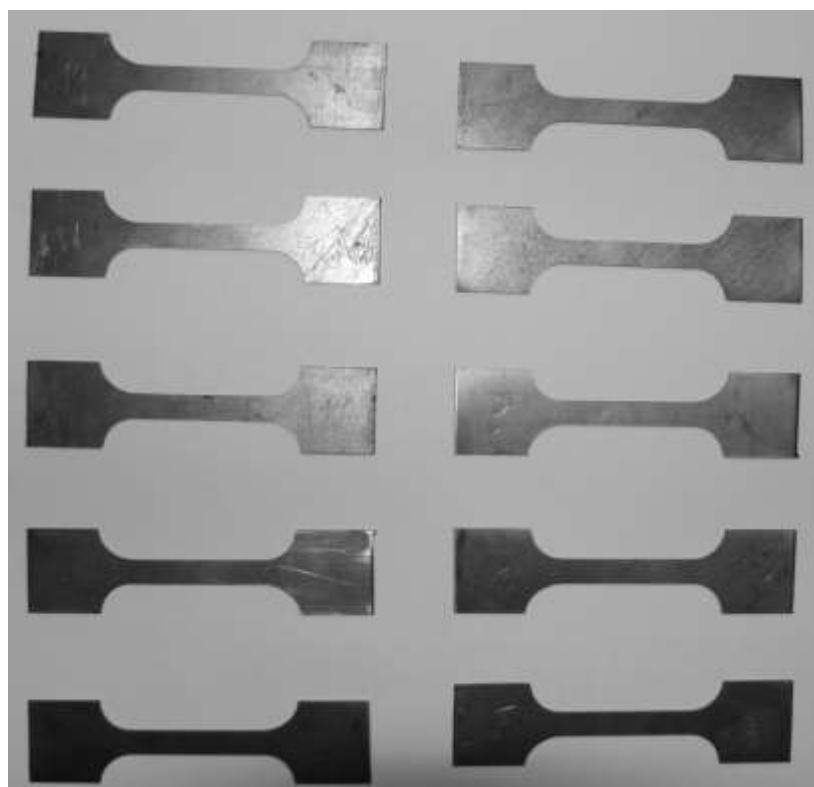


Рис. 4.2. Зразки для випробувань на розтяг

За результатами досліджень встановлено ізотропію миттєвого деформування матеріалу. Похибка не перевищувала 10% та була однаковою для різних зразків, вирізаних з різних напрямів. Експериментальні дані використано для побудови діаграми деформування (рис. 4.3).

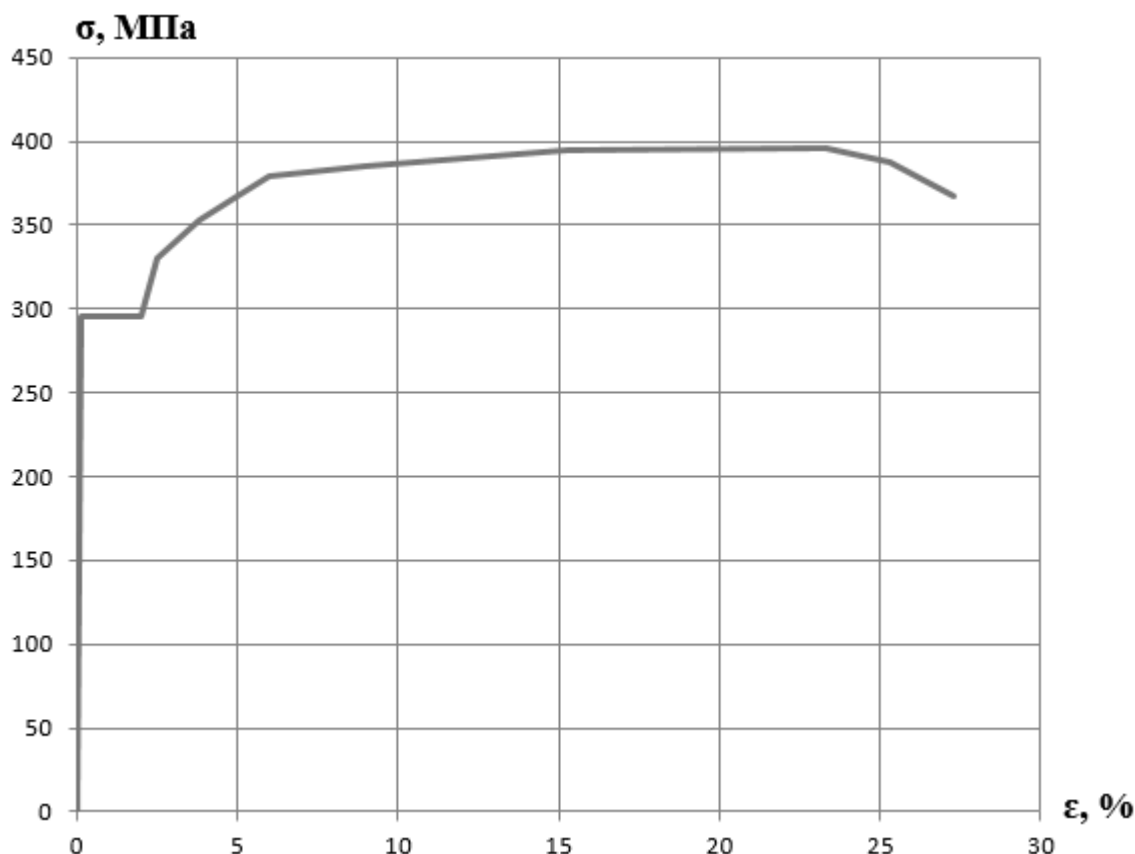


Рис. 4.3. Діаграма деформування сталі 3

За дослідними даними встановлено, що модуль пружності матеріалу, що розглядається, дорівнює $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, межа плинності $\sigma_T = 295.8$ МПа, межа міцності $\sigma_B = 395.3$ МПа. Відмітимо, що діаграма має досить значну площадку плинності. Значення руйнівної деформації складала 27-28%.

До експериментів на повзучість було залучено стандартну випробувальну машину АІМА-5-2 [222] лабораторії кафедри динаміки та міцності машин НТУ «ХП». Використовувався модифікований пристрій для закріплення плоских зразків. Зразки також вирізались з тих самих трьох напрямів та виготовлялись фрезеруванням за ДСТУ 3248-81. Всього було виготовлено та випробувано 27 зразків. На рис. 4.4-4.5 надано загальний вигляд та їхні основні розміри. Вимірювання переміщень здійснювалось за допомогою індикаторів годинникового типу ІЧ 10 з можливістю вимірювань до 0.01 мм.

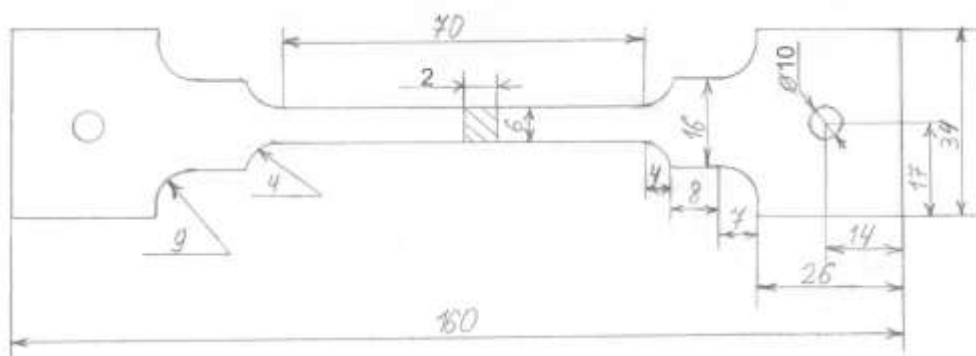


Рис. 4.4. Розміри зразків для випробувань на повзучість

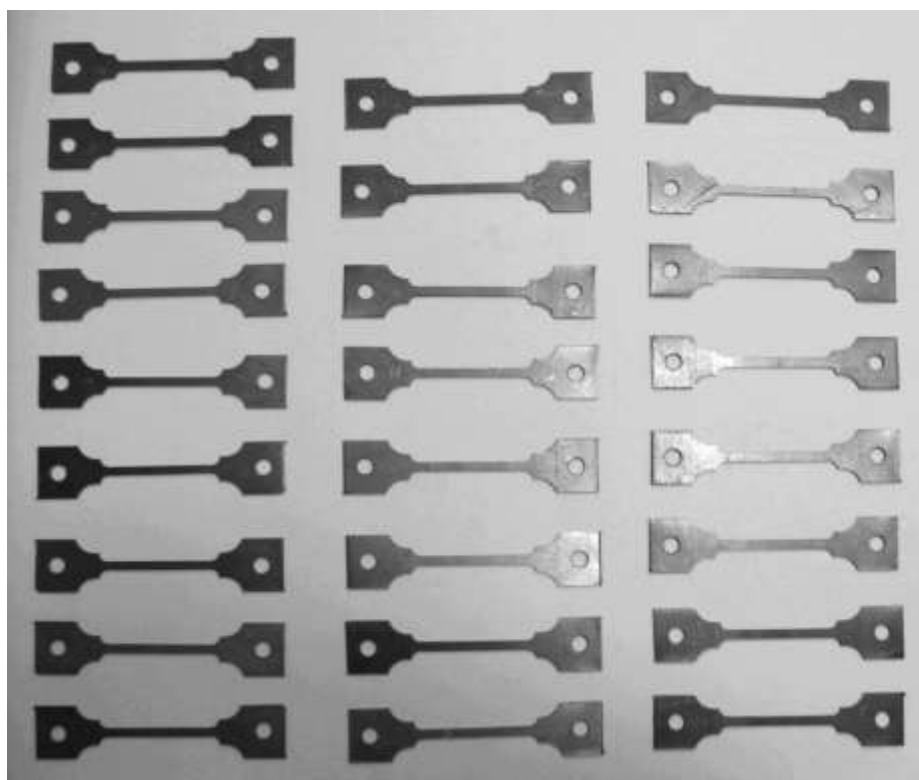


Рис. 4.5. Зразки для випробувань на повзучість

Для досліджень було обрано діапазон напружень, що суттєво перебільшує межу плинності. Експерименти виконувались для трьох значень напруження розтягу: 378.7 МПа, 366.8 МПа та 352.3 МПа.

Проведено випробування 27 зразків: три групи експериментів для кожного значення напруження, в кожній з яких випробувалось по 9 зразків. Досліджено по три зразки для трьох напрямків – вздовж, поперек напрямку прокатки та під кутом 45° до нього. Розкид даних не перевищував 18-23%, що є типовим для експериментів на повзучість [211].

За результатами дослідів встановлено, що для сталі 3, яка розглядається, у прийнятому діапазоні напружень є характерною короточасна повзучість. Деформації повзучості розвиваються після миттєвих деформацій пластичності. Зауважимо, що повзучість має обмежений у часі характер: вона інтенсивно розвивається у перші хвилини, та практично зупиняється після 30 хвилин деформування. Один з зразків (вирізаний вздовж напрямку прокатки), при дії напруження 378.7 МПа було залишено під навантаженням на термін 26 днів. Результати наведено на рис. 4.6. З рисунку видно, що деформація повзучості за час навантаження практично не зросла у порівнянні з першими 30 хвилинами навантаження (приріст склав $72.6 \cdot 10^{-4}\%$). У зв'язку з цим було прийнято рішення проводити експерименти на часовій базі 0.5 години. По одному зі зразків було випробувано на часовій базі 1.5 години (90 хвилин). Додаткова деформація була на рівні $1-2 \cdot 10^{-3}\%$.

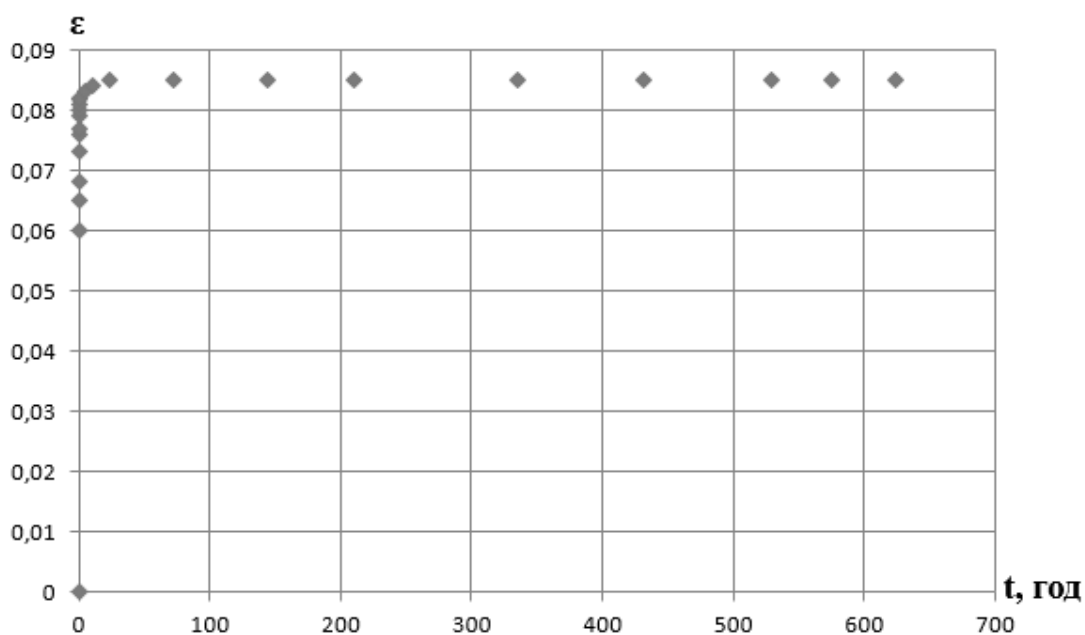


Рис. 4.6. Залежність повної деформації зразку від часу

Загальні криві деформування наведено на рис. 4.7-4.9. Тут кривою 1 позначено дані експериментів з напруженням 378.7 МПа, кривою 2 - 366.8 МПа та кривою 3 - 352.3 МПа.

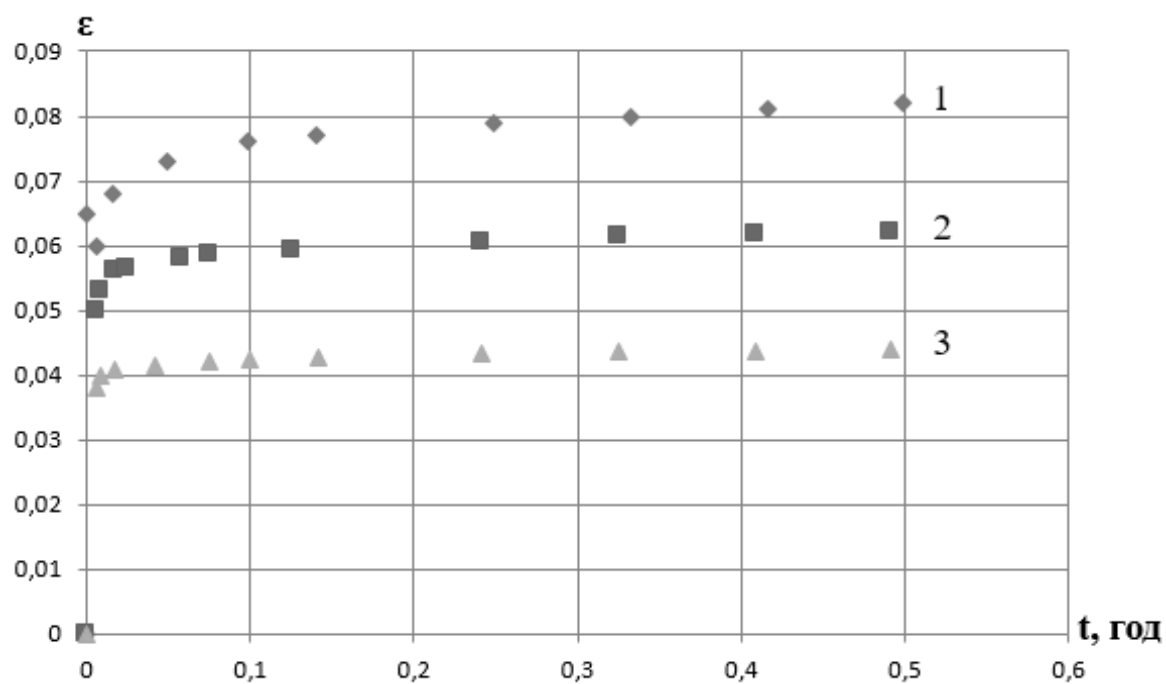


Рис. 4.7. Залежність повної деформації зразку від часу (зразки, що вирізано вздовж напрямку прокатки)

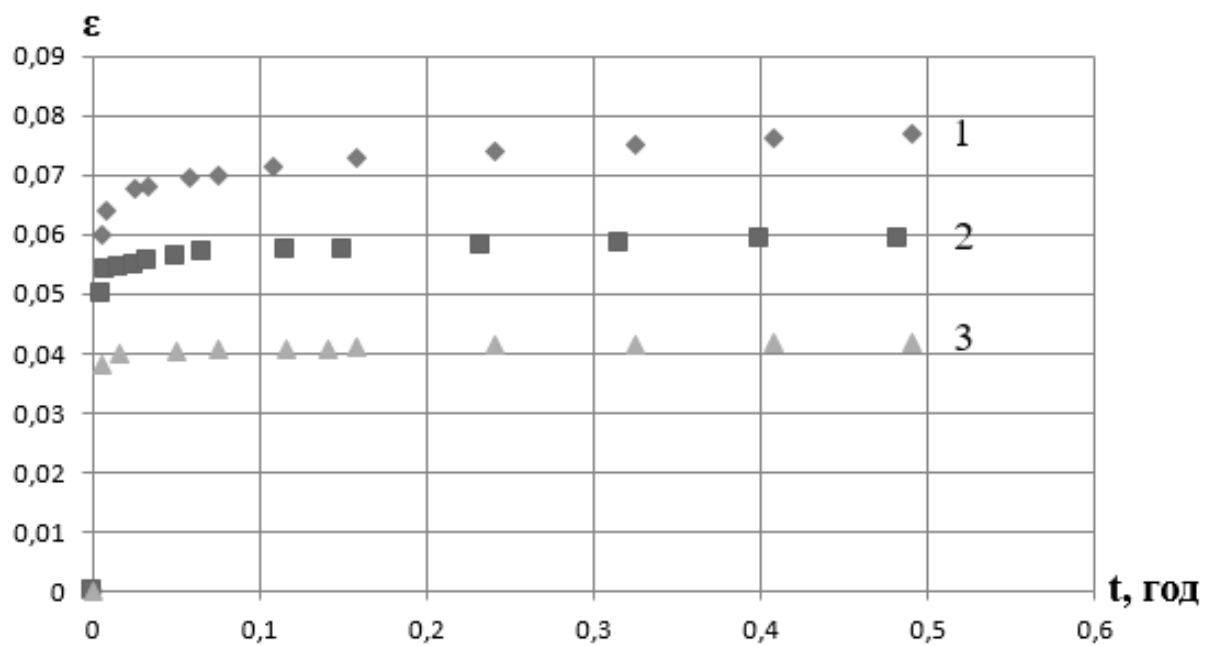


Рис. 4.8. Залежність повної деформації зразку від часу (зразки, що вирізано поперек напрямку прокатки)

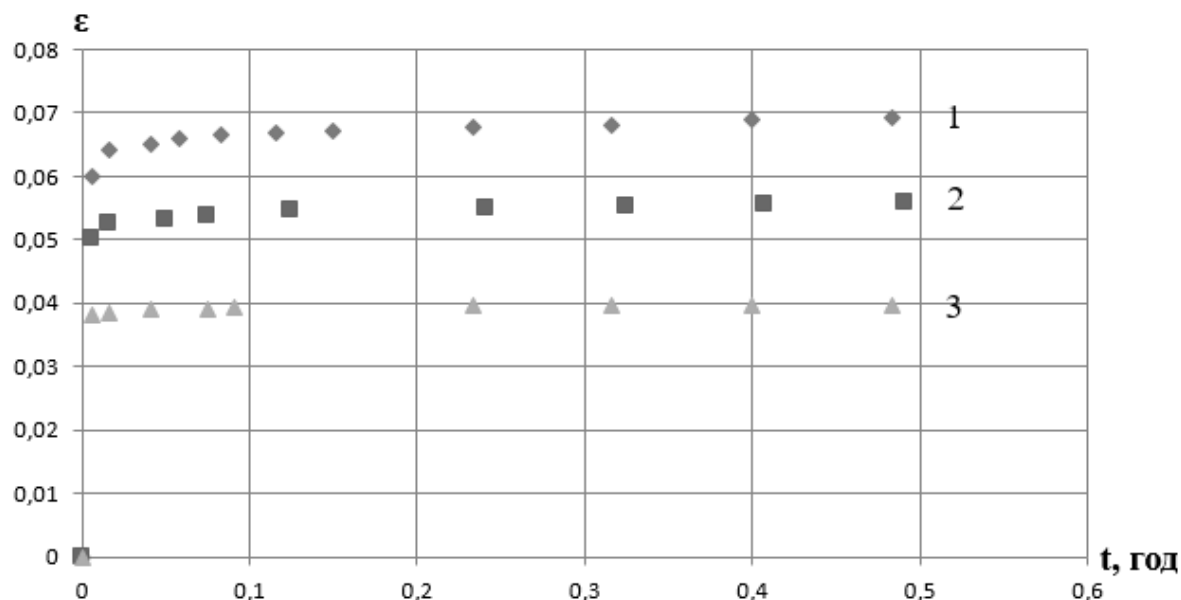


Рис. 4.9. Залежність повної деформації зразку від часу (зразки, що вирізано під кутом 45° до напрямку прокатки)

З кривих деформування за часом було виділено криві повзучості (рис. 4.10-4.12). Для цього від значень повних деформацій віднімалися миттєві пружні та пластичні, які були визначені для даного напруження за діаграмою деформування. На рис. 4.10 наведено дані для зразків, що було вирізано вздовж прокатки, рис. 4.11 – поперек прокатки, рис. 4.12 – під кутом 45° до напрямку прокатки. На цих графіках кривими 1, 2, 3 позначені дані для трьох значень напруження розтягу: 378.7 МПа, 366.8 МПа та 352.3 МПа відповідно.

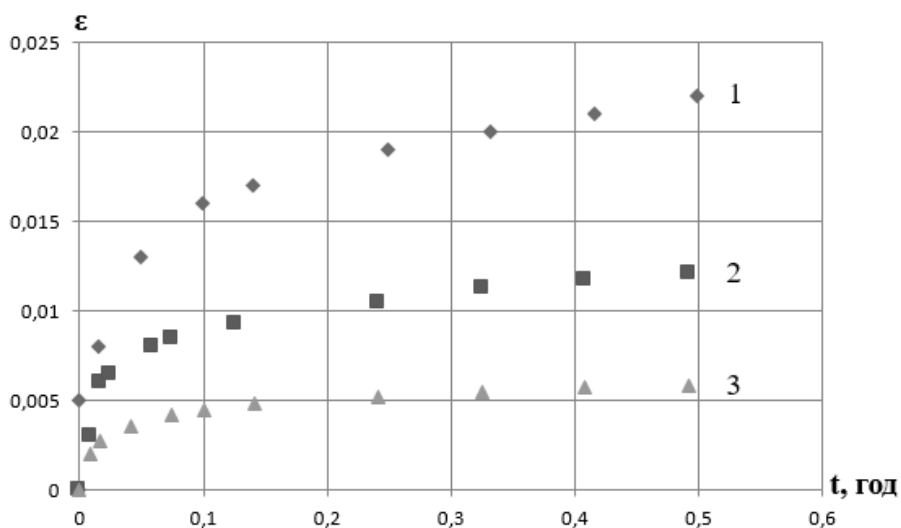


Рис. 4.10. Криві повзучості (зразки, що вирізано вздовж напрямку прокатки)

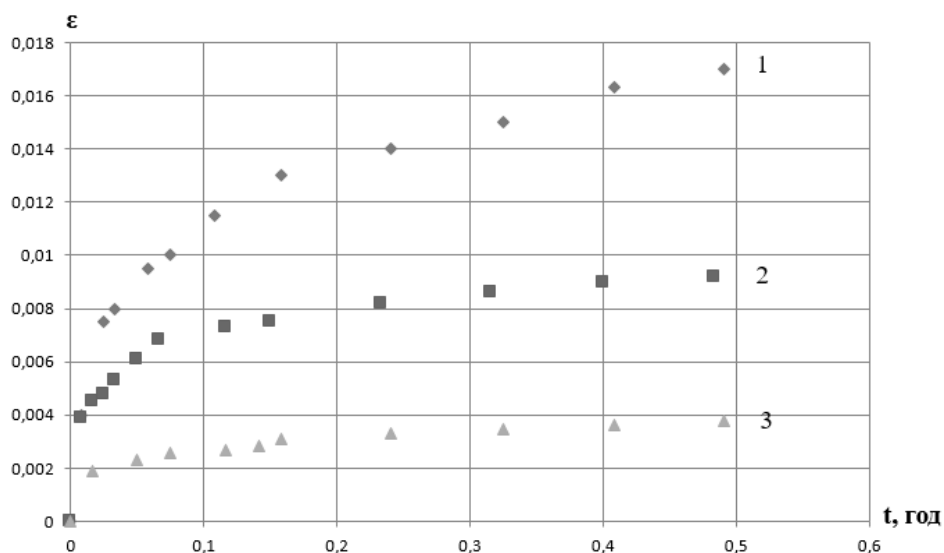


Рис. 4.11. Криві повзучості (зразки, що вирізано поперек напрямку прокатки)

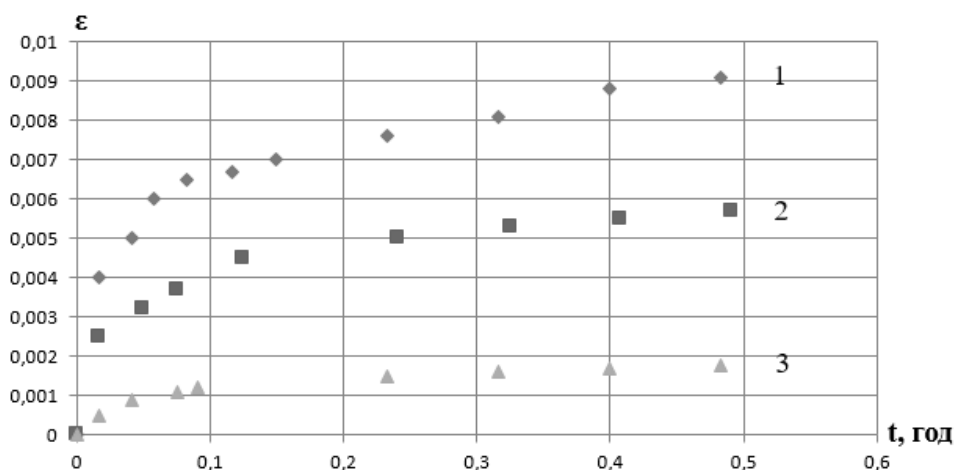


Рис. 4.12. Криві повзучості (зразки, що вирізано під кутом 45° до напрямку прокатки)

Аналіз отриманих експериментальних результатів для всіх напрямків показує, що для всіх значень напружень з обраного діапазону форма кривих повзучості відповідає першому етапу повзучості матеріалів – неусталеної повзучості.

Проведено експерименти на періодичне навантаження зразків. Для цього було обрано програму, наведену на рис. 4.13.

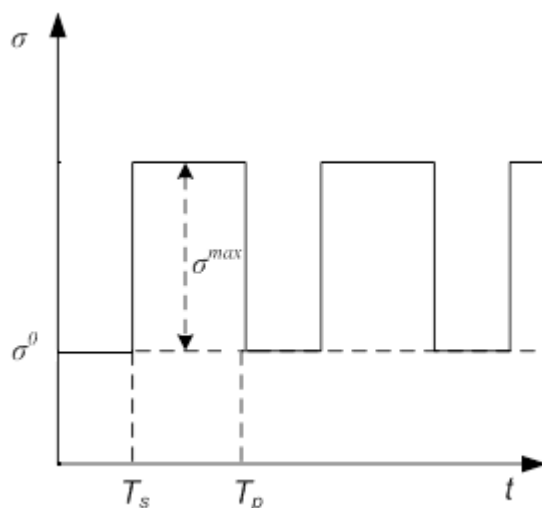


Рис. 4.13. Програма періодичного навантаження зразків

В експериментах було прийнято: $T_s = 60$ с. (0.0166 год.), $T_p = 240$ с. (0.0066 год.). Досліди проводились для 10 циклів навантаження (загальний час 2400 с.). Значення напружень склали $\sigma^0 = 352.3$ МПа, $\sigma^{max} = 26.4$ МПа, тобто протягом перших 60 с. у циклі зразки були навантажені напруженням $\sigma = 352.3$ МПа, потім 180 с. - напруженням $\sigma = 378.7$ МПа. Ці значення напружень є мінімальним та максимальним значеннями навантаження, які застосовувались у статичних дослідях.

Для експериментів було використано 9 зразків, по 3 на кожний напрямок в матеріалі – вздовж, поперек прокатки та під кутом 45° . Як й у статичних дослідженнях, при навантаженні мала місце миттєва пластична деформація, її значення відповідало значенням, набутим при деформуванні з $\sigma = 352.3$ МПа (рис. 4.7-4.9).

Експериментальні результати для деформації повзучості, усереднені для трьох зразків, наведено на рис. 4.14. Тут кривою 1 позначено дані для зразків, що вирізані вздовж прокатки, кривою 2 – поперек, кривою 3 – під кутом 45° . Відмінності між даними для зразків для кожного напрямку не перевершували 20-25%. З аналізу графіку видно, що при циклічному деформуванні зберігаються основні співвідношення у швидкості деформації для трьох напрямків, як це було виявлено для випадку статичного навантаження.

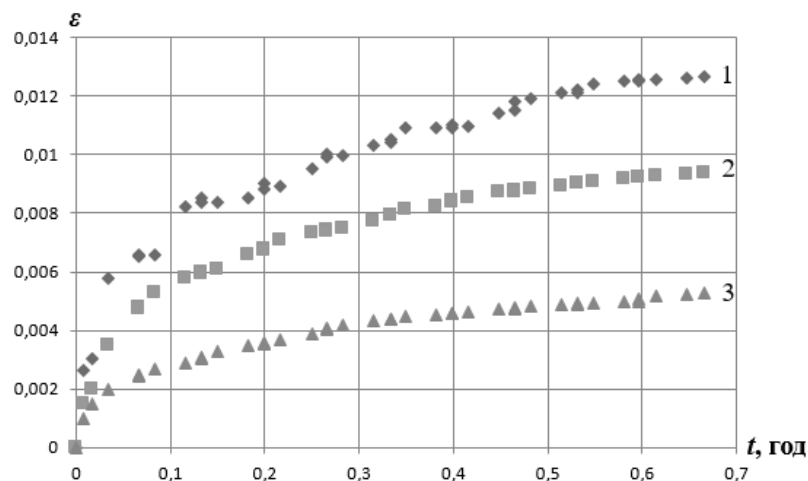


Рис. 4.14. Криві повзучості при періодичному навантаженні (зразки, що вирізано в усіх трьох напрямках)

Рис. 4.15-4.17 містять порівняння експериментальних даних, що отримано на зразках при статичному навантаженні з максимальним 378.7 МПа (крива 1) та мінімальним $\sigma = 352.3$ МПа (крива 3) напруженнями циклу, з даними періодичного навантаження (крива 2). Рис. 4.15 побудовано для зразків, що вирізано вздовж прокатки, рис. 4.16 – поперек прокатки, рис. 4.17 – для зразків, вирізаних під кутом 45° . Аналіз графіків показує, що криві деформування йдуть проміж кривих, які відповідають максимальному та мініимальному напруженням, що й співпадає з відомими з літератури даними [169, 171, 213] та витікає зі співвідношень (2.35).

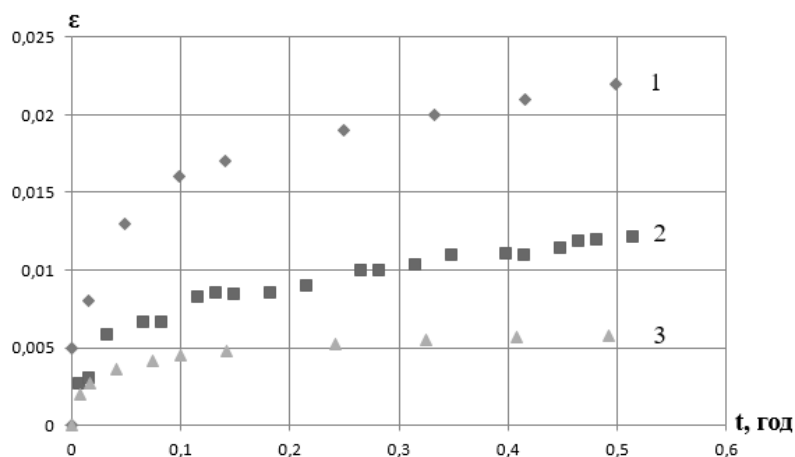


Рис. 4.15. Криві повзучості зразків, що вирізано вздовж прокатки (порівняння випадків статичного та періодичного навантаження)

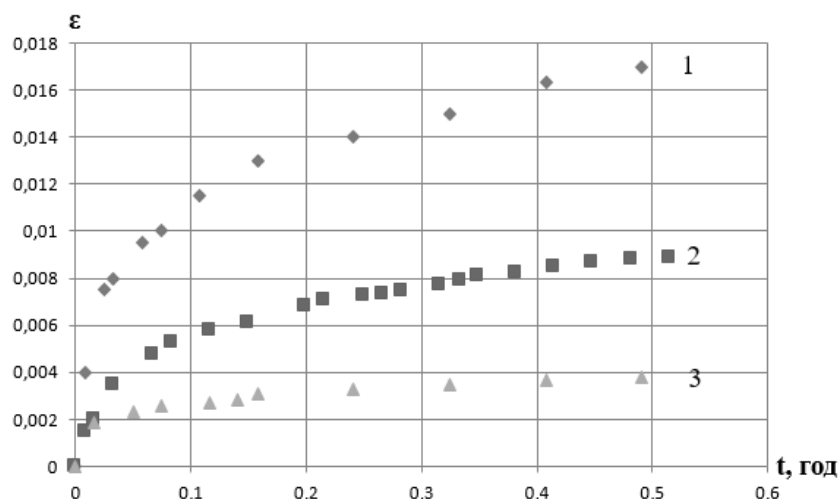


Рис. 4.16. Криві повзучості зразків, що вирізано поперек прокатки (порівняння випадків статичного та періодичного навантаження)

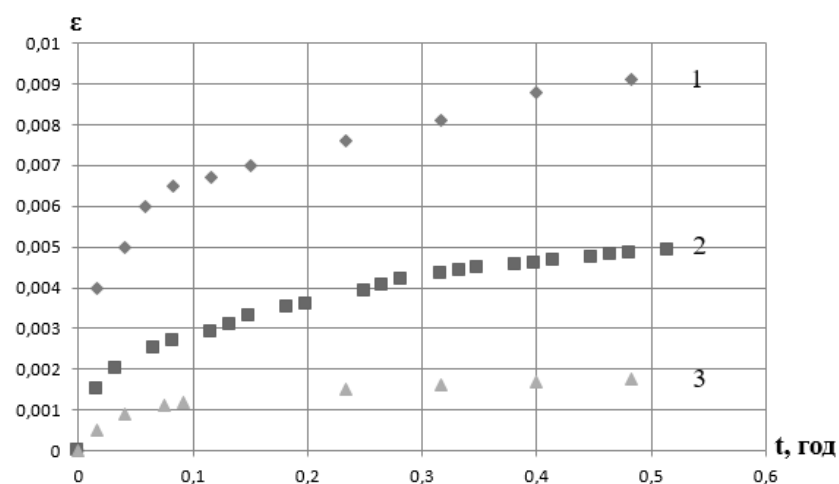


Рис. 4.17. Криві повзучості зразків, що вирізано під кутом 45° до прокатки (порівняння випадків статичного та періодичного навантаження)

4.2 Дослідження деформування пластин з отворами

З листів сталі 3 тієї ж серії постачання, що їх було використано для виготовлення плоских зразків, було виготовлено прямокутні пластини 160x34 мм з 5-ма отворами – центральним діаметром 10 мм, та 4-ма боковими діаметром 8 мм. Таку схему було обрано для реалізації в певних точках пластини напруженого стану, що відповідає діапазону проведених експериментів на повзучість для даного матеріалу. Чисельні дані попереднього пружно-пластичного розрахунку обговорено у підрозділі 5.2.

Пластини вирізались з листів вздовж напрямку прокатки. Для фіксації пластин у випробувальній машині АІМА-5-2 було виготовлено верхній та нижній технологічні отвори діаметром 10 мм. Схему пластини наведено на рис. 4.18. Всього було виготовлено 7 пластин (рис. 4.19). На них механічним шляхом було нанесено мірну сітку з кроком по поздовжньому напрямку 1 мм, у поперечному – 2 мм. (рис. 4.20). Для отримання даних для різних моментів часу використовувалась відеофіксація.

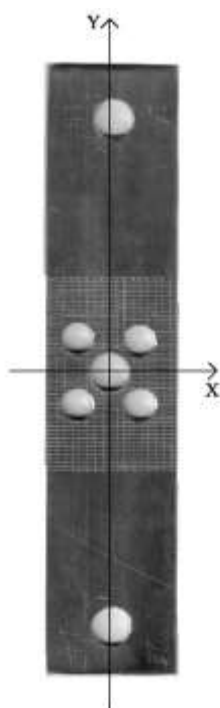


Рис. 4.18. Пластина з 5-ма отворами

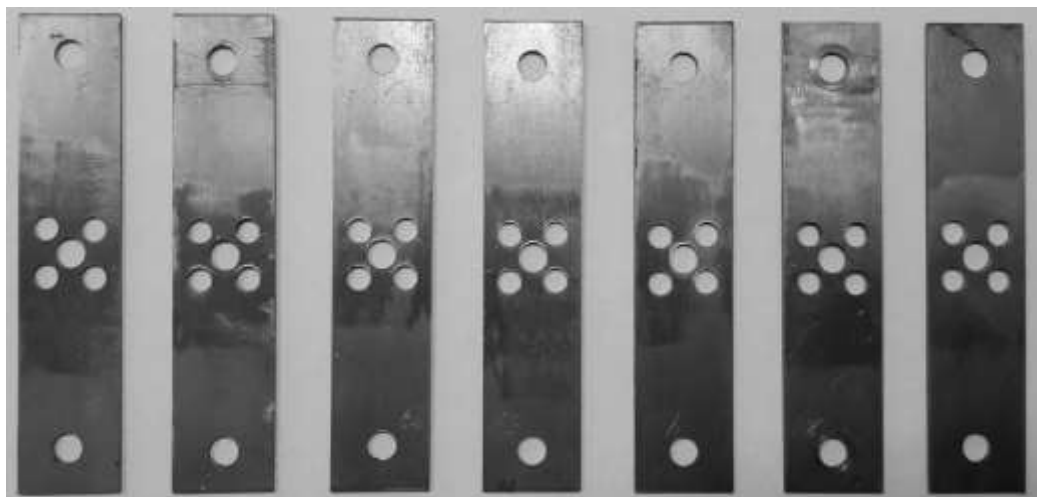


Рис. 4.19. Пластини, підготовані до випробувань

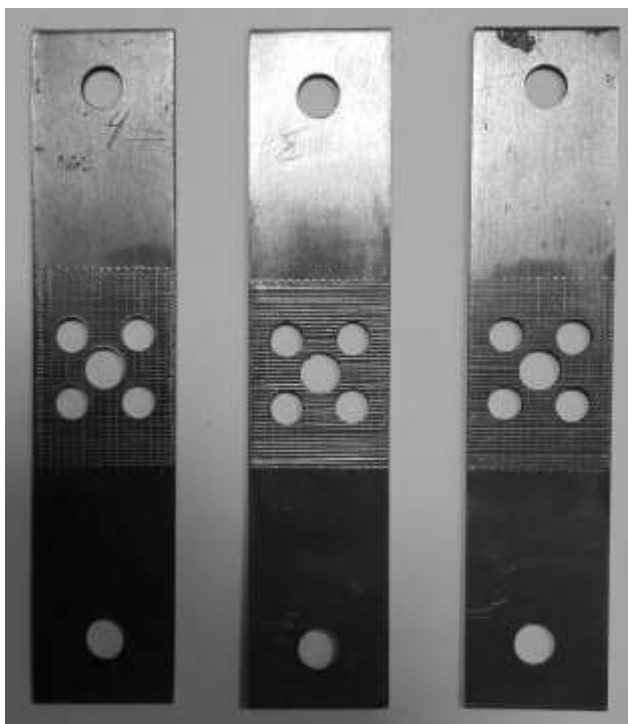


Рис. 4.20. Пластини з нанесеною мірною сіткою

В роботі було проведено експериментальні випробування таких пластин з 5-ма отворами при статичному та періодичному навантаженнях розтягуючим напруженням. В останньому випадку за програмою експерименту пластини через фіксований час розвантажувались, а потім навантажувались знов. Пластину, приготовану до експериментального випробування, зображено на рис. 4.21.



Рис. 4.21. Пластина, встановлена до захватів випробувальної машини з нанесеною мірною сіткою

При статичному навантаженні випробувано 3 пластини, при періодичному – 4. Результати замірів усереднювались. Для виконання замірів з відсканованих пластин в роботі розроблено допоміжне програмне забезпечення.

Розглянемо спочатку випадок статичного навантаження. Пластини навантажувались вагою 3000 кг на 60 с. (1 хвилину). Результати експериментів для різних моментів часу наведено на рис. 4.22, а-е. З аналізу фотографій видно, що має місце істотне деформування пластини за часом, при цьому кругові отвори перетворюються на еліптичні, зменшується ширина пластини в околі їхнього розташування. Після миттєвого зростання деформації з часом продовжується її збільшення.

Кількісні дані з деформованого стану визначались за аналізом змінювання розмірів комірок мірної сітки. На жаль, відсутність точної вимірювальної техніки не дозволила провести аналіз для частого змінювання часу визначення деформацій. Розглядались дані для таких значень часу: 3, 10, 20, 30 та 60 с.

Момент часу $t = 3$ с. вважався моментом набуття пластичних деформацій, потім дані аналізувались через 10 с. до моменту $t = 30$ с. У зв'язку з уповільненням повзучості відрізнити з повною впевненістю дані для моментів 40 та 50 с. з застосованою технікою вимірів не вдалось. Останні заміри проведені для моменту $t = 60$ с. Дані для деяких моментів часу у вигляді відео-кадрів наведено на рис. 4.22.

Також не вдалося з задовільною точністю провести визначення змінювання значень переміщень $u(x,y)$ у напрямку x , поперечному розтязі пластини (рис. 4.18.). Аналізувались поздовжні зміщення $v(x,y)$.

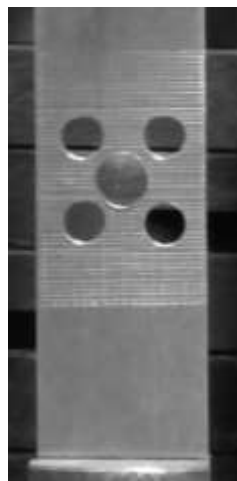
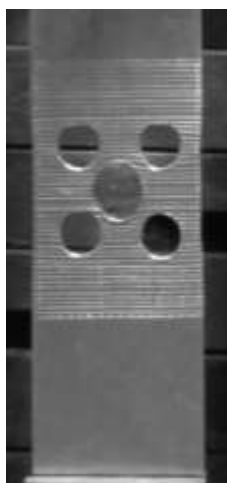
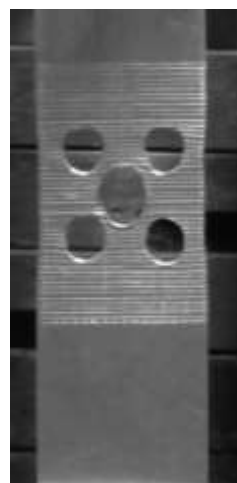
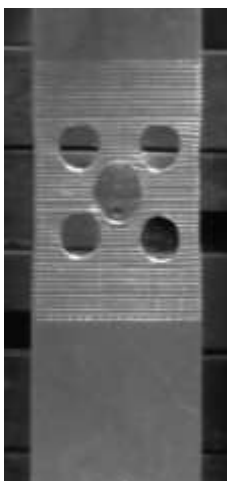
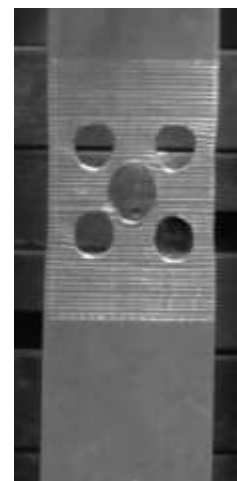
а) $t = 0$ с.б) $t = 3$ с.в) $t = 30$ с.г) $t = 40$ с.д) $t = 50$ с.е) $t = 60$ с.

Рис. 4.22. Деформована пластина при статичному навантаженні у різні моменти часу

Далі наведемо дані, визначені замірами для деяких точок пластин, в яких мало місце найбільш істотне збільшення деформованого стану (рис. 4.23). Дані усереднювались для трьох пластин, у зв'язку з симетрією розташування отворів також аналізувались та додавались для усереднення дані для лівих та правих половин.

Використовувалась наступна техніка замірів: миттєві фотографії пластини збільшувались до масштабу 200% та роздруковувались. Після цього виконувались заміри для деформованих пластин, порівнянням з початковим недеформованим станом та з миттєвими пластичними деформаціями визначались прирісти переміщень у поздовжньому напрямку. Результати порівнювались з даними, отриманими при програмному оцінюванні переміщень. У разі суттєвих відмінностей заміри повторювались з метою визначення помилки в тому чи іншому методі.

На рис. 4.23 представлено розташування точок, в яких проводилось вимірювання для різних моментів часу. Такі точки було обрано в районах на границях отворів та між ними, де й мало місце найбільш істотне зміння сітки. Для прикладу на рис. 4.24 наведено один зі збільшених кадрів, що відповідає моменту часу 30 с.

Експериментальні дані – змінювання переміщень за часом наведено на рис. 4.25, де точками позначено вимірювані значення, та у табл. 4.1.

Аналіз одержаних результатів свідчить про відповідність характеру кривих випадку неусталеної повзучості. Також відмітимо схожість з кривими, отриманими для зразків при одновісному розтязі.

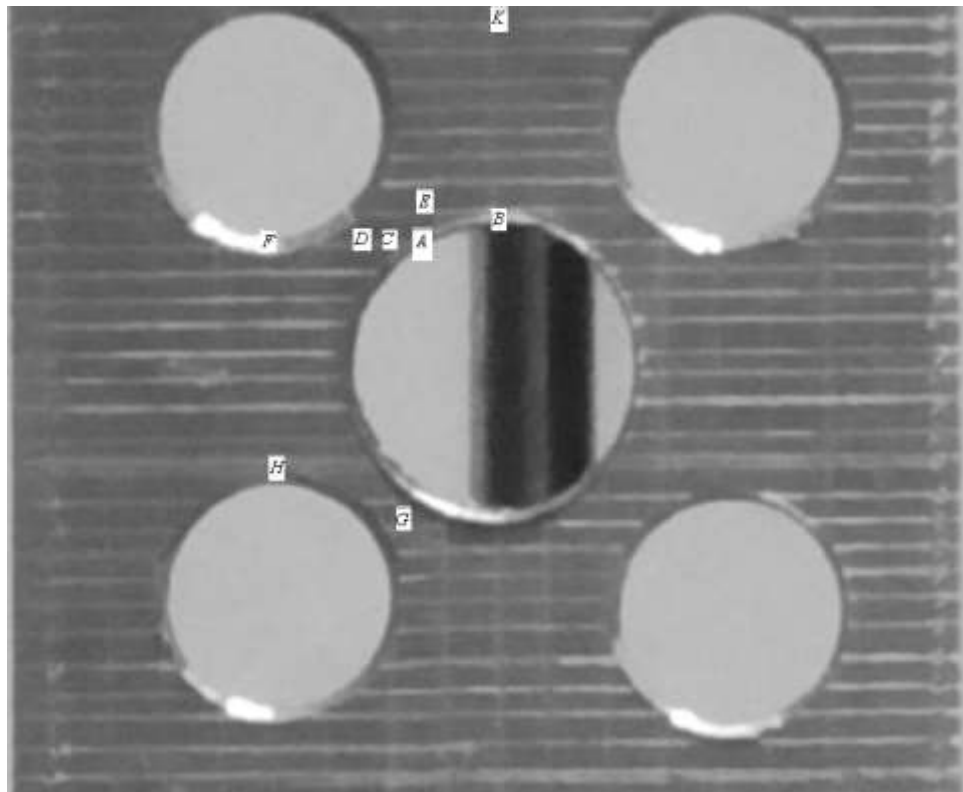


Рис. 4.23. Розташування точок пластини,
в яких відбувались заміри переміщень, $t = 0$ с.

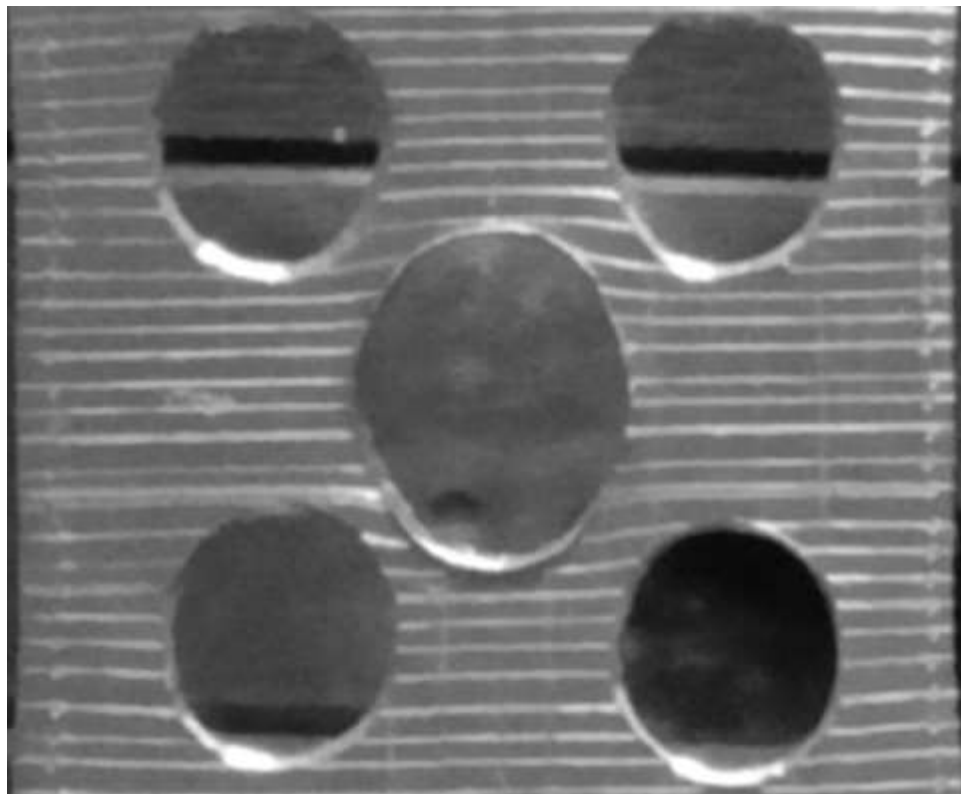


Рис. 4.24. Фрагмент деформованої пластини, збільшення для $t = 30$ с.

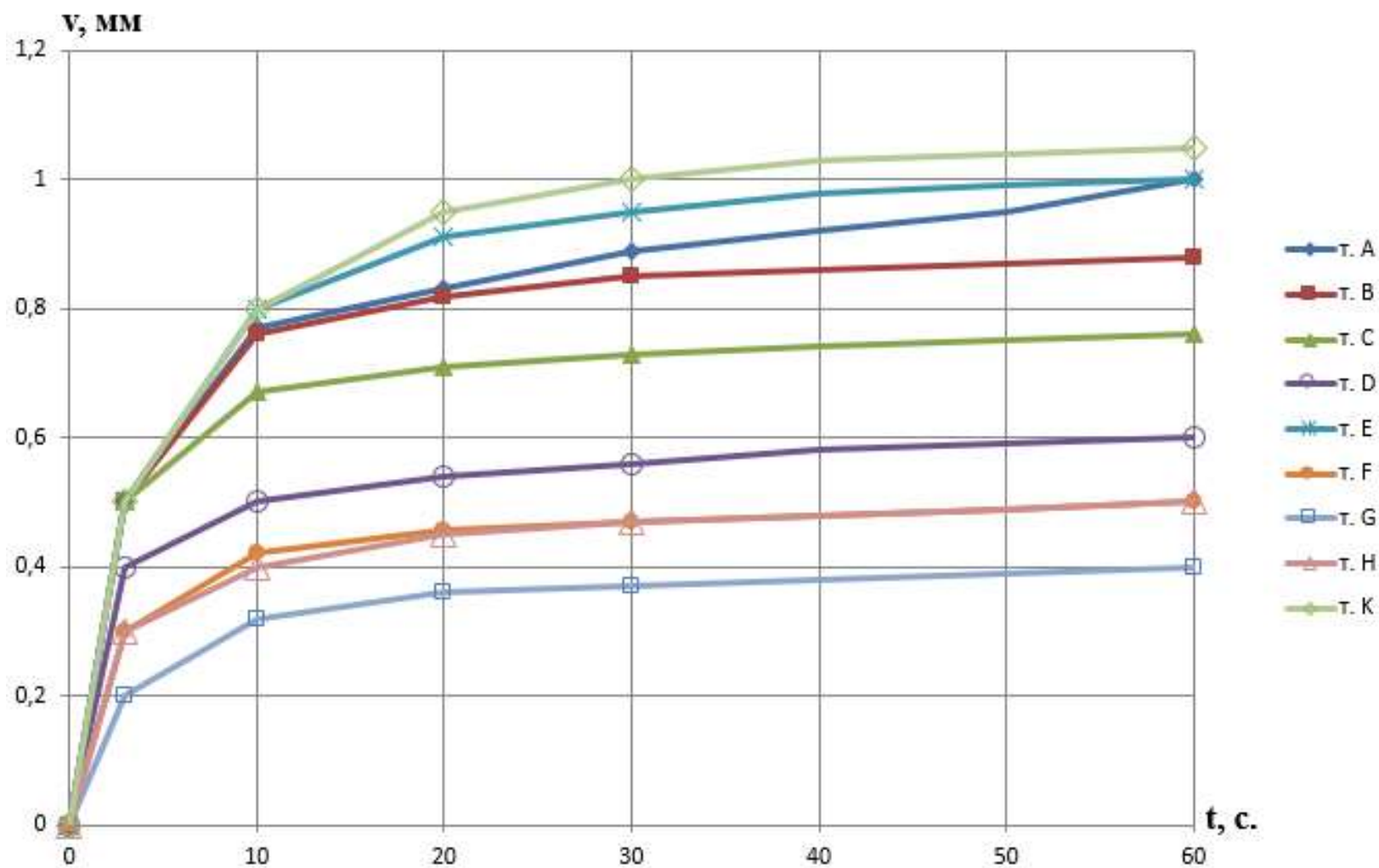


Рис. 4.25. Змінювання за часом переміщень у точках пластини, позначених літерами на рис. 4.23 (статичне навантаження)

Змінювання за часом переміщень у точках пластини (статичне навантаження)

t , с.	т. А, мм	т. В, мм	т. С, мм	т. D, мм	т. Е, мм	т. F, мм	т. G, мм	т. Н, мм	т. К, мм
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.3	0.2	0.3	0.5
10	0.77	0.76	0.67	0.5	0.8	0.42	0.32	0.4	0.8
20	0.83	0.82	0.71	0.54	0.91	0.456	0.36	0.45	0.95
30	0.89	0.85	0.73	0.56	0.95	0.47	0.37	0.47	1
60	1	0.88	0.76	0.6	1	0.5	0.4	0.5	1.05

Як видно з рис. 4.25, усі криві для точок пластин є якісно схожими: вони мають перші ділянки швидкого зростання приблизно до $t = 20$ с., а потім уповільнюють свою швидкість. Винятком є крива 3, побудована для точки А, розташованій на границі центрального отвору, в якій у період з 50–ї секунди починається пришвидшення повзучості. За цими даними є можливість зробити висновок про початок третьої ділянки кривої повзучості, яка відповідає прискореній повзучості, що супроводжується прихованим руйнуванням. Як відомо [103], саме в цих місцях концентрації напружень й відбувається руйнування розтягнених пластин.

Далі розглянемо результати експериментального вивчення деформування пластин при періодичному (циклічному) навантаженні за схемою рис. 2.5. Воно було задане таким чином: на час $T_c = 10$ с. пластину було навантажено силою розтягу 3000 кг, наступні 20 с. – силою 2725 кг, таким чином $T_p = 30$ с. В ході проведення експериментів з'ясувалось, що після чотирьох повних описаних вище циклів навантаження відбувалось руйнування пластин (рис. 4.26). У досліді мало місце руйнування на початку п'ятого циклу (на 3-й, 8-й, 9-й та 2-й секундах відповідно до номеру експерименту). Як видно з рисунку, руйнування відбувалось у районі технологічного отвору, призначеного для організації навантаження. Але й у місцях переходу від центрального отвору до бокового, від бокового до сторони пластини мають місце характерні помутніння металу, що може свідчити

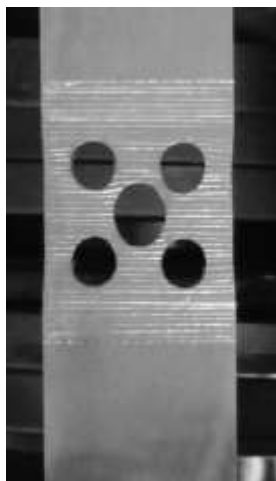
про набуття в цих місцях суттєвої пошкодженості та близького руйнування [22, 223].



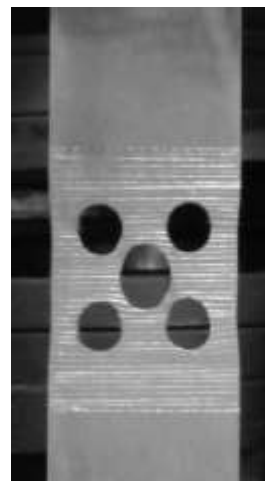
Рис. 4.26. Пластини, зруйновані після 4-х циклів навантаження

Наведемо ілюстрацію процесу деформування пластини. На рис. 4.27 наведено фотографії пластини (2-й експеримент), виконані на початку кожного періоду навантаження.

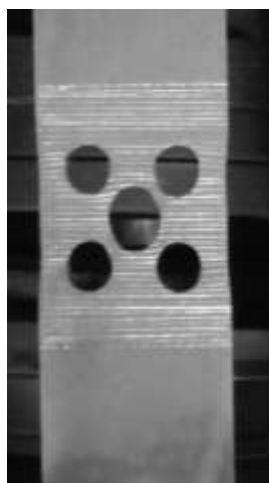
Як видно з рисунку, принципових відмінностей у характері деформування у порівнянні з дослідом, проведеним при статичному навантаженні, немає.



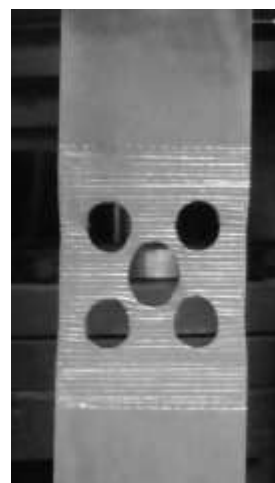
$t = 31$ с., початок 2-го циклу



$t = 61$ с., початок 3-го циклу



$t = 91$ с., початок 4-го циклу



$t = 119$ с., закінчення 4-го циклу

Рис. 4.27. Деформована пластина при періодичному навантаженні у різні моменти часу

Розглянемо результати замірів поздовжніх переміщень пластини. Для одержання цих даних використовувалась техніка, аналогічна розглянутій вище для статичного навантаження. Дані замірів, отриманих обробкою відеофіксації експериментів, для тих же точок рис. 4.23 представлені на рис.4.28.

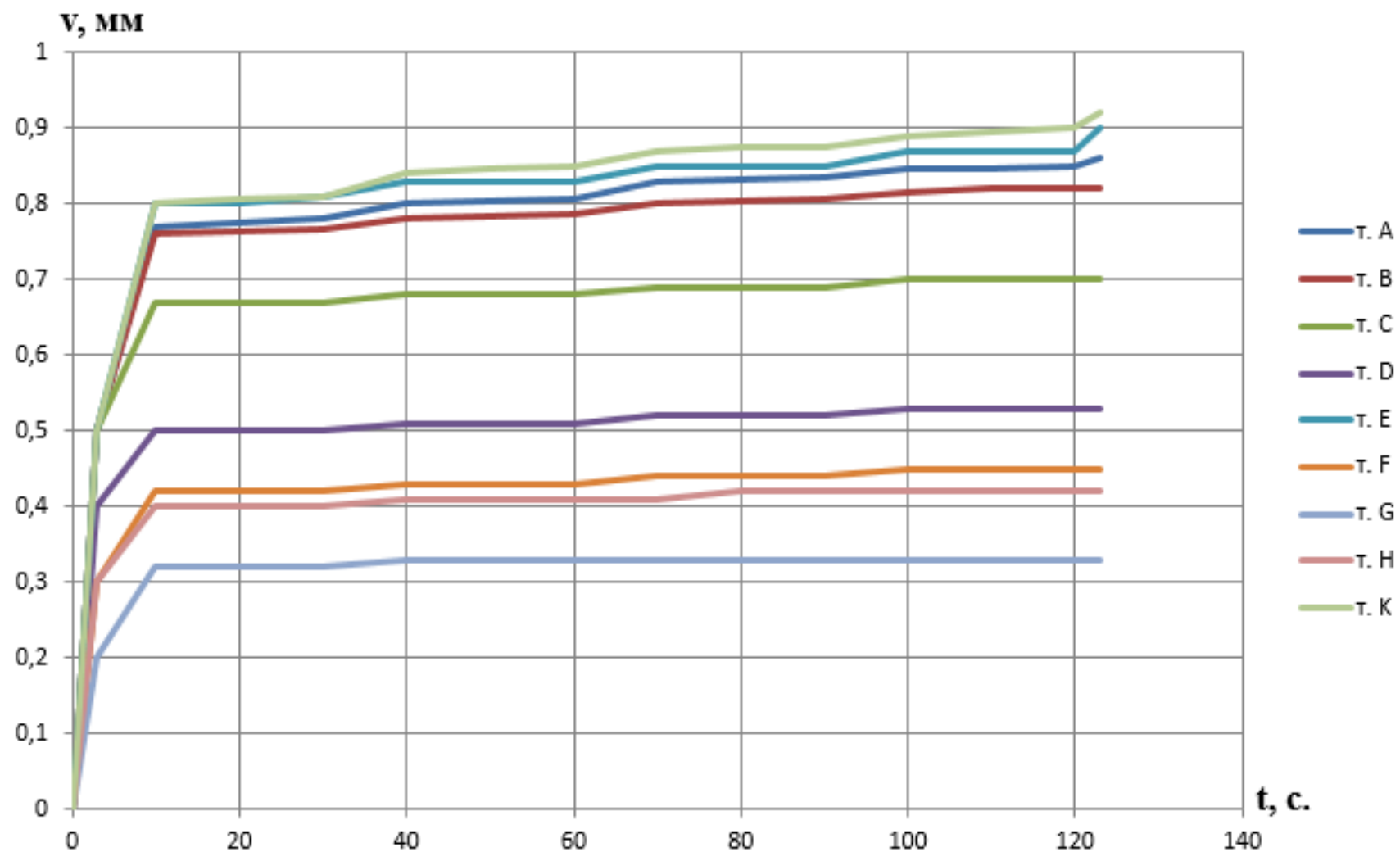


Рис. 4.28. Змінювання за часом переміщень у точках пластини, позначених літерами на рис. 4.23 (періодичне навантаження)

Як видно з рис. 4.28, усі отримані криві для точок пластин є якісно схожими: при зростанні у перші 10 с. криві відповідають кривим чисто статичного навантаження, далі завдяки частковому розвантаженню йде істотне уповільнення процесу зростання переміщень.

При побудові графіку залежності поздовжнього переміщення від часу (рис. 4.28) зміну переміщень у періоди циклів з меншим значенням навантаження (від 11-ї до 30-ї с. циклів) було зафіксовано за допомогою техніки замірів, що використовувалась, лише у точках А, В, Е та К, в яких й у дослідях статичного навантаження мали місце максимальні переміщення. В інших точках зміна переміщень у наведених частинах періодів була настільки малою, що її визначити не вдалось.

Як вже відзначалось, в місцях переходів від центрального до бокових отворів було зафіксовано характерні зміни металу, що може розглядатись як ознака близького руйнування. Цей висновок підтверджується й графіками переміщень для розташованих в тих місцях точок А та Е, в яких період з 120 до 123 с. експерименту починається пришвидшене зростання переміщень.

В цілому за результатами експериментів з періодичним навантаженням пластин можливо зробити висновок щодо істотного уповільнення процесу зростання переміщень у порівнянні з повзучістю при статичному навантаженні. Так, наприклад при ньому у точці А за 60 с. значення набутого переміщення складає 1 мм, а при періодичному навантаженні – 0.8 мм; у точці Е за 60 с. - також 1 мм, а при періодичному навантаженні – 0.85 мм.

4.3 Програма для обробки експериментальних даних

Для обробки отриманих даних експериментів з повзучості пластин з отворами, на які було нанесено мірну сітку, розроблено спеціалізовану програму «*DDN (Displacement of Deformed Nodes)*». Програму орієнтовано на застосування операційної системи *MS WINDOWS* та мови програмування *C++* з використанням кросплатформеного інструментарію *QT* [224]. Програма працює у автоматизованому режимі шляхом зіставлення сканованих зображень

деформованої та недеформованої пластини. Оператор-користувач сам визначає вузли, координати яких він хоче порівняти на недеформованому та деформованому об'єктах, для зручності вузли нумеруються та виділяються кольором. Для обраних вузлів створюються файли з координатами вузлів на недеформованій та деформованій пластині, та файли з різницею у координатах.

Коротко проілюструємо алгоритм роботи програми:

1) Користувач обирає зображення, з якими буде працювати. Після відкриття зображення стискаються до розмірів області, в яких вони мають розміститися, враховується довжина та ширина кожного з зображень для запобігання їхнього деформування. В залежності від розмірів зображення розраховується положення всередині області (рис. 4.29).

2) Далі користувач обирає пункт "Size". Задає відстані у міліметрах між вузлами та обирає колір для роботи на зображенні. Двома кліками миші на кожному з зображень, користувач задає розміри одного прямокутного елемента, програма отримує відстані у пікселях між вузлами (рис. 4.29).

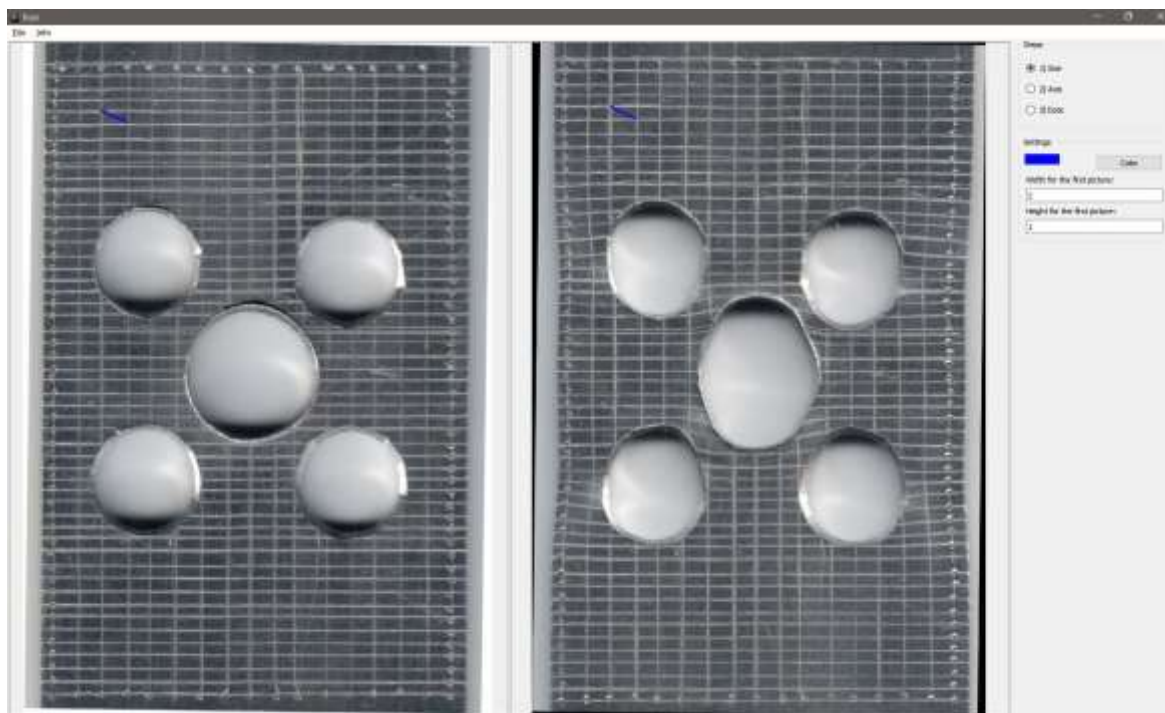


Рис. 4.29. Встановлення співвідношення кількості пікселей зображення з реальними розмірами зразка

3) Наступним кроком користувач позначає точки для розташування осей. На цьому етапі автоматично вираховується “центр” зображення (рис. 4.30).

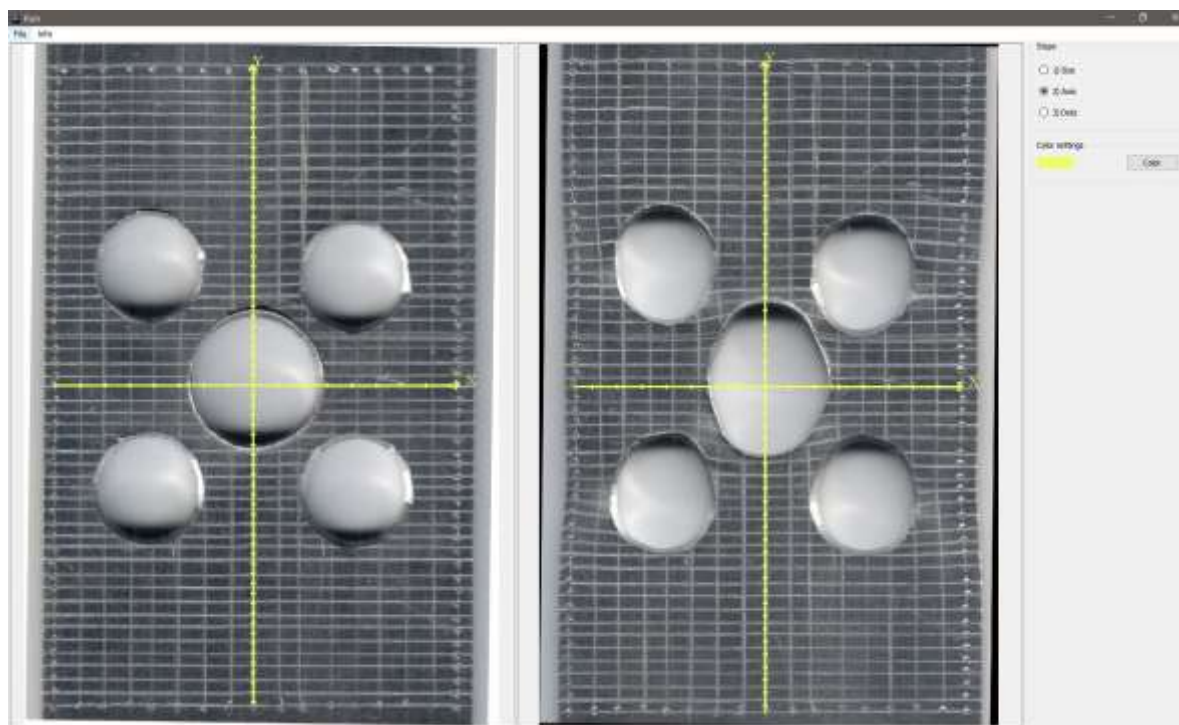


Рис. 4.30. Нанесення координатних осей та визначення початку координат

4) Після виконання 2 та 3 пунктів користувачу стає доступним пункт “Dots” для завдання положення точок. На цьому етапі користувач може отримати відстань від нанесених точок від центру у міліметрах для кожної з них. Йому надається можливість переглянути координати обраних точок та зберегти їх у окремі файли. Також одночасно розраховуються зміщення вузлів у міліметрах на зразку, отриманому після експерименту.

Перевірка програми здійснюється порівнянням отриманих результатів в розробленій програмі та вимірами на реальних зразках (рис. 4.31). Оператор обирає однакові вузли на обох зразках, отримує їхню відстань від початку координат та створює файл з даними. Також розраховуються зміщення вузлів на деформованій пластині. Після цього вручну, як це було описано у п. 4.2, вимірюється відстань від цих вузлів до центра зразку до початку експерименту та після, та порівнюються результати вимірювань. Результати, отримані у програмі

та безпосередньо при ручному замірі, збігаються з погрешністю до 25-30%. Така похибка може бути пояснена неточністю роботи людини-оператора, застосуванням інструменту з обмеженими характеристиками, відхиленнями у даних при скануванні та збільшенні зображень.

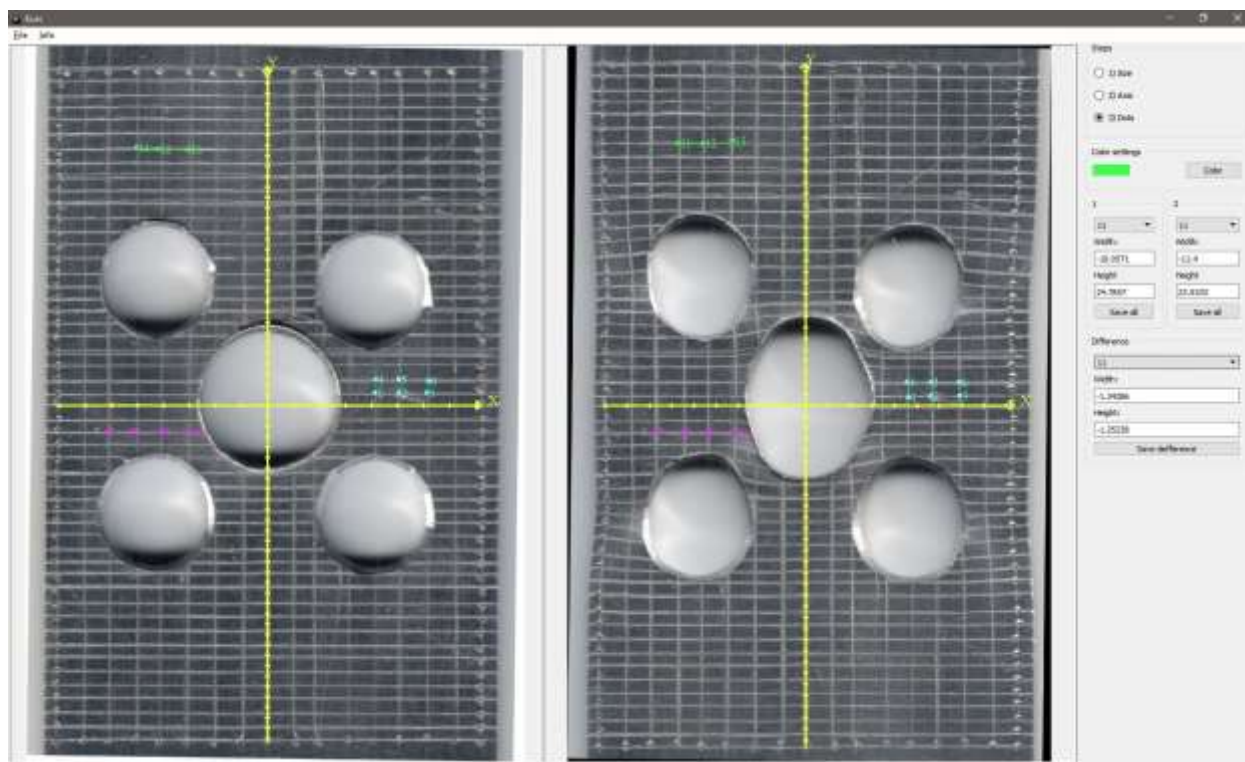


Рис. 4.31. Позначення вузлів та отримання відстаней від вузлів до початку координат, отримання величини зміщення точок

4.4 Висновки за розділом

У розділі наведено результати експериментального вивчення повзучості сталі 3 при кімнатній температурі при простому та складному (двовісному) напружених станах. За дослідів на плоских зразках, що їх було вирізано зі сталевих листів однієї серії постачання у трьох напрямках – вздовж, поперек та під кутом 45° до напрямку прокатки, визначені криві повзучості. Встановлено ортотропію (трансверсальну ізоτροпію) властивостей повзучості сталі 3. Розглянутий тип фізично нелінійного деформування можливо вважати короткочасною повзучістю, тому що основний процес триває не більш 10-15 хвилин, після чого ще приблизно 15 хвилин повзучість істотно уповільнюється.

Проведено дослідження впливу періодичного навантаження на деформування при повзучості сталі з трансверсально-ізотропними властивостями повзучості при кімнатній температурі.

За експериментами над спеціально спроектованими та виготовленими пластинами з 5-ма отворами досліджено процес короткочасної повзучості при плоскому напруженому стані та при істотній концентрації напружень. Встановлено залежності деформування різних точок пластин від часу при чисто статичному та періодичному навантаженнях. Наголошується, що якісно криві повзучості у цьому випадку співпадають з кривими, отриманими при простому напруженому стані.

Для роботи з мірними сітками, що були нанесені на пластини, які досліджувались, було розроблено та застосовано спеціальну комп'ютерну програму.

Основні результати, одержані у розділі, опубліковано у роботах [5, 9, 11-12].

РОЗДІЛ 5

РОЗРАХУНКИ КОРОТКОЧАСНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ПЛАСТИН У ЇХНІЙ ПЛОЩИНІ

У розділі надано опис результатів чисельного моделювання деформування при повзучості пластин, навантажених у їхній площині. Розглянуто задачі для пластин з отворами та технологічну задачу визначення напружено-деформованого стану сталевих листів після прокатки та витягування.

5.1 Повзучість та приховане руйнування титанових пластин

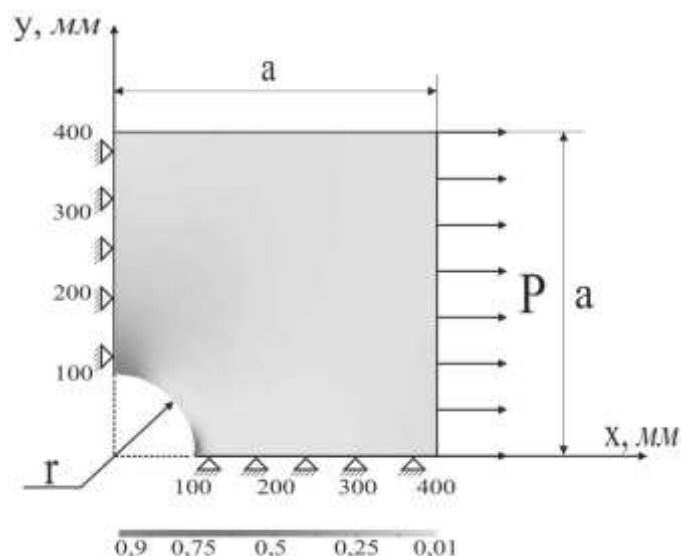
Розроблений метод і програмне забезпечення були використані для моделювання повзучості та пошкоджуваності в титанових пластинах зі сплаву BT1-0 (аналоги – сплави IM125 або T40). Дані з констант, що входять до рівнянь повзучості та пошкоджуваності при $T=773$ К, наведено у п. 3.4.2.

Спочатку для оцінювання достовірності результатів, що отримуються, було проведене порівняння чисельних розрахунків з експериментальними даними, отриманими авторами [133] при статичній повзучості до руйнування для зразків, вирізаних у різних напрямках. Зразки розглядалися як довгі прямокутні пластини при розтязі. При цьому встановлено, що відмінності між значеннями не перевершували 25-32% як для змінювання за часом деформацій, так й для значень часу до руйнування. Ці дані для напруження розтягу 60 МПа представлено у таблиці 5.1.

Далі розглянемо задачу статичної та динамічної повзучості титанової пластини (0.8 м x 0.8 м) з центральним отвором, радіус якого дорівнює 0.1 м. Була розглянута одна чверть пластини, розрахункову схему наведено на рис. 5.1. Після чисельних експериментів було обрано скінченноелементну сітку з 2364 елементів. Проаналізовано напружено-деформований стан і змінювання пошкоджуваності в часі. На рис. 5.1 представлено розподіл міри пошкоджуваності для випадку статичного навантаження при дії напруження розтягу в 10 МПа в момент часу $t=220$ год., близькому до моменту часу до руйнування $t^*=221$ год.

Порівняння значень часу до руйнування при статичному навантаженні

Орієнтація осей анізотропії, ϑ°	Напруження розтягу, МПа	Експериментально визначене значення t_* , год	Чисельне значення t_* , год
0	60	24	25.9
45	60	19	20.5
90	60	28.7	19.7

Рис. 5.1. Розподіл міри пошкоджуваності $\eta = \eta(\tilde{\sigma}, y)$ при $t=220$ год.

Розрахунками встановлено нелінійну залежність характеристик повзучості та пошкоджуваності від навантаження: так, наприклад, збільшення навантаження з 10 до 13 МПа призводить до зменшення часу до руйнування від 221 годин до 68.5 годин.

Наведемо результати моделювання динамічної повзучості цієї ж пластини. Осьове навантаження в даному випадку складається з статичної складової $p_0=16.9$ МПа та циклічної, яка змінюється за синусоїдальним законом з частотою 10 Гц. Введемо параметр навантаження $L=p_0/p_a$ де p_a – амплітудне значення навантаження. Розглянуто зміну L від 0 до 0.3.

Час до руйнування при такій програмі навантаження зменшується зі збільшенням L від 0.166 год. для $L=0$ до 0.122 год. для $L=0.3$. Встановлено, що характер перерозподілу напружень і міри пошкоджуваності якісно збігається з випадком статичного навантаження, але має місце суттєве прискорення процесів повзучості та післядії внаслідок динамічної повзучості.

Розрахунками встановлено, що для малих значень навантажень, і відповідно, малих значень напружень в пластині, характер процесу відрізняється від вище проаналізованого. Періодичне навантаження прискорює релаксацію напружень в області отвору, як і у випадку динамічної повзучості, при якій рівень напружень настільки малий, що швидкість накопичення пошкоджуваності значно знижується. Наприклад, для $p_0=13$ МПа час до руйнування для $L=0$ складає $t^*=68.5$ год., але додавання малої циклічної складової ($L=0.05$) призводить до збільшення часу $t^*=72.6$ год. Подальше збільшення L призводить до аналогічного збільшення часу до руйнування у зв'язку зі швидкою динамічною релаксацією на початку процесу: для $L=0.1$ $t^*=120.1$ год.

Використання тензорної моделі для опису накопичення прихованої пошкоджуваності внаслідок динамічної повзучості дозволяє отримувати характеристики пошкоджуваності в різних напрямках. Як приклад, на рис. 5.2 наведено розподіл міри пошкоджуваності η (крива 1) та компонентів тензору пошкоджуваності ω_{xx} й ω_{yy} (криві 2 та 3 відповідно) по лінії $y=0$ від місця руйнування області пластини, в якій у початковий момент має місце максимальна концентрація напружень, до краю пластини для випадку $L=0.3$. Компоненти ω_{xx} й ω_{yy} наведено для моменту 0.061 год. ($t=t^*/2$). Видно, що накопичення пошкоджуваності має неоднорідний характер у локальній області біля отвору та швидко зменшується за віддаленням від нього до малих величин порядку 10^{-4} . Як видно з графіку, найбільші значення притаманні компоненту ω_{xx} . Міру пошкоджуваності η приведено для моменту перед закінченням прихованого руйнування $t=0.1219$ год.

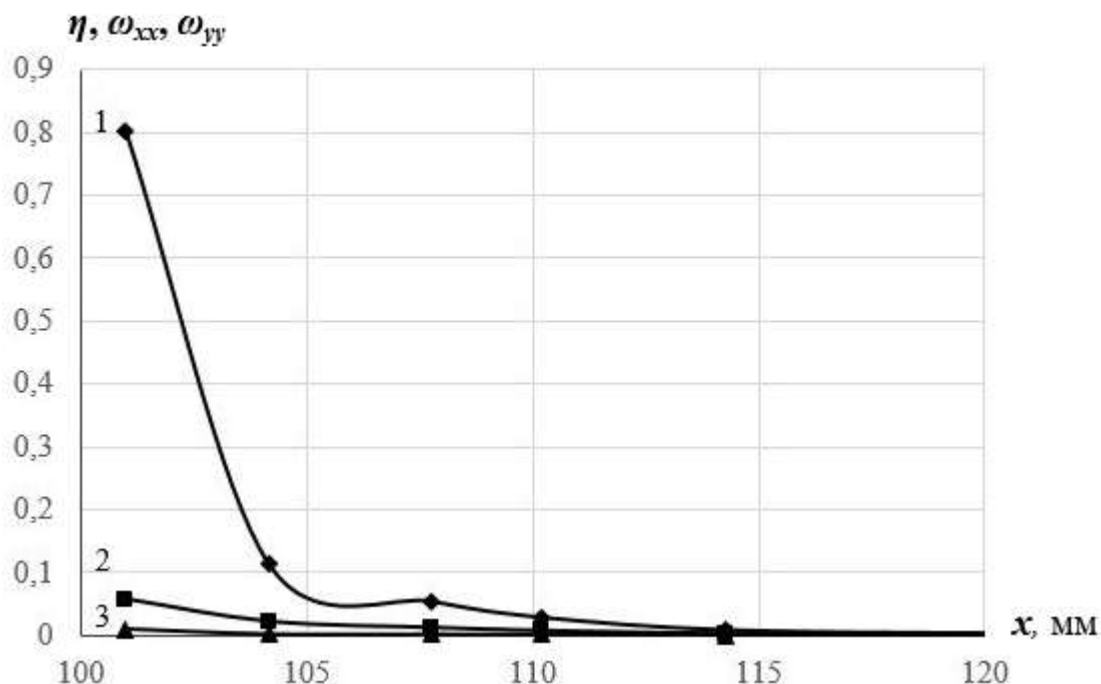


Рис. 5.2. Розподіл міри та компонентів тензору пошкоджуваності за довжиною пластини

Аналіз значень компонентів тензору пошкоджуваності, які отримуються при розрахунках, дозволяє робити висновки про ймовірні напрямки подальшого руйнування.

5.2 Повзучість пластин з отворами при початковому пружно-пластичному деформуванні

5.2.1 Порівняння чисельних та експериментальних результатів для статично навантаженої пластини з 5ма отворами.

Результати експериментальних досліджень деформування пластини з п'ятьма отворами, що описані у 4-му розділі, застосовано до порівняння з даними чисельного моделювання за допомогою створеного програмного забезпечення. Внаслідок симетрії навантаження, як розрахункову схему використано модель половини пластини розмірами 17x160 мм, причому за підходом Сен-Венану пластина з верхнього боку вважалась навантаженою рівномірним розтягуючим навантаженням $p=135$ МПа. Точне навантаження пластини за отвором також моделювалось чисельно, та цю величину було

підтверджено за результатами чисельного моделювання. Нижня границя пластини вважалась жорстко закріпленою. Розрахункову схему пластини разом зі скінченноелементною сіткою, що налічує 838 вузлів та 1474 елементи, наведено на рис. 5.3. Цю сітку було обрано після проведення перевірочних пружно-пластичних розрахунків, які виконувались як у застосованому програмному забезпеченні «*FEM CREEP*», так й в пакеті інженерних розрахунків з однаковими сітками. Розподіл інтенсивностей напружень наведено на рис. 5.4. а (розрахунки в пакеті) та 5.4. б («*FEM CREEP*»). Як видно, напружений стан визначається приблизно однаковим, з розбіжністю 10-15 МПа та якісно близькими зонами з однаковим рівнем напружень.

Результати розрахунків свідчать про істотну концентрацію напружень у зонах між отворами та під кутом приблизно 45° до отворів у напрямках до зовнішніх сторін пластин, максимальне значення інтенсивності напружень дорівнює 394 МПа та 390 МПа, що є близьким до границі міцності матеріалу 395.3 МПа.

У зв'язку з присутністю в деяких зонах пластини скінченних деформацій, розрахунки у ПЗ «*FEM CREEP*» у цих зонах надають завищені значення компонентів тензору деформацій. Величини деформації у постановці пакету визначаються точніше, максимальні значення складають 6%. У зв'язку з цим при миттєвому пластичному деформуванні дані з початкового розподілу напружено-деформованого стану залучені ті, що одержані за допомогою пакету інженерних розрахунків *ANSYS* (студентська версія). Отримані значення вузлових компонентів напружень та деформацій за допомогою спеціального програмного модулю перераховувались до значень в елементах у комплексі «*FEM CREEP*». Діаграму деформування (рис. 4.3) задано за спрощеною моделлю зміцнення, причому в розрахунках дотичний модуль був прийнятим рівним 429.712 МПа.

Далі проводилось моделювання повзучості пластини з отворами протягом 30 секунд. В розрахунках застосовано значення констант повзучості матеріалу пластини, визначені в роботі експериментально (2.15).

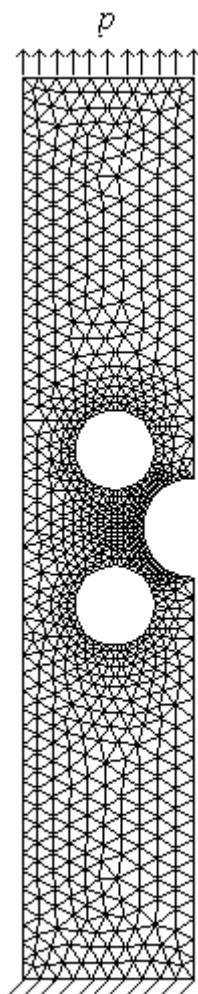


Рис. 5.3. Схема половини пластини з 5-ма отворами
та скінченноелементна сітка

Розрахунки повзучості проведено зі змінним кроком інтегрування - з початкового значення $1 \cdot 10^{-9}$ год до $1 \cdot 10^{-4}$ год. Загальний час розрахунку складав 30-40 хвилин з застосуванням процесору Intel Core i7-720QM.

Результати розрахунків (рис. 5.4-5.12) за допомогою програмного комплексу «*FEM CREEP*» порівнювались з даними, що було отримано після обробки експериментальних відео записів експериментів (рис. 4.25), табл. 4.1.

Розглянемо результати порівняння чисельних та експериментальних даних з деформування пластин в околі отворів. Порівнювались виміряні для різних моментів часу до 30 с. значення повних компонентів переміщень v , мм зі значеннями, отриманими для відповідних вузлів скінченноелементної сітки. Компоненти переміщення u при заданому характері деформування мають значно

менші значення, які було неможливо визначити за застосованим методом порівняння сіток. Часовий інтервал розрахунку обрано виходячи з можливостей створеного програмного забезпечення, яке дозволяє аналізувати випадок малих деформацій. Дані представлені на рис. 5.5-5.10 та у табл. 5.2.

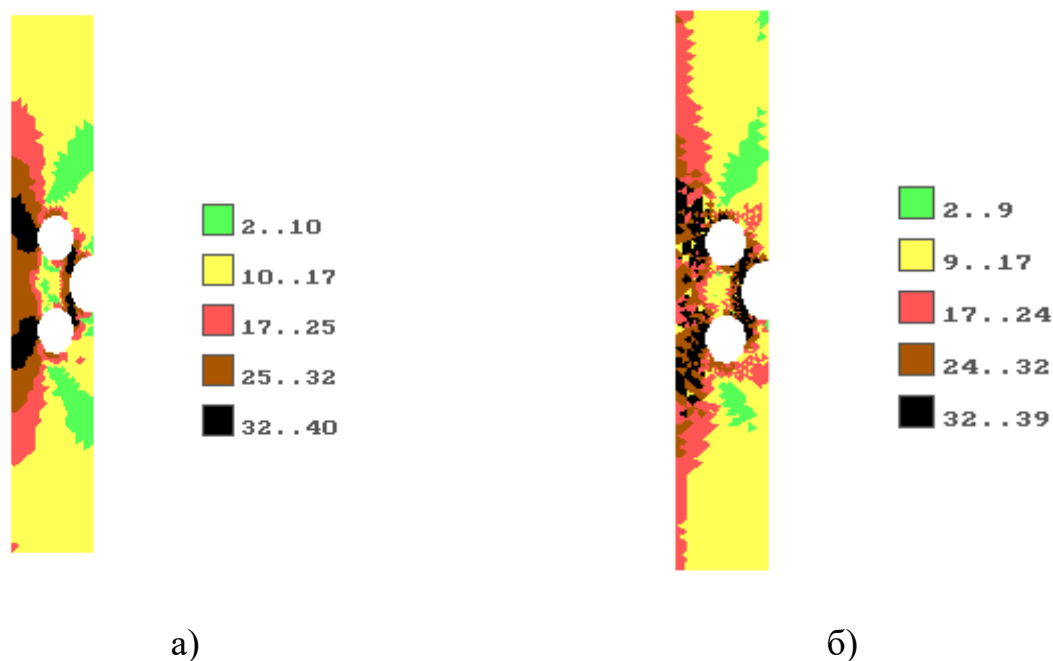


Рис. 5.4. Початковий розподіл інтенсивностей напружень в половині пластини, $\sigma_i \cdot 10^{-1}$ МПа

На рис. 5.5 наведено отриману розрахунками деформовану скінченноелементну сітку для моменту часу $t=30$ с. Порівняння її з рис. 4.26, де міститься фото деформованої пластини для цього ж моменту, дозволяє зробити висновок щодо якісно вірного опису деформування при повзучості.

Розглянемо кількісні оцінки. В табл. 5.2 представлено результати порівняння експериментальних та чисельно визначених значень переміщень короточасної повзучості для точок, розташованих між трьома отворами, в яких має місце істотне деформування при повзучості. Розташування точок, позначених буквами, відмічено на рис. 4.23. Цим точкам у скінченноелементній моделі відповідають номери вузлів, представлені на рис. 5.6. Точка К відповідає 424-му вузлу, який завдяки застосованому масштабу не відображено на рис. 5.6.



Рис. 5.5. Деформована скінченноелемента сітка, масштаб 1:60

Таблиця 5.2

Порівняння експериментальних та чисельно визначених переміщень [мм]
для $t=30$ с.

Точка / номер вузла	A / 44	B / 37	C / 270	D / 286	E / 250	F / 169	G / 258	H / 194	K / 424
Експериментальні дані	0.4	0.35	0.23	0.15	0.45	0.17	0.17	0.17	0.5
Чисельні дані	0.32	0.34	0.25	0.21	0.3	0.2	0.13	0.19	0.34
Похибка, %	20	3	9	29	33	15	24	11	32

Аналіз даних, наведених у табл. 5.2, свідчить, що у районах найбільшого рівня переміщень максимальна відмінність між чисельними та

експериментальними даними складає 32-33%, але в інших точках похибки є значно меншими.

Порівняння чисельних (суцільні лінії) та експериментальних даних (точки) для різних моментів часу наведено на рис. 5.7-5.9.

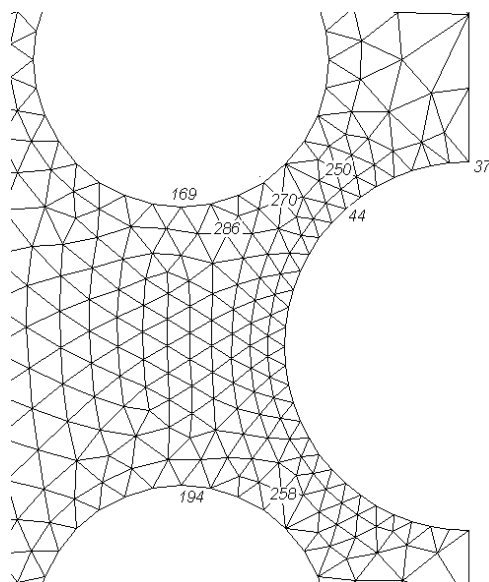


Рис 5.6. Розташування вузлів скінченноелементної сітки в околі трьох отворів

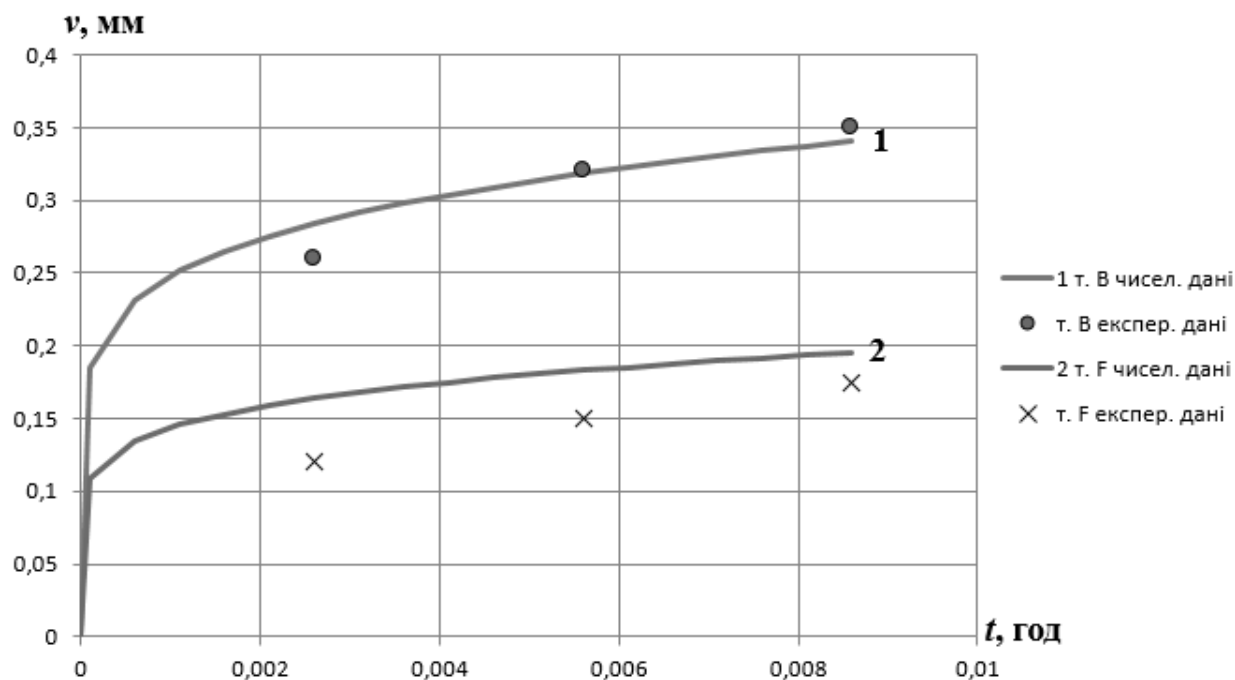


Рис. 5.7. Змінювання за часом переміщень у точках В та F

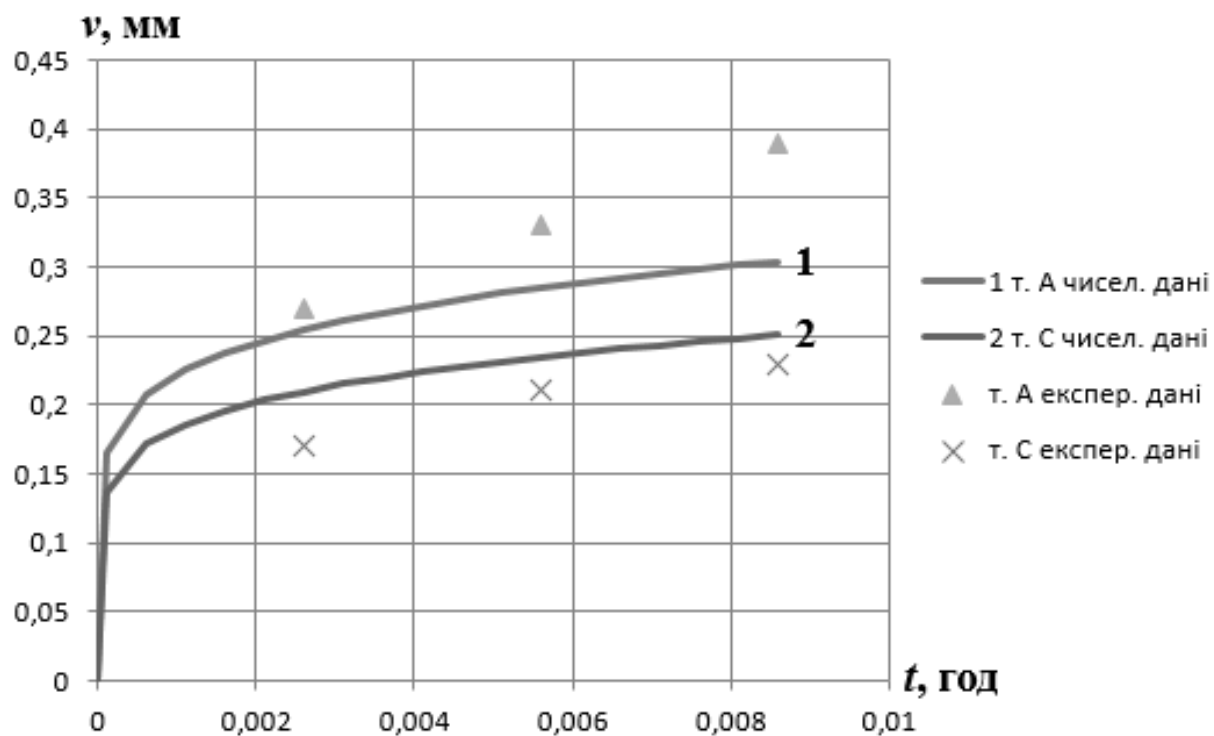


Рис. 5.8. Змінювання за часом переміщень у точках А та С

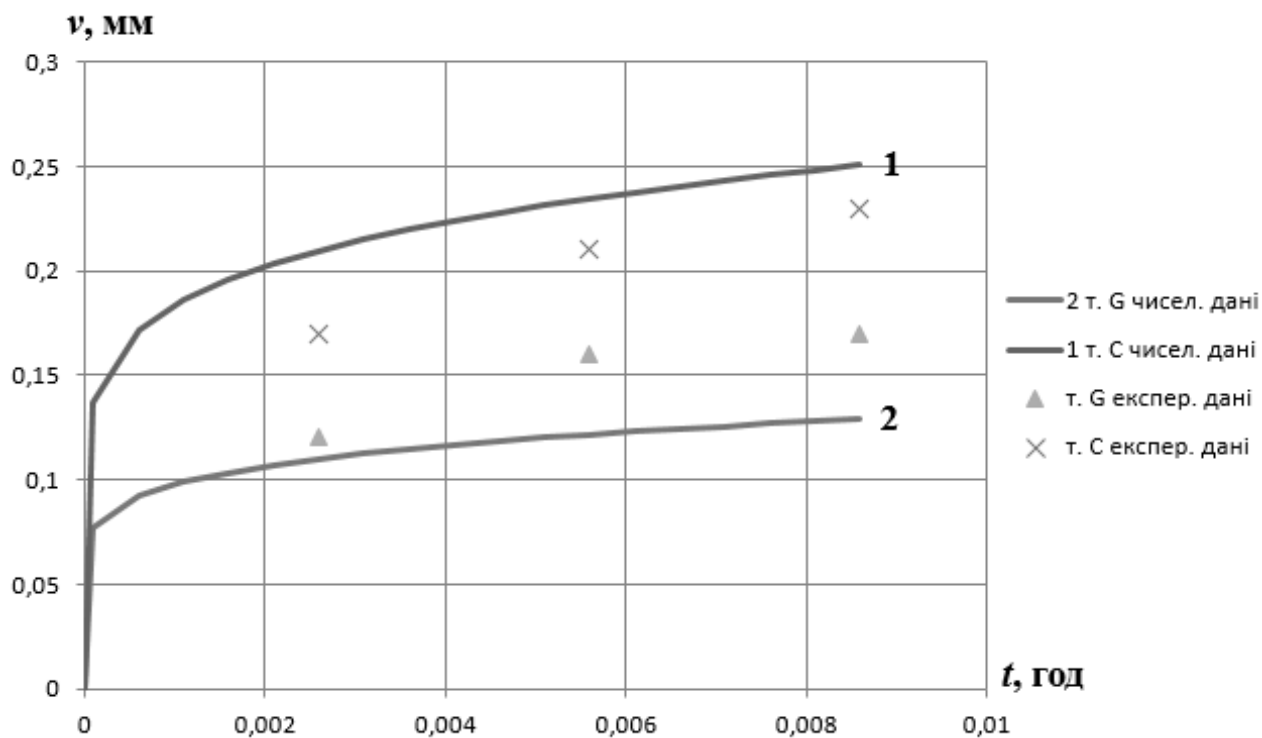


Рис. 5.9. Змінювання за часом переміщень у точках С та G

Аналізуючи рис. 5.7-5.9, - порівняння у три моменти часу розрахункових та експериментальних даних, приходимо до висновку, що чисельне моделювання

якісно вірно відображає процес деформування у часі. Кількісні відмінності складають від 3 до 40% для різних фрагментів пластини. Останнє значення є досить великим, але необхідно прийняти до уваги, що експериментальні дані теж визначені з певною похибкою при замірюванні.

Рис. 5.7 містить порівняння переміщень у точці В, яка розташована на верхній кромці центрального отвору, та у точці F, розташованій у нижній точці верхнього. Як видно з дослідних даних, переміщення точки В практично в два рази перебільшує значення для точки F. Такий самий характер мають й чисельні дані.

Порівняння переміщень у точках А та С наведено на рис. 5.8. Зміщення точки А, розташованій на краю центрального отвору, розрахунковим шляхом оцінено як менше за експериментальне. В точці С, розміщеній у проміжку між двома отворами, залежність протилежна.

Третє порівняння виконано для двох точок С та G (рис. 5.9), симетрично розташованих відносно центрального отвору – між ним й верхнім та нижнім отворами. Дані розрахунків показують значне перебільшення переміщень у верхній частині пластини, ніж у нижній, що й спостерігається експериментально.

Аналіз отриманих після розрахунку короткочасної повзучості значень деформації показує, що її максимальні значення складають 1.5%, що відповідає застосованому при математичній постановці задачі повзучості підходу малих деформацій.

Чисельне моделювання короткочасної повзучості пластини надає також якісно вірну оцінку процесу змінювання напруженого стану: має місце перерозподіл напружень в околі між отворами, та між отворами та зовнішньою стороною пластини (рис. 5.10). Якісний характер розподілу напружень не змінюється, та й найбільш навантаженими зонами залишаються ці ж зони пластини.

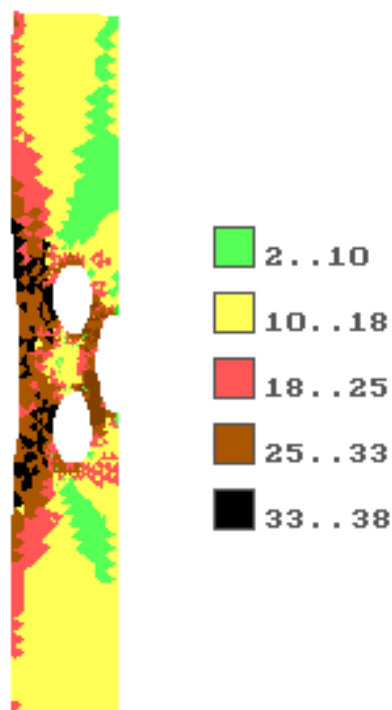


Рис. 5.10. Розподіл інтенсивностей напружень в половині пластини при $t=30$ с, $\sigma_i \cdot 10^{-1}$ МПа

Для прикладу розглянемо дані з перерозподілу напружень у зоні між двома отворами (табл. 5.3 та рис. 5.12). Обрані для порівняння елементи розташовані між верхнім та центральним отвором, їхні номери наведено на рис. 5.11. В таблиці елементи наведено починаючи з розташованих біля верхнього отвору й до розташованих біля нижнього.

Таблиця 5.3

Дані з перерозподілу напружень в околі між двома отворами, σ_i , МПа

№ ел.	1324	1309	1340	1361	1381	1404	1405	1429	1430	1454	1455
$t=0$ с.	254	268	331	332	340	338	349	340	367	358	385
$t=30$ с.	322	301	334	333	348	330	331	317	306	298	313

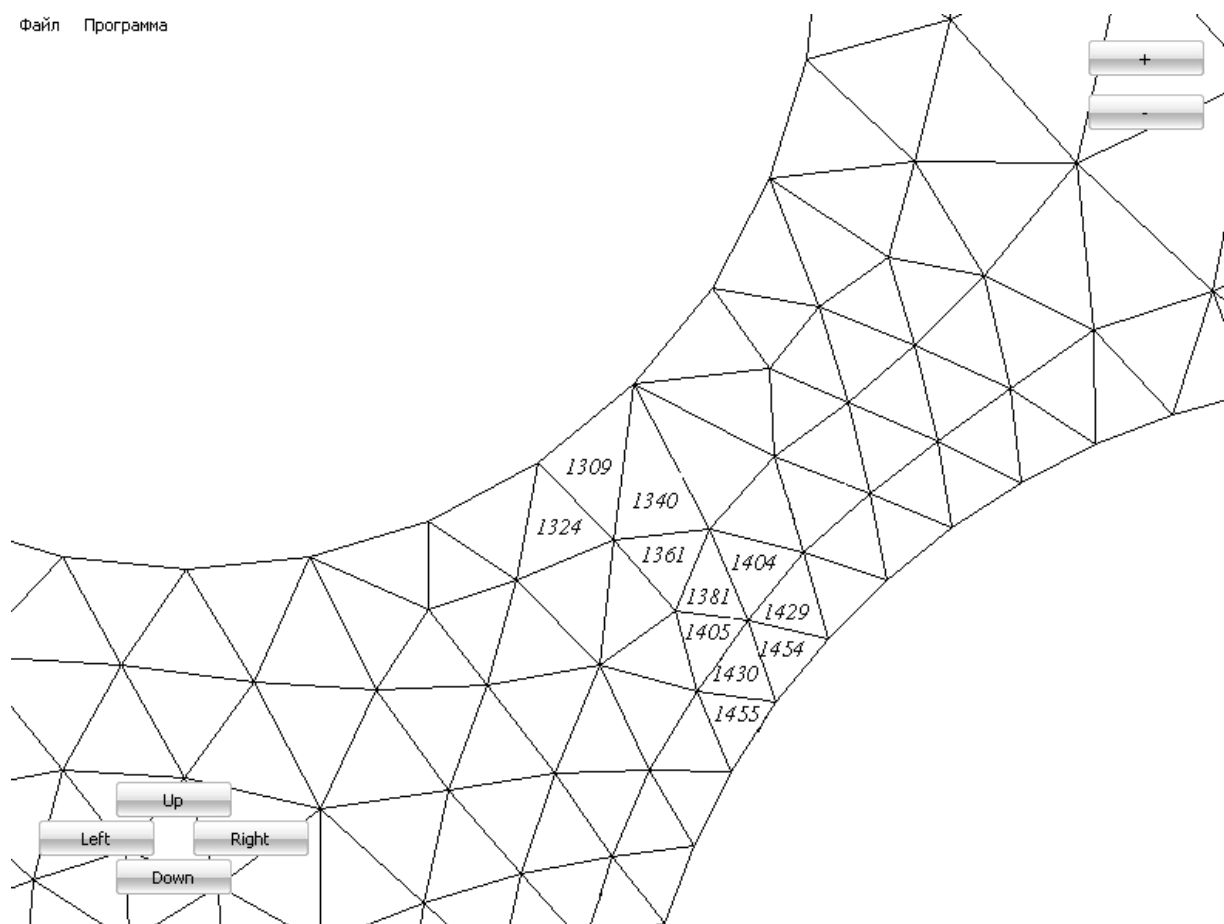


Рис. 5.11. Розташування елементів для табл. 5.3
у застосованій скінченноелементній сітці

На рис. 5.12 кривою 1 позначено початковий розподіл інтенсивності напружень, кривою 2 – після 30 с. повзучості. З аналізу табл. 5.3 та рис. 5.12 видно, що за невеликий проміжок часу – 30 с., у зоні між отворами, що розглядається, відбувається певний перерозподіл інтенсивності напружень. В околі центрального отвору має місце релаксація – з 385 до 313 МПа, а біля верхнього – певне зростання, при чому матеріал переходить у пластичний стан.

Аналіз змінювання напруженого стану між краєм пластини та боковими отворами, що може бути виконаний з порівняння рис. 5.4 та 5.10, також показує, що має місце перерозподіл напружень. Внаслідок повзучості відбувається певна релаксація напружень, максимальні значення зменшуються з 390 до 380 МПа.

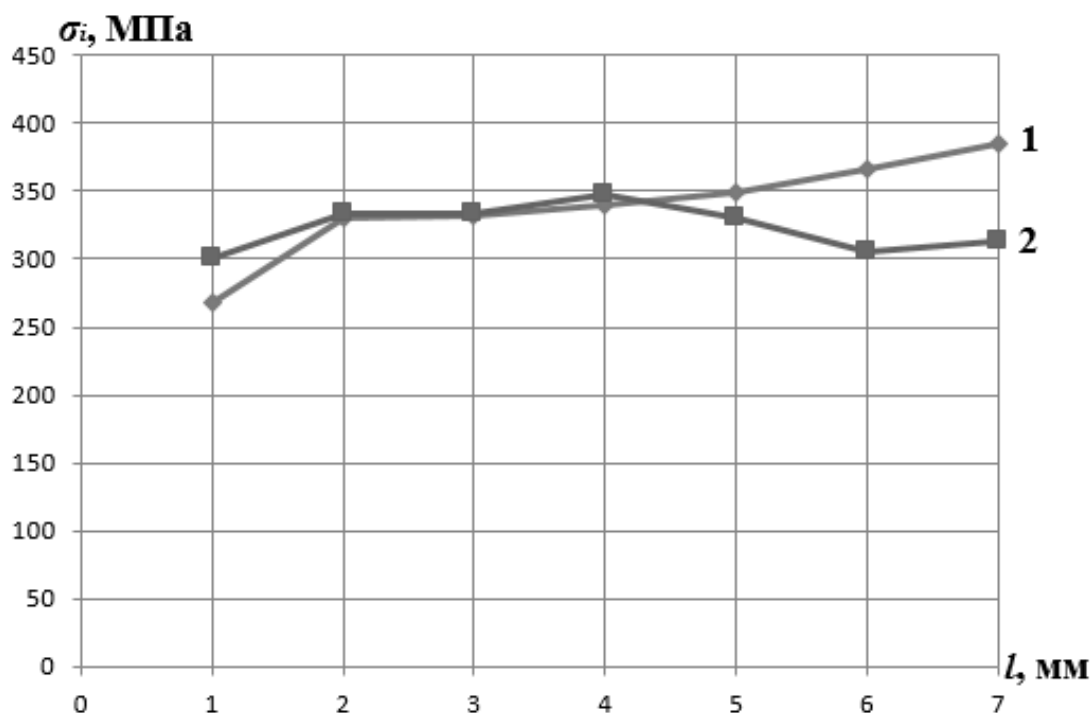


Рис. 5.12. Змінювання напружень за лінією між отворами

Далі розглянемо періодичне навантаження цих пластин, порівнюючи експериментальні та чисельні результати з їхньої повзучості. За аналізом експериментальних даних розділу 4 видно, що для порівняння можливо залучити дані для чотирьох циклів навантаження, що складає 0.033 год. чи 2 хвилини. Якщо проаналізувати дані п. 2.2, наведені на рис. 2.6, то бачимо, що 4 – це граничне значення числа циклів, при якому в одновісному розрахунку отримуються значення з задовільною похибкою. На жаль, особливості експерименту та властивості повзучості сталі 3, що розглядається, не надали можливості для збільшення числа циклів.

Аналіз експериментального вивчення повзучості пластин з 5-ма отворами, що розглядаються, показує, що з якісної точки зору немає відмінностей між розподілом переміщень та ходом процесу деформування. Тому далі наведемо тільки дані з порівняння експериментальних та чисельних результатів в характерних точках рис. 4.23, обраних для аналізу й в дослідженні деформування при статичному навантаженні.

На рис. 5.13-5.17 суцільними кривими наведено розрахункові дані, а точками – експериментальні. Проаналізовано повзучість у точках А (рис. 5.13), В (рис. 5.14), С (рис. 5.15), F (рис. 5.16) та G (рис. 5.17).

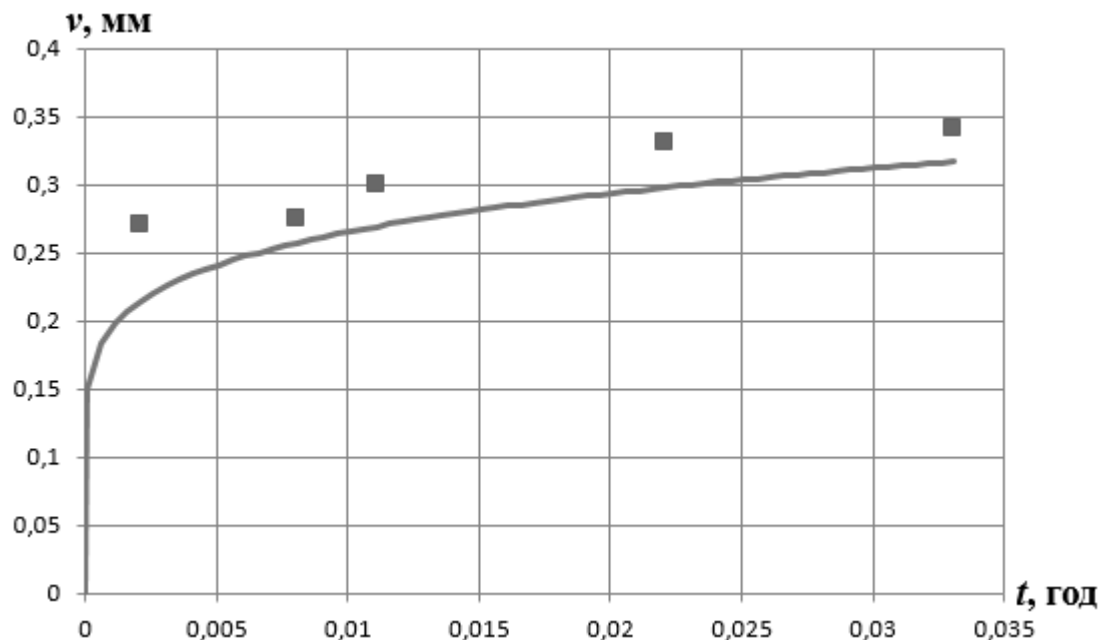


Рис. 5.13. Порівняння розрахункових та експериментальних даних (періодичне навантаження, точка А)

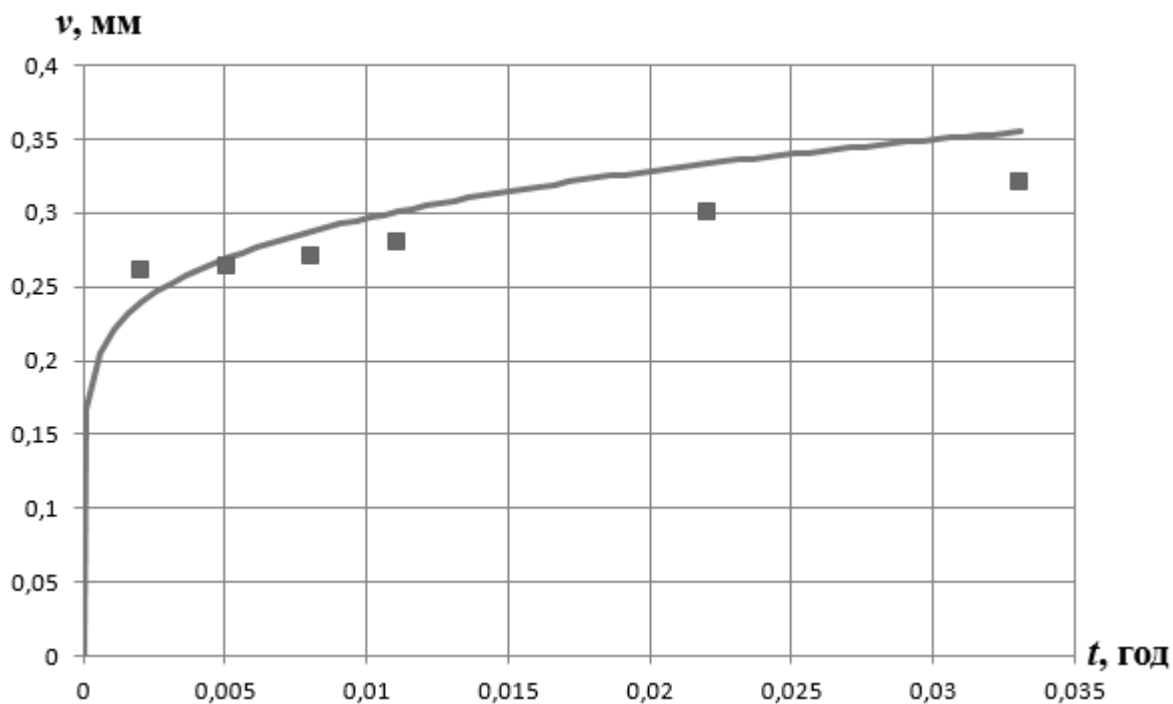


Рис. 5.14. Порівняння розрахункових та експериментальних даних (періодичне навантаження, точка В)

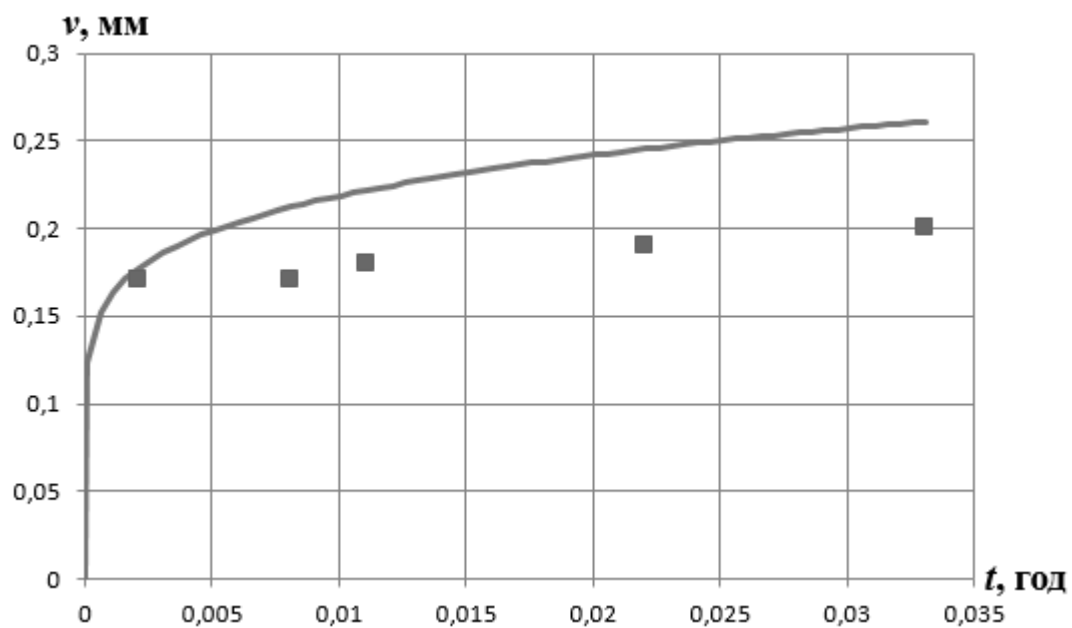


Рис. 5.15. Порівняння розрахункових та експериментальних даних (періодичне навантаження, точка С)

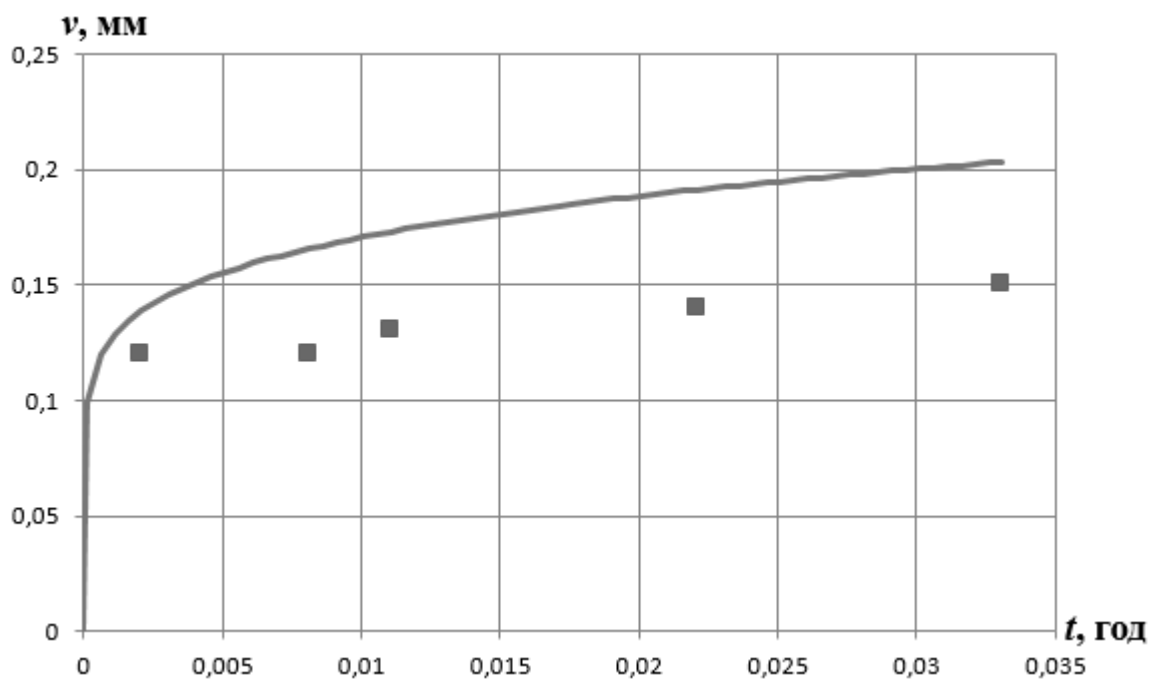


Рис. 5.16. Порівняння розрахункових та експериментальних даних (періодичне навантаження, точка F)

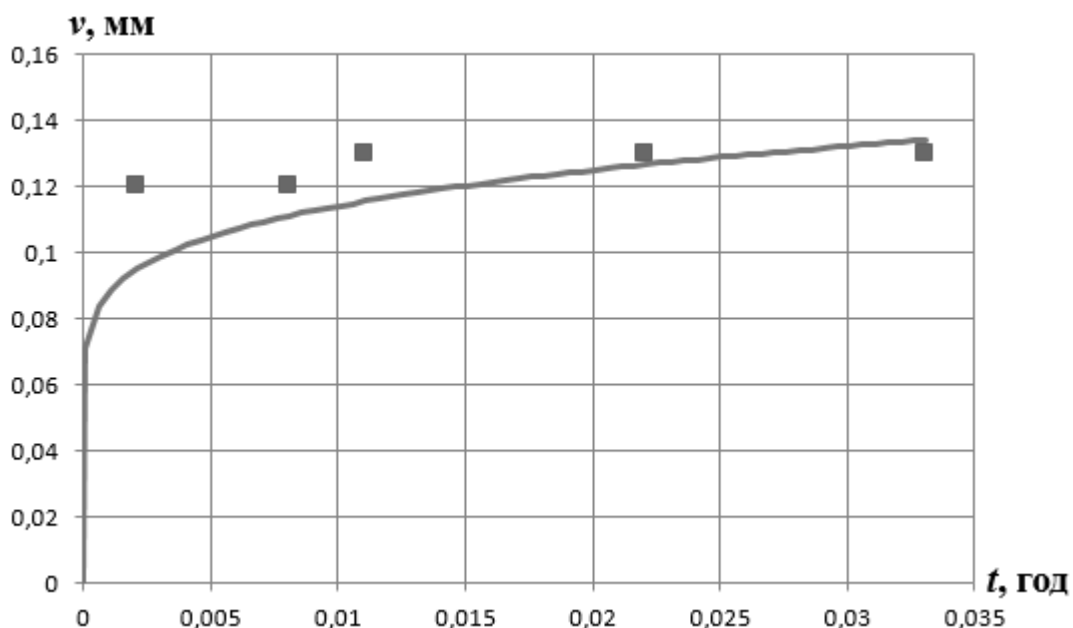


Рис. 5.17. Порівняння розрахункових та експериментальних даних (періодичне навантаження, точка G)

Як видно з результатів порівняння, змінювання переміщень у процесі повзучості при складному двовимірному напруженому стані якісно вірно описується розрахунковими кривими, вид яких також, як й у випадку деформування при статичному навантаженні, відповідає вигляду кривих першої стадії неусталеної повзучості. Зменшення швидкості повзучості у порівнянні з даними при статичному навантаженні, яке обумовлено зменшенням навантаження у другій частині періоду, також описується якісно вірно.

Максимальна розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними була зафіксована: для перших 10 с. в точці G – 35%, для 120 с. – в точках С та F – 25% та 27% відповідно. Швидкість деформацій повзучості, яку можна проаналізувати за нахилом кривих, оцінюється задовільно, з точністю до 10-15%. Але в точках С та F, як видно з рисунків, є перевищення чисельних даних над експериментальними для перших періодів. Це може бути пояснено як не зовсім точною технікою замірів, так й недостатньою кількістю циклів навантаження для повністю задовільних умов експерименту, що потребувала б їхнього більшого числа.

На рис. 5.18 надано порівняння розрахункової кривої переміщення в точці В для статичного та періодичного навантаження. Як видно з графіку, оцінювання проведено й кількісно вірно. Для перших 10 с. експериментальні точки співпали – це пояснюється тим, що до 10-ї с навантаження в обох випадках було однаковим. Розбіжності в 5-8% між відповідними чисельними та експериментальними даними є значно меншими, ніж відмінність у 30% між даними статичного та періодичного навантаження, що може продемонструвати можливість чисельного визначення ефекту впливу періодичного навантаження й при складному напруженому стані.

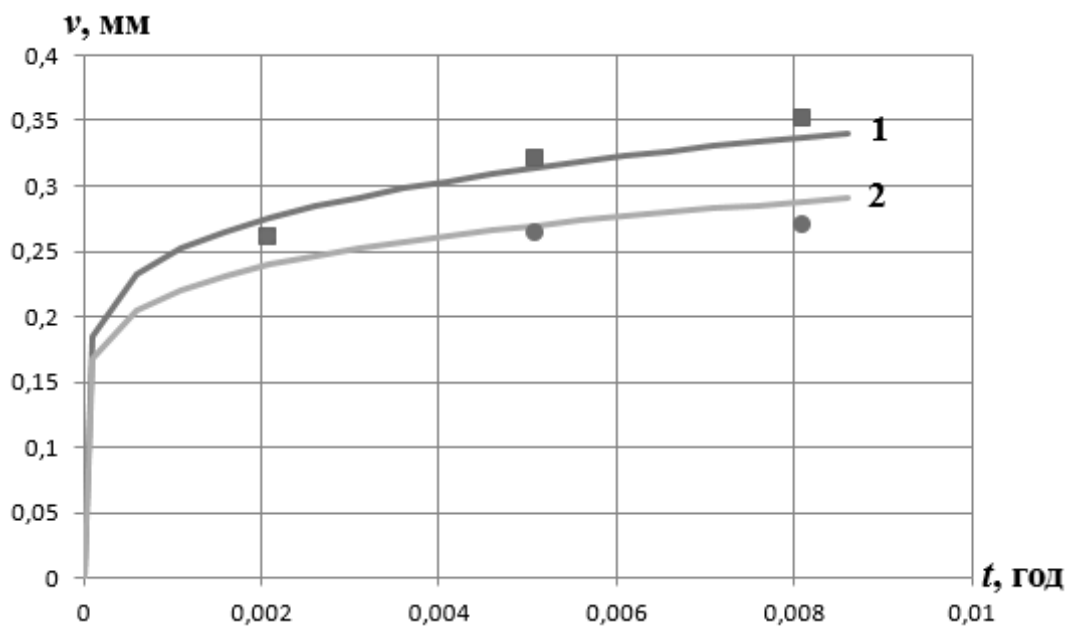


Рис. 5.18. Порівняння розрахункових та експериментальних даних при статичному та періодичному навантаженнях (точка В)

Проведені у підрозділі чисельні дослідження, порівняння їхніх результатів з експериментальними даними, отриманий при цьому достатній ступінь достовірності розрахункових значень надає змогу використання розробленого програмного засобу для розв'язання практичної задачі.

5.3 Врахування деформацій короткочасної повзучості при моделюванні листової прокатки

Виготовлення листових заготовок для їхнього подальшого застосування у промисловості потребує істотних теоретичних обґрунтувань цього процесу. Розглянемо технологічний процес прокатки металу. Традиційно він розглядається як процес незворотного суто пластичного деформування матеріалу [39, 47]. Для низки матеріалів, що демонструють істотні властивості змінювання компонентів напружено-деформованого стану за часом на фоні попереднього деформованого стану, який характеризується досить великим рівнем напружень, виявляється необхідним проводити моделювання початково-крайової задачі повзучості.

Розглянемо процес прокатки листової заготовки зі сталі 3. Технологічний процес включає її прокатку через вальці, що обертаються, з подальшим витягненням заготовки за допомогою приводу електродвигуна. Загальна схема протягу заготовки через вальці представлена на рис. 5.19.

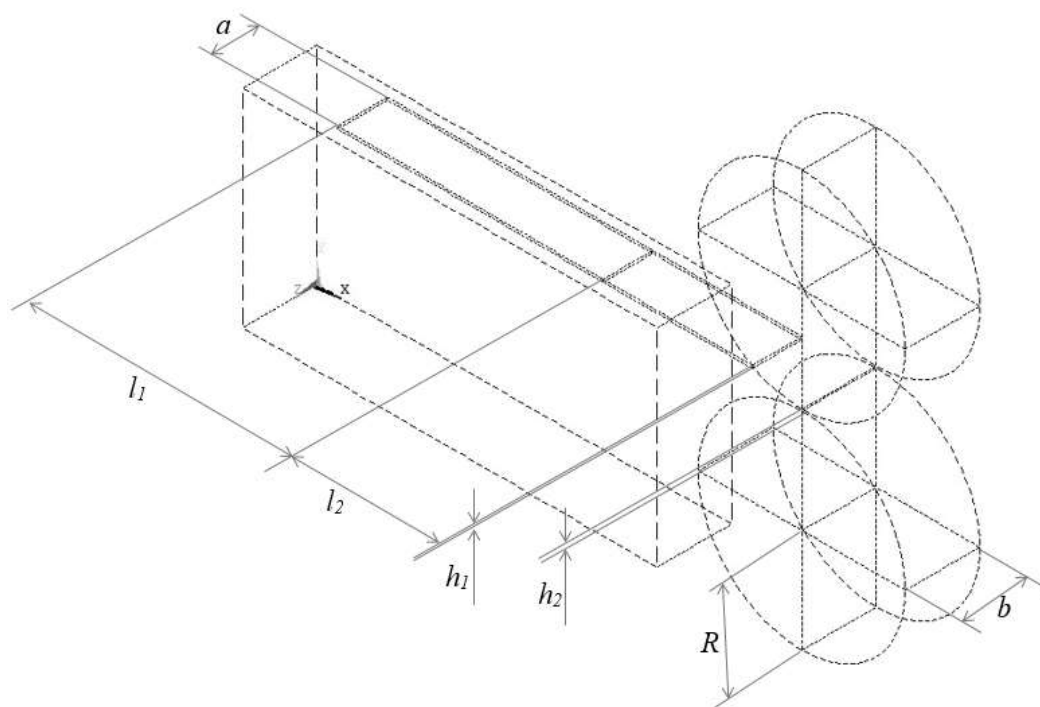


Рис. 5.19. Загальна схема розташування заготовки при прокатці

В розрахунках аналізувались прямокутні листові заготовки з такими розмірами (позначення за рис. 5.19):

$a = 0.12$ м – ширина заготовки;

$l_1 = 0.64$ м – довжина першої частини заготовки;

$l_2 = 0.36$ м – довжина другої частини заготівки, що протягується крізь недеформовані вальці;

$h_1 = 0.006$ м – товщина заготівки.

Нижня поверхня заготівки розташована на нерухомій прямокутній основі. Прийнято такі характеристики вальців:

$h_2 = 0.0038$ м – відстань між недеформованими вальцями;

$b = 0.18$ м – товщина вальця;

$R = 0.25$ м – радіус вальця.

Заготівка входить до вальців з початковою швидкістю v . Рух її вважається рівномірним та прямолінійним.

При контакті торцю заготівки з вальцями завдяки виникаючим при цьому зусиллям відбувається її незворотне деформування. При виході заготівки з вальців через заданий час до її переднього краю прикладається зусилля витягнення.

Для визначення залишкового напружено-деформованого стану, що реалізується у заготівки після її виходу з вальців, був застосований програмний комплекс. В розрахунках прийнято такі припущення: основа, по якій рухається заготівка, та вальці розглядаються як недеформовані тіла.

Розрахунки проводились у трьохвимірній постановці з урахуванням виникнення контактних напружень між заготівкою і недеформованими вальцями. Прийнято ідеалізовану діаграму деформування з лінійним зміцненням, що описано у підрозділі 4.1. Для розрахунку використовувався восьмивузловий трьохвимірний СЕ (100 СЕ вздовж довжини заготівки, 12 СЕ по ширині та 3 СЕ по товщині). Взагалі повна розрахункова схема включала 63069 вузлів та 55800 елементів. Загальний вигляд моделі наведено на рис. 5.20.

Проведено розрахунки протягу заготівок через вальці з різними швидкостями. Як приклад, розглянемо результати розв'язання контактної задачі при русі заготівки зі швидкістю 0.75 м/с.

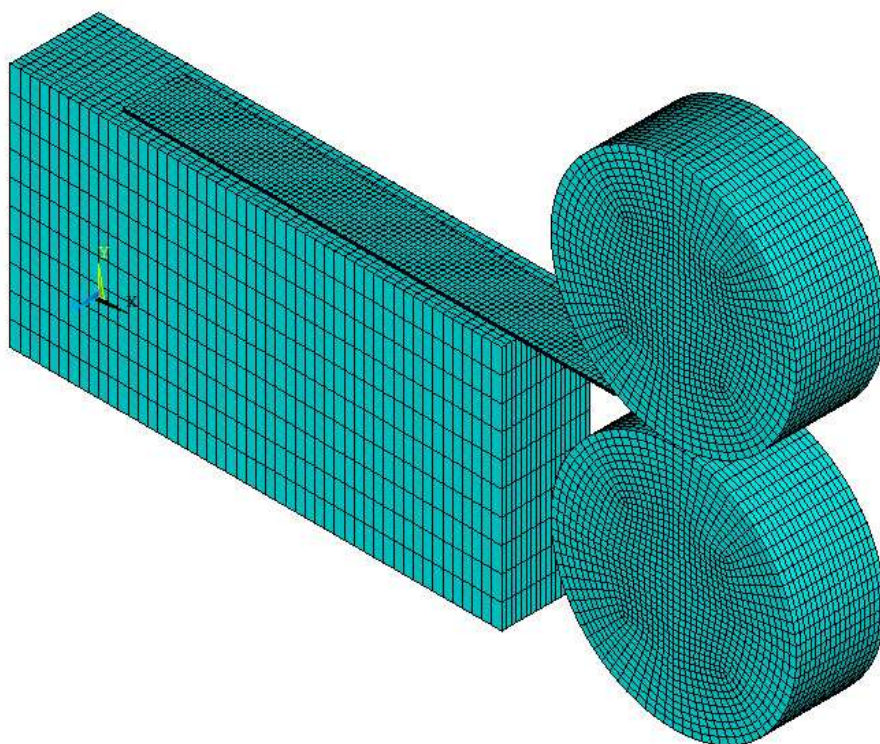


Рис. 5.20. Скінченноелементна модель для розрахунку протягу заготовки

Час розрахунку приймався $t=0.75$ с. Як приклад, на рис. 5.21 наведено отриманий в розрахунках розподіл інтенсивностей деформацій за Мізесом.

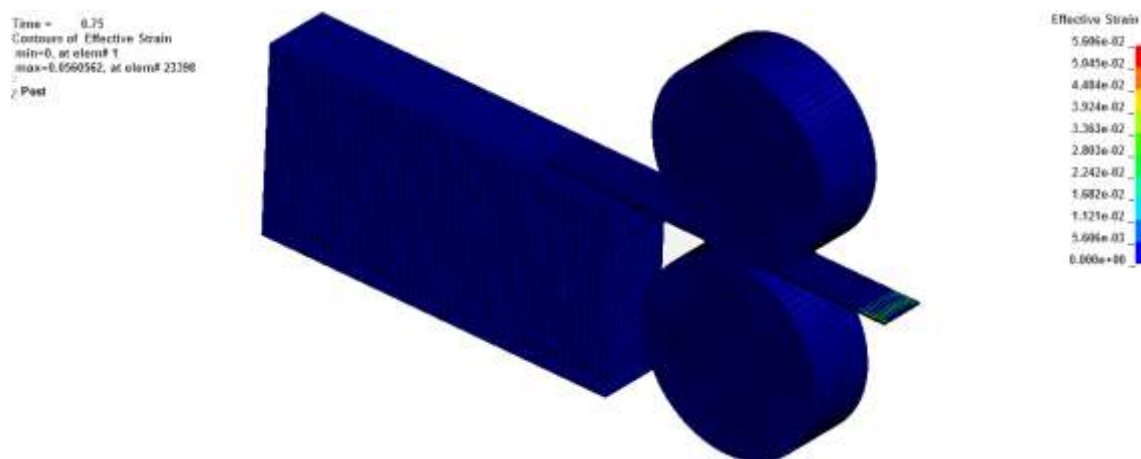


Рис. 5.21. Епюра загальних інтенсивностей деформацій заготовки

Далі розглянемо задачу визначення напружено-деформованого стану в листовій заготовці при прикладенні по її краю зусиль витяжки. У зв'язку з тим, що, як визначено в експериментах 4-го розділу, матеріал листів – сталь 3 при високих рівнях напружень й при кімнатній температурі виказує істотні

властивості повзучості, необхідно обрати таке зусилля розтягу при витяжці, при якому були б відсутні істотні деформації повзучості.

Сформулюємо задачу таким чином: розглянути повзучість прямокутної пластини в її площині, до одного краю якої прикладене рівномірне навантаження p . Ця пластина утворюється з листового матеріалу, який виходить з кліті. Моделювання впливу вальців визначається закріпленням лівого краю. Розміри пластини 0.36×0.12 м.

За допомогою спеціально створеної програми виконано імпорт частки скінченноелементної сітки, яка відноситься до виділеного для розрахунків повзучості фрагменту сталевого листа. При цьому координати вузлів були збережені. Для цих вузлів згенеровано рівномірну скінченноелементну сітку, що в результаті складається з 864 трикутних елементів та 481 вузла.

Значення компонентів напружено-деформованого стану у вузлах загальної моделі, що отримані розрахунком процесу прокатки, також були імпортовані та застосовані як початкові умови в задачі повзучості пластини. Для оціночних розрахунків було обрано розподіл у верхньому шарі пластини, який не відрізняється від нижнього та є більшим за значення у середині пластини. У зв'язку з тим, що поперечні переміщення листу, отримані розрахунком прокатки, є незначними (не перевищують 0.2 мм), відповідні y -координати у двовимірній моделі не змінювались. Всі x -координати перераховані для сітки з трикутних елементів зсувом на величину 2.5 мм, яка є середньою величиною переміщення в цьому напрямку.

Значення компонентів тензору напруження для двовимірного стану були отримані перерахунком, в якому забезпечувалось незмінне значення інтенсивності напруження для кожного елементу. При цьому осьові нормальні напруження лишались незмінними, нормальні у поперечному напрямку та дотичні перераховувались, виходячи з вимоги рівності кожного з них відповідному виразу у трьохвимірному записі інтенсивності напружень. Отриманий перерозподіл у вигляді еквівалентних інтенсивностей напружень для двох- та трьохвимірного напруженого стану (у верхньому шарі пластини)

наведено на рис. 5.22, а. На рис. 5.22, б, наведено розподіл осьової компоненти напруження. З нього видно, що контактний вплив роликів призводить до виникнення напружень різного знаку. Розподіл напружень за шириною пластини є нерівномірним, за довжиною він є більш однорідним, що обґрунтовує зроблений вибір геометричних розмірів пластини.

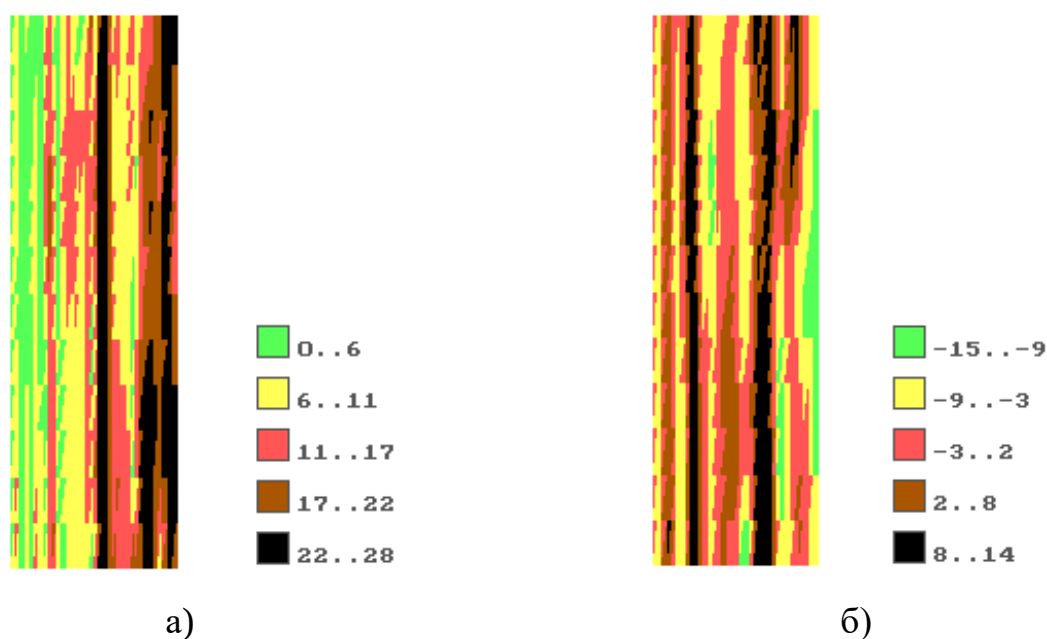


Рис. 5.22. Початковий розподіл напружень у пластині, 10^{-1} МПа.

а) інтенсивностей напружень; б) осьових напружень

Було виконано низку розрахунків задач повзучості пластини з різними значеннями напруження розтягу τ , яке приймало значення 64, 128, 220, 230 та 250 МПа. Час деформування складав 30 с. При цьому початкові умови в задачі повзучості визначались як сума залишкових напружень від прокатки та напружень від рівномірного розтягу. На рис. 5.23 наведено картину сумарних інтенсивностей напружень при навантаженні 250 МПа. Як видно, у пластині мають місце зони з досить великими значеннями інтенсивності напружень (330-390 МПа), при яких, згідно з отриманими експериментальними даними, має місце повзучість матеріалу. Вочевидь, значення навантаження розтягу в цьому випадку слід вважати граничними, у зв'язку з наближенням максимальних значень інтенсивностей напружень (390 МПа) до границі міцності 395.3 МПа.

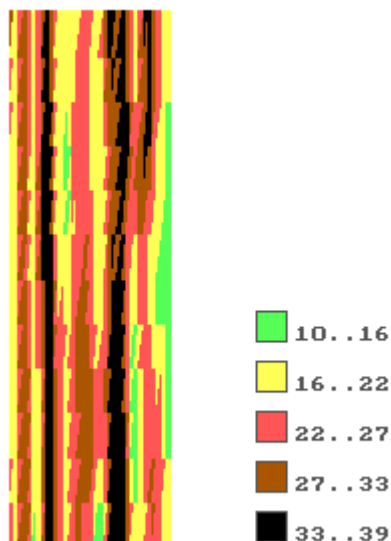


Рис. 5.23. Розподіл інтенсивностей напружень в пластині при $t=0$ с., 10^{-1} МПа
(зусилля витяжки 250 МПа)

На рис. 5.24 наведено залежність максимальних переміщень на краю пластини від прикладеного навантаження. Як видно з графіку, значення навантаження розтягу в 200 МПа слід вважати гранично припустимим. Справа у тому, що хоча й переміщення у 0.5 мм не є досить значним, необхідно приймати до уваги нерівномірність накопичення переміщень за шириною пластини, яке виникає внаслідок істотної повзучості матеріалу у зонах пластини з максимальними значеннями напружень. Для навантаження у 250 МПа розподіл переміщень на краю пластини у $t=30$ с. наведено на рис. 5.25 та рис. 5.26.

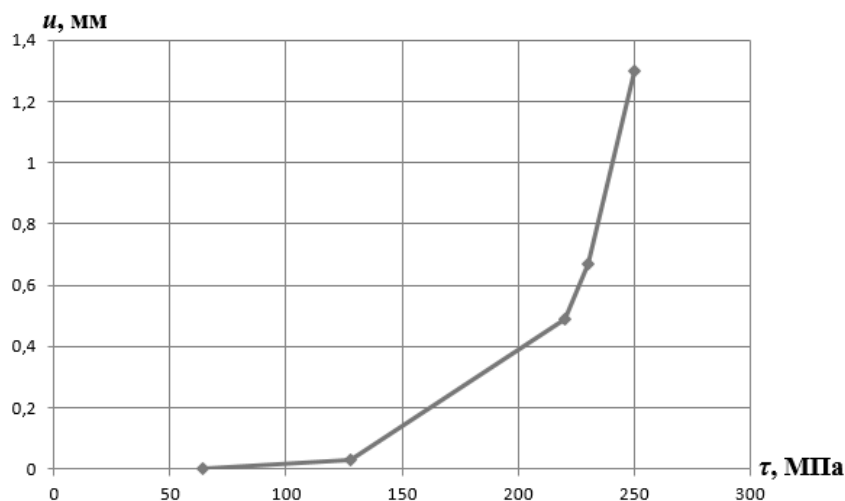


Рис. 5.24. Залежність максимальних переміщень від напруження розтягу

На рис. 5.25 представлено графік зростання осьових переміщень у трьох точках пластини (крайових – криві 1 та 3, та середній – крива 2). Рис. 5.26 містить розподіл максимальних переміщень при $t=30$ с.

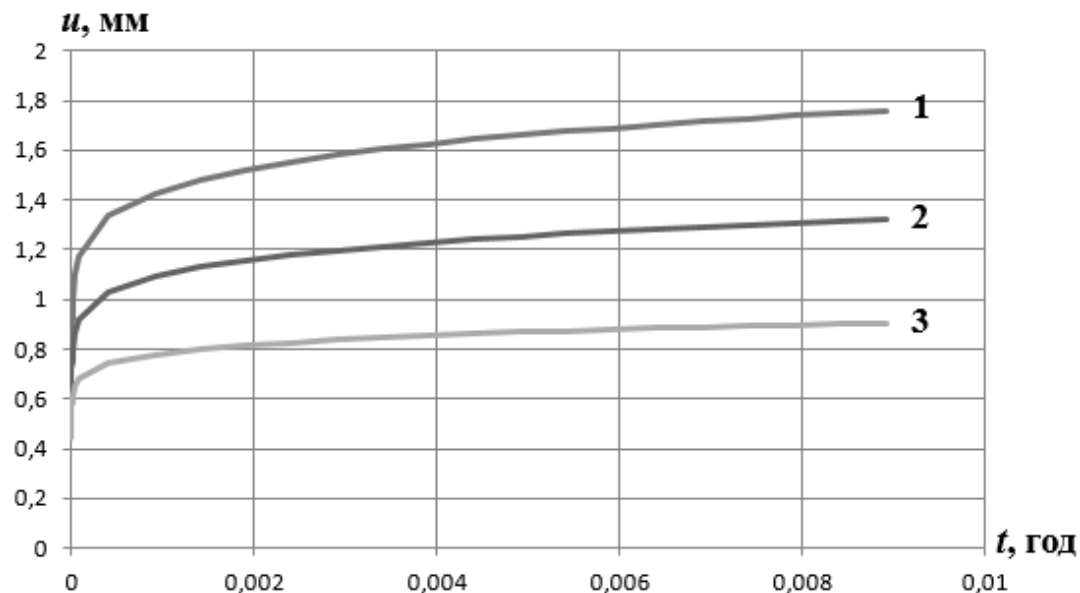


Рис. 5.25. Залежність осьових переміщень пластини від часу

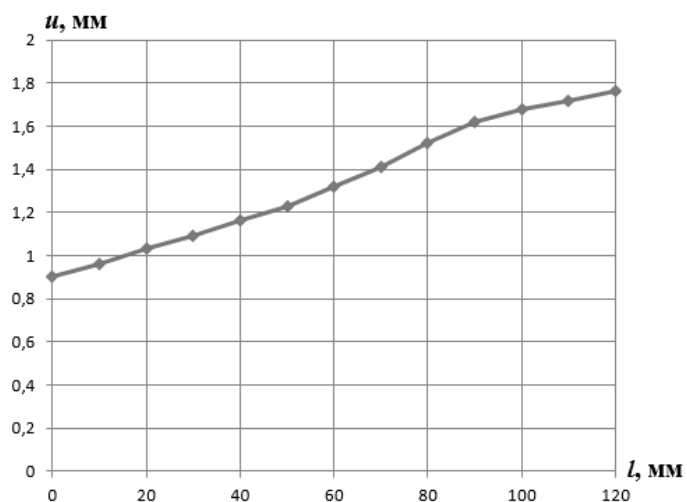


Рис. 5.26. Деформований край пластини при $t=30$ с.

Такий несиметричний розподіл переміщень в пластині можливо обґрунтувати несиметричністю розподілу зон з максимальними напруженнями та спільністю деформацій.

Таким чином, проведенне чисельне моделювання дозволило визначити граничне значення навантаження листів при витяжці, при якому несиметричність їхнього деформування є незначною.

Далі розглянемо схему технологічного процесу, в якій передбачено прокатку листової заготовки через вальці двох клітей. Загальна схема протягу заготовки через вальці представлена на рис. 5.27.

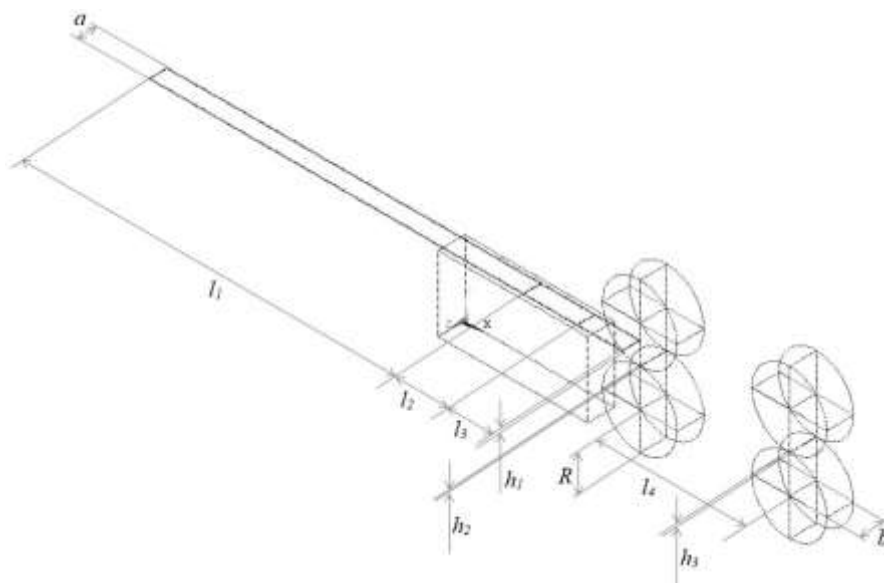


Рис. 5.27. Загальна схема розташування заготовки при прокатці

В розрахунках аналізувались прямокутні листові заготовки з такими розмірами (позначення за рис. 5.27):

$a = 0.12$ м – ширина заготовки;

$l_1 = 2.5$ м – довжина першої частини заготовки;

$l_2 = 0.36$ м – довжина другої частини заготовки, що протягується крізь недеформовані вальці та розглядається при аналізі результатів;

$l_3 = 0.3$ м – довжина третьої частини заготовки, що протягується крізь недеформовані вальці;

$h_1 = 0.006$ м – товщина заготовки.

Нижня поверхня заготовки розташована на нерухомій прямокутній основі. Прийнято такі характеристики вальців:

$h_2 = 0.0038$ м – відстань між недеформованими вальцями першої кліті;

$h_3 = 0.003$ м – відстань між недеформованими вальцями другої кліті;

$l_4 = 1$ м – відстань між недеформованими вальцями першої та другої клітей;

$b = 0.18$ м – товщина вальця;

$R = 0.25$ м – радіус вальця.

Розміри a , l_2 , h_2 , b , R є однаковими для обох моделей. Аналогічно, нижня поверхня заготовки розташована на нерухомій прямокутній основі.

Для розрахунку, як й для випадку однієї кліті, використовувався восьмивузловий трьохвимірний СЕ (320 СЕ вздовж довжини заготовки, 12 СЕ по ширині та 3 СЕ по товщині). Повна розрахункова схема включає 121459 вузлів та 106776 елементів. Загальний вигляд моделі наведено на рис. 5.28.

Проведено розрахунки протягу заготовки через вальці з різними швидкостями. Як приклад, розглянемо результати розв'язання контактної задачі при русі заготовки зі швидкістю 0.75 м/с.

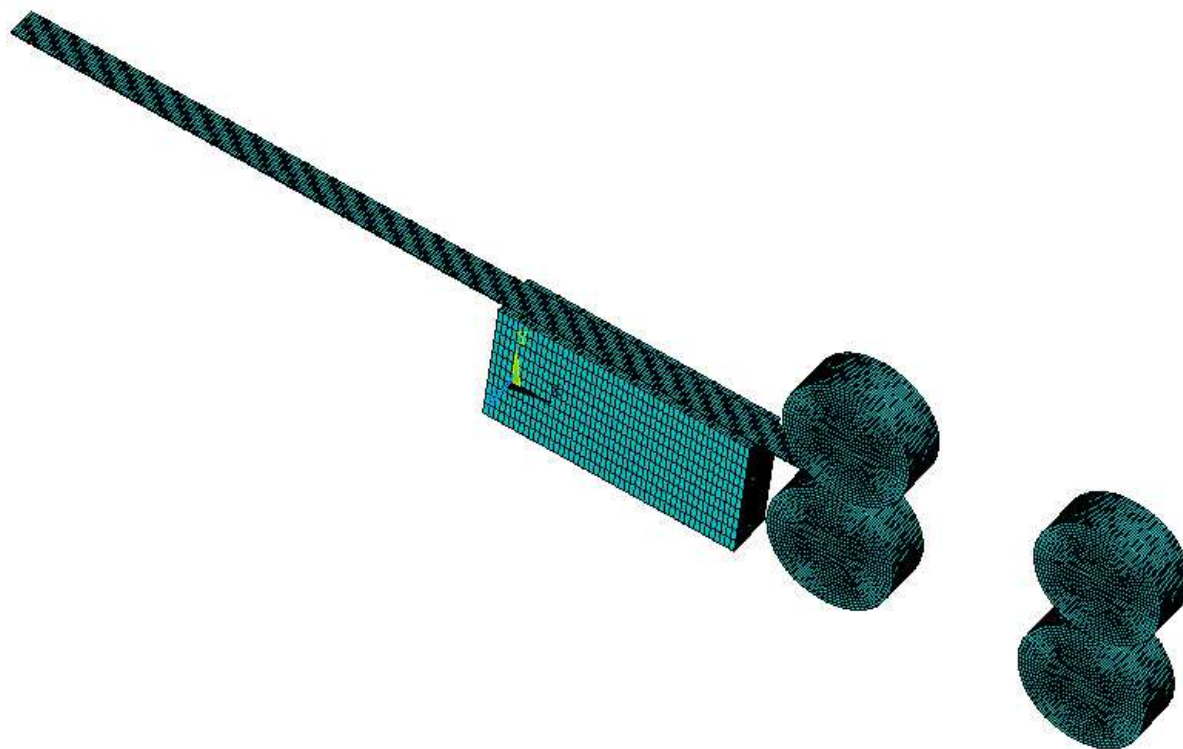


Рис. 5.28. Скінченноелементна модель для розрахунку протягу заготовки

Час розрахунку приймався $t=2.67$ с. На рис. 5.29 наведено отриманий в розрахунках розподіл інтенсивностей деформацій за Мізесом.

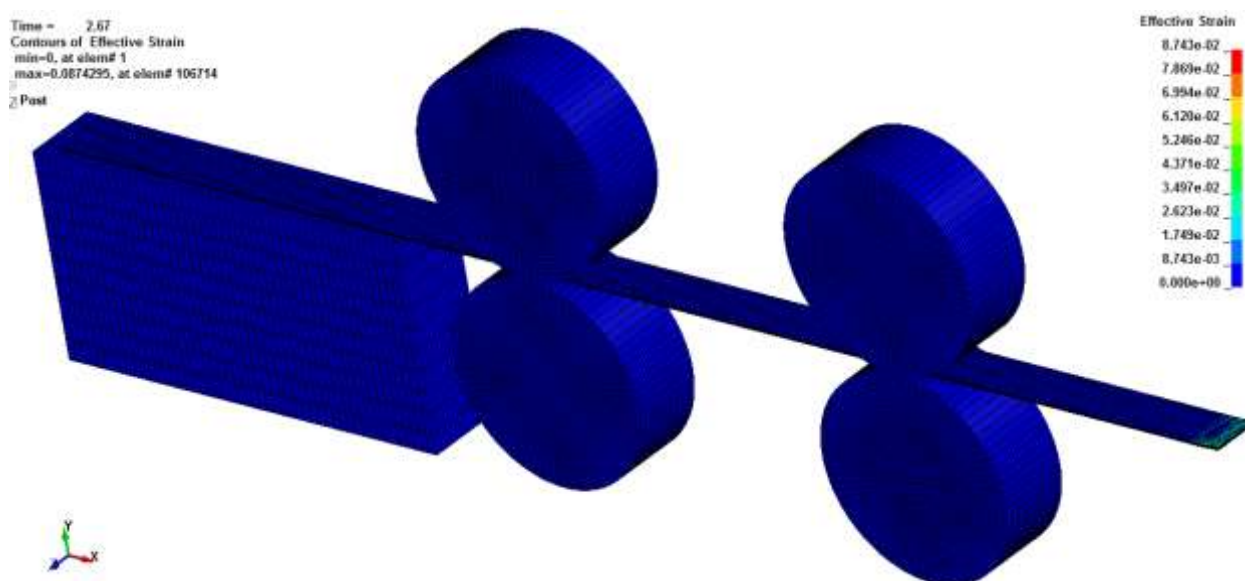


Рис. 5.29. Епюра загальних інтенсивностей деформацій заготовки (прокатка через дві кліті)

Розглянемо аналогічну задачу визначення напружено-деформованого стану в листовій заготовці при прикладенні по її краю зусиль витяжки. Застосуємо описану вище технологію переходу до двохвимірного напруженого стану.

Наведемо розподіли еквівалентних, залишкових інтенсивностей напружень (рис. 5.30, а) та осьової компоненти напруження (рис. 5.30, б) для двохвимірного напруженого стану та порівняємо їх з отриманими для моделі з однією кліттю (рис. 5.22, а-б, відповідно).

Як видно з порівняння, у випадку схеми прокатки через дві кліті має місце істотно менший рівень напружень у листовій заготовці. Максимальне значення інтенсивності напружень зменшується майже вдвічі, на 47%. Осьові напруження теж зменшуються приблизно на 40%. При цьому у центральній частині пластини є зони з незначним рівнем напружень.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок про переваги застосування технології прокатки листових заготовок через дві кліті. Розглянемо деформування пластин при прикладенні до них навантаження розтягу при витяжці.

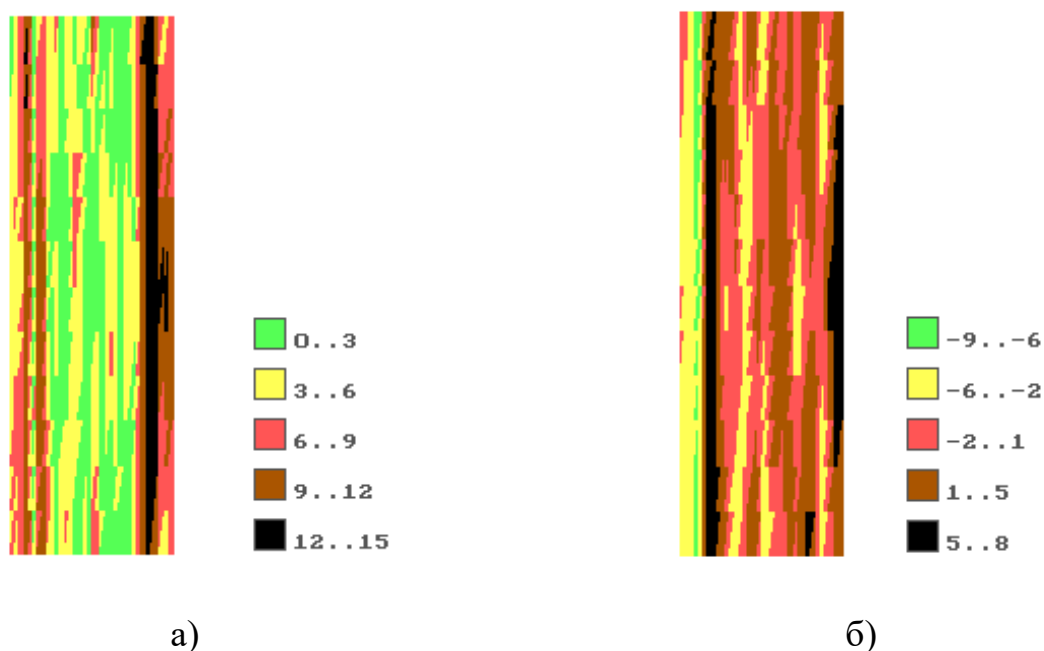


Рис. 5.30. Початковий розподіл напружень у пластині, 10^{-1} МПа (прокатка через дві кліті). а) інтенсивностей напружень; б) осьових напружень

Як слідує з проведеного аналізу у випадку схеми з двома клітями, максимально можливу величину напруження було визначено як 250 МПа. При додаванні цього навантаження до заздалегідь продеформованої крізь дві кліті пластини призводить до початкового розподілу інтенсивностей напружень, що наведено на рис. 5.31, а. Як видно з рисунку, їхнє максимальне значення не перевершує 290 МПа. Як показують розрахунки, істотної повзучості при витяжці у цьому випадку не відбудеться.

Виконаний розрахунковий аналіз надає можливість проведення аналізу й вищих значень навантаження витяжки. Для прикладу розглянемо величину у 290 МПа. При цьому отримуємо розподіл інтенсивностей напружень з максимальним значенням 340 МПа (рис. 5.31, б).

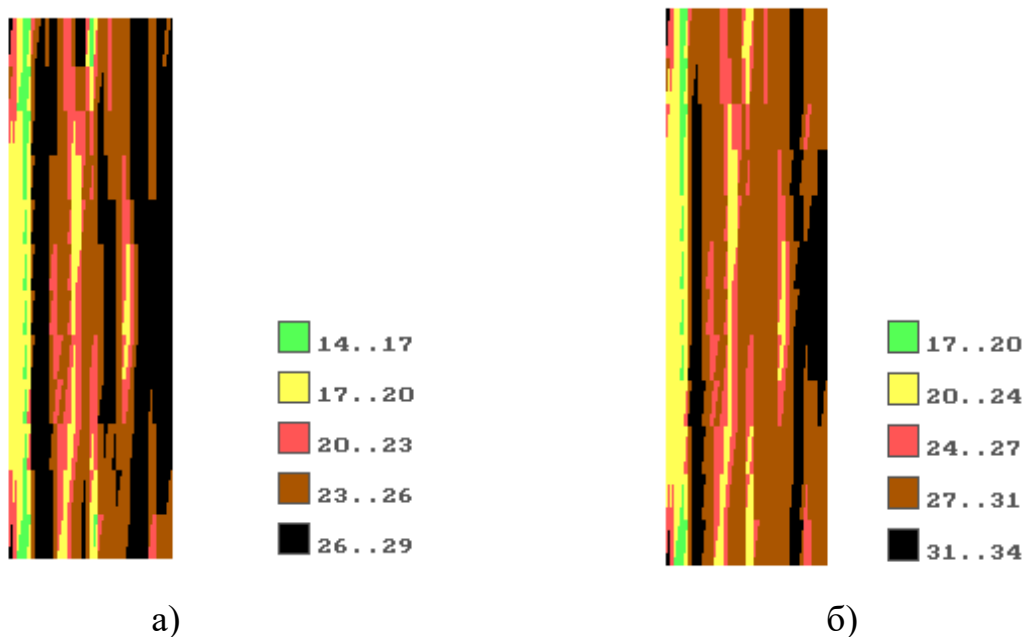


Рис. 5.31. Розподіл напружень у протягнутій крізь дві кліті пластині при $t=0$ с., 10^{-1} МПа. а) зусилля витяжки 250 МПа; б) зусилля витяжки 290 МПа

Розрахунки повзучості для цього випадку свідчать, що завдяки іншому розподілу початкових напружень, деформування при короточасній повзучості впродовж 30 с. відбувається інакше. Рис. 5.32 демонструє розподіл прогинів на краю пластини. Порівняння цього рисунку з рис. 5.26 (для однієї кліті) показує, що максимальні переміщення мають місце не на краю, а в центрі пластини, а мінімальні – на її краях. При цьому різниця в прогинах є меншою та не перевершує 0.4 мм.

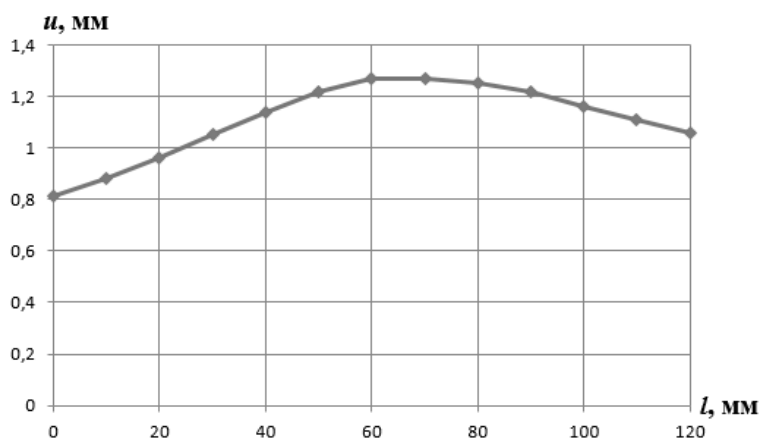


Рис. 5.32. Деформований край протягнутої крізь дві кліті пластини при $t=30$ с. (зусилля витяжки 290 МПа)

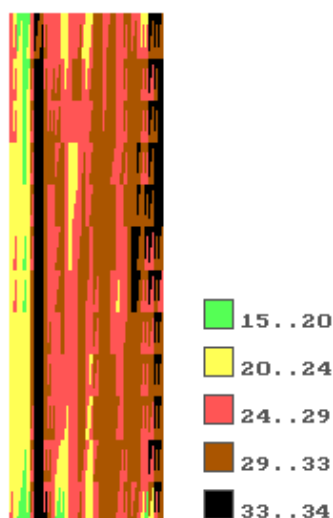


Рис. 5.33. Розподіл інтенсивностей напружень у протягнутій крізь дві кліті пластині при $t=30$ с., 10^{-1} МПа (зусилля витяжки 290 МПа)

Подібну зміну характеру деформування можливо обґрунтувати іншим типом перерозподілу напружень при повзучості (рис. 5.33). Як видно з порівняння рис. 5.33 та 5.31, б, в центральних частинах пластини відбувається певна релаксація напружень.

Отже, після проведеного чисельного моделювання процесів прокатки та витяжки зі сталим навантаженням розтягу можливо зробити висновок щодо необхідності застосування схеми прокатки з двома клітями, яка забезпечує менший рівень залишкових напружень. Це дозволяє, у разі необхідності, застосовувати більші рівні навантаження витяжки. При цьому необхідно контролювати рівень залишкових переміщень у листі, чи враховувати їхню присутність при виготовленні деталей. Наявність несиметричного розподілу залишкових напружень має чи враховуватись у подальшому при моделюванні напружено-деформованого стану деталей, що будуть виготовлені з подібних листів, чи усуватись – завдяки, наприклад, термічній обробці.

5.4 Висновки за розділом

У розділі наведено результати чисельних досліджень повзучості та накопичення пов'язаної з нею прихованої пошкоджуваності. Проведене

порівняння чисельних та експериментальних результатів для випадку статичного та періодичного навантаження пластин в їхній площині, отримана при цьому задовільна на рівні припустимої у фізично нелінійних задачах [20, 111] збіжність результатів дає можливість зробити висновок про припустимість застосування модернізованого програмного комплексу для розв'язання задач деформування матеріалів з вираженою ортотропією властивостей повзучості при початковому пружно-пластичному деформуванні.

Визначено закономірності динамічної повзучості та прихованого руйнування титанових пластин з отворами.

Встановлено, що хід деформування при достатньо невеликих значеннях часу навантаження, яке можливо характеризувати короткочасною повзучістю, якісно не відрізняється від відомих класичних розв'язків.

За даними чисельного моделювання процесу витяжки сталевих листів при прокатці знайдено, що існують граничні значення зусиль витягування, при перевершенні яких в матеріалі листів починають швидко зростати деформації повзучості. При цьому завдяки несиметричному розподілу остаточної напруженості, що має місце після прокатки, листи можуть загубити свою форму, що є неприпустимим з технологічної точки зору.

Основні результати, одержані у розділі, опубліковано у роботах [1, 6, 8, 10-11, 13-18].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розроблено метод розрахунку ортотропної повзучості при плоскому напруженому стані та незмінному й періодичному навантаженнях із застосуванням запропонованих у роботі рівнянь стану. Експериментально та за допомогою чисельного моделювання, використовуючи розвинений у роботі програмний комплекс «*FEM CREEP*», вивчено короточасну повзучість сталі 3 при простому та складному напруженому стані за кімнатної температури.

Найбільш важливі наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Розроблено та експериментально перевірене рівняння стану ортотропної повзучості, що використовує гіпотезу зміцнення, для випадку плоского напруженого стану та статичного й періодично змінюваного навантаження.

2. За допомогою асимптотичного методу двох масштабів часу та усереднення на періоді змінювання напруження отримано нову форму для запропонованого О.К. Морачковським кінетичного рівняння з тензорним параметром пошкоджуваності для випадку періодичного навантаження.

3. За допомогою проведеного циклу експериментальних досліджень на стандартній випробувальній машині АІМА-5-2 на плоских зразках зі сталі 3 отримано нові дані та закономірності з її короточасної повзучості при кімнатній температурі.

Експериментально отримано значення констант для рівняння стану ортотропної (трансверсально-ізотропної) повзучості. Встановлено, що: криві повзучості у всіх напрямках вздовж, поперек та під кутом 45° до напрямку прокатки сталевих листів є подібними; максимальна швидкість повзучості реалізується у напрямку вздовж прокатки, а мінімальна – під кутом 45° до нього; вигляд кривих повзучості відповідає першій ділянці (неусталеної повзучості); основна частка деформації набувається в перші хвилини повзучості, що надає

можливість класифікації кривих типом короткочасної повзучості; повзучість практично припиняється після 30 хвилин деформування.

В дослідженнях на періодичне навантаження зразків прямокутним циклом навантаження-розвантаження на базі дії середнього напруження встановлено істотну інтенсифікацію повзучості у порівнянні з чисто статичними випробуваннями.

Виконано дослідження деформування прямокутних пластин з п'ятьма отворами при розтязі. За допомогою відеофіксації та нанесених на поверхню матеріалу мірних сіток отримано кількісні та якісні характеристики процесу деформування пластин при дії статичного та періодичного навантаження.

4. У роботі розвинений програмний комплекс «*FEM CREEP*» на випадок попереднього пластичного деформування та опису пошкоджуваності за допомогою тензорного параметру пошкоджуваності. Програмний комплекс «*FEM-CREEP*» використаний для відтворення результатів обчислень у вигляді розподілів компонентів напружено-деформованого стану та параметру пошкоджуваності. Проведено дослідження достовірності розрахункового методу у цілому при порівнянні чисельних та експериментальних результатів при простому та плоскому напруженому стані, що має місце у досліджених пластинах з п'ятьма отворами. Встановлено цілком припустиме для фізично нелінійних задач механіки відхилення розрахункових та експериментальних даних у межах 25-30%, за винятком двох точок при періодичному навантаженні.

5. Чисельним моделюванням встановлено нові закономірності повзучості та пов'язаного з нею прихованого руйнування титанової пластини з центральним отвором при статичному та періодичному навантаженнях. Встановлено деформування при прокатці прямокутних сталевих листів, які надають можливість обрати безпечні з точки зору неприпустимих переміщень режимів руху.

6. Результати роботи у вигляді розрахункових даних та рекомендацій використовуються у практиці проектування Публічним акціонерним товариством «Дніпропетровський металургійний завод ім. Комінтерну» та були використані

при виконанні держбюджетних тем МОН України «Розробка методів, алгоритмів та програм для оцінювання динаміки, міцності і точності управління ракетної техніки» (Д.Р. № 0113U000448, 2013-2014 рр.) та «Розробка методів та алгоритмів розрахунку впливу теплових полів на працездатність приладів та елементів ракетно-космічної техніки» (Д.Р. № 0117U0004891, 2017 р.), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Breslavsky D.V., Mietielov V.O. Consideration the influence of residual stresses and creep strains on rolling the steel sheets. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин.* Харків, 2016. № 46 (1218). С. 77-80.

2. Breslavsky D., Mietielov V., Morachkovsky O., Tatarinova O., Pashchenko S. Asymptotic solution of anisotropic cyclic creep problem. *Nonlinear dynamics - 2016: Proceedings of 5th International Conference, Kharkov, 27-30 September 2016.* Kharkov, 2016. P. 276.

3. А. с. № 64660. Україна. Комп'ютерна програма "Розрахунки повзучості методом скінченних елементів" ("FEMCreep v 1.3") / Д.В. Бреславський, Ю.М. Коритко, В.О. Метельов. № 65155 ; заявл. 02.02.16 ; опубл. 29.04.16, Бюл. № 40. С. 492

4. Бреславський Д.В., Метельов В.О. Рівняння стану трансверсально-ізотропної повзучості сталі 3. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXIV міжнар. наук.-практ. конф.,* Харків, 18-20 травня 2016 р.: у 4 ч. Харків: НТУ «ХПІ», 2016. Ч. 1. С. 51.

5. Бреславський Д.В., Конкін В.М., Метельов В.О. Пластичність та повзучість сталі 3 при кімнатній температурі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин.* Харків, 2015. № 57 (1166). С. 14-19.

6. Метельов В.О. Пружнопластичне деформування при виготовленні трубчатих заготовок. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин.* Харків, 2015. № 55 (1164). С. 50-53.

7. Breslavsky D.V., Mietielov V.O., Morachkovsky O.K., Pashchenko S.O., Tatarinova O.A. Asymptotic methods and finite element method in cyclic creep-damage problems. *Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики.* Зб. наук.

праць, Львів, 24-25 вересня 2015 р. Львів: Львівський національний університет ім. Івана Франка, 2015. С. 19-20.

8. Breslavskii D.V., Metelev V.A., Morachkovskii O.K. Anisotropic creep and damage in structural elements under cyclic loading. *Strength of Materials*. 2015. Vol. 47, № 2. P. 235-241.

9. Бреславський Д.В., Метельов В.О., Конкін В.М., Макогон О.А. Деформування сталевих пластин при високих напруженнях. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези ХХІІІ міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 20-22 травня 2015 р.: у 4 ч. Харків: НТУ «ХП», 2015. Ч. 1. С. 39.

10. Бреславский Д.В., Метелев В.А., Морачковский О.К. Анизотропия ползучести и повреждаемости в элементах конструкций при циклическом нагружении. *Проблемы динамики и прочности в турбомашиностроении*: тезисы пятой междунар. науч.-техн. конф., Киев, 27-31 мая 2014 г. Киев: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2014. С. 29-30.

11. Метельов В.О. Короткочасна повзучість та руйнування тонкостінних елементів літальних апаратів. *До 100-річчя з дня народження академіка В.Г. Сергєєва та 50-річчя створення в ХПІ спеціальності «Динаміка польоту та управління»*: матеріали доповідей наук.-техн. конф. «Сергєєвські читання», Харків, 11-12 вересня 2014 р. Харків: НТУ «ХП», 2014. С. 48-49.

12. Бреславський Д.В., Конкін В.М., Метельов В.О. Деформування та руйнування сталевих матеріалів при дії напружень, близьких до границі міцності. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези ХХІІ міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 21-23 травня 2014 р.: у 4 ч. Харків: НТУ «ХП», 2014. Ч. 1. С. 40.

13. Breslavsky D., Korytko Yu., Mitielov V., Morachkovsky O., Tatarinova O. Numerical calculations of creep damage at cyclic loading by use of tensor damage parameter model. *Nonlinear dynamics - 2013: proceedings of the Fourth International Conference*, Sevastopol, 19-22 June 2013. Kharkov: «Tochka», 2013. P. 379-384.

14. Бреславский Д.В., Метелев В.А., Морачковский О.К., Татарина О.А. Расчеты динамической ползучести и повреждаемости элементов конструкций из анизотропных материалов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин. Харків, 2013. № 58 (1031). С. 23-31.

15. Бреславский Д.В., Метелев В.А., Морачковский О.К., Татарина О.А. Расчеты динамической ползучести и повреждаемости элементов конструкций из анизотропных материалов. *Математическое моделирование в естественных науках: тезисы докладов XXI Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов*, Пермь, 2-5 октября 2013 г. Пермь: ПНИПУ, 2013. С. 28-29.

16. Бреславський Д.В., Метельов В.О., Татарінова О.А. Анізотропія повзучості та пошкоджуваності в пластинах з отвором. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXI міжнар. наук.-практ. конф.*, Харків, 29-31 травня 2013 р.: у 4 ч. Харків: НТУ «ХПІ», 2013. Ч. 1. С. 34.

17. Метелев В.А., Наумов И.В. Моделирование упруго-пластического деформирования тонкостенных конструкций. *Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXV междунар. науч. конф.: в 10 т.* Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. Т. 3. Секция 5. С. 74-76.

18. Бреславський Д.В., Метельов В.О. Розрахунки напружено-деформованого стану коробчастої конструкції. *До 50-річчя першого пілотованого польоту людини у космос: матеріали X наук.-практ. конф. студентів та аспірантів інженерно-фізичного факультету НТУ «ХПІ»*, Харків, 12 квітня 2011 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2011. С. 80-81.

19. Lemaitre J., Chaboche J.-L. Mechanics of solid materials. Cambridge: Cambridge University press, 1994. 556 p.

20. Работнов Ю.Н., Милейко С.Т. Кратковременная ползучесть. Москва: Наука, 1970. 224 с.

21. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. Москва: Машиностроение, 1975. 399 с.

22. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. Москва: Наука, 1966. 752 с.
23. Хофф Н. Кратковременная (быстрая) ползучесть в конструкциях. *Проблемы высоких температур в авиационных конструкциях*. Москва: Изд-во иностр. лит., 1961. С. 365-394.
24. Kassner M.E. Fundamentals of Creep in Metals and Alloys. 3rd Edition. London: Elsevier Science Technology, 2015. 356 p.
25. Стрижало В.А. Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. Киев: Наукова думка, 1988. 230 с.
26. Стрижало В.А., Скрипченко В.И. Малоцикловая усталость при низких температурах. Киев: Наукова думка, 1983. 216 с.
27. Гудрамович В.С., Герасимов В.П., Коноваленков В.С., Пошивалов В.П. Предельные состояния оболочек при сложном нагружении и ползучести материала. Киев: Наукова думка, 1984. 256 с.
28. Пошивалов В.П. Длительная прочность и долговечность элементов конструкций. Киев: Наукова думка, 1992. 120 с.
29. Никитенко А.Ф., Соснин О.В. О ползучести и длительной прочности при циклических режимах нагружения. *Проблемы прочности*. 1976. № 12. С. 18-20.
30. Стрижало В.О. Про застосовність теорій повзучості і методів оцінки довговічності для випадку ступінчастого спрямованого деформування матеріалу в малоцикловій області. *Вісн Ан. УРСР*. 1978. № 3. С. 14-24.
31. Лебедев А.А., Ковальчук Б.И., Гигиняк Ф.Ф., Ламашевский В.П. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии. Справочник. Киев: Наукова думка, 1983. 366 с.
32. Лебедев А.А., Гигиняк Ф.Ф., Башта В.В. Исследование циклической ползучести корпусных сталей в условиях сложного напряженного состояния в диапазоне температур 20-400 °С. *Проблемы прочности*. 1978. № 10. С. 11-14.
33. Кеннеди А.Дж. Ползучесть и усталость в металлах. Москва: Металлургия, 1965. 312 с.

34. Цимбалистый Я.И., Троян И.А., Марусий О.И. Исследование виброползучести сплава ЭИ437Б при нормальных и высоких температурах. *Проблемы прочности*. 1975. № 11. С. 30-35.

35. Weinbel R.C., Schwarzkopf E.A., Tien J.K. Effects of frequency on the cyclic creep and fracture of a lead-rich-lead-tin solder alloy. *Scripta Metallurgica*. 1987. Vol. 21. P. 1165-1168.

36. Fakpana K., Otsukab Y., Mutohb Y., Inouec S., Nagatad K., Kodani K. Creep-fatigue crack growth behavior of Pb-contained and Pb-free solders at room and elevated temperatures. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 10. P. 1238-1243.

37. Ильюшин А.А. Пластичность. Москва: Гостехтеориздат, 1948. 376 с.

38. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. Москва: Наука, 1969. 420 с.

39. Соколовский В.В. Теория пластичности. Москва: Высшая школа, 1969. 608 с.

40. Шевченко Ю.Н. Термопластичность при переменных нагрузениях. Киев: Наукова думка, 1970. 287 с.

41. Грин А., Адкинс Дж. Большие упругие деформации и нелинейная механика сплошной среды. Москва: Мир, 1965. 455 с.

42. Жермен П. Курс механики сплошной среды. Общая теория. Москва: Высшая школа, 1983. 399 с.

43. Bonet J., Wood R.D. Nonlinear continuum mechanics for finite element analysis. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 283 p.

44. Crisfield M.A. Nonlinear finite element analysis of solids and structures. Volume 1 Essentials. John Wiley & Sons, 2000. 360 p.

45. Belytschko T., Wing K.L., Moran B. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures. John Wiley & Sons, 2000. 300 p.

46. Lange K. Handbook of Metal forming. Society of Manufacturing Engineers, 1985. 1204 p.

47. Wagoner R.H., Chenot J.L. Metal Forming Analysis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 376 p.

48. Kobayashi S., Oh S.I., Altan T. Metal Forming and the Finite Element

Method. New York: Oxford University Press, 1989. 402 p.

49. Chinesta F., Cueto E. *Advances in Material Forming. Esaform 10 years on.* Paris: Springer, 2007. 236 p.

50. Hino R., Sasaki A., Yoshida F., Toropov V.V. A new algorithm for reduction of number of press-forming stages in forging processes using numerical optimization and FE simulation. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2008. № 50. P. 974-983.

51. Ishimaru E., Hamasaki H., Yoshida F. Deformation-induced martensitic transformation behavior of type 304 stainless steel sheet in draw-bending process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. Vol. 223. P. 34–38.

52. Yoshida F., Uemori T., Fujiwara K. Elastic–plastic behavior of steel sheets under in-plane cyclic tension–compression at large strain. *International Journal of Plasticity*. 2002. Vol. 18. P. 633–659.

53. Zang S.L., Thuillier S., Port A. Le, Manach P.Y. Prediction of anisotropy and hardening for metallic sheets in tension, simple shear and biaxial tension. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2011. Vol. 53. P. 338–347.

54. Gall'ee S., Manach P.Y., Thuillier S. Mechanical behavior of a metastable austenitic stainless steel under simple and complex loading paths. *Materials Science and Engineering A*. 2007. Vol. 466. P. 47–55.

55. Kawka M., Bathe K.-J. Implicit integration for the solution of metal forming processes. *First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics*. Oxford: Elsevier, 2001. P. 283-286.

56. Kim Do-N., Montáns F.J., Bathe K.-J. Insight into a model for large strain anisotropic elasto-plasticity. *Comput Mech*. 2009. Vol. 44. P. 651–668.

57. Baig M.M.I., Bathe K.-J. On direct time integration in large deformation dynamic analysis. *Third MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics*. Oxford: Elsevier, 2005. P. 1044-1047.

58. Wang Yu, Zhao J., Dai S., Chen F., Yu X., Zhang Y. Influence of cold rolling and ageing treatment on microstructure and mechanical properties of Ti–30Nb–5Ta–6Zr

alloy. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2013. Vol. 27. P. 33–42.

59. Guang-ming L., Hong-shuang D., Cun-long Z., Hong-cui L., Jiang L. Tension and Thickness Control Strategy Analysis of Two Stands Reversible Cold Rolling Mill. *Journal of Iron and Steel Research*. 2012. Vol. 19. P. 20–25.

60. Mashayekhi M., Torabian N., Poursina M. Continuum damage mechanics analysis of strip tearing in a tandem cold rolling process. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2011. Vol. 19. P. 612–625.

61. Malik A.S., Grandhi R.V. A computational method to predict strip profile in rolling mills. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 206. P. 263–274.

62. Yu Y, Hai-bo W., Min W. FEM modelling for press bend forming of doubly curved integrally stiffened aircraft panel. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2012. Vol. 22. P. 39–47.

63. Verleysen P., Peirs J., Slycken J.V., Faes K., Duchene L. Effect of strain rate on the forming behaviour of sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011. Vol. 211. P. 1457–1464.

64. Malcher L., Andrade Pires F.M., César de Sá J.M.A., Andrade F.X.C. Numerical integration algorithm of a new model for metal plasticity and fracture including pressure and lode angle dependence. *International Journal of Material Forming*. 2009. Vol. 2. P. 443–446.

65. Saanouni K., Chaboche J.L. Computational Damage Mechanics: Application to Metal Forming simulation. *Comprehensive Structural Integrity*. 2003. Vol. 3. P. 321-376.

66. Saanouni K. Damage Mechanics in metal forming: Advanced modeling and numerical simulation. London: John Wiley, 2012. 544 p.

67. Saanouni K. On the numerical prediction of the ductile fracture in metal forming. *Engineering Fracture Mechanics*. 2008. Vol. 75. P. 3545–3559.

68. Badreddine H., Saanouni K., Dogui A. On non associative anisotropic finite plasticity fully coupled with isotropic ductile damage for metal forming. *International Journal of Plasticity*. 2010. Vol. 26. P. 1541–1575.

69. Comellas E., Bellomo F., Oller S. A new generalized finite strain damage model for quasi-incompressible hyperelasticity using hybrid formulation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2015. Vol. 00. P. 1–23.

70. Кукуджанов В.Н. Компьютерное моделирование деформирования, повреждаемости и разрушения неупругих материалов и конструкций. Москва: МФТИ, 2008. 215 с.

71. Miloud M.H., Imad A., Benseddig N., Bouiadjra B.B., Bounif A., Serier B. A numerical analysis of relationship between ductility and nucleation and critical void volume fraction parameters of Gurson–Tvergaard–Needleman model. *Proc IMechE Part C: J Mechanical Engineering Science*. 2013. Vol. 227(11). P. 2634–2646.

72. Ganjiani M., Naghdabadi R., Asghari M. An elastoplastic damage-induced anisotropic constitutive model at finite strains. *International Journal of Damage Mechanics*. 2012. Vol. 22(4). P. 499–529.

73. Yana Y., Suna Q., Chena J., Pan H. The initiation and propagation of edge cracks of silicon steel during tandem cold rolling process based on the Gurson–Tvergaard–Needleman damage model. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013. Vol. 213. P. 598–605.

74. Yu H.L., Liu X.H., Li X.W. FE analysis of inclusion deformation and crack generation during cold rolling with a transition layer. *Materials Letters*. 2008. Vol. 62. P. 1595–1598.

75. Xiea H.B., Jiang Z.Y., Yuen W.Y.D. Analysis of friction and surface roughness effects on edge crack evolution of thin strip during cold rolling. *Tribology International*. 2011. Vol. 44. P. 971–979.

76. Teixeira P., Santos A.D., César de Sá J.M.A., Andrade Pires F.M., Barata da Rocha A. Sheet metal formability evaluation using continuous damage mechanics. *International Journal of Material Forming*. 2009. Vol. 2. P. 463–466.

77. Areias P.M.A., C'esar de S'aa J.M.A., Conceição António C.A. Strong displacement discontinuities and Lagrange multipliers: finite displacement formulation in the analysis of fracture problems. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2005. Vol. 2. P. 77–88.

78. Areias P.M.A., César de Sá J.M.A., Conceição António C.A. Algorithms for the analysis of 3D finite strain contact problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2004. Vol. 61. P. 1107–1151.

79. Lemaitre J., Desmorat R. Engineering Damage Mechanics. Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2005. 380 p.

80. Andrade F.X.C., C'sar de s' J.M.A., Andrade Pires F.M. A Ductile Damage Nonlocal Model of Integral-type at Finite Strains: Formulation and Numerical Issues. *International Journal of Damage Mechanics*. 2011. Vol. 20. P. 1-43.

81. Wisselink H.H., Huetink J. Modelling of ductile failure in metal forming. *7th European LS-DYNA Conference*, Salzburg, 14-15 May 2009. Salzburg: DYNAmore GmbH, 2009. P. 1-10.

82. Hallquist J. LS DYNA Theoretical Manual. Livermore Software Technology. Livermore: Corporation, 2005. 320 p.

83. Генки Г. Новая теория пластичности, упрочнения, ползучести и опыты над неупругими материалами. *Теория пластичности*. Москва: Изд-во иностр. лит., 1948. С. 427-446.

84. Лазаренко Э.С., Малинин Н.Н., Романов К.И. Кратковременная ползучесть и разрушение алюминиевых и магниевых сплавов. Сообщение I. *Известия вузов*. 1982. № 3. С. 25-28.

85. Малинин Н.Н., Мохнатюк В.А., Романов К.И. Исследование процесса горячей осадки в условиях плоской деформации. *Известия вузов*. 1983. № 8. С. 24-27.

86. Романов К.И. Механика горячего формоизменения металлов. Москва: Машиностроение, 1993. 240 с.

87. Соснин О.В., Горев Б.В., Любашевская И.В. Ползучесть в обработке металлов давлением. *Математическое моделирование систем и процессов*. 2001. № 9. С. 169-176.

88. Никитенко А.Ф., Рубанов В.В. К оценке остаточного деформационного ресурса изделия после его формообразования в режиме ползучести. Динамика сплошной среды. *Сб. научн. трудов. АН СССР*. 1984. Вып. 66. С. 92-101.

89. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения: в 10 т. / под общей редакцией: Ф.В. Новикова, А.В. Якимова. Одесса: ОНПУ, 2004. Т. 5: Обработка металлов методами пластического деформирования. 522 с.

90. Бреславский Д.В., Бурлаенко В.Н., Морачковский О.К. Теоретические основы моделирования теплового формообразования панелей из листовых заготовок в режиме вибрационного нагружения. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2000. Вып. 14. С. 163-165.

91. Zhan L., Lin J., Dean T.A. A review of the development of creep age forming: Experimentation, modelling and applications. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2011. Vol. 51. P. 1-17.

92. Ho K.C., Lin J., Dean T.A. Modelling of springback in creep forming thick aluminum sheets. *International Journal of Plasticity*. 2004. P. 733-751.

93. Yanagimoto J., Oyamada K. Mechanism of Springback-Free Bending of High-Strength Steel Sheets under Warm Forming Conditions. *CIRP Annals Manufacturing Technology*. 2007. Vol. 56. P. 265-268.

94. Jie M., Chow C.L., Wu X. Damage-coupled FLD of Sheet Metals for Warm Forming and Nonproportional Loading. *International Journal of Damage Mechanics*. 2011. Vol. 20. P. 1243-1262.

95. Oehlert A., Atrons A. Room temperature creep of high strength steels. *Acta Metallurgica et Materialia*. 1994. Vol. 42. P. 1493-1508.

96. Tsuchidaa N., Nagahisab N., Harjo S. Room-temperature creep tests under constant load on a TRIP-aided multi-microstructure steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2017. Vol. 700. P. 631-636.

97. Niea De-fu, Zhaoa J., Moa T., Chen W. Room temperature creep and its effect on flow stress in a X70 pipeline steel. *Materials Letters*. 2008. Vol. 62. P. 51-53.

98. Liua C., Liua P., Zhaoa Z., Northwood D.O. Room temperature creep of a high strength steel. *Materials & Design*. 2001. Vol. 22. P. 325-328.

99. Pandeya C., Mahapatra M.M., Kumara P., Saini N. Effect of creep phenomena on room-temperature tensile properties of cast & forged P91 steel. *Engineering Failure Analysis*. 2017. Vol. 79. P. 385-396.

100. Kivisäkk U. Relation of room temperature creep and microhardness to microstructure and HISC. *Materials Science and Engineering: A*. 2010. Vol. 527. P. 7684-7688.

101. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. Т 1. Москва: Изд-во иностр. лит., 1954. 647 с.

102. Оровэн Э., Содерберг К.Р. Механические свойства материалов, применяемых в газотурбинных двигателях. *Основы проектирования и характеристики газотурбинных двигателей*. Москва: Машиностроение, 1964. С. 411-497.

103. Качанов Л.М. Теория ползучести. Москва: Физматгиз, 1960. 456 с.

104. Odkvist F.K.G. Mathematical theory of creep and creep rupture. Stockholm: Darendon press, 1966. 170 p.

105. Шевченко Ю.Н., Терехов Р.Г. Физические уравнения термовязко-пластичности. Киев: Наукова думка, 1982. 239 с.

106. Писаренко Г.С., Можаровский Н.С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. Киев: Наукова думка, 1981. 493 с.

107. Бойл Д., Спенс Д. Анализ напряжений в конструкциях при ползучести. Москва: Мир, 1986. 360 с.

108. Бурлаков А.В., Львов Г.И., Морачковский О.К. Ползучесть тонких оболочек. Харьков: ХГУ, 1977. 123 с.

109. Бурлаков А.В., Львов Г.И., Морачковский О.К. Длительная прочность оболочек. Харьков: Вища школа, 1981. 104 с.

110. Ползучесть элементов машиностроительных конструкций / А.Н. Подгорный и др.; Киев: Наукова думка, 1984. 262 с.

111. Шестериков С.А., Локощенко А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов. *Итоги науки и техники. Механика деформируемого твердого тела*. Москва: ВИНТИ, 1980. Т. 13.С. 3-104.

112. Maugin G.A. The thermomechanics of plasticity and fracture. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 350 p.
113. Krajcinovic D. Constitutive Equations for Damaging Materials. *Journal of Applied Mechanics*. 1983. № 50. P. 355-360.
114. Chaboche J.L. Anisotropic creep damage in the framework of continuum damage mechanics. *Nuclear Engineering and Design*. 1984. Vol. 79. P. 309-319.
115. Chaboche J.L. Damage Mechanics. In Comprehensive Structural Integrity. Pergamon Press. 2002. Vol. 2. P. 213-284.
116. Betten J. Damage tensors in continuum mechanics. *Journal de mécanique théorique et appliquée*. 1983. Vol. 2. P. 13–32.
117. Murakami S. Notion of Continuum Damage Mechanics and its Application to Anisotropic Creep Damage Theory. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1983. Vol. 105 (2). P. 99-105.
118. Murakami S. Progress of Continuum Damage Mechanics. *JSME International Journal*. 1987. Vol. 30. P. 701-710.
119. Ju J.W. Isotropic and Anisotropic Damage Variables in Continuum Damage Mechanics. *Journal of Engineering Mechanics*. 1990. Vol. 116 (12). P. 2764-2770.
120. Ziegler F. Developments in structural dynamic viscoplasticity including ductile damage. *ZAMM*. 1992. Vol. 72 (4). P. 1005-1015.
121. Skrzypek J.J. Plasticity and Creep. CRC Press, 1993. 456 p.
122. Dyson B.F., McLean M. Microstructural evolution and its effects on the creep performance of high temperature alloys. *Microstructural Stability of Creep Resistant Alloys for High Temperature Plant Applications* / Ed.: A. Strang, J. Cawley, G.W. Greenwood. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. P. 371–393.
123. Dyson B.F., McLean M. Micromechanism-quantification for creep constitutive equations. *IUTAM Symposium on Creep in Structures* / Ed.: S. Murakami, N. Ohno. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. P. 3–16.
124. Hayhurst D.R. The use of continuum damage mechanics in creep analysis and design. *Journal Of Strain Analysis For Engineering Design*. 1994. Vol. 29 (3). P. 233-241.

125. Perrin I.J., Hayhurst D.R. Creep constitutive equations for a 0.5Cr-0.5Mo-0.25V ferritic steel in the temperature range 600-675°C. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 1994. Vol. 31 (4). P. 299–314.

126. Kowalewski Z.L., Hayhurst D.R., Dyson B.F. Mechanisms-based creep constitutive equations for an aluminium alloy. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 1994. Vol. 29 (4). P. 309–316.

127. Соснин О.В. Анизотропная ползучесть упрочняющихся материалов. *Инженерный журнал. Механика твердого тела*. 1968. Вып. 4. С. 143-146.

128. Малинин Н.Н., Хажинский Г.М. К построению теории ползучести с анизотропным упрочнением. *Изв. АН СССР. Механика твердого тела*. 1969. Вып. 3. С. 148-152.

129. Chaboche J.L. Comportement Mercanique des Solides Anisotropes. *Colloques internationaux du CNRS*. Grenoble: Col. Euromech, 1982, Vol. 115, P. 737-760.

130. Bertram A., Olschewski J. Anisotropic creep modelling of the single crystal superalloy SRR99. *Computational Materials Science*. 1996. Vol. 5. P. 12-16.

131. Морачковский О.К., Подгорный А.Н. Соотношения нелинейной ползучести анизотропных тел. *Доклады АН УССР*. 1984. Сер. А., № 6. С. 82-85.

132. Морачковский О.К., Золочевский А.А. О влиянии исходной ортотропии материала на ползучесть конструкций из оболочек. *Прикладная механика*. 1980. Т. 16, № 6. С. 28-32.

133. Конкин В.Н., Морачковский О.К. Ползучесть и длительная прочность легких сплавов, проявляющих анизотропные свойства. *Проблемы прочности*. 1987. № 5. С. 38-42.

134. Ohno N, Takeuchi T. Anisotropy in multiaxial creep of nickel-based single-crystal superalloy CMSX-2 (experiments and identification of active slip systems). *JSME International Journal Series A*. 1994. Vol. 37. P. 129–137.

135. Морачковский О.К. Ползучесть: обзор результатов и современные направления исследований. *Инфиз: очерки истории творчества*. Харьков: Энерго Клуб Украины, 2005. С. 238-274.

136. Chaboche J.L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive equations. *International Journal of Plasticity*. 2008. Vol. 24. P. 1642–1693.
137. Betten J. Creep damage and life analysis of anisotropic materials. *Archive of Applied Mechanics*. 2001. Vol. 71 (2-3). P. 78–88.
138. Tvergaard V., Needleman A. The modified Gurson model. *Handbook of Materials Behavior Models* / Ed. J. Lemaitre. London: Academic Press, 2001. Vol. 2, ch. 6.5. P. 430–435.
139. Skrzypek J., Ganczarski A. Modeling of Material Damage and Failure of Structures: Theory and Applications. Berlin: Springer, 1999. 326 p.
140. Voyiadjis G.Z., Kattan P.I. Advances in Damage Mechanics: Metals and Metal Matrix Composites. Oxford: Elsevier, 1999. 541 p.
141. Wei Y., Chow C. Constitutive modeling of viscoplastic damage. *Iutam symposium on creep in structures* / Ed.: S. Murakami, N. Ohno. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. P. 131–140.
142. Dragon A., Halm D. *Continuous Damage and Fracture* / Ed. A. Benallal. Paris: Elsevier, 2000. P. 207–215.
143. Chaboche J.L., Gallerneau F. An overview of the damage approach of durability modelling at elevated temperature. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2001. Vol. 24. P. 405–418.
144. Betten J. Creep Mechanics. Berlin: Springer, 2005. 365 p.
145. Hyde T., Sun W., Hyde C. Applied Creep Mechanics. McGraw-Hill Education, 2013. 384 p.
146. Naumenko K., Altenbach H. Modelling of Creep for Structural Analysis. Berlin: Springer, 2007. 221 p.
147. Naumenko K., Altenbach H. Modeling high temperature materials behavior for structural analysis. Part 1. Continuum Mechanics Foundations and Constitutive Models. Berlin: Springer, 2016. 371 p.
148. Астафьев В.И., Радаев Ю.Н., Степанова Л.В. Нелинейная механика разрушения. Самара: Изд-во «Самарский университет», 2004. 562 с.

149. Morachkovsky O., Altenbach H., Pasynok M. Computational modelling of creep damage evolution in transversally-isotropic structures. *Республиканский межведомственный научно-технический сборник “Динамика и прочность машин”*. 1998. Вып. 56. С. 9-18.

150. Altenbach H., Huang C., Naumenko K. Creep damage predictions in thin-walled structures by use of isotropic and anisotropic damage models. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2002. Vol. 37 (3). P. 265–275.

151. Ozhoga-Maslovskaja O., Altenbach H., Naumenko K., Prygorniev O., Vodka O. Micromechanical creep model for pure copper. *PAMM*. 2011. Vol. 11 (1). P. 419–420.

152. Ozhoga-Maslovskaja O., Altenbach H., Naumenko K., Prygorniev O. Micromechanical simulation of grain boundary cavitation in copper considering nonproportional loading. *Computational Materials Science*. 2015. Vol. 96. P. 178-184.

153. Naumenko K., Gariboldi E. A phase mixture model for anisotropic creep of forged Al-Cu-Mg-Si alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2014. Vol. 618. P. 368–376.

154. Radayev Y.N. Constitutive Models of Anisotropic Damage Growth and Modeling of Damaging Processes in Solids. *Proc. 1st Canadian Conference on Nonlinear Solid Mechanics*, Victoria, Canada, 16-20 June 1999. Victoria: 1999. Vol. 1. P. 294-303.

155. Хажинский Г.М. Модели деформирования и разрушения металлов. Москва: Научный мир, 2011. 231 с.

156. Stewart C.M., Gordon A.P., Ma Y.W., Neu R.W. An anisotropic tertiary creep damage constitutive model for anisotropic materials. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2011. Vol. 88 (8-9). P. 356–364.

157. Stewart C.M., Gordon A.P., Ma Y.W., Neu R.W. An Improved Anisotropic Tertiary Creep Damage Formulation. *Journal of Pressure Vessel Technology*. 2011. Vol. 133 (5). P. 051201(1)–051201(10).

158. Золочевский А.А., Склепус А.Н., Склепус С.Н. Нелинейная механика деформируемого твердого тела: монография. Харьков: Бизнес Инвестор Групп, 2011. 720 с.

159. Склепус С.М. Варіаційні принципи теорії повзучості при скінченних деформаціях. *Машинознавство*. 2004. № 6. С. 22-26.

160. Latief F.H., Kakehi K., Murakami H. Anisotropic creep behavior of aluminized Ni-based single crystal superalloy TMS-75. *Materials Science and Engineering: A*. 2013. Vol. 567. P. 65-71.

161. Wen Z., Zhang D., Li S., Yue Z., Gao J. Anisotropic creep damage and fracture mechanism of nickel-base single crystal superalloy under multiaxial stress. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 692. P. 301-312.

162. Huang J., Shi D.-Q., Yang X.-G. A physically based methodology for predicting anisotropic creep properties of Ni-based superalloys. *Rare Metals*. 2016. Vol. 35 (8). P. 606–614.

163. Hayhurst D.R., Wong M.T., Vakili-Tahami F. The use of CDM analysis techniques in high temperature creep failure of welded structures. *JSME International Journal Series A*. 2002. Vol. 45. P. 90–97.

164. Hyde T.H., Sun W., Agyakwa P.A., Shipeay P.H., Williams J.A. Anisotropic creep and fracture behaviour of a 9CrMoNbV weld metal at 650°C. *Anisotropic Behaviour of Damaged Materials* / Ed.: J.J. Skrzypek, A.W. Ganczarski. Berlin: Springer, 2003. P. 295–316.

165. Hyde T.H., Sun W. A Study of Anisotropic Creep Behaviour of a 9CrMoNbV Weld Metal Using Damage Analyses with a Unit Cell Model. *The Journal of Materials: Design and Applications*. 2005. Vol. 219 (4). P. 193-206.

166. Naumenko K., Altenbach H. A phenomenological model for anisotropic creep in a multipass weld metal. *Archive of Applied Mechanics*. 2005. Vol. 74 (11-12). P. 808–819.

167. Lvov I. Micro-macro analysis of creep behavior in a multi-pass weld: Diss. ... Dr.-Ing. / Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Magdeburg, 2014. 95 p.

168. Collins J.A. Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction,

Prevention. Second Edition. New York: John Wiley and Sons, 1993. 654 p.

169. Тайра С., Отани Р. Теория высокотемпературной прочности материалов. Москва: Металлургия, 1986. 280 с.

170. Голуб В.П., Погребняк А.Д. Высокотемпературное разрушение материалов при циклическом нагружении. Киев: Наукова думка, 1994. 228 с.

171. Breslavsky D.V., Morachkovsky O., Tatarinova O. Creep and damage in shells of revolution under cyclic loading and heating. *International Journal of Nonlinear Mechanics*. 2014. Vol. 66. P. 87-95.

172. Можаровский Н.С., Антипов Е.А., Бобырь Н.И. Ползучесть и долговечность материалов при программном нагружении. Киев: Вища школа, 1982. 130 с.

173. Бобырь Н.И., Яхно Б.О., Грабовский А.П. Поврежденность конструкционных материалов при сложном малоцикловом нагружении. *Проблемы прочности*. 2007. № 6. С. 25-34.

174. Bobyr M., Khalimon O., Koval V. Damage and rupture of structural materials under complex low cycle loading. *Proc. of First Int. Conf. on Damage Mechanics ICDM1*, Belgrade, 25-27 June 2012. Belgrade: Serbian Chamber of Engineers: Faculty of Civil Engineering, 2012. P. 65-68.

175. Adamchuk M., Borodii M., Selin O., Stryzhalo V. Development of the Model for Cyclic Plasticity to Describe the Ratcheting Effect Under Non-Proportional Asymmetric Loading. *Strength of Materials*. 2016. Vol. 48 (2). P. 251-258.

176. Breslavsky D., Morachkovsky O. A new model of nonlinear dynamic creep. *IUTAM Symposium on Anisotropy, Inhomogeneity and Nonlinearity in Solid Mechanics*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995. P. 161-166.

177. Breslavsky D., Morachkovsky O. Cyclic creep constitutive equations with consideration of creep fatigue interaction. *Proc. of 1st International Conference on Mechanics of Time Dependent Materials*. 1995. Bethel: SEM. P. 61-66.

178. Голуб В.П. Циклическая ползучесть жаропрочных никелевых сплавов. Киев: Наукова думка, 1983. 224 с.

179. Москвитин В.В. Циклические нагрузки элементов конструкций. Москва: Наука, 1981. 344 с.
180. Penny R.K., Marriott D.L. Design for creep. London: Chapman and Hall, 1995. 430 p.
181. Hayhurst D.R. Estimates of creep rupture lives of structures subjected to cyclic loading. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1976. Vol. 18. P. 75-83.
182. Шукаев С., Гладский М., Заховайко А., Панасовский К. Метод оценки долговечности металлических материалов при малоцикловой усталости в условиях многоосного нагружения. *Проблемы прочности*. 2008. № 1. С. 56–59.
183. Breslavs'kyi D.V., Korytko Yu.M., Morachkovs'kyi O.K. Cyclic Thermal Creep Model for the Bodies of Revolution. *Strength of Materials*. 2011. Vol. 43 (2). P. 134-143.
184. Oskay C., Fish J. Fatigue life prediction using 2-scale temporal asymptotic homogenization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2004. Vol. 61(3). P. 329-359.
185. Yu Q., Fish J. Temporal homogenization of viscoelastic and viscoplastic solids subjected to locally periodic loading. *Computational Mechanics*. 2002. Vol. 29. P. 199–211.
186. Fish J., Bailakanavar M., Powers L., Cook T. Multiscale fatigue life prediction model for heterogeneous materials. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2012. Vol. 91 (10). P. 1087–1104.
187. Devulder A., Aubry D., Puel G. Two-time scale fatigue modelling: application to damage. *Computational Mechanics*. 2010. Vol. 45. P. 637–646.
188. Puel G., Aubry D. Efficient vibration fatigue simulations using a multiple-scale periodic homogenization method. *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EUROLYN 2014*, Porto, Portugal, 30 June - 2 July 2014. Porto: 2014. P. 1795-1802.
189. Puel G., Aubry D. Material fatigue simulation using a periodic time homogenization method. *European Journal of Computational Mechanics*. 2012. Vol. 21 (3-6). P. 312-324.

190. Argyris J.H. Three-Dimensional Anisotropic and Inhomogeneous Media – Matrix Analysis for Small and Large Displacements. *Ingeniour Archiv*. 1965. Vol. 34. P. 33–55.
191. Bathe K.J. Finite-Elemente Methoden. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1990. 820 p.
192. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. Москва: Мир, 1975. 539 с.
193. Постнов В.А., Хархурим И.Я. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций. Ленинград: Судостроение, 1974. 344 с.
194. Метод конечных элементов в механике твердых тел. / А.С. Сахаров и др.; Киев: Вища школа; Лейпциг: ФЭБ Фахбухферлаг, 1982. 480 с.
195. Оден Дж.Т. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. Москва: Мир, 1976. 560 с.
196. Zienkiewicz O.C., Corneau I.C. Visco-plasticity, plasticity and creep in elastic solid - an unified numerical solution approach. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1974. Vol. 8. P. 821-845.
197. Уманский С.Э. Оптимизация приближенных методов решения краевых задач механики. Киев: Наукова думка, 1983. 168 с.
198. MSC software solutions. MSC corporate brochure. 2016. 28 p.
199. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах. Москва: Компьютер Пресс, 2002. 224 с.
200. System Requirements for Abaqus 6.12 Products. URL: <https://www.3ds.com/support/certified-hardware/simulia-system-information/abaqus-612/system-requirements-for-abaqus-612-products/> (Last accessed: 13.10.2017).
201. Дударева Н.Ю., Загайко С.А. SolidWorks 2011 на примерах. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2011. 496 с.
202. Бреславський Д.В., Коритко Ю.М., Татарінова О.А. Проектування та розробка скінченноелементного програмного забезпечення. Харьков: «Підручник НТУ «ХПИ», 2017. 218 с.

203. Баженов В.А., Гуляр О., Пискунов С.О., Сахаров О.С. Напіваналітичний метод скінчених елементів в задачах руйнування просторових тіл. Київ: КНУБА, 2005. 298 с.
204. Рудаков К.М., Сидоренко І.Л. Алгоритми розв'язання крайових задач методом скінчених елементів при великих пружно-пластичних деформаціях та з урахуванням пошкодженості структури матеріалу. Повідомлення 1. Логарифмічні деформації. *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування*. 2012. Вип. 66. С. 138–144.
205. Chekhov V.V. Modification of the finite-element method to apply to problems of the equilibrium of bodies subject to large deformations. *International Applied Mechanics*. 2013. Vol. 49 (6). P. 658–664.
206. Бреславський Д.В., Пащенко С.О., Татарінова О.А. Розрахунки повзучості при неперервному зростанні температури. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин*. 2015. Вип. 57 (1166). С. 20-24.
207. Laengler F., Mao T., Scholz A. On the creep-fatigue lifetime of Turbine housing s affected by application specific load conditions. *Proc. of First Int. Conf. on Damage Mechanics ICDM1*, Belgrade, 25-27 June 2012. Belgrade: Serbian Chamber of Engineers: Faculty of Civil Engineering, 2012. P. 185-188.
208. Hyde T.H., Yaghi A., Becker A.A., Earl P.G. Finite element creep continuum damage mechanics analysis of pressurised pipe bends with ovality. *International Journal Series A*. 2002. Vol. 45 (1). P. 84–89.
209. Морачковский О.К., Пасынок М.А. Ползучесть изотропных и анизотропных плоских тел. *Труды международной научно-технической конференции “Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье”*. Харьков: ХГПУ, 1997. Ч. 1. С. 127-131.
210. Демидов С.П. Теория упругости. Москва: Высшая школа, 1979. 432 с.
211. Закономерности ползучести и длительной прочности. Справочник / под общ. ред. С.А. Шестерикова. Москва: Машиностроение, 1983. 101 с.
212. Морачковский О.К. О нелинейных задачах ползучести тел при воздействии быстро осциллирующего поля. *Прикладная механика*. 1992. Т. 28,

№ 8. С. 17-23.

213. Breslavsky D., Morachkovsky O. A new model of nonlinear dynamic creep. *IUTAM Symposium on Anisotropy, Inhomogeneity and Nonlinearity in Solid Mechanics*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995. P. 161-166.

214. Хемминг Р.В. Численные методы. Москва: Наука, 1968. 400 с.

215. Моисеев Н.Н. Асимптотические методы нелинейной механики. Москва: Наука, 1969. 379 с.

216. Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах. Москва: Наука, 1984. 352 с.

217. Постнов В.А., Хархурим И.Я. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций. Ленинград: Судостроение, 1974. 344 с.

218. Уилкинсон Р. Справочник алгоритмов на языке АЛГОЛ. Линейная алгебра. Москва: Машиностроение, 1976. 389 с.

219. Зенкевич О., Чанг И. Метод конечных элементов в теории сооружений и механике сплошных сред. Москва: Недра, 1974. 240 с.

220. Савин Г.М., Тульчій В.П. Довідник з концентрації напружень. Київ: Вища школа, 1976. 412 с.

221. Пасынок М.А. Разработка методов расчета на анизотропную ползучесть с учетом повреждаемости плоских конструктивных элементов машин: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.09 /Харьковский гос. политехнический ун-т. Харьков, 2000. 193 с.

222. Машина для испытания металлов на ползучесть и длительную прочность модели АИМА-5-2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Гб 2.773.С33 ТО. Иваново: Ивановский ЗИП, 1977. 63 с.

223. Walczak J., Sieniawski J., Bathe K. On the analysis of creep stability and rupture. *Computers & Structures*. 1983. Vol. 17 (5-6). P. 783-792.

224. Шлее М.К. Qt 5.5. Профессиональное программирование. Киев: Лит-Пресс, 2015. 512 с.

ДОДАТОК А.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Breslavskii D.V., Metelev V.A., Morachkovskii O.K. Anisotropic creep and damage in structural elements under cyclic loading. *Strength of Materials*. 2015. Vol. 47, № 2. P. 235-241.

2. Breslavsky D.V., Mietielov V.O. Consideration the influence of residual stresses and creep strains on rolling the steel sheets. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин*. Харків, 2016. № 46 (1218). С. 77-80.

3. Бреславський Д.В., Конкін В.М., Метельов В.О. Пластичність та повзучість сталі 3 при кімнатній температурі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин*. Харків, 2015. № 57 (1166). С. 14-19.

4. Метельов В.О. Пружнопластичне деформування при виготовленні трубчатих заготовок. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин*. Харків, 2015. № 55 (1164). С. 50-53.

5. Бреславский Д.В., Метелев В.А., Морачковский О.К., Татарина О.А. Расчеты динамической ползучести и повреждаемости элементов конструкций из анизотропных материалов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин*. Харків, 2013. № 58 (1031). С. 23-31.

6. А. с. № 64660. Україна. Комп'ютерна програма "Розрахунки повзучості методом скінченних елементів" ("FEMCreep v 1.3") / Д.В. Бреславський, Ю.М. Коритко, В.О. Метельов. № 65155 ; заявл. 02.02.16 ; опубл. 29.04.16, Бюл. № 40. С. 492

7. Breslavsky D., Mietielov V., Morachkovsky O., Tatarinova O., Pashchenko S. Asymptotic solution of anisotropic cyclic creep problem. *Nonlinear dynamics - 2016: Proceedings of 5th International Conference, Kharkov, 27-30 September 2016*. Kharkov,

2016. Р. 276.

8. Бреславський Д.В., Метельов В.О. Рівняння стану трансверсально-ізотропної повзучості сталі 3. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доповідей XXIV міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 18-20 травня 2016 р.: у 4 ч. Харків: НТУ «ХПІ», 2016. Ч. 1. С. 51.

9. Breslavsky D.V., Mitielov V.O., Morachkovsky O.K., Pashchenko S.O., Tatarinova O.A. Asymptotic methods and finite element method in cyclic creep-damage problems. *Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики*. Зб. наук. праць, Львів, 24-25 вересня 2015 р. Львів: Львівський національний університет ім. Івана Франка, 2015. С. 19-20.

10. Бреславський Д.В., Метельов В.О., Конкін В.М., Макогон О.А. Деформування сталевих пластин при високих напруженнях. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези XXIII міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 20-22 травня 2015 р.: у 4 ч. Харків: НТУ «ХПІ», 2015. Ч. 1. С. 39.

11. Бреславский Д.В., Метелев В.А., Морачковский О.К. Анизотропия ползучести и повреждаемости в элементах конструкций при циклическом нагружении. *Проблемы динамики и прочности в турбомашиностроении*: тезисы пятой междунар. науч.-техн. конф., Киев, 27-31 мая 2014 г. Киев: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2014. С. 29-30.

12. Метельов В.О. Короткочасна повзучість та руйнування тонкостінних елементів літальних апаратів. *До 100-річчя з дня народження академіка В.Г. Сергєєва та 50-річчя створення в ХПІ спеціальності «Динаміка польоту та управління»*: матеріали доповідей наук.-техн. конф. «Сергєєвські читання», Харків, 11-12 вересня 2014 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2014. С. 48-49.

13. Бреславський Д.В., Конкін В.М., Метельов В.О. Деформування та руйнування сталевих матеріалів при дії напружень, близьких до границі міцності. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези XXII міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 21-23 травня 2014 р.: у 4 ч. Харків: НТУ «ХПІ», 2014. Ч. 1. С. 40.

14. Breslavsky D., Korytko Yu., Mitielov V., Morachkovsky O., Tatarinova O. Numerical calculations of creep damage at cyclic loading by use of tensor damage parameter model. *Nonlinear dynamics - 2013: proceedings of the Fourth International Conference, Sevastopol, 19-22 June 2013*. Kharkov: «Tochka», 2013. P. 379-384.

15. Бреславский Д.В., Метелев В.А., Морачковский О.К., Татарина О.А. Расчеты динамической ползучести и повреждаемости элементов конструкций из анизотропных материалов. *Математическое моделирование в естественных науках: тезисы докладов XXI Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов, Пермь, 2-5 октября 2013 г.* Пермь: ПНИПУ, 2013. С. 28-29.

16. Бреславський Д.В., Метельов В.О., Татарінова О.А. Анізотропія повзучості та пошкоджуваності в пластинах з отвором. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXI міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 29-31 травня 2013 р.: у 4 ч.* Харків: НТУ «ХПІ», 2013. Ч. 1. С. 34.

17. Метелев В.А., Наумов И.В. Моделирование упруго-пластического деформирования тонкостенных конструкций. *Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXV междунар. науч. конф.: в 10 т.* Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. Т. 3. Секция 5. С. 74-76.

Бреславський Д.В., Метельов В.О. Розрахунки напружено-деформованого стану коробчастої конструкції. *До 50-річчя першого пілотованого польоту людини у космос: матеріали X наук.-практ. конф. студентів та аспірантів інженерно-фізичного факультету НТУ «ХПІ», Харків, 12 квітня 2011 р.* Харків: НТУ «ХПІ», 2011. С. 80-81.

ДОДАТОК Б.

АКТ ПРО ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА ПАТ «ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ МЕТАЛУРГІЙНИЙ ЗАВОД ІМ. КОМІНТЕРНУ»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Проректор з наукової роботи
Національного технічного
університету «Харківський
політехнічний інститут»

проф.Марченко А.П.

« 29 » 11 2015р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор з виробництва
Публічного акціонерного товариства
«Дніпропетровський металургійний
завод ім. Комінтерну»

Серпіченко С.М.

« 29 » 11 2015р.

АКТ

про застосування на ПАТ «Дніпропетровський металургійний завод
ім.Комінтерну» результатів дисертаційної роботи
Метельова Володимира Олександровича

Створений аспірантом кафедри систем і процесів управління Національного технічного університету «ХПІ» В.О. Метельовим метод розрахунку деформування та конструктивної міцності труб, що виготовляються на Публічному акціонерному товаристві «Дніпропетровський металургійний завод ім. Комінтерну», та отримані ним результати розрахунків використовуються при оцінюванні проектних параметрів продукції заводу.

Висновки та рекомендації, надані В.О. Метельовим, дозволять виконати порівняльний уточнений аналіз різних варіантів умов технологічного процесу та параметрів продукції.

Від Національного технічного
університету «Харківський
політехнічний інститут», зав.
кафедрою систем і процесів
управління, д-р технічних наук,
професор

Д.В. Бреславський

Від публічного акціонерного
товариства «Дніпропетровський
металургійний завод ім. Комінтерну»
начальник проектно-технічного
відділу

О.П. Попенко

ДОДАТОК В.

**АКТ ПРО ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ
РОБОТИ ПРИ ВИКОНАННІ ДЕРЖБЮДЖЕТНИХ
НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ ТЕМ В НТУ «ХП»**

„ЗАТВЕРДЖУЮ”

Проректор з наукової роботи
Національного технічного університету
„Харківський політехнічний інститут”
проф. Марченко А.П.
2017 р.

АКТ

про застосування результатів дисертаційної роботи

Метельова Володимира Олександровича
при виконанні держбюджетної науково-дослідної теми в Національному технічному університеті „Харківський політехнічний інститут”

Результати дисертаційної роботи асистента кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем Метельова В.О. у вигляді створених ним рівнянь стану ортотропної повзучості та пошкоджуваності при періодичному навантаженні, дані експериментального дослідження та чисельні дані розрахунків за розвиненим у роботі програмним комплексом для розрахунку повзучості при двовимірному напруженому стані були використані в Національному технічному університеті „Харківський політехнічний інститут” при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт М5813 “Розробка методів, алгоритмів та програм для оцінювання динаміки, міцності і точності управління ракетної техніки” (№ Д.Р. 0113U000448, 2013-2014 рр.), М5815 «Розробка методів та алгоритмів розрахунку впливу теплових полів на працездатність приладів та елементів ракетно-космічної техніки» (№ ДР 0117U0004891, 2017р.).

Науковий керівник тем М5813, М5815,
завідувач кафедри комп'ютерного
моделювання процесів та систем
д-р техн. наук, проф.



Д.В.Бреславський