

УДК 539.3.4

А. Пилипенко, канд. техн. наук; В. Параца

Національний університет біоресурсів і природокористування України

## ВИКОРИСТАННЯ ПОВНОЇ ДІАГРАМИ ДЕФОРМУВАННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ГРАНИЧНОЇ ПОШКОДЖЕНОСТІ МАТЕРІАЛУ ПРИ СКЛАДНИХ УМОВАХ НАВАНТАЖЕННЯ

*Резюме.* На конкретних прикладах показано переваги методу повних діаграм деформування для оцінки граничної пошкодженості матеріалу при складних режимах навантаження. Підкреслюється перспективність використання повних діаграм деформування для оцінки поточного стану матеріалу незалежно від виду попереднього напрацювання матеріалу. Наведено дані зі зміни питомої роботи руйнування матеріалів при статичному розтягу в залежності від попередніх режимів навантаження.

*Ключові слова.* Пошкодженість, повна діаграма деформування, крива накопичення пошкодженості, імпульсні підвантаження.

A.Pylypenko, V.Paratsa

## THE USAGE OF COMPLETE STRESS-STRAIN SOFTENING DIAGRAMS FOR AN ESTIMATION OF LIMITING DAMAGE OF MATERIAL UNDER COMPLEX MODES LOADING

*The summary.* On concrete examples advantages of a method of complete stress-strain softening diagrams to an estimation material limiting damage under complex modes loading are shown. The availability of complete stress-strain softening diagrams usage for estimation of current material condition independently of the previous operating time mode of material is accentuated. The data on change of fracture specific work of materials are shown at static tensile depending on the previous modes of loading.

*Key words.* Damage, complete stress-strain softening diagrams, damage accumulation curve, subloading pulse.

**Вступ.** Переваги методу повних діаграм деформування для дослідження кінетики руйнування пластичних матеріалів і оцінки їх тріщиностійкості на малогабаритних зразках обґрунтовані в роботах [1...3].

Концепція повних діаграм деформування в даний час представляється вельми привабливою і пріоритетною для вирішення задач пружно-пластичної механіки руйнування [4...6].

Повні діаграми деформування, тобто діаграми, що включають другу, спадну до осі абсцис ділянку, можуть бути отримані лише на випробувальних машинах великої жорсткості, або на високоточних машинах, забезпечених швидкодійними пристроями зворотного зв'язку.

При побудові повних діаграм деформації необхідно враховувати один принциповий момент. Для кожного матеріалу існує критична довжина зразка, запас пружної енергії на базі якої у момент старту макротріщини дорівнює роботі руйнування. Залежно від мікромеханізмів розвитку тріщини (в'язкий відрив, в'язкий зріз, змішане руйнування) ця робота істотно змінюється. Таким чином, є обмеження на допустимі розміри використовуваних зразків в дослідах на зрівноважене деформування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для прогнозування кінетики розсіяних пошкоджень в матеріалі на різних стадіях деформування при статичному навантаженні в Інституті проблем міцності НАН України ім. Г.С.Писаренка розроблено модель накопичення пошкоджень в металевих матеріалах, у тому числі з

урахуванням виду напруженого стану, в якій у якості основного параметру поточного стану матеріалу, якому ставиться у відповідність ступінь розпушування, прийнято коефіцієнт поперечної деформації на цій стадії [7,8].

Виявилося, що модель можна розповсюдити і на випадок, коли пошкодженість досягає своїх граничних рівнів, про що свідчать результати спеціально поставлених дослідів [9]. Зауважимо, що граничні рівні пошкодженості матеріалу при будь-якій жорсткості напруженого стану можна досягти тільки в умовах зрівноваженого деформування.

Сукупність кривих, що відповідають різному напрацюванню, є поверхнею граничної пошкодженості, яка може розглядатися як свого роду паспорт матеріалу при розрахунках конструкцій за критеріями пошкодженості [9].

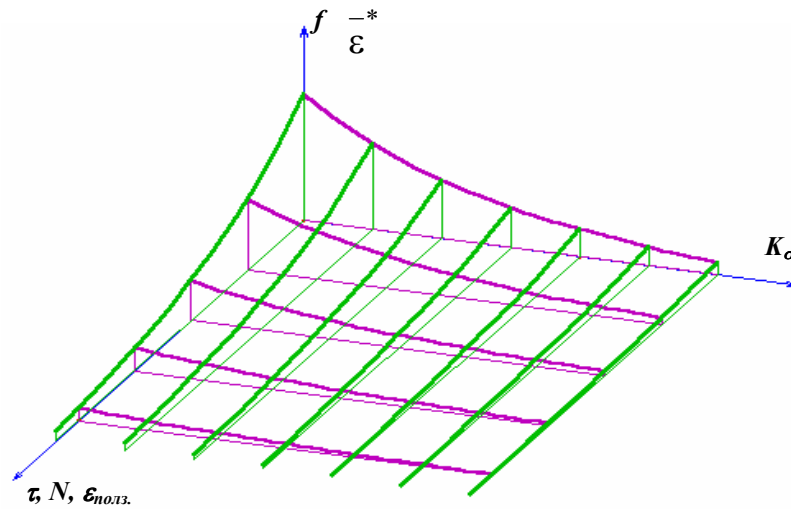


Рис. 1. Залежність граничної пошкодженості матеріалу від виду напруженого стану і напрацювання

Для оцінки граничної пошкодженості матеріалу запропонований також параметр  $A_p$ , що має зміст питомої роботи руйнування [10]:

$$A_p = \varepsilon_F \cdot S_k \quad (2)$$

тут  $\varepsilon_F = \Delta l_p / F_k$ ;  $\Delta l_p$  - подовження зразка на стадії росту макротріщини;  $F_k$  - площа поверхні руйнування;  $S_k$  – опір матеріалу відриву.

За параметром  $A_p$  можна достатньо просто проводити експрес-контроль рівня локальних граничних пошкоджень в матеріалі, що деформується. Як еталон можна використовувати відповідні дані, що отримані, наприклад, методом зважування.

В даній роботі наведено результати випробувань цілого ряду конструкційних матеріалів з використанням методу повних діаграм деформування після різних режимів напрацювання, методика яких описана в наших роботах [11...15].

**Метою досліджень** є отримання нової інформації про механічні характеристики конструкційних матеріалів при складних режимах навантаження (статичний розтяг – імпульсне підвантаження зразка – статичний розтяг, статичний розтяг з накладанням додаткового вібраційного навантаження, попереднє термоциклічне напрацювання) з використанням методу повних діаграм деформування.

**Методика досліджень.** Випробування проводили на гладких циліндричних зразках діаметром 8 мм з довжиною робочої частини 25 мм. В якості досліджуваних

матеріалів було вибрано сталі 10, 20, мартенситно-старіючу сталь ВНС-25, сталі 12Х2МФА і 25Х1М1Ф. Повністю методика проведення досліджень описана в працях [1, 2, 3, 11, 13, 15].

**Результати досліджень.** На рис. 2 показані повні діаграми деформацій гладких зразків з мартенситно-старіючої сталі та сталі 20 при статичному розтягу (криві 1,3) і в режимі складного навантаження (статичний розтяг – імпульсне підвантаження зразка – статичний розтяг) (криві 2, 4) відповідно при величині імпульсів 46,1 кН і 32,1 кН.

При випробуваннях виконувались часткові або повні розвантаження для визначення дефекту модуля пружності матеріалу

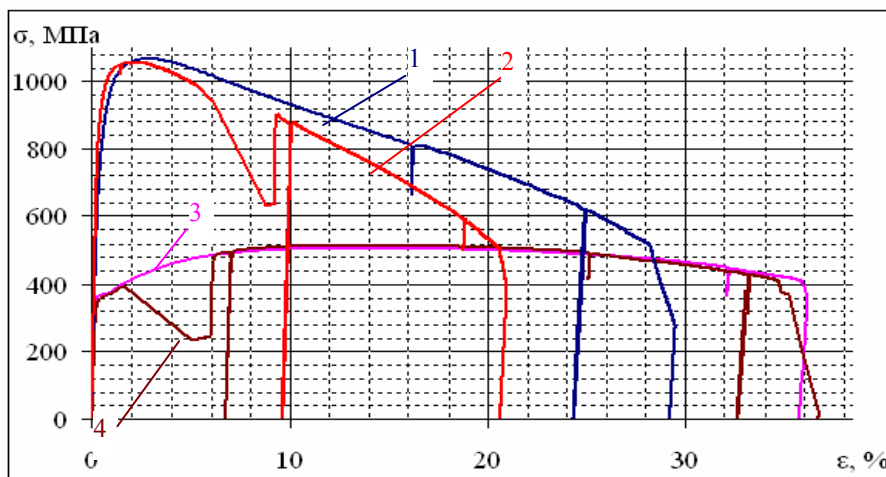


Рис. 2. Повні діаграми деформацій мартенситно-старіючої і сталі 20 при статичному розтягу та з урахуванням імпульсного підвантаження (позначення кривих подано в тексті)

На рис. 3 представлено графіки, що характеризують поведінку реакторної сталі після двох режимів попередньої термообробки з урахуванням імпульсного підвантаження зразків на різних стадіях деформування. Ці дані дозволяють наочно проілюструвати істотність зміни поведінки матеріалів при наступному статичному розтягу.

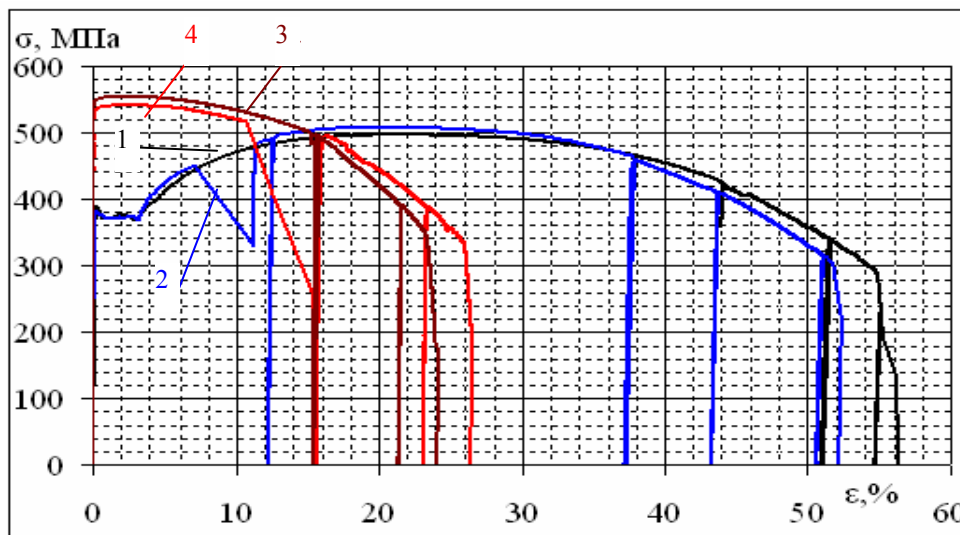


Рис. 3. Повні діаграми деформацій корпусної сталі при статичному розтягу та з урахуванням імпульсного підвантаження після двох різних режимів термообробки (позначення кривих подано в тексті)

Тут криві 1, 3 відповідають статичному розтягу відповідно при двох режимах термообробки, криві 2, 4 – з урахуванням імпульсного підвантаження зразків імпульсами величиною 25,1 кН і 31,4 кН, відповідно.

Експериментальні криві, наведені на рис. 5 ілюструють істотні зміни в характері деформування і руйнування сталі 25Х1М1Ф в залежності від попереднього термоциклічного напрацювання.

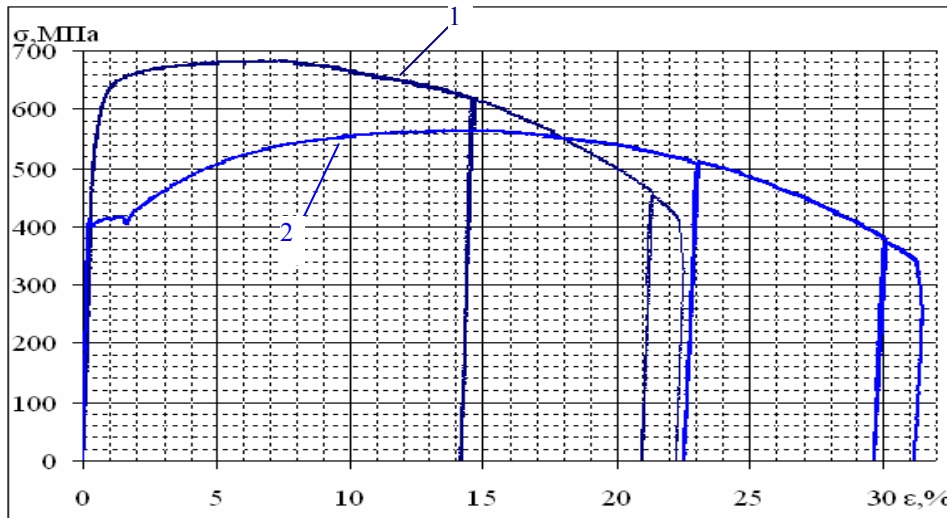


Рис. 4. Повні діаграми деформацій сталі 25Х1М1Ф при статичному розтягу і після термоциклічного напрацювання: 1 – статичний розтяг; 2 – 2000 циклів напрацювання

На рис. 5 подано результати дослідження низьковуглецевої сталі 10. Тут крива 1 відповідає статичному розтягу, а крива 2 – складному режиму навантаження. Спочатку зразок статично розтягували до т. А, після чого статичний розтяг припинявся і зразок піддавався вібраційному впливу на протязі 1 год. Потім зразок розвантажувався, витримувався упродовж 30 діб і знову повторно розтягувався в режимі зрівноваженого деформування до повного поділу на частини.

Порівняння питомої роботи руйнування, на прикладі сталі 20, за статичного розтягу і з урахуванням імпульсного підвантаження однакової інтенсивності ( $P_{руйн} = 19,1$  кН) на різних стадіях деформування, дозволило встановити найбільш небезпечні ступені деформацій для дослідженого складного режиму навантаження.

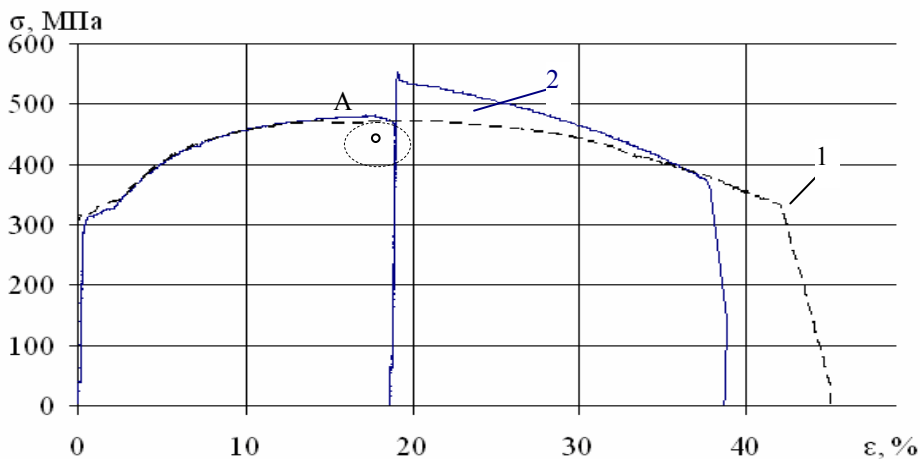


Рис. 5 Повні діаграми деформацій сталі 10 :

1 – при статичному розтягу; 2 – з накладанням додаткового вібраційного навантаження і витримки

Як з'ясувалось (рис. 6), мінімальні значення питомої роботи руйнування  $A_p$  зафіксовані при раптових змінах в режимі навантаження на зубі (площині) текучості і межі міцності пластичної сталі.

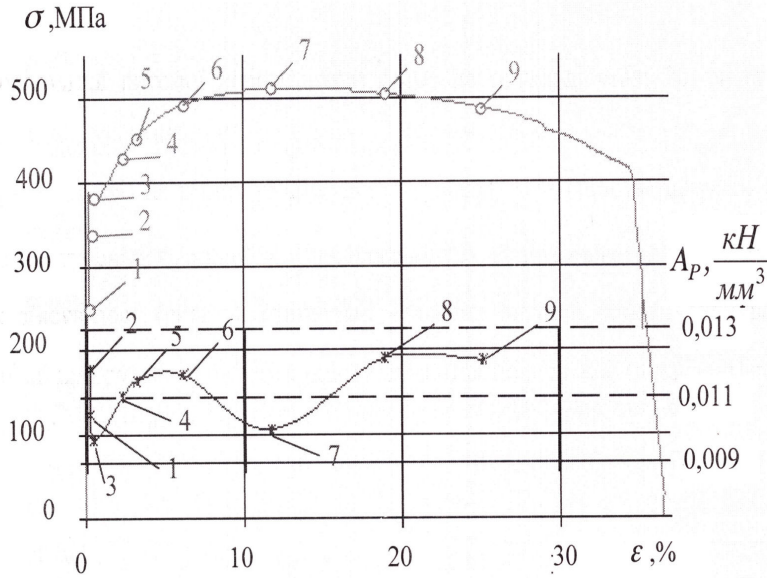


Рис. 6. Ступені деформації сталі 20, за яких здійснювались імпульсні підвантаження (точки 1...9) і відповідні їм значення питомої роботи руйнування  $A_p$

Такі особливості процесу деформування можна пояснити з позицій оцінки поточної пошкодженості матеріалу, так як характерні точки на діаграмі деформацій: зуб (площадка) текучості і межа міцності матеріалу характеризують перехідні ділянки S-подібної кривої накопичення пошкоджень при статичному розтягу (початок росту пор і їх злиття).

Імпульсні підвантаження на стадіях утворення і росту пор вносять істотні зміни в кінетику процесу накопичення пошкоджень, що, передусім, впливає на стадію злиття пор і на граничну пошкодженість матеріалу. Таким чином, вся область можливих поточних і граничних значень деформації розпушування  $\epsilon_p$  матеріалу після раптового підвищення швидкості деформації, при одному й тому ж ступені деформації, в координатах  $\epsilon_p - \epsilon$  обмежена деякою криволінійною фігурою, сторони якої являють залежність  $\epsilon_p(\epsilon)$  від величини раптового підвищення швидкості деформації: одна сторона (крива 1) – для вихідного матеріалу без раптових змін в режимі навантаження;

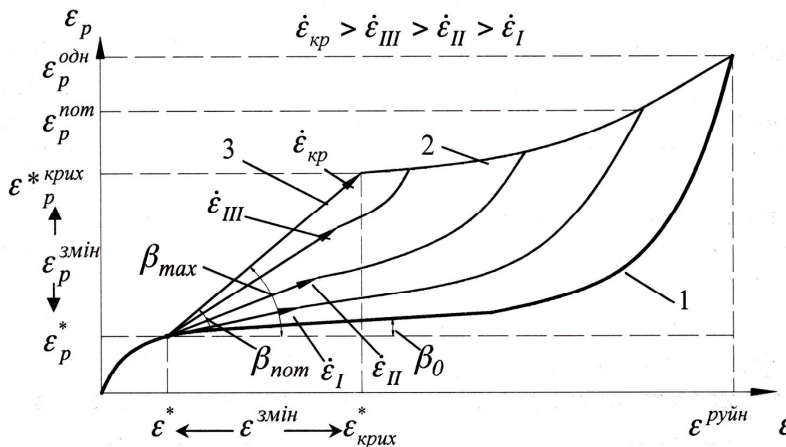


Рис. 7. Залежність граничної пошкодженості матеріалу  $\epsilon_p$  від величини раптового підвищення швидкості деформації

друга сторона (крива 2) – крива граничних рівнів пошкоджень з урахуванням впливу раптових змін в режимі навантаження; третя сторона (пряма 3) – рівень крихкого стрибка деформації розпушування при “критичній” швидкості деформації (рис. 7).

Потрібно враховувати, що саме від величини раптового підвищення швидкості деформації, яка характеризується похідною стрибка деформації пошкодженості по загальній деформації матеріалу в процесі раптової зміни в режимі навантаження, залежить кінетика процесу накопичення пошкоджень і тріщиностійкість матеріалу при подальшому статичному розтягу.

В межі, при  $d\varepsilon_p / d\varepsilon = 1$  реалізується крихке руйнування матеріалу.

В таблиці зведено результати оцінки питомої роботи руйнування методом повних діаграм деформування для складних режимів навантаження, якій ставиться у відповідність пошкодженість матеріалів.

Таблиця

Матеріал	Характер напруження	Питома робота руйнування зразка у вихідному стані $A_{p1}, \text{кН/мм}^3$	Питома робота руйнування зразка після напруження $A_{p1}, \text{кН/мм}^3$
Мартенситно-старіюча сталь	Імпульсне підвантаження 46,1 кН	0,071	0,0508
Сталь 20	Імпульсне підвантаження 32,1 кН	0,0173	0,0148
Сталь 12Х2МФА I	Імпульсне підвантаження 25,1 кН	0,0371	0,0286
Сталь 12Х2МФА II	Імпульсне підвантаження 31,4 кН	0,0222	0,0254
Сталь 25Х1М1Ф	Термоцикловання $f = 0,013$ Гц, 13↔500°C, 2000 циклів	0,0548	0,0624
Сталь 10	Вібраційне навантаження $f = 100$ Гц на протязі 1 год	0,028	0,021

### Висновки.

1. Показано перспективність використання методу повних діаграм деформування при оцінці рівня граничної пошкодженості конструкційних матеріалів при складних режимах навантаження.

2. Встановлено, що після імпульсного підвантаження і вібраційного впливу з витримкою 30 діб для більшості випробуваних матеріалів питома робота руйнування істотно знижується.

### Література

1. Чаусов Н.Г. Кинетика разрушения металлов на заключительных стадиях деформирования: автореф. дис. докт. техн. наук: спец. 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела» / Н.Г. Чаусов. – Киев, 1992. – 32 с.
2. Чаусов Н.Г. Полная диаграмма деформирования как источник информации о кинетике накопления повреждений и трещиностойкости материалов / Н.Г. Чаусов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – Т. 70. – №7. – С. 42–49.
3. Лебедев А.А. Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки / А.А. Лебедев, Н.Г. Чаусов. — Киев.: Изд-во ИПП НАН Украины, 2004. – 133с.
4. Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій. [Під заг. ред. В.В. Панасюка.]. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. – 2004. – 912 с.
5. Вильдеман В.Э. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов / [В.Э. Вильдеман, Ю.В. Соколкин, А.А. Ташкинов]; под ред. Ю.В. Соколкина. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 288 с.
6. Панасюк В.В. До джерел  $\delta_k$ -моделі та моделі смуг пластичності / В.В. Панасюк, С.Я. Ярема //

- Фіз. – хім. механіка матеріалів. – 2001. – №2. – С. 181–188.
7. Лебедев А.А. Модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении / А.А. Лебедев, Н.Г. Чаусов, И.О. Богинич, С.А. Недосека // Пробл. прочности. –1995. – №7. – С.31–40.
  8. Лебедев А.А. Модель накопления поврежденности в металлических материалах при сложном напряженном состоянии / А.А. Лебедев, Н.Г. Чаусов, И.О. Богинич // Пробл. прочности. –1997. – №3. – С.55–63.
  9. Lebedev A.A. Model for Damage Accumulation in a Material under Multiaxial Loading / A.A. Lebedev, N.G. Chausov and A.Z. Bogdanovich / In Proc. of The Sixth Int. Conf. on Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture. – Ed. Manuel Morlina de Freitas– Lisboa. – Portugal. – 2001. – №2. –P. 1023-1029.
  10. Чаусов Н.Г. О предельной поврежденности материала в зоне концентратора / Н.Г. Чаусов, А.А. Лебедев, А.З. Богданович // Пробл. прочности. – 2002. – №6. – С. 17–21.
  11. Чаусов Н.Г. Установка для испытания материалов с построением полных диаграмм деформирования / Н.Г. Чаусов, Д.Г. Войтюк, А.П. Пилипенко, А.М. Кузьменко. // Проблемы прочности. – 2004. – № 5. – С. 1–7.
  12. Chausov N.G. Influence of Dynamic Overloads on Fracture Kinetics of Metals at Final Stages of Deformation / N.G. Chausov, A.P. Pilipenko // Mechanika. – 2004. – 3 (48), P. 13–18.
  13. Чаусов М.Г. Вплив динамічних перевантажень на кінетику руйнування сталей за наступного статичного навантаження / Микола Георгійович Чаусов, Андрій Петрович Пилипенко. // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій. Під заг. ред. В.В.Панасюка. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, 2004. – С. 787–792.
  14. Чаусов М. Повна діаграма деформування як джерело інформації про кінетику руйнування пластичних матеріалів / Микола Георгійович Чаусов / Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій. Під заг. ред. В.В. Панасюка. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2004. – С. 781–786.
  15. Марущак П. Кінетика статичного деформування та руйнування теплостійкої сталі 25Х1М1Ф після попереднього термоциклічного напруження / П. Марущак, Р. Біщак, А. Пилипенко // Вісник Тернопільського держ.техн.ун-ту. – 2008. – № 4. – С. 56–60.

Одержано 10.10.2009р.