

ВПЛИВ ДИНАМІЧНИХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ НА КІНЕТИКУ НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ І СТАТИЧНУ ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ МАТЕРІАЛІВ

Показано ефективність використання методу повних діаграм деформування при вивченні впливу динамічних перевантажень на кінетику накопичення пошкодженості і статичну тріщиностійкість сталей. Для проведення досліджень на кафедрі опору матеріалів Національного аграрного університету України створено випробувальну установку, яка дозволяє реалізувати складні режими навантаження (статичний розтяг – динамічне перевантаження – статичний розтяг) із записом повних діаграм деформування. Випробування проводились на гладких зразках з реакторної і мартенситно-старіючої сталей. На базі нових експериментальних даних запропоновано фізично несуперечливу модель накопичення пошкодженень в матеріалах при складних режимах навантаження.

Вступ

Відомо, що усі фізичні процеси, які протікають у матеріалі при навантаженні, відображені в повних діаграмах деформування, причому спадаючі ділянки цих діаграм відповідають окремим стадіям руйнування [1,2].

Метод повних діаграм деформування є також досить ефективним для вивчення впливу попереднього навантаження на кінетику накопичення пошкодженень і тріщиностійкість матеріалу при подальшому статичному розтягу [3].

Необхідність побудови повних діаграм деформування в таких випадках викликана тим, що характер будь-якого попереднього навантаження може істотно вплинути на фізико-механічні властивості матеріалів при наступному статичному розтягу.

Особливу небезпеку можуть викликати динамічні перевантаження, так як вони істотно підвищують схильність матеріалів до окрихнення, що може призводити до непередбачуваних руйнувань машин і обладнання.

Для проведення випробувань при складних умовах навантаження (статичний розтяг – динамічне перевантаження – статичний розтяг) на кафедрі опору матеріалів Національного аграрного університету України на базі випробувальної машини ZD-100Pu розроблена установка для випробувань матеріалів з побудовою повних діаграм деформування, що за всіма характеристиками вигідно відрізняється від відомих [4].

Установка обладнана пристосуванням, яке дозволяє реалізувати складні режими навантаження (статичний розтяг – динамічне перевантаження – статичний розтяг) з записом повних діаграм деформування. В момент досягнення заданого навантаження на випробовуваних зразках їх піддають дії динамічних перевантажень за рахунок крихкого руйнування проб металу, що встановлюються паралельно до зразка, на величину силового імпульсу ΔP_1 , ΔP_2 , ΔP_{max} , де гранична величина ΔP_{max} відповідає різниці між максимальним навантаженням на зразок і заданим навантаженням.

Ще одною перевагою створеної установки є те, що вона обладнана комп'ютеризованою вимірювальною системою (КВС) з програмним забезпеченням для проведення і обробки результатів випробувань.

Всі дані, які реєструються і візуалізуються, наводяться у фізичній розмірності з врахуванням тарирувальних коефіцієнтів і нуля каналів (рис. 1).

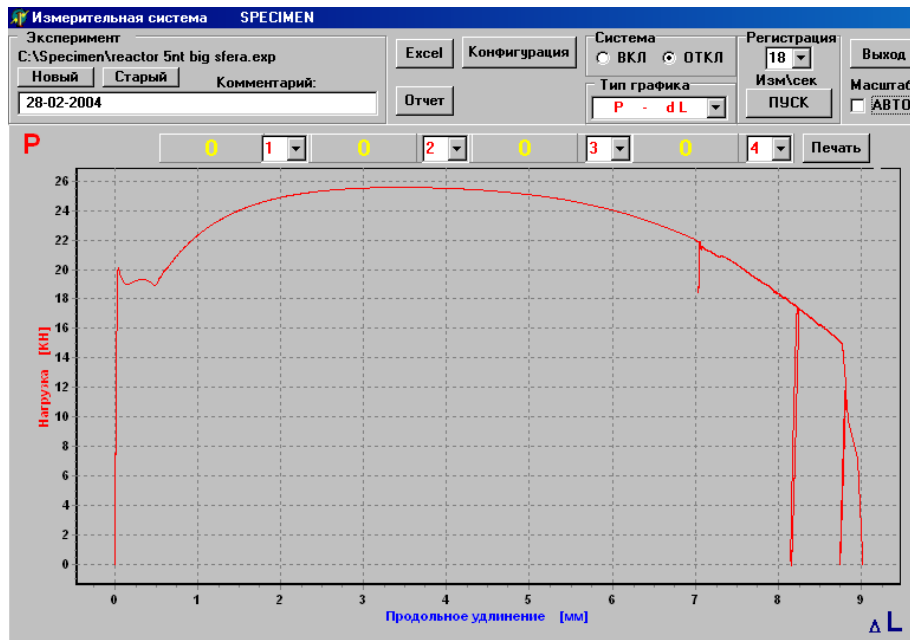


Рис. 1. Повна діаграма деформування реакторної сталі 12ХНЗМФА

Створена система здатна відображати в реальному масштабі часу графік деформування „навантаження - видовження”, а після закінчення експерименту автоматично будувати інші варіанти графіків. Наявна можливість масштабування будь-якої частини графіка.

Досліджувані матеріали і результати експериментів

В даній роботі наведені результати випробувань реакторної сталі 12ХНЗМФА після двох режимів термообробки та мартенситно-старіючої сталі.

Для випробувань використовувались гладкі циліндричні зразки діаметром 8 мм та довжиною робочої частини 25 мм.

На рис 2 показані ділянки діаграм деформування зразків із реакторної сталі після першого режиму термообробки, що випробовувалися в умовах „статичний розтяг – динамічне перевантаження” з перевантаженням на зубі текучості (цифрами вказані номери випробовуваних зразків).

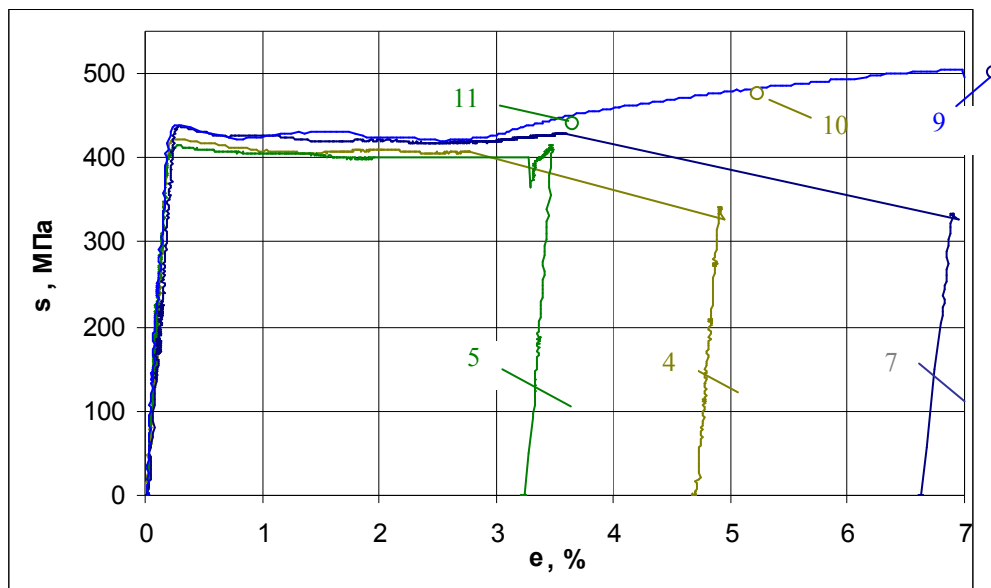


Рис.2. Ділянки діаграм деформації зразків з сталі 12ХНЗМФА після першого режиму термообробки при різних режимах навантаження

Після динамічного перевантаження зразки розвантажувалися для подальших метало-фізичних досліджень. Тут же, для порівняння, приведені стадії деформації зразків з тієї ж сталі, випробовуваних при статичному розтягуванні і розвантажених при тих же ступенях деформації, що і з урахуванням динамічних перевантажень.

Як видно з рис. 2, динамічні перевантаження істотно впливають на процес деформування сталі.

Для вивчення особливостей структурного стану сталі після різних режимів навантаження скористаємося феноменологічною моделлю накопичення пошкоджень в металевих матеріалах при статичному розтягуванні, відповідно до якої ступінь пошкодження (розпушення) пов'язаний з деформацією співвідношенням [5]:

$$\varepsilon_p = [1 - 2\mu(\varepsilon)]/\varepsilon, \quad (1)$$

де $\mu(\varepsilon)$ - поточне значення коефіцієнта поперечної деформації. Деформація розпушення має стійку кореляцію з пошкодженістю матеріалу [3].

Приведені на рис. 3 дані свідчать про те, що у момент динамічного перевантаження змінюється густина матеріалу в хвилях розрідження і стиснення. Причому залежно від ступеня деформації, при якій проводилося динамічне перевантаження на зубі текучості, відзначаються деякі відмінності в кінетиці накопичення пошкоджень. Однозначно можна стверджувати, що динамічне перевантаження стрибком збільшує ступінь розпушення матеріалу, внаслідок чого відзначається істотне розміщення матеріалу в порівнянні з деформаційними процесами, що відбуваються в матеріалі при статичному розтягуванні. З іншого боку, особливості деформації матеріалу на зубі текучості виявляються в тому, що у разі динамічного перевантаження матеріалу в стані, близькому до жорстко-пластичного тіла без зміцнення (зразки № 5, 4), деформація розпушування ε_p послідовно зростає в хвилях розрідження і стиснення. У разі ж динамічного перевантаження матеріалу в стані, близькому до жорстко-пластичного тіла із зміцненням (зразок № 7) деформація розпушування різко зростає в хвилі розрідження і падає в хвилі стиснення.

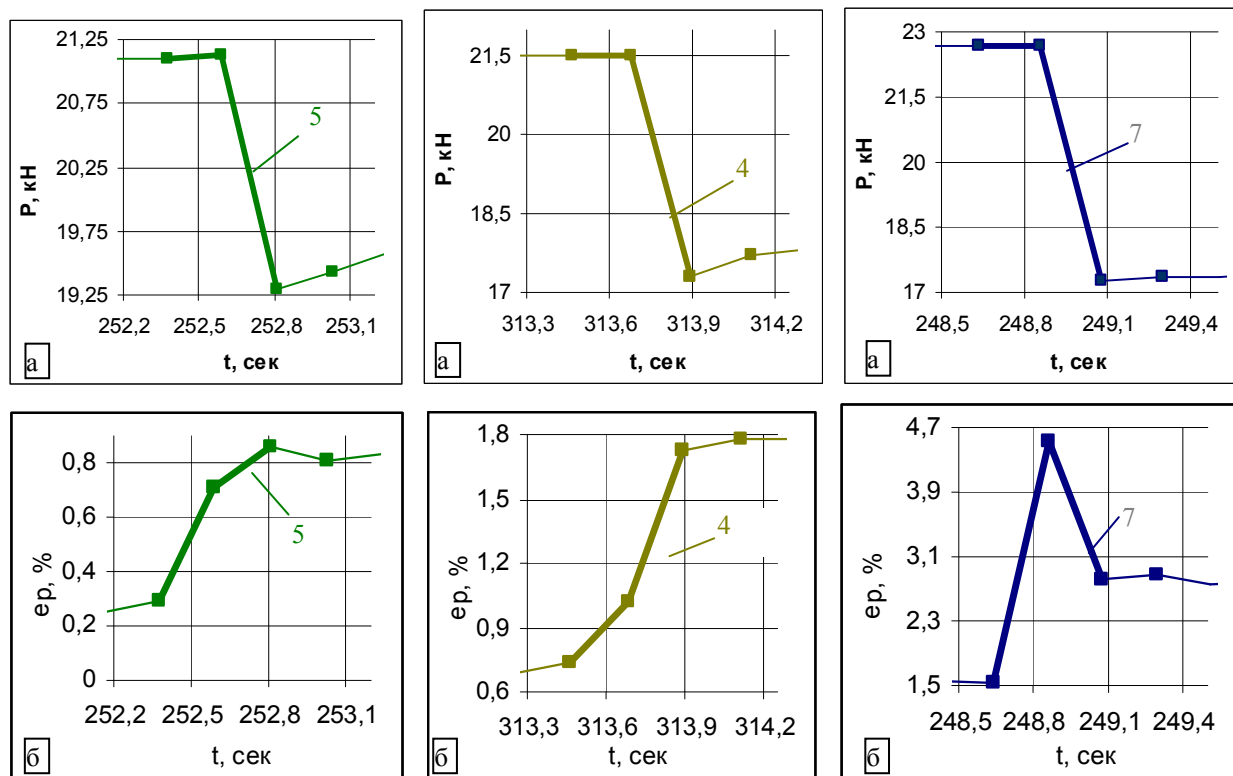


Рис. 3. Фрагменти графіків у момент динамічного перевантаження зразків із сталі 12ХНЗМФА після першого режиму термообробки: а - зміна навантаження; б- зміна деформації розпушення. Нумерація зразків відповідає рис.2

Не менш цікавими виявились дані за результатами випробувань реакторної сталі після другого режиму термообробки. Як видно з рис. 4, динамічні перевантаження на стадії зміцнення сталі істотно впливають на вид повних діаграм деформування.

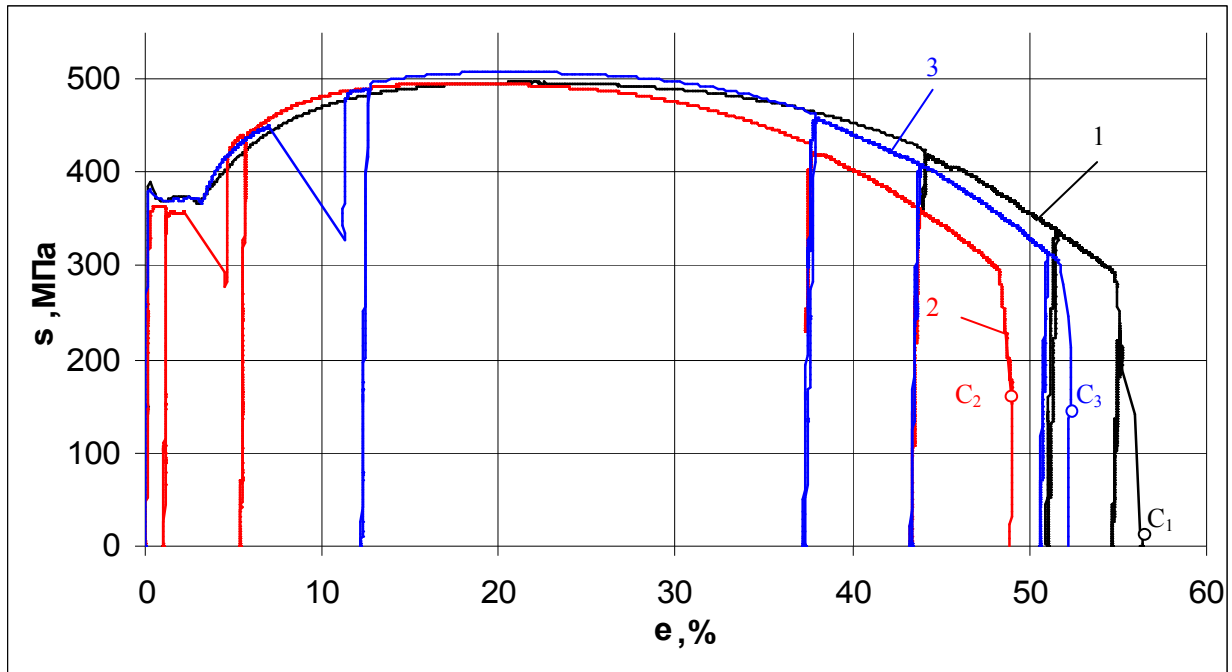


Рис. 4. Повні діаграми деформування гладких зразків з реакторної сталі при статичному навантаженні після другого режиму термообробки (крива 1) і з врахуванням динамічного перевантаження (криві 2,3)

Цікаво порівняти дані, приведені на рис. 3, 5. Як видно, кінетика процесу розпушування для двох станів сталі 12ХНЗМФА у момент динамічних перевантажень якісно подібна. Динамічне перевантаження стрибкоподібно змінює деформацію розпушування на істотну величину. Слід зазначити, що величина стрибка деформації розпушування ε_p залежить не тільки від величини силового динамічного імпульсу, але також і від стадії деформації, на якій цей імпульс здійснюється. Аналіз результатів випробувань свідчить також про те, що кінетика процесу розпушування в хвилях розрідження і стиснення неоднозначна. Для розуміння цих тонких процесів потрібні додаткові дослідження.

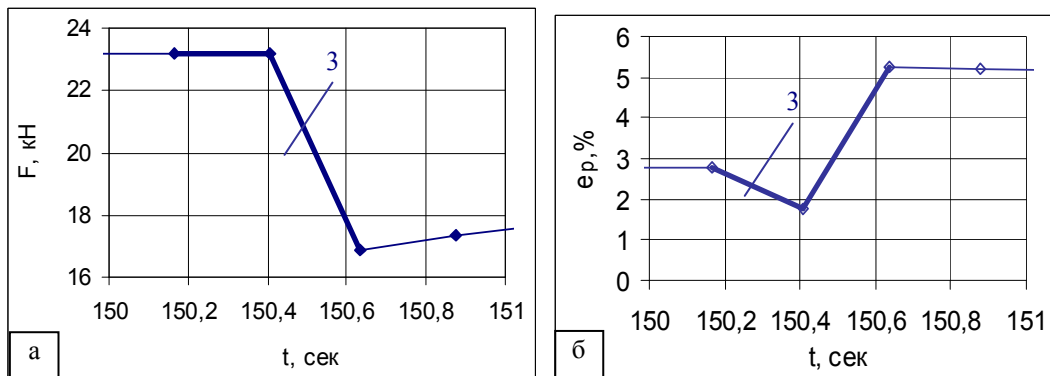


Рис.5. Фрагменти графіків в момент динамічного перевантаження зразка з реакторної сталі після другого режиму термообробки: а – зміна навантаження; б – зміна деформації розпушення (нумерація кривої відповідно до рис.4)

На рис. 6 показані повні діаграми деформування гладких зразків з мартенситно-старіючої сталі при статичному розтягу (крива 1) і в режимі складного навантаження

(статичний розтяг – динамічне перевантаження – статичний розтяг) при різних силових динамічних імпульсах (криві 2, 3, 4). При випробуваннях виконувались часткові або повні розвантаження для визначення дефекту модуля пружності матеріалу. Точками C_i позначені значення деформацій, при яких виконувались остаточні розвантаження зразків з макротріщинами для подальших метало-фізичних досліджень.

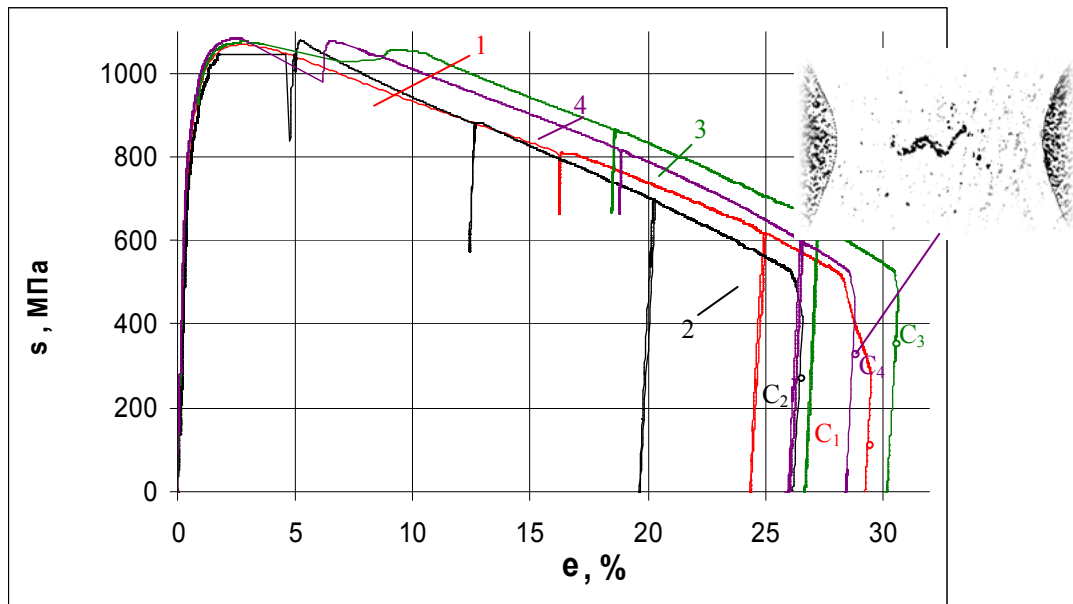


Рис. 6. Повні діаграми деформування гладких зразків з мартенситно-старіючої сталі при статичному навантаженні (крива 1) і з врахуванням різних динамічних перевантажень (криві 2, 3, 4)

Аналіз одержаних результатів дозволяє зробити висновок про помітний вплив динамічних перевантажень на вид повних діаграм деформування.

Не дивлячись на те, що описана модель накопичення пошкоджень [5] не враховує можливості фазових перетворень, тим не менше скористаємося нею для якісного відображення процесів поведінки структурного стану мартенситно-старіючої сталі при динамічних перевантаженнях.

Наведені на рис.7 дані свідчать про те, що в момент динамічного перевантаження змінюється густина матеріалу у хвилях стиску і розрідження. Ймовірно, у хвилі стиску в сталі відбуваються фазові перетворення, тому що коефіцієнт поперечної деформації істотно перевищує величину 0,5, потім густина матеріалу зменшується, деформація розпушення раптово зростає, в наслідок чого відбувається істотне розміщення матеріалу в порівнянні з деформаційними процесами при статичному навантаженні.

Для оцінки якісних показників граничної пошкодженості і тріщиностійкості сталі застосовувались питома робота руйнування A_p [6], $A_p = \frac{S_k \cdot \Delta l_p}{F_k}$ і параметр

тріщиностійкості K_λ [3, 7], $K_\lambda = \sqrt{S_k \cdot \Delta l_p \cdot E}$, тут S_k - опір матеріалу відриву; Δl_p - величина видовження зразка на стадії росту макротріщини відриву, F_k - площа перерізу зразка в момент старту тріщини відриву, Δl_p - нормована, шляхом приведення до початкової площі перерізу стандартного зразка, величина видовження зразка на стадії росту макротріщини відриву; E - модуль Юнга матеріалу.

Порівняння граничної пошкодженості і тріщиностійкості реакторної сталі при статичному навантаженні і з врахуванням динамічних перевантажень показало, що максимальне зменшення параметру A_p зафіксовано на рівні 20,7% (A_p при статичному

навантаженні дорівнює $0,037 \text{ кН/мм}^3$, а у випадку, описаним кривою 2, - $A_p = 0,029 \text{ кН/мм}^3$). Зменшення параметру K_λ для тих самих випадків випробувань зафіксовано на рівні 10,4%.

Відзначається також помітний вплив динамічного перевантаження на граничну пошкодженість і тріщиностійкість мартенситно-старіючої сталі в бік зменшення цих параметрів. Так максимальне зменшення параметру A_p зафіксовано на рівні 41% (A_p при статичному навантаженні дорівнює $0,071 \text{ кН/мм}^3$, а у випадку, описаним кривою 3, - $A_p = 0,042 \text{ кН/мм}^3$). Зменшення параметру K_λ для тих самих випадків випробувань зафіксовано на рівні 27%.

За результатами обробки експериментальних даних фізично несуперечливу модель накопичення пошкоджень в матеріалах (1) адаптовано для розглянутого складного випадку навантаження.

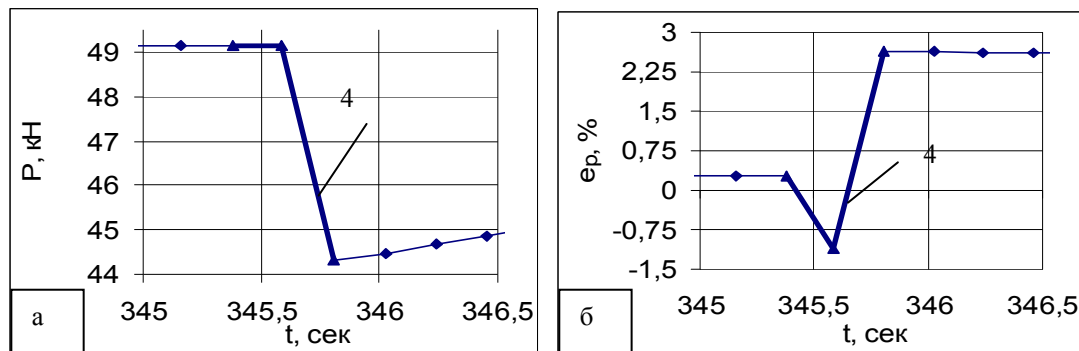


Рис. 7. Фрагменти графіків в момент динамічного перевантаження зразка з мартенситно-старіючої сталі: а – зміна навантаження; б – зміна деформації розпушення (нумерація кривої відповідно до рис.6)

Як встановлено раніше [2], крива, яка описує закон накопичення пошкоджень відповідно до формули (1), має S-подібний вигляд з трьома яскраво вираженими ділянками, що відображають істинні фізичні процеси, які протікають у деформівному матеріалі (утворення пор, їх ріст і злиття). Динамічне перевантаження на стадіях утворення і росту пор завдає істотних змін в кінетику накопичення пошкоджень, що, в першу чергу, позначається на стадії злиття пор і на граничний рівень пошкоджень. Таким чином, вся область можливих поточних і граничних значень деформацій розпушення матеріалу ε_p після динамічних перевантажень різної інтенсивності, при одному і тому ж ступені деформації, в координатах $\varepsilon_p - \varepsilon$ обмежена деяким трикутником, сторони якого ілюструють залежність $\varepsilon_p(\varepsilon)$ залежно від інтенсивності динамічного перевантаження: одна сторона (крива 1) – без динамічних перевантажень, друга сторона (крива 2) – крива граничних рівнів пошкоджень, третя сторона (крива 3) – рівні стрибків деформацій розпушення при дії динамічних перевантажень.

Слід врахувати, що саме від величини імпульсу $\frac{d\varepsilon_p}{d\varepsilon}$ залежить подальша кінетика накопичення пошкодженості і тріщиностійкість матеріалу при наступному статичному розтягу.

В межі, при $\frac{d\varepsilon_p}{d\varepsilon} = 1$ відбувається крихке руйнування матеріалу.

Зважаючи на те, що на стадії злиття пор складно використовувати модель (1), для оцінки граничної пошкодженості матеріалу зручно користуватися питомою роботою руйнування A_p .

Раніше показано [2], що між питомою роботою руйнування A_p і параметром тріщиностійкості K_λ існує залежність:

$$K_{\lambda}^2 = F_0 \cdot A_P \cdot E, \quad (2)$$

де F_0 - початкова площа поперечного перерізу стандартного зразка.

Отже, знаючи A_p матеріалу після динамічних перевантажень, автоматично можна отримати значення параметру K_λ для тих же режимів навантаження.

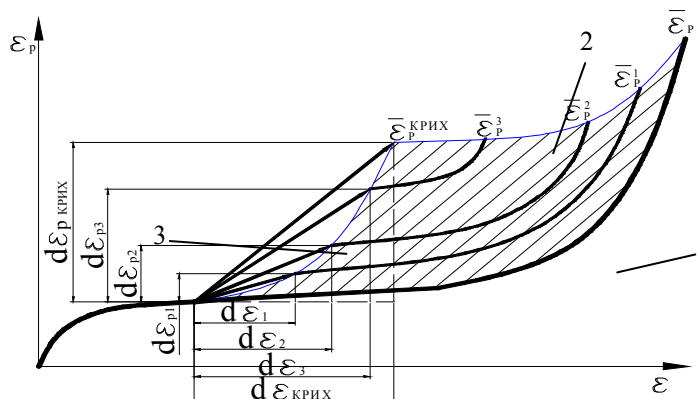


Рис.8. Залежність граничної пошкодженості матеріалу ε_p від величини прикладеного динамічного перевантаження $\frac{d\varepsilon_p}{d\varepsilon}$

Висновки

1. Розроблена ефективна методика дослідження впливу динамічних перевантажень на кінетику накопичення пошкоджень і тріщиностійкість сталей при наступному статичному навантаженні.

2. На прикладі випробувань двох сталей різних класів показано помітний вплив динамічних перевантажень на граничну пошкодженість і тріщиностійкість сталей в бік зменшення цих параметрів.

3. Запропонована схема кінетики процесу накопичення пошкоджень в матеріалі при складних умовах навантаження (статичний розтяг – динамічне перевантаження – статичний розтяг).

Efficiency of use of a method of complete stress-strain soft diagrams of deformation is shown for studying influence of dynamic overloads on fracture kinetics and fracture toughness of steels at the subsequent static loading. For such carrying out of researches on faculty of strength of materials of National agrarian university of Ukraine installation for test of materials is developed, which allows to realize complex modes loading (static stretching - dynamic overload - static stretching) with record of complete stress-strain soft diagrams. Tests were carried out on smooth specimens from reactor and martensite-growing old steels. On the basis of new experimental data physically consistent model of accumulation of damages to materials for considered case complex loading is offered.

Література

1. Kreiskorte H., Funk W. Die Simulation liner "harten" Wertsstoffprüfmaschine // Mat Rufung. - 1970.-12, N1. - S. 1-6.
2. Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки // Лебедев А.А., Чаусов Н.Г. – Киев. - 2004. – 133 с.
3. Чаусов Н.Г., Богданович А.З. Влияние предварительного циклического нагружения на процесс разрушения пластичной стали при статическом растяжении / Материалы IV Международного симпозиума «Трибофатика», 23-27 сентября 2002 г., Тернополь, Украина. - Том 1. - С. 312-316.
4. Патент України 61760А, МКИ7, G01N3/08. Установка з регульованою жорсткістю навантажувальної системи / М.Г.Чаусов, В.Ф.Ярошенко, А.П.Пилипенко. - Опубл. 17.11.2003. Бюл.№11.
5. А.А.Лебедев, Н.Г.Чаусов, С.А.Недосека, И.О.Богинич. Модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении// Проблемы прочности. - 1995.- № 7. - С. 31-40.

6. Чаусов Н.Г., Лебедев А.А., Богданович А.З. О предельной поверженности материала в зоне концентратора // Пробл. прочности. - 2002. - №6. - С.17-21.
7. Лебедев А.А., Чаусов Н.Г. Экспресс-метод оценки трещиностойкости пластичных материалов: Препр./ АН Украины. - Ин-т пробл. прочности. -Киев, 1988.-43 с.

Одержано 28.09.2004 р.