

# МЕХАНІКА ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

## MECHANICS AND MATERIALS SCIENCE

УДК 539.3.4

**М.Чаусов, докт. техн. наук; А.Пилипенко, канд. техн. наук;  
М.Бондар, канд. пед. наук; В.Параца; В.Березін**

*Національний аграрний університет*

### МЕТОДИКА ВИЯВЛЕННЯ ЗМІН СТРУКТУРНОГО СТАНУ ПЛАСТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ У ПРОЦЕСІ РАПТОВИХ ЗМІН В РЕЖИМІ НАВАНТАЖЕННЯ

*Розроблено інженерну методику виявлення змін структурного стану пластичних матеріалів у процесі раптових змін в режимі навантаження, яка дозволяє оцінювати не лише якісно, але і кількісно деякі фізичні параметри, які характеризують структурний стан матеріалів. Крім того, методика дозволяє фіксувати значення пластичної деформації, за якої відбуваються істотні структурні зміни.*

**M.Chausov, F.Pylypenko, M.Bondar, V.Paratsa, V.Berezin**

### THE TECHNIQUE OF REVEALING OF STRUCTURAL CONDITION CHANGES OF PLASTIC MATERIALS DURING SUDDENLY CHANGES IN LOADING MODE

*The engineering technique of revealing of a structural condition changes of plastic materials during suddenly changes in a loading mode is developed, which allows to estimate not only qualitatively but and quantitatively some physical parameters which characterize the structural condition of materials. Besides the technique allows to settle value of plastic deformation at which it is realized essential structural changes.*

**Вступ.** Виявлення змін структурного стану пластичних матеріалів при заданому режимі силового навантаження проводиться експериментально методом оптичної металографії або методом трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ) [1...4].

Особливі складності виникають при виявленні змін структурного стану пластичних матеріалів за змінного режиму силового навантаження, так як це потребує використання експериментальних методик з дуже високою роздільною здатністю.

На практиці змінне навантаження включає випадки втомного, вібраційного навантаження, а також випадки імпульсних підвантажень і динамічних перевантажень.

Особливий інтерес представляє дослідження особливостей трансформації структури матеріалів при переході механічної системи до нестійкого стану, тобто при динамічних незрівноважених процесах, які виявляються в процесі раптових змін у режимі навантаження. В даному випадку, згідно з термомеханічною теорією утворення впорядкованих (в просторі або у часі) структур в макроскопічних системах, далеких від рівноваги [5], слід очікувати суттєвих змін структурного стану матеріалів на багатьох масштабних рівнях, які не завжди виявляються при експериментальному металографічному дослідженні після зняття навантаження. Оскільки, по-перше, потрібні експериментальні методики з високою роздільною здатністю, а, по-друге, структура може частково руйнуватися після зняття навантаження. На даний час

практично відсутні методики досліджень, які дозволяють виявляти зміни структурного стану матеріалів безпосередньо в процесі складного навантаження.

Авторами вперше експериментально встановлено [6...10], що в процесі раптових змін у режимі навантаження, коли процес імпульсного підвантаження або динамічних перевантажень проходить із затримками за часом, поведінка пластичного матеріалу може стати «аномальною». Ця «аномальність» проявляється в тому, що за рахунок раптових змін в режимі навантаження реалізується короткочасне зменшення матеріалів практично на будь-якій стадії деформування матеріалів, включаючи і ділянку зміцнення на стандартній статичній діаграмі деформування.

В даному випадку ефективно реалізується ефект ударно-хвильового синтезу. Раптове підвищення швидкості деформації матеріалів на першому етапі раптових змін у режимі навантаження, у порівнянні зі статичним розтягом, а потім раптове гальмування швидкості деформації на другому етапі призводить до того, що раптово змінюється баланс енергії на етапі раптового уповільнення процесу деформування і при цьому значна частина кінетичної енергії високошвидкісного деформування першого етапу дисипує у дослідному матеріалі, перетворюючись у тепло і викликає істотні структурні зміни. Слід відзначити, що дія ударної хвилі створює умови для синтезу продуктів і для диспергування. Зокрема, ударно – хвильовий синтез в даний час є одним із основних способів отримання нанокластерів і наноструктур, що базуються на їх основі [11].

Таким чином, через те, що процеси, які відбуваються, дуже швидкі, вони фактично протікають в адіабатичному режимі, що призводить до ефективного використання енергії. Внутрішній розігрів матеріалу, необов'язково всього об'єму, а можливо будь-якої новоутвореної замкненої об'ємної тонкосмугової структури, в даному випадку здійснюється без зовнішнього температурного нагрівання.

При повторному раптовому підвищенні швидкості деформації (третій етап) фактично деформується матеріал з новою сформованою структурою, що володіє зовсім іншими механічними властивостями.

Метою даної роботи є розробка інженерної методики виявлення змін структурного стану пластичних матеріалів у процесі раптових змін в режимі навантаження, яка дозволяє оцінювати не тільки якісно, але й кількісно деякі фізичні параметри, які характеризують структурний стан матеріалу.

**Методика досліджень.** В методиці, що пропонується, фіксуються два незалежних параметри, що характеризують структурний стан пластичних матеріалів у процесі деформування, а також використовується принцип їх синхронізації.

Відомо, що коефіцієнт поперечної деформації  $\mu$  дуже чутливий до структурних змін матеріалів. Приймаючи його в якості основного параметру поточного стану матеріалу, якому ставиться у відповідність ступінь розпушення, побудована фізично-достовірною моделлю накопичення розсіяних пошкоджень [12]

$$\varepsilon_p = (1 - 2\mu) \cdot \varepsilon,$$

де  $\varepsilon_p$  - деформація розпушення,  $\varepsilon$  - поточна деформація.

Експериментальні дослідження, проведені на різних матеріалах: сталях, технічній міді, армко-залізі, алюмінієвому сплаві, показали, що в момент раптових змін у режимі навантаження (із затримками по часу) відбувається стрибкоподібна зміна деформації розпушення  $\varepsilon_p$ , що свідчить про суттєву зміну структурного стану матеріалів при заданому ступені пластичної деформації [7...9]. Слід однак звернути увагу на ту обставину, що деформація розпушення  $\varepsilon_p$  - величина розрахункова (модельна), тому вона не є прямою характеристикою оцінки зміни структурного стану матеріалу у процесі складних режимів навантаження. Для підвищення достовірності процедури виявлення змін структурного стану пластичних матеріалів у процесі раптових змін у режимі навантаження необхідно додатково застосувати прямий метод їх виявлення. До

таких методів можна віднести методи, пов'язані з вимірюванням електричних властивостей матеріалів у процесі навантаження, так як відомо, що електричні властивості матеріалів також дуже чутливі до структури матеріалів.

Синхронізація за часом запропонованих незалежних параметрів оцінки структурного стану пластичних матеріалів у процесі деформування (деформації розпушення  $\varepsilon_p$  і електричних властивостей матеріалів) дає можливість за їх одночасної раптової зміни достовірно виявляти зміну структурного стану при заданому ступені деформації.

В якості одного з параметрів, що характеризує електричні властивості матеріалів, у дослідях, виходячи із практичної зручності вимірювання, доцільно прийняти електричний опір матеріалів.

Методика випробувань реалізована на базі модернізованих випробувальних машин ZD-100Pu і RelVi-5. Установа ZD-100Pu обладнана високоточною комп'ютеризованою вимірювальною системою, яка дозволяє фіксувати до 2400 вимірювань за секунду, і пристроєм, що дозволяє реалізувати раптові зміни в режимі навантаження. У момент досягнення заданої деформації на зразках руйнуються крихіткі проби металу різного мінімального діаметру (поз. 1 на рис. 1), що розтягуються паралельно із зразком поз. 2 на рис. 1. За рахунок цього динамічного імпульсу раптово підвищується швидкість деформації матеріалу.

Аналіз результатів проведених випробувань показав також, що винятково важливу роль для завдання складного закону підвищення швидкості деформації із затримками в часі при раптових змінах в режимі навантаження відіграє не лише статична жорсткість системи навантаження, але також і динамічна жорсткість, яка, в першу чергу, залежить від маси приєднаних рухомих частин випробувальної установки, що залучаються до руху при руйнуванні зразків супутників.

Саме за рахунок інерційності масивної рухомої траверси установки ZD-100Pu, на якій проводилися досліді (маса становить 1350 кг), вдалося на ділянці різкого нарощування швидкості деформації здійснити миттєву затримку процесу деформування пластичного матеріалу. Цікаво відзначити, що фактор маси рухомих частин, що залучаються до руху в процесі руйнування, раніше вдало використовувався авторами як ефективний засіб побудови повних діаграм, так як при цьому вдавалося істотно знизити швидкість активного затискача при раптовому падінні опору матеріалу зразка [13].

Для вимірювання електричного опору зразка 2 в процесі раптових змін в режимі навантаження захватні частини 3,4 машини струмоізолюються за допомогою гумових прокладок (поз. 5 на фіг. 1). Далі в режимі короткого замкнення (КЗ) подається постійний електричний струм силою 60 мА і напругою 5 В на захватні частини зразка (поз. 6 на фіг. 1). Вибір параметрів електричного струму зумовлений, в першу чергу, його мінімальним впливом на механічні властивості матеріалу. Реєстрація зміни електричного опору матеріалу зразка в процесі раптових змін в режимі навантаження здійснюється на базі 16 мм (поз. 2 на фіг. 1). База вимірювання електричного опору 16 мм вибрана з тих міркувань, що саме на таку вихідну базу встановлюється екстензометр для вимірювання поздовжньої деформації в процесі деформування зразка.

Досліді проводились на стандартних зразках із сталі 20. Вихідний електричний опір зразка із сталі 20 на базі 16 мм встановлюється розрахунковим методом, виходячи із відомого значення питомого електричного опору сталі 20,  $\rho = 169$  мкОм·см і площі

поперечного перерізу зразка  $R_{вих} = \frac{\rho \cdot l}{F} = 47,7 \cdot 10^{-5}$  Ом.

За аналогічною методикою, досліді проводились на випробувальній машині RelVi-5, яка дозволяє здійснювати наступне складне навантаження: статичний розтяг – вібраційне навантаження з частотами 100 і 150 Гц – статичний розтяг. Випробувальна

машина RelVi-5 також оснащена аналогічно вищеописаній комп'ютеризованій вимірвальній системі.

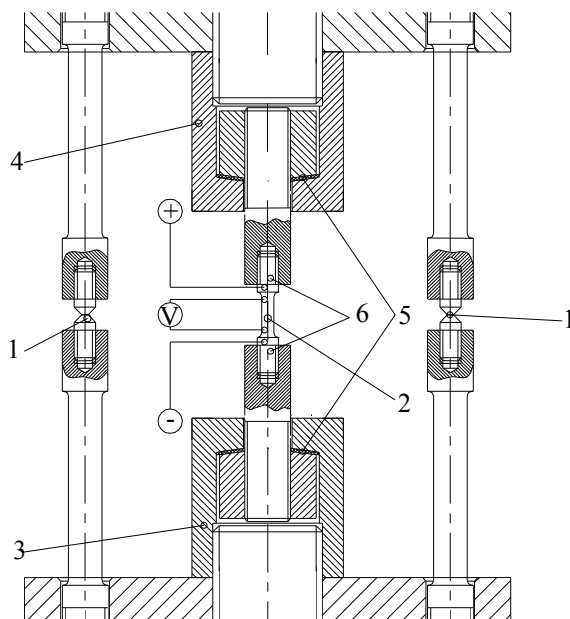


Рисунок 1 - Схема випробувальної установки

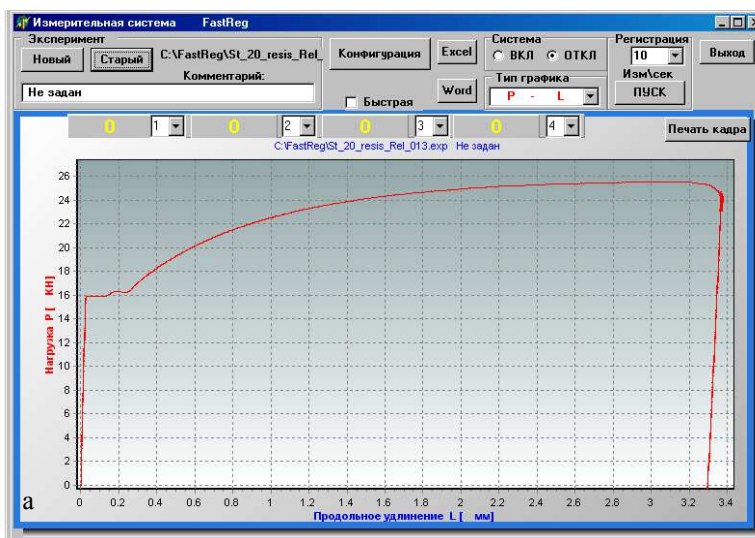
### Результати випробувань

Програма досліджень передбачала їх проведення у два етапи.

Відомо, що при дії вібраційного навантаження матеріал інтенсивно розігрівається і можна очікувати істотних структурних змін, що впливає на зміну електричного опору матеріалу.

Тому на першому етапі досліджень випробування зразків із сталі 20 проводили при наступному складному режимі навантаження: статичний розтяг до деформації  $\epsilon_B$ , що відповідає межі міцності матеріалу, наступне вібраційне навантаження з амплітудою  $\pm 16$  кг і частотою 100 Гц протягом 1 год., та повне розвантаження зразка. Через кожні 10 хвилин вмикалася система швидкої реєстрації параметрів з частотою 2400 вим/сек для реєстрації зміни електричного опору в часі.

На рис. 2 наведені результати механічних випробувань сталі 20, на рис. 3 – показана зміна електричного опору в часі, відповідно на 10, 20, 30, 40, 50, 60 хвилинах вібраційного навантаження і на рис. 4 - зміна середньо інтегрального електричного опору в процесі швидкої реєстрації на відповідних хвилинах вібраційного навантаження.



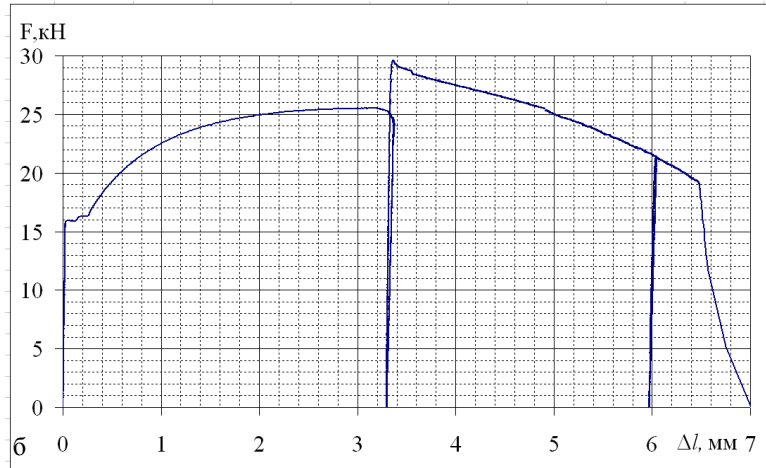


Рисунок 2 - Діаграми деформування сталі 20 при складних режимах навантаження:  
 а - статичний розтяг – вібраційне навантаження; б - статичний розтяг – вібраційне навантаження –  
 витримка 1 місяць – статичний розтяг

Порівняння результатів механічних випробувань сталі 20 на рис. 2, а і 2, б підтверджує той факт, що в процесі вібраційного навантаження відбулися істотні структурні зміни матеріалу. Ці зміни, в першу чергу, відбилися на підвищенні міцнісних і пластичних властивостей матеріалу на спадаючій ділянці повної діаграми деформування.

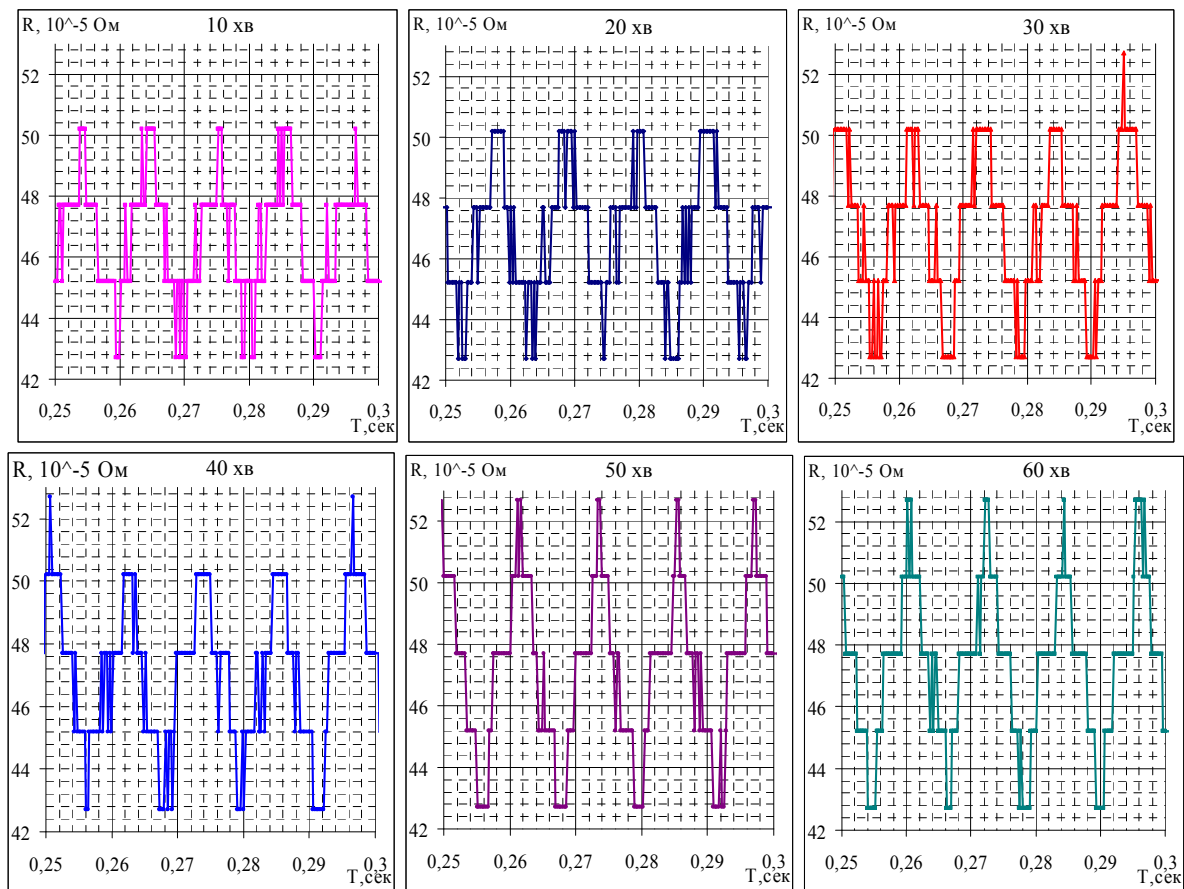


Рисунок 3 - Графіки реєстрації зміни електричного опору сталі 20 в залежності від часу вібраційного навантаження

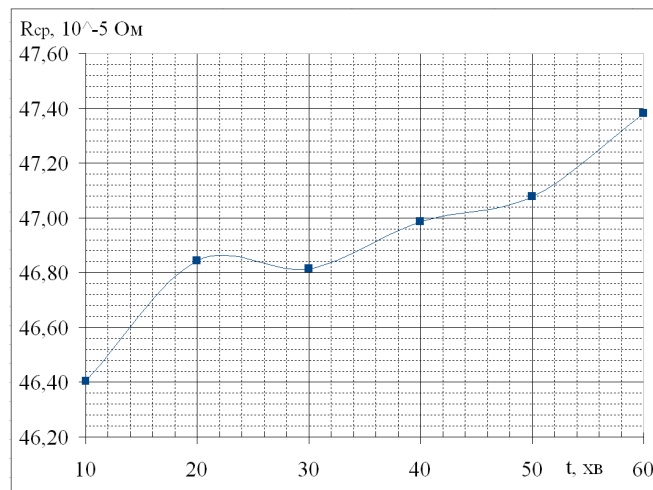


Рисунок 4 - Середньоінтегральний електричний опір сталі 20 в залежності від часу вібраційного навантаження

Аналіз даних, поданих на рис. 3,4, показує, що запропонована методика якісно і кількісно характеризує кінетику зміни електричного опору в процесі розігрівання зразка.

Причому слід відзначити, що на ділянці вібраційного стиску інтенсивність зміни електричного опору матеріалу зразка значно випереджає інтенсивність зміни електричного опору на ділянці вібраційного розтягу. Тобто можна зробити однозначний висновок, що розроблена методика чутлива до виду навантаження.

На другому етапі випробувань виявлення змін структурного стану пластичних матеріалів, згідно із запропонованою методикою, проводилось при раптових змінах в режимі навантаження.

На рис. 5, для прикладу, подані результати реєстрації зміни деформації розпушення в процесі раптових змін у режимі навантаження на стадії зміцнення матеріалу. На рис. 6, 7 подані результати зміни електричного опору в процесі раптових змін у режимі навантаження відповідно на стадії пружності і стадії зміцнення, а на рис. 8 представлені дані з одночасної зміни деформації розпушення і електричного опору у процесі раптових змін в режимі навантаження на стадії зміцнення.

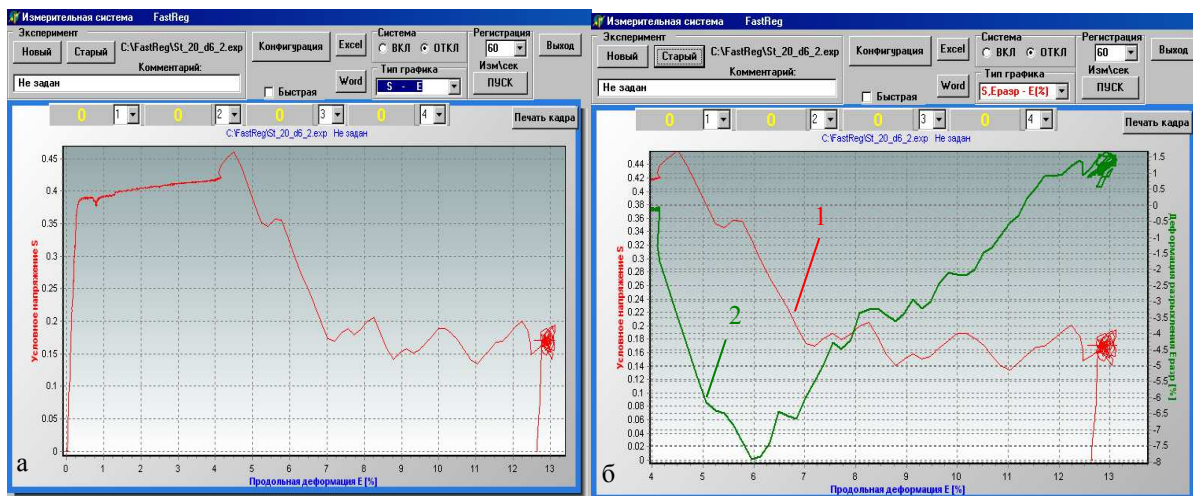


Рисунок 5 - Результати випробувань сталі 20 при раптових змінах у режимі навантаження: а – діаграма деформації; б – фрагмент діаграми деформації (1) з накладанням кривої зміни деформації розпушення (2)

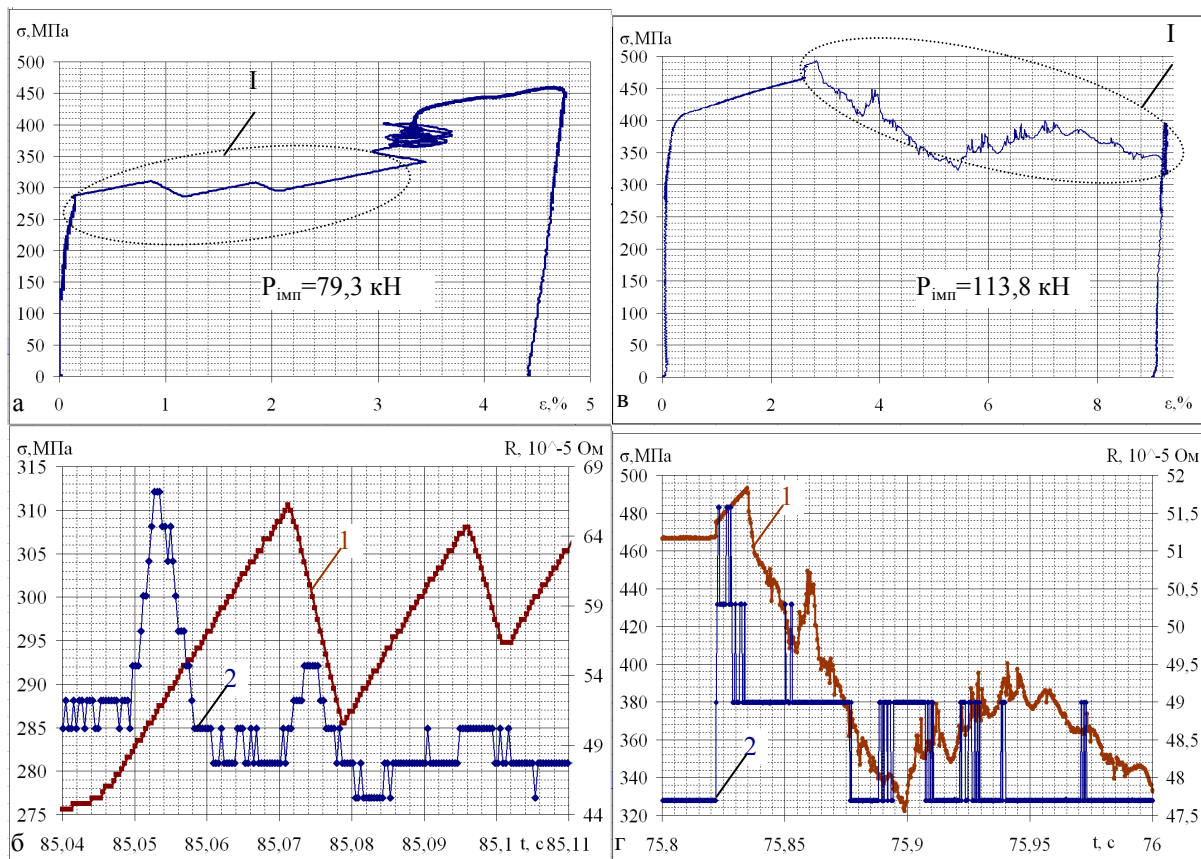


Рисунок 6 - Результати випробувань сталі 20 при раптових змінах у режимі навантаження: а, в – діаграми деформацій; б, г – криві зміни у часі напруження та електричного опору, відповідають ділянкам I на кривих б а,в

За результатами випробувань, поданих на рис. 5...7, можна зробити ряд висновків.

По-перше, амплітуда стрибків зміни електричного опору сталі 20 в процесі раптових змін в режимі навантаження відповідає амплітудам, зафіксованим при вібрації (див. рис. 3). Це означає, що на ділянках “аномального” зменшення (див. ділянки I на рис. 6, 7) значна частина енергії, що вивільняється в процесі руйнування крихких проб (поз. 1 на рис. 1), дисипує в досліджуваному матеріалі, перетворюючись в тепло.

Таким чином, при раптових змінах у режимі навантаження, що здійснюються за розробленою методикою, відбувається короткочасне інтенсивне розігрівання матеріалу смугами макроскопічної протяжності, пов'язаних між собою на різних масштабних рівнях.

Саме в таких смугах і відбуваються істотні структурні зміни, які супроводжуються зменшенням матеріалу і стрибком деформацій.

По-друге, у процесі раптових змін в режимі навантаження відзначається стрибкоподібний ріст пошкодженості матеріалу, що, ймовірно, пов'язано з тим, що генерується велика кількість вакансійних дефектів у смугах інтенсивного зсуву.

По-третє, наявна повна синхронізація в часі стрибків електричного опору і стрибка деформації розпушення  $\epsilon_p$  у процесі раптових змін в режимі навантаження.

**Висновки.** Розроблена інженерна методика достовірно виявляє зміну структурного стану пластичних матеріалів у процесі раптових змін в режимі навантаження при заданому рівні пластичної деформації. Крім того, методика дозволяє фіксувати і абсолютне значення пластичної деформації  $\epsilon_{3M}$  (див рис. 7а), при якій відбуваються ці структурні зміни.

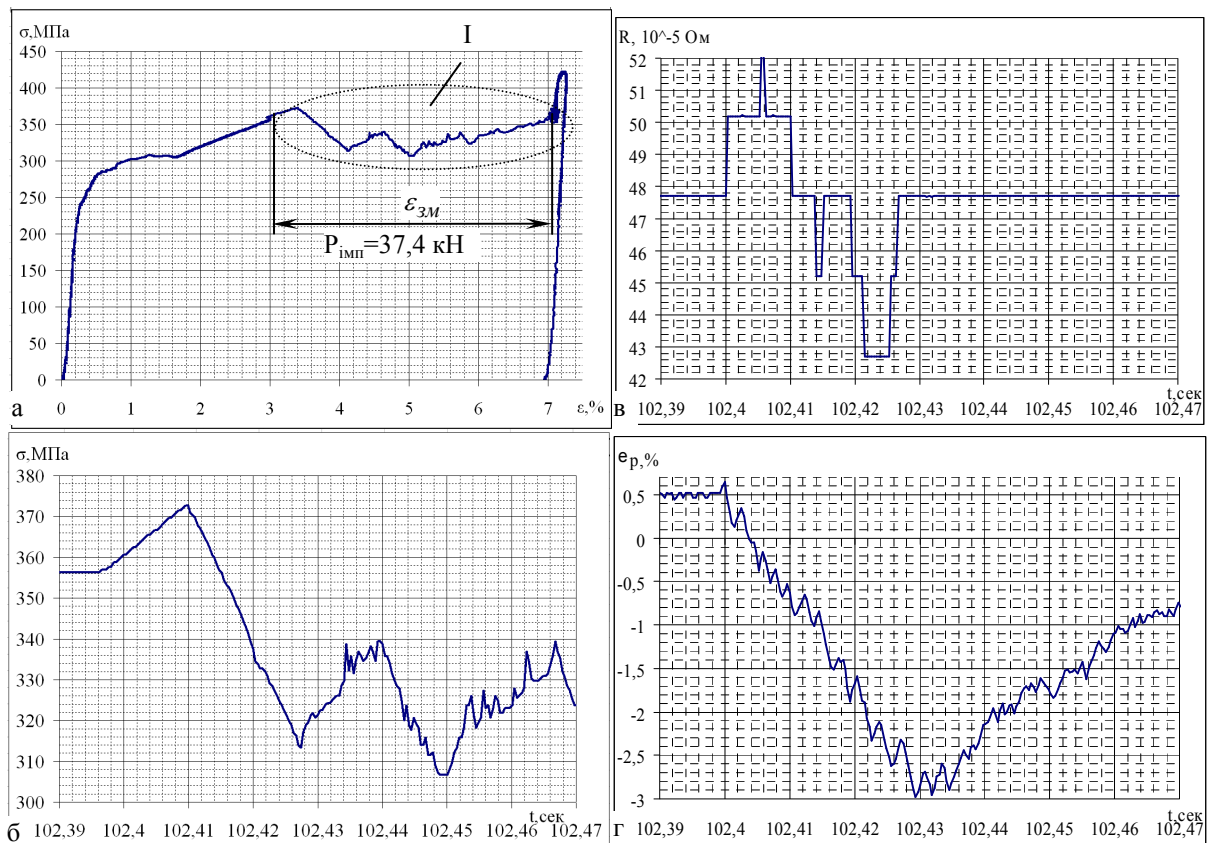


Рисунок 7 - Результати випробувань сталі 20 при раптових змінах у режимі навантаження: а- діаграма деформацій; б, в, г – відповідно криві зміни в часі напруження, електричного опору і деформації розпушення, що відповідають ділянці I на кривій 7 а

### Література

1. Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации / Лихачев В.А., Панин В.Е., Засимчук Е.Э., и др.; Отв. ред. Немошкаленко В.В., АН УССР. Ин – т. металлофизики. – Киев: Наук. думка, 1989. – 320 с.
2. Засимчук Е.Э., Гордиенко Ю.Г., Гонтарева Р.Г., Тарасенко Л.В. К вопросу о структуре каналов пластического течения кристаллов // Металлофиз. новейшие технол. – 2004. – Т. 26. - №1. – С. 105 – 115.
3. Белякова М.Н., Засимчук Е.Э., Гордиенко Ю.Г. Признаки гидродинамического течения при импульсном сжатии молибдена и железа // Металлофиз. новейшие технол. – 1999. – Т.21. - №4. – С. 59 – 71.
4. Zasimchuk E.E. Markashova L.I. Microbands in rolling-deformed nickel single crystals // Materials Science and engineering. – A127, 1990. p. 33-39.
5. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. – М.: Мир, 1979. – 512 с.
6. Чаусов Н.Г., Недосека С.А., Пилипенко А.П. Комплексная оценка поврежденности пластичных материалов при различных режимах нагружения // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2004. - № 3. – С. 16 – 21.
7. Чаусов Н.Г., Пилипенко А.П. Влияние динамических перегрузок на кинетику разрушения конструкционных материалов / Надежность и долговечность машин и сооружений. Международный научно-технический сборник, 2006. Вып. 27. – С. 131-137.
8. Chausov M.G., Pylypenko A.P. Laws of deformation processes and fracture of Plastic steel From the Point of view of dynamic overloading. - Mechanika. – 2005.- Nr. 4 (54) - P. 24-29.
9. Чаусов Н.Г., Пилипенко А.П., Параца В.М. Эффекты проявления кратковременного разупрочнения пластичных материалов в процессе резких смен в режиме нагружения / Материалы 46 Международной конференции «Актуальные проблемы прочности».- Витебск, Беларусь, 2007.- С. 207-212.
10. Чаусов Н.Г., Пилипенко А.П., Параца В.М. Методы управления механизмами пластического течения металлов / Сборник статей по материалам II Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». – Москва, Россия, 2007. – С. 71-73.
11. Суздальев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. – М.: КомКнига, 2006. – 592 с.
12. Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки / Лебедев А.А., Чаусов Н.Г.. - Киев, 2004. – 133 с.
13. А.С. 920445 СССР, МКИ<sup>4</sup> G01 N3/08. Способ испытания материалов на растяжение / А.А.Лебедев, Н.Г.Чаусов // Открытия. Изобретения. – 1982. – 14. – С. 155-156.

Одержано 08.07.2008 р.