

ЭВОЛЮЦИЯ ПОЛЯ ДЕФОРМАЦИИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛИСТОВОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НЕРАВНОВЕСНЫХ ПРОЦЕССАХ

З використанням розробленого оптичного комплексу для безконтактного дослідження поля деформації методом кореляції цифрових зображень, проаналізовано еволюцію поля деформацій на поверхні листової нержавіючої сталі при складному режимі навантаження "статичний розтяг-динамічний незрівноважений процес". Виявлено якісну подібність залишкового поля деформацій і розподілу однорідності структури за методом LM-твердості.

Using optical complex for contactless strain field evaluation by digital image correlation, strain field on sheet-metal stainless steel sample evolution under complex loading mode "static deformation-dynamical non-equilibrium process" is analyzed. Existence of qualitative similarity between residual strain field and structural homogeneity by LM-hardness method is shown.

Вступление.

При динамических неравновесных процессах практически все пластичные материалы проявляют склонность к кратковременной пластификации с одновременным "аномальным" эффектом разупрочнения за счет образования диссипативной структуры в виде объемно-связанных, на различных масштабных уровнях, тонких полос (каналов) [1..3]. Экспериментально установлено, что диссипативная структура имеет плотность меньше плотности основного материала [4]. При этом в зависимости от величины энергетического (силового) импульса и степени деформации, при которой материал подвергается воздействию заданного импульса, может возникнуть значительное количество новых упорядоченных структур (состояний материала), каждая из которых обладает новыми механическими свойствами.

При импульсном вводе энергии в материал можно обеспечить широкий спектр регулирования прочностных и пластических свойств материала, а именно: пластифицировать любой материал на стандартной восходящей ветви диаграммы деформаций, добиться изменения протяженности стадий деформирования и изменения прочностных свойств на заданных стадиях деформирования; реализовать квази-сверхпластичное состояние при комнатной температуре (получить идеально-пластичное поведение материала до десятков процентов остаточной деформации), за счет многократных импульсных подгрузок; реализовать резервы механических свойств материалов на стадии разупрочнения, включая и стадию роста макротрещины [1, 5, 6].

Для исследований большой интерес представляет граничное состояние самоорганизации структуры материалов при динамических неравновесных процессах, при которых механические свойства максимально увеличиваются на макроуровне или резко уменьшаются, вплоть до полного разрушения материала.

В результате таких исследований можно будет выявить положительные эффекты импульсного ввода энергии в материал (пластификация материала, достижение квази-сверхпластического состояния, стабилизация дефектной структуры и др.), которые можно использовать в технологических операциях, например при ударной штамповке и для продления ресурса ответственных элементов конструкций, а также негативные эффекты, когда за счет ввода критического импульса энергии можно просто разрушить материал, или создать в нем повреждения, которые резко уменьшат его трещиностойкость при дальнейшей эксплуатации.

Целью настоящей работы является исследование эволюции поля деформаций на поверхности плоских образцов при динамических неравновесных процессах, а также контроль качества вновь образованной структуры при различных остаточных деформациях по сравнению с качеством структуры, полученной при статическом растяжении образцов, при том же уровне остаточной деформации.

Методики исследований.

Для реализации динамических неравновесных процессов в настоящей работе использован новый вид механических испытаний, описанный в работах [1..3]. Процессы деформирования и разрушения материалов при импульсных подгрузках исследуются в составе механической системы, которая представляет собой простейшую статически неопределенную конструкцию, в виде одновременно нагружаемых трех параллельных элементов – центрального образца и двух симметричных образцов-спутников ("хрупких проб"), разного поперечного сечения, изготовленных из закаленных сталей 65Г или У8А. При нагружении данной конструкции образцы-спутники разрушаются при заданной нагрузке на образце (или заданной деформации) и осуществляется импульсная подгрузка образца.

Естественно, что классические методы измерения деформации путем использования экстензометров не в состоянии предоставить достаточной информации при ограниченном количестве испытаний. В данном случае

необходимо использование бесконтактного метода анализа поля перемещений или деформаций на поверхности образца.

Условиям реализации высокой скорости регистрации данных и простоты оборудования удовлетворяет метод корреляции цифровых изображений [7]. Он имеет точность до 0,01% абсолютной ошибки при определении локальной деформации, а рабочий диапазон определения деформаций составляет от 0 до 1000% и более.

Для технической реализации метода корреляции цифровых изображений на кафедре механики, сопротивления материалов и строительства Национального университета биоресурсов и природопользования Украины разработан оптический комплекс, с соответствующим программным обеспечением, оборудованный высокоскоростной камерой Citius T10.

Основным отличием разработанного комплекса от известных, является использование информации об изменении контраста поверхности в зависимости от степени деформации, что позволило снизить абсолютную ошибку на 5-20% при измерении локальной деформации, не увеличивая систематическую ошибку, связанную с аппроксимацией действительного поля перемещений функцией формы элемента корреляции.

Контроль качества структурного состояния плоской поверхности образцов после процесса сложного режима нагружения «статическое растяжение - динамический неравновесный процесс» проводили с использованием известного LM-метода, разработанного в Институте проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины [8,9]. Данный метод позволяет судить об изменениях структурного состояния поверхности материала по величине параметра, который характеризует степень рассеивания характеристик твердости.

В настоящем исследовании в качестве параметра рассеивания принят коэффициент гомогенности m , который рассчитывается по формуле Гумбеля [10].

Очевидно, что большему значению коэффициента m соответствует низкий уровень рассеивания характеристик твердости и, соответственно, лучшая организация структуры.

Исследования проводили на плоских образцах из листовой нержавеющей стали шириной 30 мм и толщиной 2 мм.

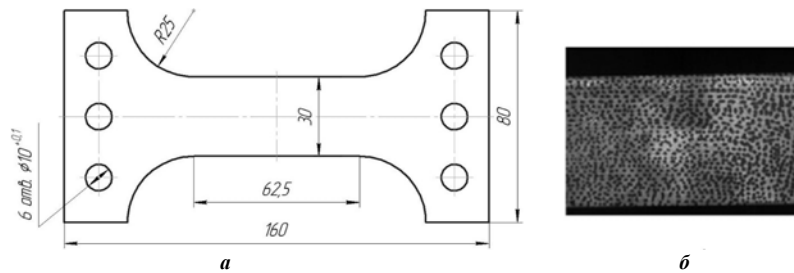


Рис. 1. Образец для испытаний: а - общий вид, б - рабочая область с нанесенной текстурой для анализа поля деформации

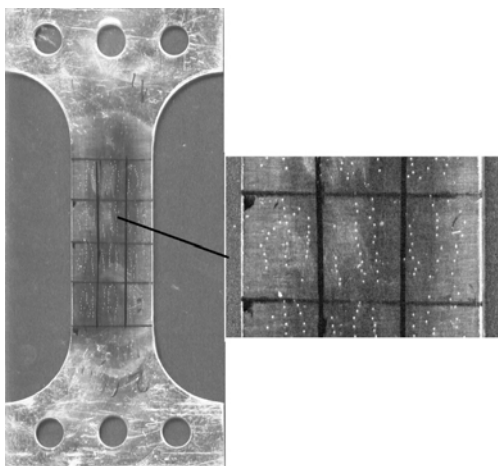


Рис. 2. Сетка на образце для измерения твердости стали и месторасположение уколов

Испытания проводили в три этапа. На первом этапе четыре образца с нанесенной стохастической текстурой на поверхность (рис. 1б) растягивали до разных степеней деформации (6,68;8,03;11,68;14,42%) и подвергали одинаковой импульсной подгрузке $F_{имп} \approx 170$ кН с одновременной фиксацией поля деформации.

На втором этапе четыре аналогичных образца статически растягивали до уровня остаточных деформаций, зарегистрированных при сложном режиме нагружения «статическое растяжение - динамический неравновесный процесс» (9,64;11,36;14,64;18,20%) и также разгружали.

Окончательно, на третьем этапе все испытанные образцы, включая и один недеформированный, полировали с одной стороны и наносили на полированную часть сетку из 12 одинаковых прямоугольников (рис. 2). После чего на переносном твердомере «Computest SC» швейцарского производства в каждом из прямоугольников было сделано не менее 27 проб твердости по шкале НВ (см. рис.2).

Результаты исследований.

На рис. 3., для примера, приведены результаты сопоставления механических испытаний. Здесь кривая 1 соответствует сложному режиму нагружения «статическое растяжение - динамический неравновесный процесс» образца №3, а кривая 2 – кривая статического растяжения образца №5 с разгрузкой при уровне деформации, аналогичном остаточной деформациям при сложном режиме нагружения.

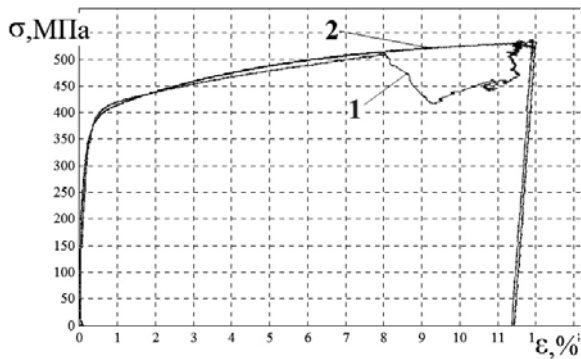


Рис. 3. Кривые деформации нержавеющей стали: 1 - сложный режим нагружения; 2 – статическое растяжение

Типичные развертки по времени, характеризующие динамику перераспределения нагрузок в системе при динамическом неравновесном процессе и рост продольной деформации на рабочей поверхности образца №3, зафиксированной оптическим комплексом, представлены на рис. 4,5 соответственно.

Несомненно, что особый интерес представляет исследование поля деформаций на рабочей поверхности образца при динамических неравновесных процессах. На рис. 6, 7, для примера, представлена типичная кинетика изменения поля деформации на поверхностях образцов №3,4 при динамическом неравновесном процессе.

Анализ представленных на рис. 6, 7. данных свидетельствует о наличии неоднородности на уровне



Рис. 4. Динамика перераспределения нагрузок в системе при динамическом неравновесном процессе. Левая шкала оси ординат (F, кН) соответствует нагрузке на образце, а правая (F_п, кН) – нагрузке на пробе

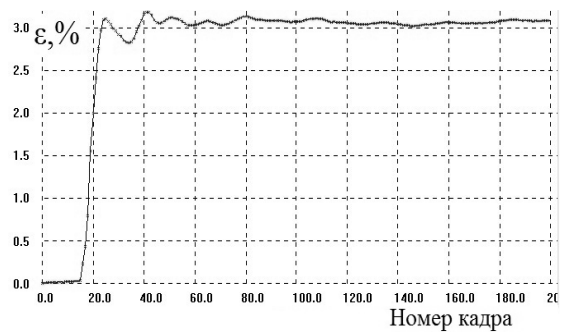


Рис. 5. Развитие продольной деформации (деформация вычислена относительно базы, которая соответствует моменту включения камеры), зафиксированное оптическим комплексом при скорости съемки 600 кадров/с

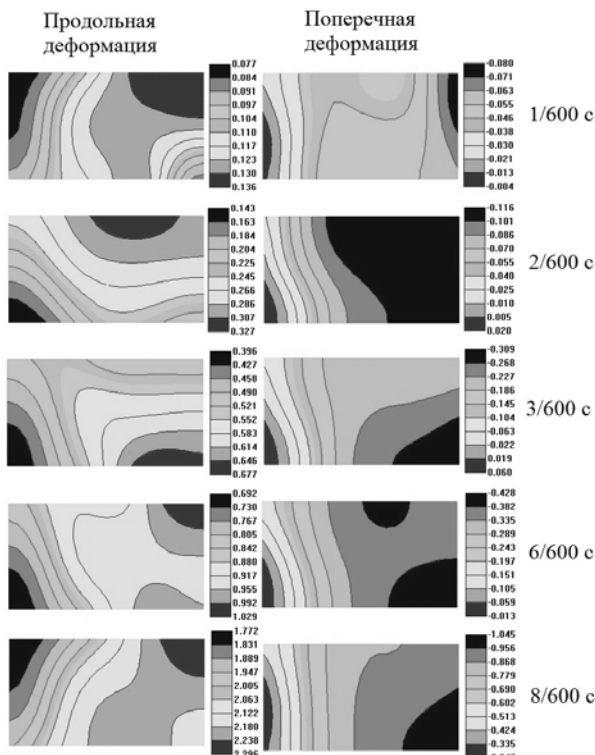


Рис. 6. Кинетика изменения поля деформации на поверхности образца №3 при динамическом неравновесном процессе (деформация вычислена относительно базы, которая соответствует моменту включения камеры)

0,5% по полю деформации, которая, по-видимому, слабо зависит от начальных условий импульсного ввода энергии, но характер распределения существенно зависит от процесса формирования структуры. Также следует отметить, что при подобных процессах зоны с неоднородностями меньше чем 0,12% продольной деформации занимают 30-50% рабочей области образца. При этом, важно отметить, что поперечная деформация в значительно меньшей мере чувствительна к неравномерности нагружения образца.

Результаты фотосъемки с высокой скоростью регистрации указывают на наличие, как минимум, двух режимов процесса, которые можно разделить по временным рамкам: 0,003-0,005 с и 0,05-0,15 с.

В особенности, следует обратить внимание на формирование областей максимальных значений продольной деформации, так как их зарождение происходит с задержкой в 0,003-0,01 с, что свидетельствует о наличии двух процессов, отвечающих за формирование и развитие диссипативной структуры. А

именно – о наличии быстропротекающего процесса, связанного с наложением пластических волн в материале, который, по-видимому, является инициатором структурных изменений, и о наличии сравнительно медленного процесса перераспределения энергии и структуры. Соответственно, влияние быстропротекающего процесса для некоторой точки рабочей области материала носит вероятностный характер, а процесс перераспределения энергии и структуры, вполне вероятно, весьма детерминирован и может иметь сравнительно простую математическую модель (см. рис. 6, 7).

В связи с этим можно связать кинетику эволюции поля деформации с соответствующими структурными изменениями, оцененными методом ЛМ-твердости.

На рис. 8 представлены результаты сопоставления поля коэффициента гомогенности m с полем продольной деформации образцов №3,4 после разгрузки.

Отмечается качественное подобие полей остаточных деформаций и коэффициента гомогенности m . Это может свидетельствовать о том, что деформационная анизотропия является следствием структурной неоднородности материала.

Интересно сопоставить данные по полю остаточной деформации при исследовании динамического неравновесного процесса и статического растяжения (рис. 9.). Анализ

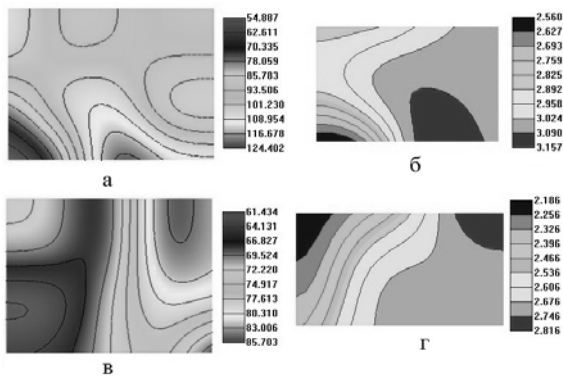


Рис. 8. Поля остаточной продольной деформации и коэффициента гомогенности m на поверхности разгруженных образцов: а, б – образец №3 (коэффициент гомогенности и поле деформации соответственно); в, г – образец №4 (деформация вычислена относительно базы, которая соответствует моменту включения камеры)

материала. Поэтому в процессе формирования диссипативной структуры возрастает роль сдвиговых процессов. Следует также обратить внимание на тот факт, что диссипативные структуры образуются за счет концентрации вакансионных дефектов [11]. Поэтому косвенным подтверждением наличия двух процессов, отвечающих за формирование и развитие диссипативной структуры в материале, могут свидетельствовать данные об изменении площади поверхности образца в процессе импульсного ввода энергии, полученные из поля деформации материала. На рис. 10 представлены соответствующие данные для образцов №3,4.

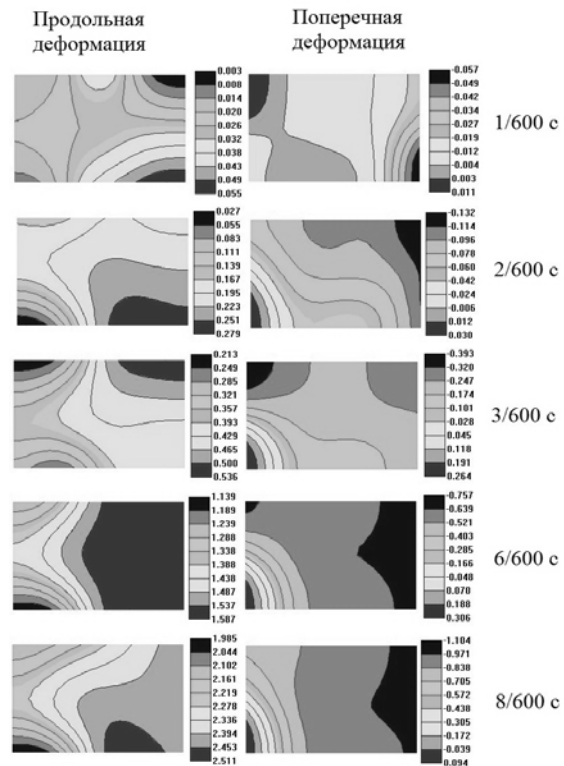


Рис. 7. Кинетика изменения поля деформации на поверхности образца №4 при динамическом неравновесном процессе (деформация вычислена относительно базы, которая соответствует моменту включения камеры)

представленных результатов показывает, что максимальная неоднородность на центральной части образца, зафиксированная при статическом растяжении, составляет порядка 0,175%, в то время как неоднородность после динамического неравновесного процесса составляет порядка 0,06%. Данный факт, по-видимому, свидетельствует о более выгодной структурной организации после импульсного ввода энергии.

Как уже раньше отмечалось, экспериментальными методами установлено, что плотность диссипативной структуры, образующейся при динамических неравновесных процессах, меньше плотности основного

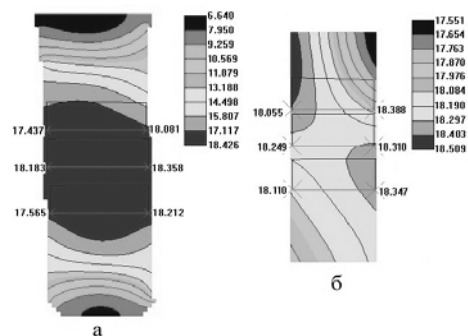


Рис. 9. Поля остаточных деформаций на поверхностях образцов при разных режимах нагружения: а – статическое растяжение; б – сложный режим нагружения (статическое растяжение – динамический неравновесный процесс)

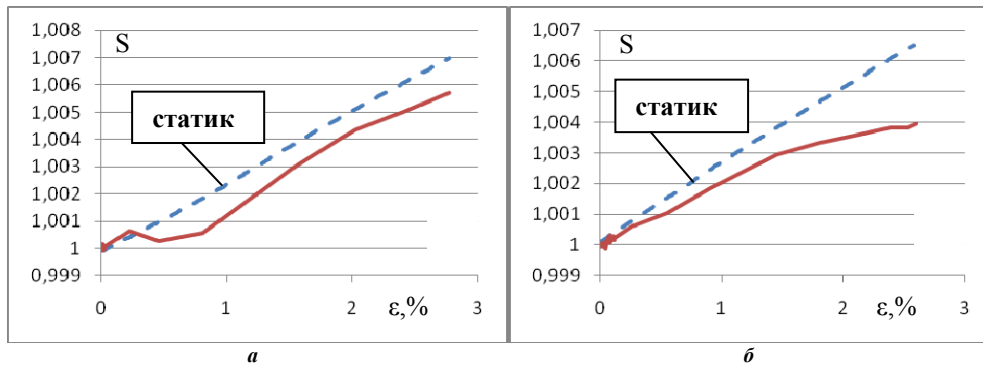


Рис. 10. Изменение площади поверхности образцов при динамическом неравновесном процессе:
а – образец №3; б – образец №4

Анализируя данные на рис. 10. можно отметить наличие области равномерного увеличения площади поверхности, аналогичное статическому растяжению в начальный момент процесса деформирования, связанной с вводом энергии в материал, и области резкого отклонения от равновесности которая, вероятно, связана с доминирующим влиянием процесса перераспределения энергии и структуры.

Выводы.

1. С использованием оптического комплекса, оборудованного высокоскоростной камерой Citius T10, исследована эволюция деформации на поверхности плоских образцов из нержавеющей стали при динамических неравновесных процессах.
2. Установлено, что при одном и том же уровне остаточной деформации на поверхности образцов при сложном режиме нагружения “статическое растяжение - динамический неравновесный процесс” и статическом растяжении максимальная неоднородность поля деформации в центральной части образца составляет 0,06% и 0,175%, соответственно. Данный факт, по-видимому, свидетельствует о более выгодной структурной организации материала после импульсного ввода энергии.
3. Выявлено качественное подобие поля остаточных деформаций и коэффициента гомогенности m , что подтверждает высокую чувствительность ЛМ-метода к структурным изменениям материала при различных режимах нагружения.
4. Высказано предположение о наличии двух процессов низкой и высокой скорости, отвечающих за формирование и развитие диссипативной структуры в материале при динамических неравновесных процессах. Причем высокоскоростные процессы связаны с инициированием структурных изменений, а низкоскоростные – с развитием структуры. Косвенным подтверждением наличия двух процессов являются данные об изменении площади поверхности образца в процессе импульсного ввода энергии, полученные из поля деформации.

Список литературы.

1. Чаусов Н.Г., Засимчук Е.Э., Маркашова Л.И., Вильдеман В.Э., Турчак Т.В., Пилипенко А.П., Параца В.Н. Особенности деформирования пластичных материалов при динамических неравновесных процессах // Заводская лаборатории. Диагностика материалов. –2009. –75. №6. –с. 52-59.
2. Засимчук Е.Э., Маркашова Л.И., Турчак Т.В., Чаусов Н.Г., Пилипенко А.П., Параца В.Н. Особенности трансформации структуры пластичных материалов в процессе резких смен в режиме нагружения // Физическая мезомеханика. –2009. –12. №2. –с. 77-82.
3. Вплив багаторазових змін в режимі навантаження на деформування пластичних матеріалів. Чаусов М.Г., Лучко Й.Й., Пилипенко А.П. та інш. / Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій. Збірник наукових праць. Львів. Каменярь. 2009, вип. 8. –с. 289-298.
4. Чаусов Н.Г., Засимчук Е.С., Пилипенко А.П., Порохнюк Е.М. Самоорганизация структур листовых материалов при динамических неравновесных процессах // Вестник Тамбовского университета. –Серия: Естественные и технические науки. –2010. –Т.15. –№3. –с. 892-894.
5. Чаусов М.Г., Лучко Й.Й., Пилипенко А.П., Волянська К.М. Вплив концентраторів напружень і зміни температури на кінетику руйнування листових матеріалів з урахуванням імпульсних підвантажень // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. –2010. Вип. 39, частина 2. –с. 307-315.
6. Mykola Chausov, Andriy Pylypenko, Kateryna Volyanska, Valentin Berezin, Volodymyr Hutsayluk. Deformation and fracture of aluminium alloy 2024-T3 under dynamic nonequilibrium process loading / Proceedings 24th Symposium on Experimental Mechanics of Solids. 2010. Wroclaw, Poland, September 22, –р. 6-7.
7. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements Basic Concepts, Theory and Applications, Michael A. Sutton, Jean-José Orteu, Hubert W. Schreier. ISBN: 978-0-387-78746-6 e-ISBN: 978-0-387-78747-3 doi: 10.1007/978-0-387-78747-3.
8. Лебедев А.А., Музыка Н.Р., Волчек Н.Л. Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости // Проблемы прочности. –2002. –№4. –с. 5-12.
9. Лебедев А.А. Новые характеристики деградации материала на стадии развития рассеянных повреждений // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. –2008. –№4. –с. 35-44.
10. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. – М.: Мир, 1965. –450с.
11. Засимчук Е.Э., Засимчук В.И. К вопросу о роли вакансионных дефектов в образовании и развитии каналов гидродинамического пластического течения кристаллов // Металлофизика и новейшие технологии. –2006. –т.28. –№6. –с. 803-809.