

УДК 539.4

**Н. Чаусов<sup>1</sup>, докт. техн. наук, профессор; Е. Засимчук<sup>2</sup>, докт. фіз.-мат. наук, профессор; В. Гуцайлюк<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доцент; Е. Волянская<sup>1</sup>, аспірантка**

*<sup>1</sup>Національний університет біоресурсів  
і природопользования України, Київ*

*<sup>2</sup>Інститут металлофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, Київ*

*<sup>3</sup>Военно-техническая академия техники ім. Ярослава Домбровского,  
Варшава, Польща*

## **МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВВОДЕ ЭНЕРГИИ В МАТЕРИАЛ**

*Резюме.* Впервые исследованы свойства диссипативных структур, образующихся при импульсном вводе энергии в материал.

*Ключевые слова:* динамический неравновесный процесс, диссипативные структуры, монокристаллическая фольга, охрупчивание, трещиностойкость.

**N. Chausov, E. Zasimchuk, V. Gutsaylyuk, E. Volyanskaya**

## **RESEARCH METHODS OF PROPERTIES OF DISSIPATIVE STRUCTURES FORMED WHILE THE IMPULSE ENERGY INPUT INTO THE MATERIAL**

*The summary.* The properties of dissipative structures formed in materials under dynamic nonequilibrium processes are analyzed for the first time.

*Key words:* dynamically nonequilibrium process, the dissipative structures, single-crystal foil, embrittlement, crack resistance.

**Введение.** При динамических неравновесных процессах практически все пластичные материалы проявляют склонность к кратковременной пластификации с одновременным «аномальным» разупрочнением за счет образования аморфно-подобной диссипативной структуры в виде локализованных полос, объемно-связанных на различных масштабных уровнях, по которым осуществляется гидродинамическое течение вещества [1–4].

Смену механизма деформации материала при динамических неравновесных процессах авторы [5] связывают с существенными флуктуациями скоростей подведения энергии к образцу материала на определенном этапе высокоскоростного деформирования, в результате образец вводится в возбужденное состояние и избыток подводимой энергии к материалу диссипирует в локальных ослабленных зонах.

Проведенный в настоящее время на кафедре механики, сопротивления материалов и строительства Национального университета биоресурсов и природопользования Украины объем экспериментальных исследований в данном направлении позволяет сделать ряд обобщений о влиянии динамических неравновесных процессов, которые

реализуются за счет импульсных подгрузок, на процессы деформирования и разрушения материалов при повторном статическом растяжении.

В настоящей работе проанализированы некоторые свойства диссипативных структур, образующихся в листовых материалах при динамических неравновесных процессах.

**Методики исследований.** Механические испытания проводили на плоских образцах из алюминиевых сплавов Д16 и 2024-Т3 шириной 10 мм и толщиной 1,5 и 3 мм, соответственно, и нержавеющей стали шириной 20 мм и толщиной 1,5 мм по методике, описанной в работах [1–4].

Свойства диссипативных структур в материалах оценивали несколькими методами.

Известно [6], что о структурообразовании под нагрузкой, являющемся активной модой деформации (самоорганизации), можно судить по поверхностному рельефу, который формируется непосредственно в процессе деформации. Нами выбран наиболее благоприятный способ для формирования деформационных структур, связанных с рельефом.

На рабочую часть образцов с помощью специального клея PASCО Fix наклеивали монокристалльную фольгу толщиной ~200 мкм, изготовленную из монокристалла алюминия высокой чистоты. Ориентировка монокристалльной фольги  $\langle 100 \rangle \{ 001 \}$ . Механические характеристики монокристалла алюминия ориентировки  $\langle 100 \rangle \{ 001 \}$  следующие: предел текучести  $\sigma_T = 26 \text{ МПа}$ , степень деформации до разрушения – 63%. Развитие поверхностного рельефа монокристалла исследовалось непосредственно в процессе деформирования при импульсных подгрузках путем снятия видеофильма. Для данных целей использовались оптический микроскоп и фотокамера Casio Exilim Pro EX-F1 с частотой измерения до 1200 изм/сек.

Структуру деформированных образцов после динамических неравновесных процессов изучали на тонких фольгах методом трансмиссионной электронной микроскопии (ТЭМ) на установке JEM-200СХ фирмы «JEOL» (Япония).

Исследования кинетики разрушения материалов проводили с использованием метода полных диаграмм деформирования [7]. С использованием данного метода удается реализовать такие условия испытаний, которые обеспечивают устойчивость процессов деформирования и разрушения на различных стадиях, в том числе на стадии макроразрушения.

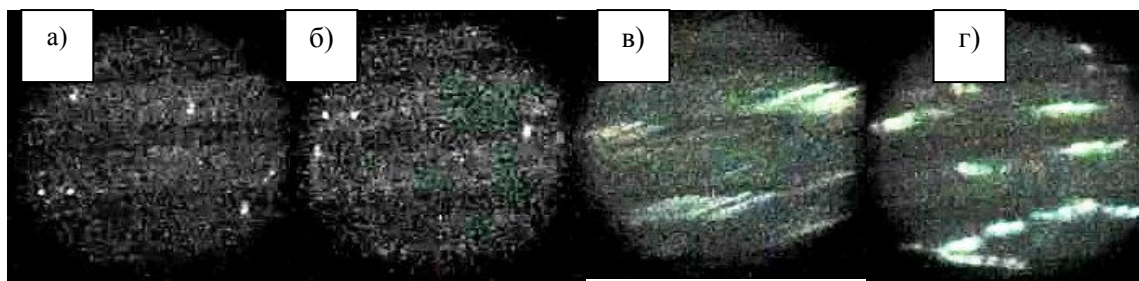
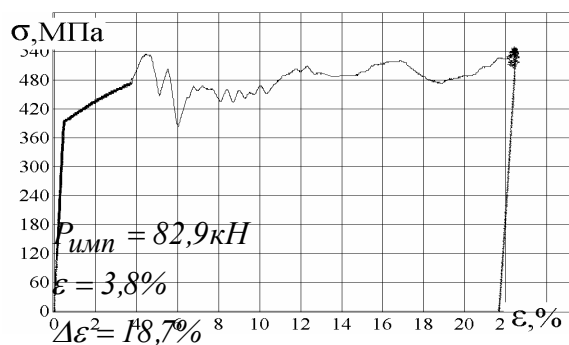
В работе также использовали специальный температурный режим нагружения (выдержка образцов в среде жидкого азота после динамических неравновесных процессов при комнатной температуре) для оценки склонности диссипативных структур в материале к охрупчиванию при последующем статическом растяжении.

**Результаты экспериментов.** На рис. 1 представлены результаты механических испытаний алюминиевого сплава Д16 при сложном режиме нагружения (статическое растяжение – динамический неравновесный процесс) и соответствующие данные фотосъемки по изменению рельефа монокристалльного сенсора (рис.1а–г). Наблюдаются характерные структурные следы локализации диссипативной структуры в макроэкструзиях (белые пятна) (рис. 1а–г) с последующим созданием решетки

«гребней» («гор»). Это указывает на то, что диссипативные структуры являются структурами с более низкой плотностью по сравнению с исходным материалом. Данный факт образования при динамических неравновесных процессах такого гибридного материала (основа, диссипативная структура, прослойки) позволяет предположить о возможности торможения макротрещин диссипативными структурами.

Специально проведенные исследования с «природными» макротрещинами, выращенными с использованием метода полных диаграмм деформирования с исходного кругового концентратора (рис. 2а) и на гладком образце (рис. 2б), а также с использованием метода ТЭМ (рис. 3) подтвердили данное предположение.

За счет фрагментации структуры материала вблизи вершины макротрещины и возникновения в полосовых структурах большого количества микротрещин (см. характерный образец ТЭМ-структуры на рис. 3а, б), работа на развитие макротрещины значительно увеличивается (см. рис. 2а, б). Штриховые линии на рис 2а, б соответствуют развитию макротрещины по механизму отрыва без импульсных подгрузок.



$f = 600 \text{ к/с}, \quad d_{\text{области}} = 0,3 \text{ мм}$

Рисунок 1. Кривая деформаций сплава Д16 при сложном режиме нагружения и результаты физических исследований (а–г)

О высоком уровне разориентации материала в зоне вершины трещины свидетельствует также микродифракционная картина (рис. 3в), а ее размытость указывает на частичную аморфизацию материала.

Для оценки склонности диссипативной структуры к охрупчиванию авторами разработана специальная методика. Структуру материала после динамических неравновесных процессов при комнатной температуре сначала «замораживали» в среде жидкого азота. После отогрева при комнатной температуре образцы повторно статически растягивали и по изменению механических характеристик материала по сравнению с характеристиками, полученными при статическом растяжении образцов при комнатной температуре, а также после «замораживания» без нагружения, отогрева и последующего растяжения – оценивали их склонность к охрупчиванию.

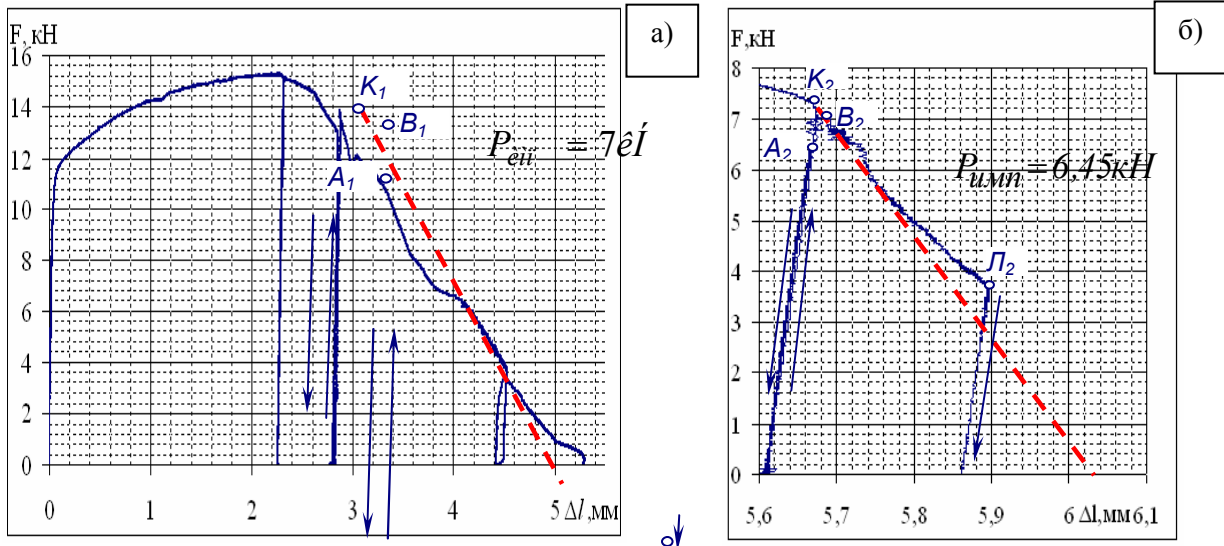


Рисунок 2. Влияние импульсных подгрузок различной интенсивности на кинетику разрушения листовой нержавеющей стали с «естественными» макротрещинами, выращенными из исходного кругового концентратора (а) и на гладком образце (б)

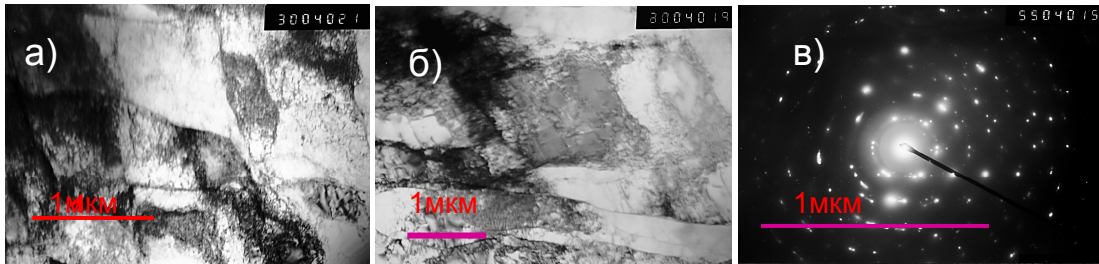


Рисунок 3. а, б – характерные образцы ТЭМ-структуры в зоне вершины макротрещины; в – микродифракционная картина

На рис.4 представлены соответствующие результаты испытаний. Их анализ показывает, что изменение температурного режима нагружения может привести к значительному охрупчиванию материала, содержащего диссипативную структуру.

В частности, образец из сплава 2024-Т3 после сложного температурного режима нагружения при повторном статическом растяжении разрушился практически квазихрупко (см. участок I на кривой 3, рис. 4).

В данном случае эффективно проявляется влияние дополнительных сжимающих температурных напряжений на повышение объема повреждений в диссипативной структуре, которая имеет плотность меньше плотности основного материала, и в прослойках между основным материалом и диссипативной структурой.

Полученные экспериментальные результаты указывают на то, что объем вновь образованной диссипативной структуры в материале следует отнести к основному параметру, который существенно влияет на изменение механических свойств при повторном статическом растяжении.

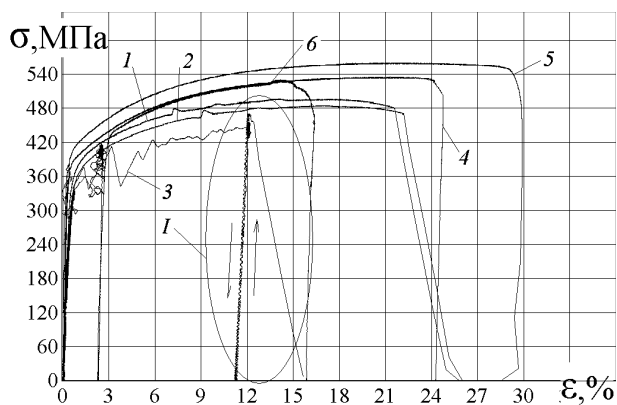


Рисунок 4. Кривые деформаций алюминиевого сплава 2024-Т3 (1, 2, 3) и нержавеющей стали (4, 5, 6) при различных температурно-силовых режимах нагружения: 1, 4 – статическое растяжение при 20°C; 2, 5 – выдержка в среде жидкого азота, отогрев до 20°C, статическое

растяжение; 3, 6 – сложный температурно-силовой режим нагружения

**Выводы.** На поверхности специального монокристалльного сенсора, наклеенного на основной образец, с помощью высокоскоростной фотосъемки зафиксирован след диссипативной структуры в виде макроэкструзий. Это указывает на то, что диссипативные структуры являются структурами с более низкой плотностью, по сравнению с исходным материалом. Продемонстрирована возможность торможения макротрещин диссипативными структурами. С помощью метода ТЭМ подтверждено, что данный факт связан с фрагментацией структуры материала вблизи вершины трещины, наличием в прослойках между диссипативной структурой и основным материалом большого количества микротрещин, а также с частичной аморфизацией материала. Впервые выявлена склонность диссипативных структур в алюминиевом сплаве 2024-T3 и нержавеющей стали к существенному охрупчиванию при изменении температурного режима нагружения.

**"Publikacja przygotowana w ramach realizacji projektu N N501 056740. Projekt został sfinansowany ze srodkow Narodowego Centrum Nauki".**

#### Литература

1. Установка для испытаний материалов с построением полных диаграмм деформирования [Текст] / Н.Г. Чаусов, Д.Г. Войтюк, А.П. Пилипенко, А.М. Кузьменко // Проблемы прочности. – 2004. – №5. – С. 117–123.
2. Особенности деформирования пластичных материалов при динамических неравновесных процессах [Текст] / Н.Г. Чаусов, Е.Э. Засимчук, Л.И. Маркашова, В.Э. Вильдеман, Т.В. Турчак, А.П. Пилипенко, В.Н. Параца // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – Т.75. – №6. – С. 52–59.
3. Особенности трансформации структуры пластичных материалов в процессе резких смен в режиме нагружения [Текст] / Е.Э. Засимчук, Л.И. Маркашова, Т.В. Турчак, Н.Г. Чаусов, А.П. Пилипенко, В.Н. Параца / Физическая мезомеханика. – 2009. – Т.12. – №2. – С. 77–82.
4. Вплив багаторазових змін в режимі навантаження на деформування пластичних матеріалів [Текст] / М.Г. Чаусов, Й.Й. Лучко, А.П. Пилипенко та інш. / Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій. Збірник наукових праць. Львів. Каменярь. – 2009, – вип.8. – С. 289–298.
5. Самоорганизация структур листовых материалов при динамических неравновесных процессах [Текст] / Н.Г. Чаусов, Е.Э. Засимчук, А.П. Пилипенко, Е.М. Порохнюк // Вестник Тамбовского университета. – Серия: Естественные и технические науки. – 2010. – Т. 15. – № 3. – С. 892–894.
6. Засимчук, Е.Э. Наблюдение *in situ* формирования поверхностного рельефа в монокристалльной фольге алюминия в процессе стесненного растяжения [Текст] / Е.Э. Засимчук, И.Т. Ярматов / Физическая мезомеханика. – 2009. – Т.12. – №3. – С. 55–60.
7. Чаусов, Н.Г. Полная диаграмма деформирования как источник информации о кинетике накопления повреждений и трещиностойкости материалов [Текст] / Н.Г. Чаусов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004 – Т.70. – № 7. – С. 42–49.