

СТРУКТУРНЫЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ГИГАЦИКЛОВОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ*

М.А. Соковилов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

В.А. Оборин, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Д.А. Билалов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

В.В. Чудинов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Проведено исследование кинетики роста усталостных трещин в сплаве алюминия и магния АМг6 в режиме гигацикловой усталости при предварительном динамическом деформировании. Актуальность постановки определяется важными приложениями – оценкой ресурса материалов и элементов конструкций авиационных газотурбинных двигателей в условиях полетного цикла при случайных динамических воздействиях. Предварительное нагружение образцов осуществлялось динамическим растяжением на разрезном стержне Гопкинсона–Кольского при скоростях деформации до $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$, последующем гигацикловом нагружении на ультразвуковой испытательной машине Shimadzu USF-2000 и количественным анализом фрактографии изломов на основе данных профилометрии и сканирующей электронной микроскопии.

Для сплавов, применяемых в авиационном моторостроении, очень важно сохранение несущей способности при динамическом нагружении. Проведены экспериментальное и теоретическое исследования механизмов локализации пластического сдвига при динамическом деформировании металлов. Механизмы связываются с коллективными эффектами в ансамбле микродефектов в пространственно-локализованных областях. Инфракрасное сканирование in-situ зоны неустойчивости и последующее изучение дислокационной субструктуры подтвердили предположение о решающей роли неравновесных переходов в ансамблях дефектов при развитии локализованного пластического течения. На основе уравнений, отражающих связь неравновесных переходов с механизмами структурной релаксации и пластического течения, проведено моделирование локализации пластической деформации.

Ключевые слова: гигацикловая усталость, скейлинг, фрактальный анализ, локализация пластической деформации, динамическое нагружение.

Предварительное нагружение образцов из сплава алюминия и магния АМг6 осуществлялось динамическим растяжением на разрезном стержне Гопкинсона–Кольского при скоростях деформации до

$\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$, после чего образцы подвергались циклической нагрузке при комнатной температуре с последующим изучением фрактографии изломов.

Испытания на усталость проводились

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-08-96025 p_урал_a.

на испытательной машине резонансного типа (Shimadzu USF-2000), позволяющей достигать усталостного ресурса 10^{10} циклов при уровнях напряжений (105, 120, 130 МПа), оцениваемых для материалов в исходном (недеформированном) состоянии.

Поверхностный рельеф разрушенных образцов регистрировался с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400n и интерферометра-профилометра высокого разрешения New-View 5010 (при увеличении $\times 2000$) с последующим вычислением пространственных инвариантов (показателя Херста) для оценки коррелированного поведения многомасштабных дефектных структур, с которыми связывалось распространение трещины.

При разрушении цилиндрических образцов за число циклов, соответствующих многоциклового усталости (10^6 – 10^7), трещина росла с поверхности образца (рис. 1, а). При разрушении на базе 10^8 циклов и более трещина образовывалась внутри образца и на поверхности разрушения наблюдалась характерная для такого режима усталости область излома – «рыбий глаз» («fish-eye»), в центре которой находится очаг разрушения, окруженный областью с фрагментированной (субмикроструктурной) структурой (светлая область 1), рис. 1, б.

Области сканирования распределялись по зоне роста усталостной трещины (рис. 1, а) и анализировались одномерные

образы-срезы рельефа поверхности в радиальном направлении по отношению к границе раздела между зонами 1 и 3. Около 12 одномерных «срезов» анализировались в пределах каждого «окна», обеспечивая представительность данных о структуре рельефа, индуцированного дефектами, с вертикальным разрешением $\sim 0,1$ нм и горизонтальным $\sim 0,1$ мкм.

Для определения минимального (критического) масштаба, соответствующего установлению длинно-корреляционных взаимодействий в ансамблях дефектов, использовался метод определения показателя Херста [2, 5].

Сравнение скейлинговых характеристик образцов, нагруженных в условиях много- и гигацикловой усталости, позволило установить существенное уменьшение диапазона пространственных масштабов (0,5–10,9 мкм), на которых показатель Херста остается постоянным для динамически нагруженных образцов в зоне «fish-eye».

Химический состав сплава АМгб определялся с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400n по спектру излучения отраженных электронов с помощью модуля INCA (рис. 2, б). По данным сканирующей электронной микроскопии, распределение элементов по сплаву неравномерно.

Исследовался спектр излучения в трех областях. Было обнаружено, что в центре «fish-eye», в области 2 содержание Al и Mg 49% и 42% соответственно. В обла-

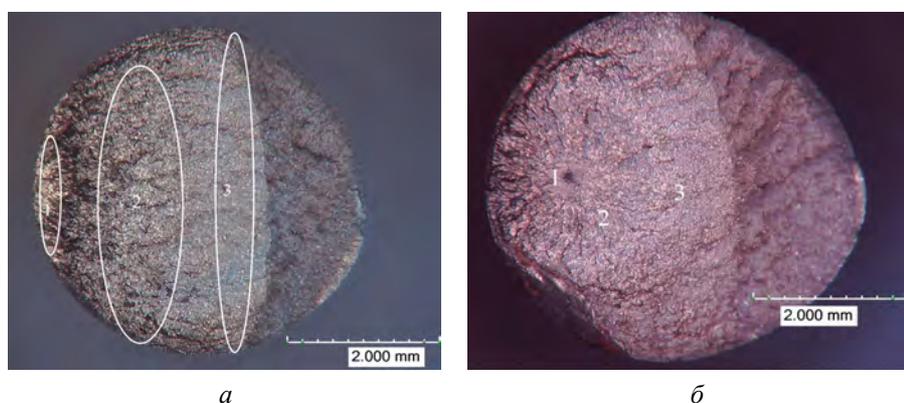


Рис. 1. Характерный рельеф поверхности зоны усталостного разрушения: при многоциклового (а) и гигацикловой усталости (б)

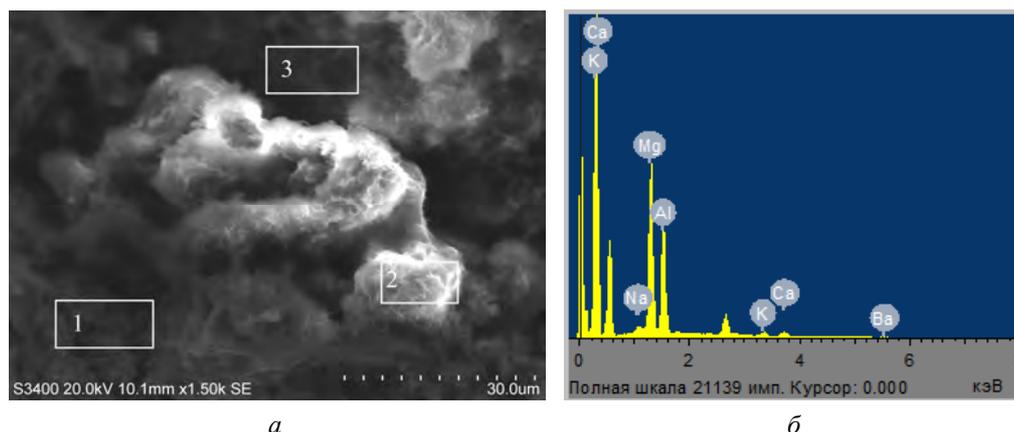


Рис. 2. Увеличенный фрагмент «fish-eye» (а) и суммарный спектр отраженных электронов в области 2 (б), полученный на электронном сканирующем микроскопе Hitachi S-3400п

ти 1 рядом с «fish-eye» Al и Mg 91% и 6%, как и положено для сплава АМг6. В области 3 на дне «fish-eye» Al и Mg 72% и 24% соответственно.

Сравнительный анализ масштабных инвариантов в зоне «fish-eye» для образцов, нагруженных в условиях много- и гигацикловой усталости, позволил установить существенное уменьшение диапазона пространственных масштабов, на которых показатель Херста остается постоянным для динамически нагруженных образцов. Этот результат подтверждает наше предположение о связи характеристических масштабов [3], определяющих многомасштабное коррелированное поведение ансамблей дефектов, с механизмами зарождения и распространения усталостных трещин.

Для сплавов, применяемых в авиационном моторостроении, очень важно сохранение несущей способности при динамическом нагружении.

Изучались неустойчивость и локализация пластической деформации при высокоскоростном нагружении.

Исследовалось поведение образцов в режиме, близком к чистому сдвигу при динамическом нагружении на стержне Гопкинсона–Кольского (образцы из сплава АМг6 типа «сдвиг-сжатие») [6]. В режиме реального времени боковая поверхность образцов изучалась с помощью высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M (чувствительность не менее 25 мК при 300 К, спектральный диапазон 3–5 мкм, максимальный размер кадра 320×240 точек). Полученное распределение температурного поля в различные моменты времени позволило судить о развитии процесса локализации пластической деформации (рис. 3).

Исследования указывают на то, что значения температур в областях локализации пластической деформации не превышают ~70°C для сплава АМг6.



Рис. 3. Образец между входным и выходным стержнями Гопкинсона–Кольского; образец после испытания; распределение температуры по координате перпендикулярно области сдвига и инфракрасное изображение в процессе деформирования, материал АМг6

Соответствие теоретических предположений о ведущей роли многомасштабных механизмов структурной релаксации, обусловленных коллективным поведением ансамблей дефектов, развитием локализации пластического течения и разрушения исследовалось методами структурного анализа морфологии поверхностного рельефа с использованием оптического интерферометра-профилометра NewView-5010 для последующего вычисления масштабного инварианта (показателя Херста) и пространственного масштаба области, на которой наблюдается коррелированное поведение микродефектов (рис. 4).

Сравнительный анализ масштабно-инвариантных характеристик динамически нагруженных образцов позволил установить незначительное изменение показателя Херста $H \sim 0,7$ в широком диапазоне пространственных масштабов 3–104 мкм. Более содержательные результаты могут быть связаны с изменением как нижнего, так и верхнего масштаба, что отражает

выраженные черты локализации деформации, предшествующей формированию разрушения.

Изучено пробивание преграды в виде формирования и выноса пробки с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры [4].

На оригинальной баллистической установке по изучению пробивания исследованы образцы, для которых были реализованы режимы импульсного нагружения, сопровождающиеся неустойчивостью пластического течения и выносом пробки (рис. 5).

Значения температур в областях локализации пластической деформации не превышают $\sim 190^\circ\text{C}$, что позволяет сделать вывод о возможности реализации механизма формирования и выноса пробки, не связанных с термопластической неустойчивостью (рис. 6).

В результате численного моделирования, проведенного с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов в материале [1], полученные поля темпера-

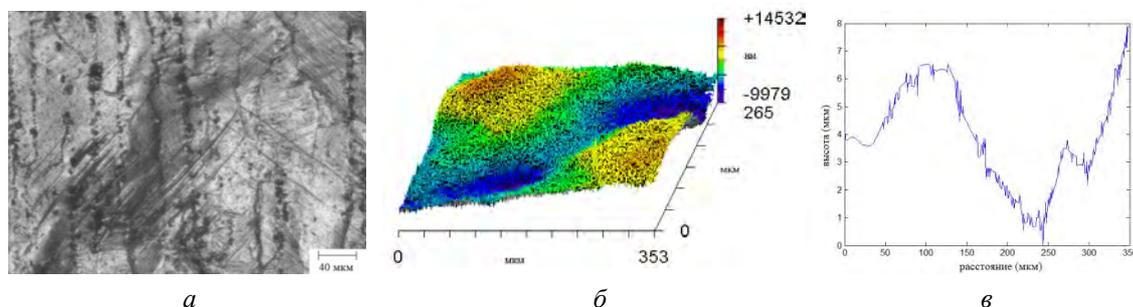


Рис. 4. Оптическое изображение (а) и 3D-образ поверхности после деформирования (б); характерный одномерный профиль поверхности (в)

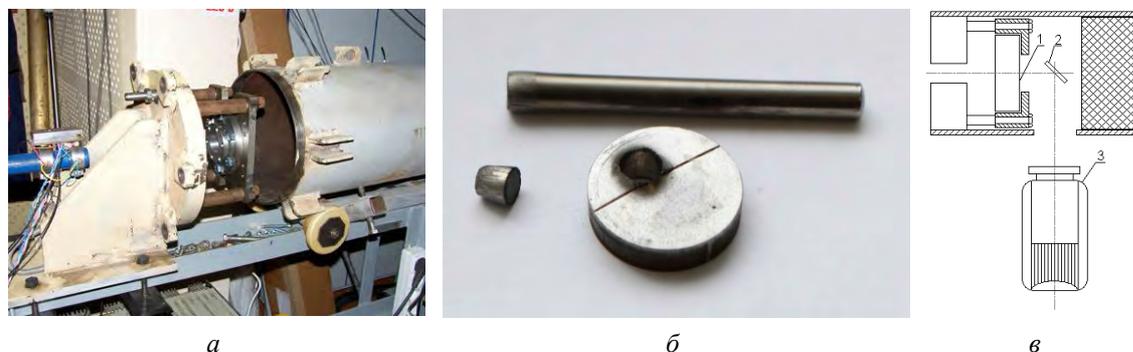


Рис. 5. Установка для испытаний образцов на пробивание (а); ударник, пробитый образец и выбитая пробка, материал мишени сталь 25ХНЗМФС, скорость соударения 378 м/с (б); схема эксперимента, 1 – образец, 2 – зеркало, 3 – инфракрасная камера (в)

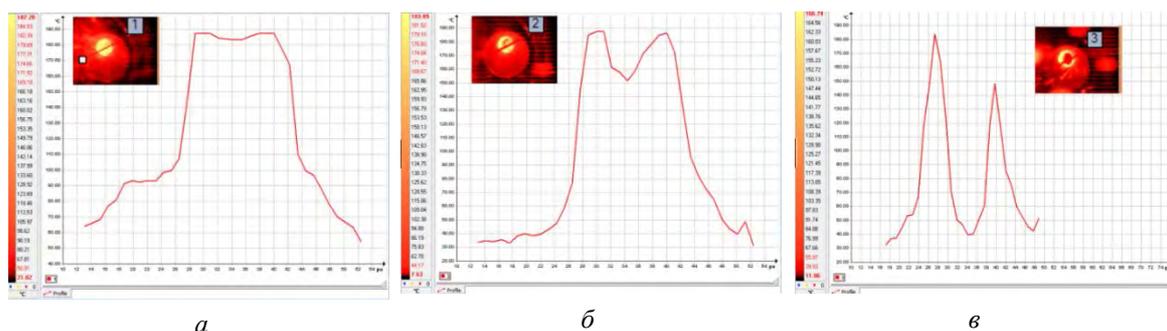


Рис. 6. Инфракрасные образы тыльной поверхности образца и распределение температуры на ней в процессе внедрения ударника в образец (а); формирования пробки (б); после пробивания преграды (в)

тур на тыльной поверхности образца при формировании и выносе пробки близки к определенным экспериментально (рис. 7).

Данные теоретических и экспериментальных исследований позволяют предполагать, что один из механизмов неустой-

чивости пластического сдвига и локализации пластической деформации при высокоскоростном нагружении в исследованном диапазоне скоростей деформации обусловлен структурно-кинетическими переходами в ансамблях микродефектов.

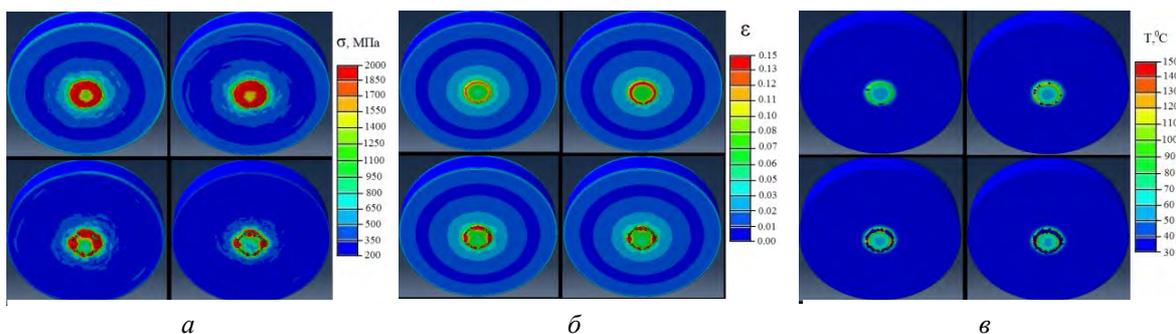


Рис. 7. Результаты численного моделирования пробивания преграды с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов в материале. Эволюция во времени распределения интенсивностей напряжений (а), деформаций (б) и температуры (в) на тыльной поверхности образца

Библиографический список

1. Наймарк О.Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 6. – С. 45–72.
2. Оборин В.А., Банников М.В., Баяндин Ю.В., Соковиков М.А., Биалов Д.А., Наймарк О.Б. Фрактальный анализ поверхности разрушения сплава АМг6 при усталостном и динамическом нагружении // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. – № 2. – С. 116–126.
3. Оборин В.А., Банников М.В., Наймарк О.Б., Palin-Luc Т. Масштабная инвариантность роста усталостной трещины при гигацикловом режиме нагружения // Письма в Журнал технической физики. – 2010. – Т. 36. – Вып. 22. – С. 76–82.
4. Соковиков М.А., Биалов Д.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Плехов О.А., Терехина А.И., Наймарк О.Б. Неравновесные переходы в ансамблях дефектов при динамической локализации пластической деформации // Письма в Журнал технической физики. – 2014. – Т. 40. – Вып. 23. – С. 82–88.
5. Bouchaud E. Scaling properties of cracks // J. Phys. Condens. Matter. – 1997. – Vol. 9. – P. 4319–4344.
6. Rittel D., Landau P., Venkert A. Dynamic Recrystallization as a Potential Cause for Adiabatic Shear Failure // Phys. Rev. Lett. – 2008. – Vol. 101. – 165501.

STRUCTURAL AND MECHANICAL ASPECTS OF FRACTURE PROCESSES UNDER GIGACYCLIC AND DYNAMIC LOADING

M.A. Sokovikov, V.A. Oborin, D.A. Bilalov, V.V. Chudinov

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS

The study of the kinetics of propagation of fatigue cracks in an aluminum-magnesium alloy AlMg6 preloaded dynamically in the gigacyclic fatigue regime has been held. The research holds a considerable practical interest for assessing the resource of materials and structural elements of aircraft gas turbine engines experiencing random dynamic effects under flight cycle conditions. The preloading of samples was realized using a split Hopkinson pressure bar set-up at strain rates of $\sim 10^3 \text{ s}^{-1}$, after which the samples were subjected to gigacyclic loading. Fatigue tests were carried out using a Shimadzu USF-2000 ultrasonic testing machine. The quantitative analysis of fracture fractography was performed on the basis of profilometry and scanning electron microscopy data.

For alloys used in the aircraft engine industry, an important point is to retain their bearing capacity under dynamic loading conditions. To this end, the mechanisms of plastic shear localization during the dynamic deformation were studied in the present work both experimentally and theoretically. It has been found that they are caused by the collective effects observed in the ensembles of microdefects in spatially localized areas. In-situ infrared scanning of the instability region and analysis of a dislocation substructure provide evidence for a crucial role of non-equilibrium transitions in the ensembles of defects during the development of a localized plastic flow. Based on the equations describing a relationship between non-equilibrium transitions and mechanisms of structural relaxation and plastic flow, numerical modeling of plastic shear localization was performed.

Keywords: gigacyclic fatigue, scaling, fractal analysis, plastic shear localization, dynamic loading.

Сведения об авторах

Соковиков Михаил Альбертович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физических основ прочности, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: sokovikov@icmm.ru

Оборин Владимир Александрович, ведущий инженер лаборатории физических основ прочности, ИМСС УрО РАН; e-mail: oborin@icmm.ru

Билалов Дмитрий Альфредович, аспирант лаборатории физических основ прочности, ИМСС УрО РАН; e-mail: ledon@icmm.ru

Чудинов Василий Валерьевич, инженер лаборатории физических основ прочности, ИМСС УрО РАН; e-mail: chudinov@icmm.ru

Материал поступил в редакцию 21.10.2016 г.