

07,01

Динамическая твердость и образование полос Портевена—Ле Шателье при ударном индентировании

© А.А. Шибков, А.Е. Золотов, А.А. Денисов, М.Ф. Гасанов, Е.А. Шибков, С.С. Кочегаров

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина,
Тамбов, Россия

E-mail: shibkovaleks@mail.ru

Поступила в Редакцию 22 февраля 2023 г.

В окончательной редакции 22 февраля 2023 г.

Принята к публикации 1 марта 2023 г.

Экспериментально с использованием методов акустической эмиссии и скоростной видеосъемки исследовалось влияние ударного индентирования на формирование и распространения полос деформации Портевена—Ле Шателье в алюминий-магний-магний сплаве. Выявлены динамические и нелинейные отклики на ударное индентирование: к первым относятся высокие значения динамической твердости и локальной скорости деформации и нагружения, а ко второй — пороговый и множественный характер силового и акустического откликов. Показано, что полосы макролокализованной деформации представляют латентный объемный вид эрозионного повреждения, который снижает механическую устойчивость и долговечность сплава.

Ключевые слова: контактный удар, эффект Портевена—Ле Шателье, полосы деформации, разрушение, алюминий-магний-магний сплав.

DOI: 10.21883/FTT.2023.04.55296.23

1. Введение

Наиболее известным проявлением коллективной дислокационной динамики на макроуровне является прерывистая деформация металлов и сплавов, или эффект Портевена—Ле Шателье (ПЛШ), состоящий в спонтанном формировании в пластически деформируемом материале полос макролокализованной деформации, которое сопровождается появлением нерегулярностей на деформационных кривых [1]. В зависимости от условий деформирования эти нерегулярности могут быть в виде повторяющихся скачков напряжения или скачков деформации. Если задан силовой закон воздействия на материал $\sigma = \sigma(t)$, обычно $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$, то откликом на развитие пластических неустойчивостей являются повторяющиеся скачки деформации $\Delta \epsilon$ на кривых $\epsilon(\sigma)$; если задана скорость деформирования $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}(t)$, как правило, $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$, то откликом являются скачки напряжения $\Delta \sigma$ на деформационных кривых $\sigma(\epsilon)$. Первая ситуация соответствует прямой задаче нелинейной динамики, когда заданы силы и откликом является неустойчивая упруго-пластическая деформация, а вторая — обратной задаче, когда задан поток $\dot{\epsilon}_0$, а исследуется нелинейный силовой отклик. Именно этой ситуации посвящено большинство исследований эффекта ПЛШ. Вместе с тем, менее исследованная первая ситуация в большей степени соответствует условиям эксплуатации и обработки металлических сплавов, когда заданы силы (сила тяги, подъемная сила, сила лобового сопротивления, сила трения, давление при формовке и т.д.), а откликом яв-

ляется собственно неустойчивая деформация материала или конструкции.

Несмотря на более чем столетнюю историю изучения прерывистой деформации [1–3] и полувековую историю исследования деформационных полос [4–9], природа этих явлений остается неясной и является предметом продолжающейся дискуссии относительно механизмов спонтанного зарождения и распространения полос локализованной деформации, вызывающих скачки на диаграммах растяжения (сжатия). В практическом плане полосы оказывают негативное влияние на прочность, долговечность и коррозионную стойкость металлов и сплавов. Кроме того, промышленные сплавы, демонстрирующие эффект ПЛШ, в ходе металлообработки и эксплуатации подвергаются технологическим внешним воздействиям (лазерная или дробеструйная обработка, действие химически агрессивной среды и т.д.), которые могут провоцировать зарождение полос деформации вблизи нагруженных элементов узлов конструкций. Для прогнозирования поведения таких сплавов в условиях внешних высокоэнергетических воздействий необходимо исследовать механизмы их влияния на образование деформационных полос, динамика которых, в конечном счете, приводит к разрушению материала. Цель настоящей работы состоит в исследовании влияния контактного удара на зарождение и распространение полос в деформируемом сплаве, демонстрирующем эффект ПЛШ, в качестве которого выбран алюминий-магний-магний сплав АМг6, широко применяемый при производстве авиационной техники и автомобилей.

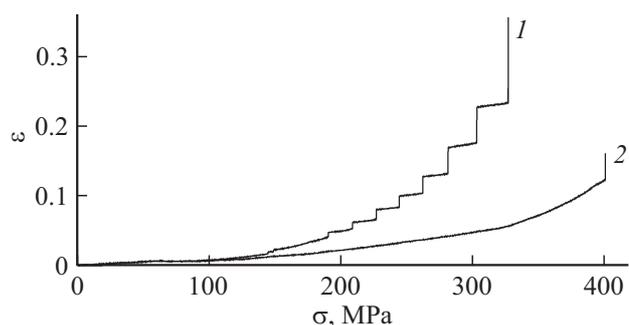


Рис. 1. Кривые нагружения со скоростью $\dot{\sigma}_0 = 0.2 \text{ MPa/s}$ образцов сплава АМг6-I (1) и АМг6-II (2).

2. Методика

Образцы промышленного алюминиево-магниевого сплава АМг6 (Al — 6.15%, Mg — 0.65%, Mn — 0.25%, Si — 0.21% Fe; wt%) в форме двухсторонних лопаток с размером рабочей части $6 \times 3 \times 0.5 \text{ mm}$ вырезались из холоднокатаного листа вдоль направления прокатки. Исследовали два типа образцов: АМг6-I с рекристаллизованной структурой, полученной 2-hr отжигом при 450°C и закалкой на воздухе и образцы АМг6-II, нагартованные с помощью холодной прокатки до истинной деформации $e \approx 3$. Структура образцов после термической и механической обработок описаны в работе [10]. На рис. 1 показаны типичные кривые растяжения образцов АМг6-I и АМг6-II с постоянной скоростью роста приложенного напряжения ($\dot{\sigma}_0 = 0.2 \text{ MPa/s}$). Образцы АМг6-I демонстрируют ступенчатые кривые нагружения, а образцы АМг6-II — гладкие, без скачков, за исключением деформационного скачка с образованием шейки и разрушения образца. В таблице приведены основные механические свойства этих образцов.

В ходе растяжения образцы подвергались динамическому (ударному) индентированию при разном уровне приложенного напряжения. При определенных условиях удар индентора провоцировал развитие вынужденного (преждевременного) скачка деформации на кривой растяжения, зарождение в зоне отпечатка и распространение полос макролокализованной деформации. Для ис-

Механические свойства образцов сплава АМг6

Типы образцов	H_V , МПа	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	ϵ_c , %	ρ_0 , cm^{-2} [10]	N_j	$\Delta\epsilon$, %
АМг6-I	800	330	160	35	2	10^8	8–10	1–10
АМг6-II	1200	400	330	16	9	10^{12}	1	2–3

Примечание. H_V — микротвердость по Виккерсу, σ_B — предел прочности, $\sigma_{0.2}$ — условный предел текучести, δ — относительная деформация до разрушения, ϵ_c — деформация появления первого скачка, ρ_0 — исходная плотность дислокаций, N_j — количество скачков деформации на кривых растяжения, $\Delta\epsilon$ — амплитуда скачков деформации.

следования динамики полос использовали метод акустической эмиссии (АЭ) и высокоскоростную видеосъемку со скоростью до 20 000 кадров в секунду (fps) скоростной цифровой камерой FASTCAM Mini UX50/100 Photron. Акустический канал включает датчик акустической эмиссии Zetlab BC 601 и предусилитель АЕР5 (Vallen-Systeme), регистрирующий сигнал АЭ в полосе частот от ~ 30 до $\sim 600 \text{ kHz}$. В качестве индентора использовали пирамиду Виккерса.

Схема экспериментального устройства, представленная на рис. 2, включает образец 1, растягиваемый с постоянной скоростью роста напряжения $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$, акустический датчик 2, укрепленный на нижней лопатке образца, индентор Виккерса 3, приводимый в движение взрывом компактного заряда ВВ 4, установленного в стальном цилиндре 5. Индентор подвешивали на легкой бронзовой ленте 6. Взрыв ВВ инициировали импульсом инфракрасного волоконного лазера 7 (YLP-1-100-50-50-NC-RG, длина волны излучения 1064 nm , номинальная энергия в импульсе 1 mJ , частота повторения импульсов 50 kHz , длительность импульса 120 ns) с плотностью потока излучения в фокусе $\sim 10^6 \text{ W/cm}^2$. Силовой отклик регистрировали тензодатчиком 8 (Zemic H3-C3-100 kg-3B чувствительностью 1.5 V/N), деформацию образца измеряли с помощью лазерного триангуляционного датчика положения 9 (Riftec, чувствительность $1.5 \mu\text{m}$ в полосе частот

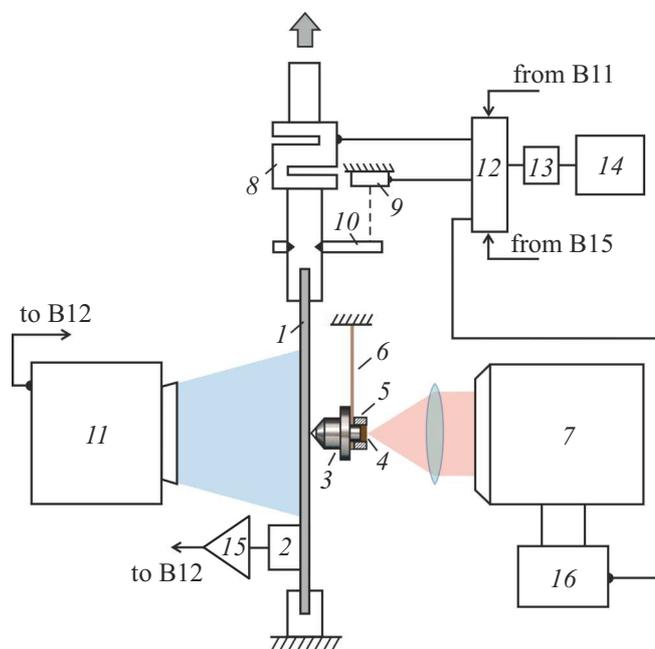


Рис. 2. Схема экспериментального устройства. 1 — образец, 2 — пьезодатчик, 3 — индентор, 4 — заряд ВВ, 5 — стальной цилиндр, 6 — легкий подвес, 7 — импульсный ИК-лазер, 8 — тензодатчик, 9 — лазерный датчик положения, 10 — зеркало, 11 — высокоскоростная камера, 12 — коммутатор, 13 — АЦП, 14 — компьютер, 15 — предусилитель сигнала АЭ, 16 — блок внешнего управления лазером.

до 2 kHz), который регистрировал расстояние между базой и зеркалом 10, укрепленном на подвижном штоке испытательной машины. Противоположную от ударного воздействия поверхность плоского образца видеофильмировали высокоскоростной камерой 11. Для синхронизации регистрируемые сигналы датчика АЭ, датчика усилия, датчика положения, блока управления лазером и видеокамеры подавались на коммутатор 12, затем на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 13 и компьютер 14. Для инициирования взрыва гранулы ВВ лазерным излучением использовали режим „свободной“ генерации в течение 1 ms. Время генерации задавалось прямоугольным импульсом напряжения длительностью 1 ms в режиме внешнего управления лазера блоком 16. Микротвердость по Виккерсу измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 20 g в течение 10 s.

3. Экспериментальные результаты

Образцы сплава АМг6-1 демонстрируют явно выраженную ступенчатую кривую растяжения (рис. 1, кривая 1). С ростом приложенного напряжения растет амплитуда скачка $\Delta\varepsilon$ и величина плато $\Delta\sigma$ между скачками [11] и, соответственно, длительность плато $\Delta t = \Delta\sigma/\sigma_0$, так что

$$\Delta\sigma = a\Delta\varepsilon^n, \quad (1)$$

где a и n — постоянные, зависящие от марки сплава. Зависимость (1) характерна для алюминиево-магневых сплавов с содержанием Mg от 2 до 6%. Для сплава АМг6-1 $a = 45$ МПа, $n = 0.273$ при $T = 300$ К. В работах [11,12] эмпирически установлено, что последняя треть плато наиболее чувствительна к внешним воздействиям, в частности, действию агрессивной среды [12] и импульсному лазерному ИК-излучению [11]. Ударное индентирование поверхности деформируемого образца сплава АМг6-1 проявляет, как обнаружено, качественно подобное поведение: первая треть плато фактически не чувствительна к ударному воздействию, в последней трети плато амплитуда индуцированного скачка деформации достигает 60–80% относительно амплитуды спонтанного скачка, а в средней трети плато относительная амплитуда возрастает соответственно от нуля до почти 60% с ростом приложенного напряжения.

Для количественного исследования деформационного отклика на ударное индентирование выбиралось плато между скачками большой амплитуды, например, между 5-м и 6-м (рис. 1) длительностью $\Delta t = t_6 - t_5 \approx 50$ s. Деформируемый образец на данном плато подвергали ударному индентированию в центр рабочей части образца через интервал $\Delta t \approx 30$ s относительно начала плато, измеряли форму и амплитуду вынужденного скачка $\Delta\varepsilon_i$, силовой и акустической отклики, и исследовали динамику и морфологию деформационных полос, образованных

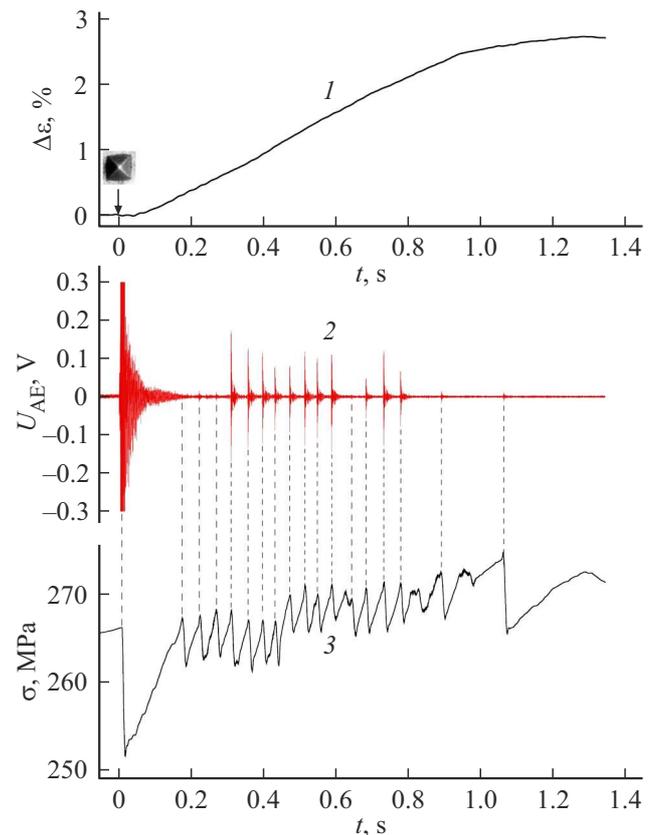


Рис. 3. Синхронная запись датчиков деформации (1), акустической эмиссии (2) и усилия (3) при ударном индентировании поверхности деформируемого образца сплава АМг6. Стрелкой отмечен момент удара. На вставке — отпечаток после удара.

в результате удара индентора и последующего развития деформационного скачка.

На рис. 3 представлена синхронная запись сигналов датчиков деформации 1, акустической эмиссии 2 и усилия 3, вызванных ударом индентора Виккерса. Как видно из рисунка, удар индентора вызывает „преждевременное“ развитие деформационного скачка амплитудой около 3% (кривая 1 на рис. 3), характерными повторяющимися всплесками сигналов АЭ (кривая 2) и скачками напряжения в силовом отклике (кривая 3). Амплитуда первого всплеска АЭ, вызванного ударом индентора, значительно превышает амплитуду последующих сигналов АЭ. Данные видеосъемки со скоростью 2000 fps показывают, что всплески АЭ на фронте деформационного скачка связаны с формированием деформационных полос, причем каждому всплеску АЭ соответствует процесс формирования одиночной полосы (амплитуда сигнала приходится на начальную стадию развития завершенной полосы) и скачок разгрузки системы машина–образец (рис. 4).

Таким образом, единственный удар индентора вызывает множественный силовой и акустический отклики в течение около секунды после ударного воздействия, которые

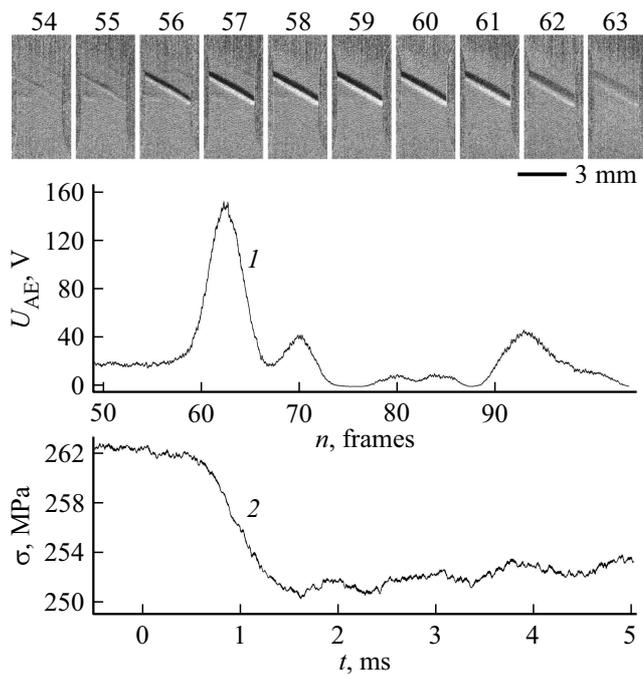


Рис. 4. Акустический (1) и силовой (2) отклики на формирование полосы деформации. На вставке сверху — соответствующий фрагмент видеосъемки со скоростью 2000 fps, n — номер кадра видеосъемки.

сопровождается формированием и распространением порядка десятка деформационных полос. Нелинейное поведение деформируемого материала после контактного удара проявляется в пороговом и множественном характере этих откликов, которые затухают не по экспоненциальному закону, как в линейных системах, а в виде последовательных скачков напряжения и всплесков сигнала АЭ, подобно остаточным толчкам (афтершокам) после главного землетрясения [13,14].

Для изучения динамики первичной полосы, инициированной ударным воздействием, и ее корреляции с последующими полосами, участвующими в развитии макроскопического деформационного скачка на кривой нагружения, скорость съемки увеличили до 20 000 fps. Из данных видеосъемки следует, что на противоположной от индентора поверхности в центре рабочей части образца сначала появляется метка (отмечена стрелкой на рис. 5), из которой затем „вырастают“ две сопряженные полосы деформации под углами $\pm 30^\circ$ относительно нормального сечения, а локальная область их пересечения находится напротив отпечатка. Затем начинается падение напряжения в силовом отклике (см. рис. 5, кривая 2), что согласуется с выводами работ [9,15]. Из формы сигнала АЭ видно, что максимум сигнала соответствует моменту появления метки (кадр 152), а старт сигнала АЭ соответствует предыдущему кадру (кадр 151), на котором метка еще отсутствует. Согласно [9], амплитуда сигнала АЭ соответствует моменту выхода зародышевой полосы на противоположную поверхность

ность. Из полученных данных высокоскоростной съемки и измерения сигнала АЭ следует, что крестообразная метка образуется в результате выхода на противоположную от индентора поверхность вершин сопряженных полос деформации, генерируемых ударом индентора, а начало удара регистрируется стартом сигнала АЭ, что дает верхнюю оценку времени распространения полосы $\Delta t = 50 \mu s$ и нижнюю оценку скорости ее вершины (tip velocity) $v_t \approx w/\Delta t \approx 10 \text{ m/s}$, где $w = 0.5 \text{ mm}$ — толщина образца.

Отметим, что экспериментальные исследования геометрии полос деформации в сплавах, демонстрирующих прерывистую деформацию, позволили выявить деформационные полосы двух видов в плоских образцах: полосы, составляющие угол 90° на фронтальной по-

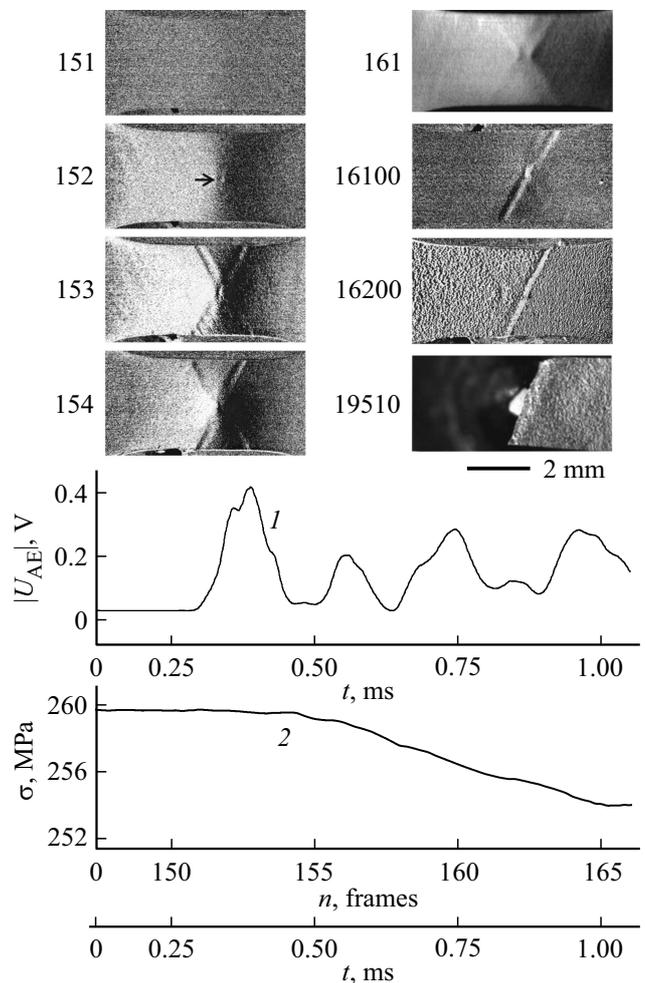


Рис. 5. Временные зависимости модуля сигнала АЭ $|U_{AE}(t)|$ (1) и скачка разгрузки σ (2) при ударе индентора в ходе одноосного растяжения образца сплава АМг6-І. На вставке — фрагмент видеосъемки формирования пересекающихся сопряженных полос от момента удара до разрушения образца по одной из полос. Стрелкой отмечена метка, образованная при выходе вершины полосы на противоположную от индентора поверхность образца. Кадры 151-154, 161 00, 162 00 получены с помощью компьютерной обработки изображений, остальные кадры — без компьютерной обработки.

верхности и $\beta = 55\text{--}63^\circ$ к оси растяжения на боковой поверхности (полосы I типа) и полосы, составляющие угол β к оси растяжения на фронтальной поверхности и 90° — на боковой (полосы II типа) [15] (для изотропного пластически деформируемого материала $\beta = \arctg \sqrt{2} = 54^\circ 44'$ [16]). В образцах с отношением $d/w > 5$ преобладают полосы II типа ($d = 3\text{ mm}$ — ширина образца). Развитие магистральной (сдвиговой) трещины всегда происходит по одной из сопряженных полос деформации, генерируемых ударом индентора (рис. 5).

Формирование сопряженных полос деформации, инициированных ударным индентированием, наблюдается на прерывистом участке кривой растяжения в последней трети любого плато, начиная со 2–3-го плато, т. е. выше $\sigma \approx 210\text{--}350\text{ MPa} \approx (1.3\text{--}1.4)\sigma_{02}$, где $\sigma_{02} \approx 160\text{ MPa}$ — условный предел текучести сплава АМг6. Это означает, что для зарождения и распространения полос необходимо превысить некоторый критический уровень внутренних напряжений в материале, которые растут на плато после очередного скачка, вызывающего их быструю релаксацию.

Нагартованные образцы АМг-II, не демонстрирующие прерывистой деформации ПЛШ, не демонстрируют и вынужденных скачков после удара индентора в ходе нагружения. Удар индентора в ходе одноосного растяжения при напряжениях 250–350 МПа производит на противоположной стороне образца поверхностный деформационный рельеф типа „апельсиновой корки“ приблизительно в шестидесятиградусном угловом секторе, отражающем распределение касательных напряжений.

4. Обсуждение результатов

На основании полученных результатов можно предложить следующую схему полосообразования, инициированного ударом индентора. При ударном воздействии на поверхность образца, деформируемого одноосным растяжением, вершина индентора как концентратор напряжения генерирует две сопряженные полосы II типа (рис. 6). До выхода на противоположную от индентора поверхность в объеме материала границы полос имеют параболическую форму. При выходе вершины одной из полос на противоположной поверхности, контролируемой видеокамерой, сначала образуется метка в виде отрезка, а затем при выходе вершины сопряженной полосы — крестообразная метка (см. вставку рис. 6). При такой схеме полосообразования метка находится в точности напротив вершины индентора, что соответствует данным наблюдений. В результате конкуренции сопряженных полос одна из них будет преобладать и станет триггером развития макроскопического деформационного скачка на кривой нагружения за счет генерирования вторичных полос по каскадному механизму, описанному в [17].

Полученные результаты свидетельствуют об участии полос макролокализованной деформации в структуре

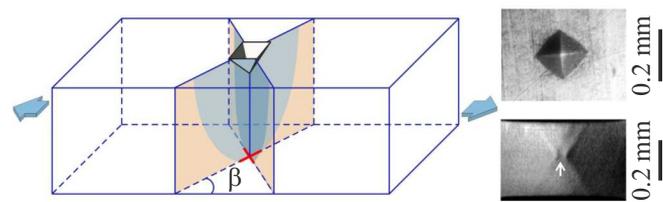


Рис. 6. Схема формирования сопряженных зародышевых полос под индентором. β ($54^\circ 44'$ [16]) — угол между плоскостью максимальных касательных напряжений и осью растяжения. На вставке справа — отпечаток индентора после удара (вверху) и крестообразная структура сопряженных полос деформации на противоположной поверхности плоского образца (внизу). Стрелкой показана впадина в области пересечения полос.

пластической зоны под индентором в условиях контактного удара. При статическом индентировании изотропного материала пластическая зона округлой формы (близкой к полуэллипсоидной) размером, сопоставимым с размером отпечатка (0.1–0.2 mm), как предполагается, располагается за зоной гидростатического сжатия, находящейся непосредственно под вершиной индентора. При ударном индентировании сплава, демонстрирующего эффект ПЛШ, локальная область под индентором генерирует две полосы деформации в сопряженных направлениях максимальных касательных напряжений, которые пересекают всё поперечное сечение образца. Их источники находятся в области пика касательных напряжений приблизительно на расстоянии порядка глубины отпечатка под индентором.

Анализ самосогласованных сдвигов в пересекающихся сопряженных полосах по схеме креста, проведенный в работах [18,19] в контексте изучения механизма пластической деформации в шейке, показал, что в области пересечения полос формируется локальная зона всестороннего растяжения и создаются условия для зарождения трещины как начальной стадии разрушения. Такой механизм позволяет объяснить образование локальной впадины (мезоскопической шейки) в центре пересечения полос (см. стрелка на вставке рис. 6 внизу справа) и последующего развития магистральной сдвиговой трещины по одной из сопряженных полос (см. рис. 5). Таким образом, ударное индентирование создает не только отпечаток на поверхности сплава и пластическую зону размером, сопоставимым с глубиной отпечатка, но и полосы макролокализованной деформации длиной несколько mm, распространяющиеся в объеме материала, эволюция которых вызывает зарождение и развитие сдвиговой магистральной трещины.

Следует отметить, что согласно данным электронно-микроскопических исследований [20,21], дислокационная структура пластически деформируемых сплавов Al–Mg с содержанием магния 3–6%, в отличие от чистого алюминия, характеризуется почти однородным распределением дислокационных сплетений, при-

чем с ростом содержания Mg увеличивается частота пересечений дислокаций, что, в свою очередь, увеличивает объемную концентрацию равномерно распределенных источников Франка–Рида (Ф–Р) и приводит к росту плотности подвижных дислокаций [22]. С одной стороны, это создает эффект упрочнения, а с другой стороны, при определенных условиях, увеличивает вероятность образования пространственной структуры — волны нуклеации.

В соответствии с наиболее общей моделью морфогенеза [23], формирование пространственной структуры в активной распределенной системе возможно при условии, что радиус действия активатора l , по которому осуществляется положительная обратная связь, значительно меньше размера ингибитора L , по которому осуществляется отрицательная обратная связь; тогда лавнообразное нарастание активатора происходит в области с характерным размером $d_a \approx 2\pi(lL)^{1/2}$, характеризующим масштаб пространственно неоднородного состояния [24]. В деформируемом кристалле величина l определяется размером дислокационного источника, а L — масштабом структуры сил торможения дислокаций.

В ходе развития макроскопически локализованной дислокационной лавины, содержащей избыток дислокаций одного механического знака („механического заряда“), в условиях одноосного растяжения в образце растет изгибающий момент [25,26], препятствующий распространению дислокационной лавины (отрицательная обратная связь). Релаксация изгибающего момента осуществляется за счет спонтанного формирования противоположного механического заряда. В этой ситуации ингибитором выступают дальнедействующие поля напряжения, связанные с несоосностью деформации, создаваемой распространяющейся полосой.

Принимая размер ингибитора равным размеру образца, $L \approx 6 \text{ mm}$, а характерный масштаб диссипативной структуры — ширине полосы на ранней стадии развития $d_a \approx 0.3 \text{ mm}$, получим оценку размера активатора — активного дислокационного источника $l = d^2 / (4\pi^2 L) \approx 0.4 \text{ }\mu\text{m}$. Длина дислокационного скопления в плоскости скольжения, согласно [27], определяется выражением

$$l_0 = \frac{NGb}{\pi\sigma k}, \quad (2)$$

где N — число дислокаций, G — модуль сдвига, b — величина вектора Бюргерса, $k = 1$ для краевых дислокаций и $k = 1-\nu$ для винтовых дислокаций, а ν — коэффициент Пуассона. Полагая, что напряжение σ превышает напряжение срабатывания дислокационного источника типа Ф–Р, которое генерирует скопление из $N \approx 20$ [27] и подставляя в (2) $G = 28 \text{ GPa}$, $b = 0.286 \text{ nm}$, $\nu = 0.33$, получим $l_0 \approx 0.36 \text{ }\mu\text{m}$ — для скопления винтовых дислокаций и $l_0 \approx 0.23 \text{ }\mu\text{m}$ — для скопления краевых дислокаций, что лучше чем по порядку величины совпадает с оценкой размера активатора ($l \approx 0.4 \text{ }\mu\text{m}$). Отметим, что согласно [28], база источника

Ф–Р $L_{FR} \approx 10^3 b / 8$, а критическое напряжение срабатывания источника $\sigma^* \approx Gb / L_{FR} \approx 224 \text{ MPa}$, т.е. соответствует напряжению зарождения первых деформационных полос и соответственно появлению первых скачков на кривых растяжения образцов сплава АМг6. Ключевая роль размножения дислокаций в формировании деформационных полос установлена в [29], поэтому можно предположить, что механизм образования и распространения деформационных полос связан с коллективным срабатыванием дислокационных источников Ф–Р.

Как отмечалось, нагартованные образцы (АМг-II) не демонстрируют эффект ПЛШ и вынужденных скачков деформации после удара индентора. Высокая исходная плотность дислокаций ($\sim 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) и соответственно субмикроскопическое среднее расстояние между дислокациями ($\sim 10 \text{ nm} \ll l$) подавляет процессы зарождения дислокаций и, следовательно, формирование полос макролокализованной деформации. Пластическая деформация в таких „стесненных“ условиях происходит за счет открепления дислокаций от стопоров (примесных атомов и дислокаций леса), перерезания преципитатов и переползания, учитывая высокую концентрацию деформационных вакансий и выделения вторичной фазы после интенсивной пластической деформации в сплавах системы Al–Mg [30,31]. Таким образом, из-за высокой плотности дислокаций в нагартованном сплаве АМг6-II полосы деформации не образуются. Неоднородность пластической деформации проявляется на уровне отдельных зерен за счет внутризеренного скольжения по перечисленным выше механизмам, что качественно объясняет деформационный рельеф в виде „апельсиновой корки“ и отсутствие развития пластических неустойчивостей на макроуровне — деформационных полос ПЛШ.

Оценим по порядку величины основные характеристики ударного индентирования: скорость деформации, скорость нагружения и время контактного взаимодействия. При упругом соударении индентора с плоским образцом считается, что соотношение между контактной силой P и сближением h остается при ударе таким же, как и в статическом случае. При индентировании призматическими или коническими инденторами эта зависимость квадратичная [32],

$$P(t) = kh^2(t), \quad (3)$$

где k — параметр, зависящий от упругих свойств материала и геометрии индентора, а временная зависимость сближения $h(t)$ есть решение уравнения динамики

$$m\ddot{h} = -kh^2. \quad (4)$$

После первого интегрирования уравнения (4) можно найти скорость внедрения индентора

$$v(t) = \sqrt{v_0^2 - \frac{2kh^3(t)}{3m}}. \quad (5)$$

Сближение h достигает максимального значения h_0 в момент времени $t = \tau_0$, когда скорость сближения

равна нулю. Отсюда

$$h_0 = \left(\frac{3mv_0^2}{2k} \right)^{1/3} = \left(\frac{3W}{k} \right)^{1/3}, \quad (6)$$

где $W = mv_0^2/2$ — кинетическая энергия индентора перед контактным ударом. Для вычисления продолжительности внедрения индентора при ударе τ_0 интегрируем выражение (5) от начала удара до максимального сближения

$$\tau_0 = \int_0^{h_0} \frac{dh}{\sqrt{v_0^2 - \frac{2kh^3}{3m}}}. \quad (7)$$

Для интегрирования удобно ввести безразмерную переменную $x = h/h_0$, тогда

$$\tau_0 = \frac{h_0}{v_0} \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{1-x^3}}, \quad (8)$$

и, вычисляя интеграл через гамма-функцию, получим

$$\tau_0 = \frac{h_0 \sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{4}{3}\right)}{v_0 \Gamma\left(\frac{5}{6}\right)} \approx 1.40218 \frac{h_0}{v_0}. \quad (9)$$

Исключая постоянную k из формул (3) и (5), получим соотношение между кинетической энергией индентора и максимальной силой удара

$$P_{\max} = kh_0^2 = 3W/h_0. \quad (10)$$

Сравним полученные формулы с литературными данными. В [33] на основе теоретических и экспериментальных исследований по упругопластическому удару жесткого индентора с углом при вершине от 50 до 150° о пластически деформируемое полупространство получены оценки времени τ_0 и максимальной силы P_{\max} удара

$$\tau_0 = 1.42h_{pl}/v_0, \quad (11)$$

$$P_{\max} \approx 1.34mv_0^2/h_{pl} = 2.68W/h_{pl}, \quad (12)$$

которые хорошо согласуются с полученными формулами (9) и (10), если положить максимальное сближение равным глубине пластического отпечатка h_{pl} , т.е. $h_0 \approx h_{pl}$.

Для количественных оценок примем, что согласно данным боковой съемки начальная скорость индентора $v_0 \approx 1$ м/с, поэтому $W = mv_0^2/2 = 2 \cdot 10^{-3}$ Дж, где $m = 4$ г — масса индентора; время сближения $\tau_0 \approx 50 \mu\text{s}$ по данным видеосъемки и измерений сигнала АЭ, а типичное значение диагонали отпечатка после ударного контакта $d \approx 200 \mu\text{m}$. Учитывая, что глубина отпечатка связана с его диагональю $h_{pl} = d/(2\sqrt{2} \operatorname{tg}(\alpha/2)) \approx d/7 \approx 30 \mu\text{m}$, где $\alpha = 136^\circ$, получим из формул (11) и (12) оценку времени сближения при ударе $\tau_0 \approx 42 \mu\text{s}$, которая хорошо согласуется

с экспериментом ($\sim 50 \mu\text{s}$), и оценку максимальной силы удара $P_{\max} \approx 180$ Н.

Полученные данные исследований *in situ* динамики и геометрии деформационных полос в ходе ударного индентирования сравнивали с результатами компьютерного моделирования распределения поля напряжений и деформаций при ударном взаимодействии индентора с поверхностью алюминиевого сплава, деформируемого одноосным растяжением выше условного предела текучести. Принималось, что распределение напряжений соответствует статическому случаю, поскольку время запаздывания $\delta t = w/c \approx 0.2 \mu\text{s}$ значительно меньше времени сближения $\delta t \ll \tau_0$ (здесь $c \approx 3$ км/с — скорость звука). Моделирование проводилось с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics с использованием модуля Solid mechanics и метода Contact Pairs. В данной модели, основанной на критерии пластичности Мизеса [34], принималось, что при растягивающем напряжении $\sigma = 250$ МПа фронтальная поверхность образца (3×6 мм) подвергалась воздействию четырехгранной пирамиды с углом при вершине 136° с линейно возрастающей силой в течение $50 \mu\text{s}$ до максимального значения $P_{\max} = 180$ Н. Функциональная связь между деформацией и напряжением задавалась с помощью оцифрованной кривой нагружения $\varepsilon(\sigma)$ на рис. 1.

На рис. 7, а представлено распределение поля пластических деформаций $\Delta\delta(x, y)$ на противоположной от индентора поверхности образца в момент максимального сближения, где $\Delta\delta(x, y) = \delta(x, y) - \delta_0$ — приращение относительной деформации, вызванное ударом индентора, $\delta(x, y)$ — деформационное поле на противоположной поверхности образца, δ_0 — однородное поле деформации при напряжении $\sigma = 250$ МПа перед ударом индентора. Видно, что наиболее интенсивная деформация происходит в направлениях максимальных касательных напряжений, сопряженных по схеме креста, составляющих с осью растяжения углы $54^\circ 44'$ и $125^\circ 46'$ [16], соответственно, что хорошо согласуется с геометрией сопряженных полос деформации в сплаве АМгб-I (рис. 7, б) и с шестидесятиградусным сектором, покрытым „апельсиновой коркой“, в сплаве АМгб-II (рис. 7, с), не демонстрирующем эффект ПЛШ.

Оценим максимальные значения динамической твердости $H_{Vd} = 1.854P_{\max}/d^2$, скорости нагружения $\dot{\sigma}_{\text{imp}} = P_{\max}/(S\tau_0)$, где $S = \frac{1}{2}d^2/\sin(\alpha/2)$ — условная площадь боковой поверхности отпечатка, и средней скорости деформации $\dot{\varepsilon}_{\text{imp}} = \langle h^{-1}dh/dt \rangle \approx v_0/h_0$. Учитывая полученные выше значения $v_0 \approx 1$ м/с, $\tau_0 \approx 42 \mu\text{s}$, $P_{\max} = 180$ Н, $d \approx 200 \mu\text{m}$, $h_0 \approx 30 \mu\text{m}$, получим оценки максимальной динамической твердости $H_{Vd} \approx 8.4$ ГПа, которая на порядок превышает статическую твердость сплава АМгб-I $H_{Vst} \approx 800$ МПа, а также оценку максимальной скорости нагружения $\dot{\sigma}_{\text{imp}} \approx 2 \cdot 10^5$ ГПа/с и среднюю скорость деформации $\dot{\varepsilon}_{\text{imp}} \approx 3 \cdot 10^4$ с⁻¹.

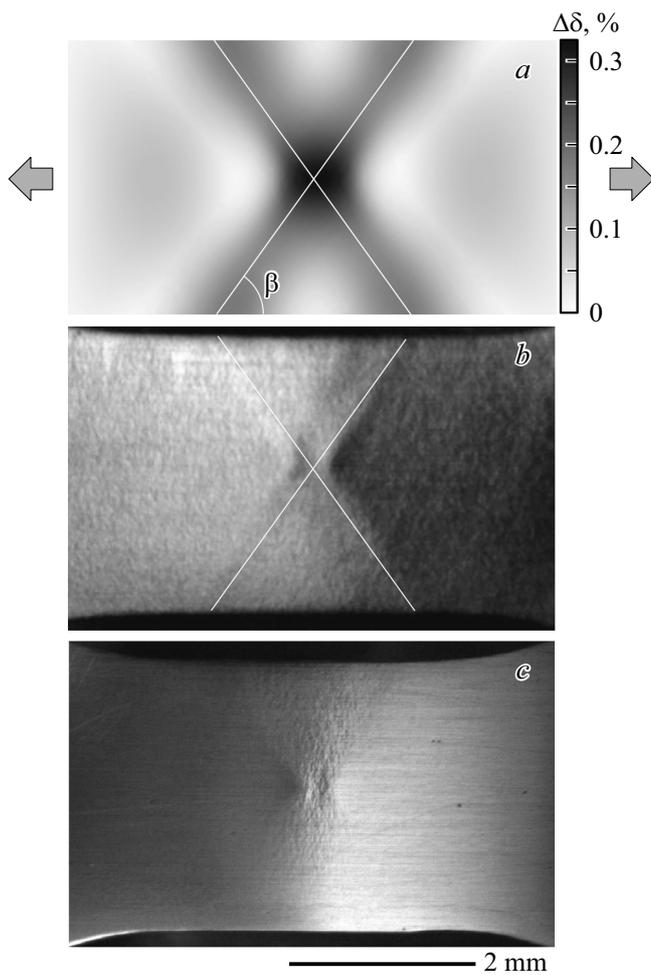


Рис. 7. Деформационное поле на противоположной относительно удара поверхности в условиях одноосного растяжения выше условного предела текучести: *a*) полученное методом компьютерного моделирования; *b* и *c*) полученные экспериментально в сплавах АМг6-I и АМг6-II соответственно. Направления максимальных касательных напряжений, сопряженных по схеме креста, обозначены на рисунках *a* и *b*. $\beta = \arctg \sqrt{2} = 54^\circ 44'$ [16].

Применительно к этой области скоростей деформации и нагружения в работе [35] предложена модель инкубационного времени, основанная на концепции „дислокационного голодания“ в условиях высокоскоростной одноосной деформации (см. также [36]) и эрозийного разрушения [37], которая может быть применена и в рассматриваемом случае, представляющем пример высокоскоростной локальной деформации с динамическими характеристиками, значительно превышающими статические.

Следует отметить, что минимальная плотность потока энергии, сообщенной материалу при ударном индентировании $F = W/(A\tau_0) \approx (2-3) \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$, где $A = d^2/2$ — площадь проекции конечного отпечатка, сопоставима с плотностью потока лазерного излучения при импульсном лазерном „уколе“ поверхности сплава

АМг6, вызывающее образование полос деформации [11]. При эрозийном изнашивании поверхности энергия удара индентора сравнима с энергией высокоскоростной частицы со скоростью 250 m/s (900 km/h), плотностью $\sim 3 \text{ g/cm}^2$ и размером около 0.3 mm, типичной, например, для вулканического пепла [38], в условиях контактного взаимодействия с обшивкой летательного аппарата.

5. Заключение

Экспериментально исследовались деформационный и акустический отклики на ударное индентирование поликристаллического алюминий-магниевого сплава АМг6, деформируемого одноосным растяжением выше условного предела текучести. Исследовались образцы в двух структурных состояниях: рекристаллизованном (АМг6-I) с исходной плотностью дислокаций $\sim 10^8 \text{ cm}^{-2}$ и нагартованном (АМг6-II) с плотностью дислокаций $\sim 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. В отсутствие ударного воздействия образцы АМг6-I демонстрировали прерывистую деформацию Портевена–Ле Шателье и полосообразование, а образцы АМг6-II деформируются без скачков и деформационных полос, за исключением стадии предразрушения.

Основные результаты можно разделить на две группы, связанные с динамическим и нелинейным откликами на ударное индентирование. К первой группе относятся следующие:

- пиковая динамическая твердость, более чем на порядок превышающая статическую для сплава АМг6-I и почти в 7 раз для сплава АМг6-II, пиковые скорости роста напряжения $\sim 2 \cdot 10^5 \text{ GPa/s}$ и скорости локальной деформации $\sim 3 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$ относят ударное индентирование к динамическим эффектам макропластической деформации типа „динамического зуба текучести“ и другим инерционным факторам динамики дефектов;

- в сплаве АМг6-I, помимо пластического отпечатка, ударное индентирование образца, деформируемого в условиях одноосного растяжения, вызывает развитие макроскачка деформации на кривой нагружения за счет формирования и распространения деформационных полос ПЛШ. В первые десятки микросекунд под индентором зарождаются и распространяются через сечение образца две полосы макролокализованной деформации в сопряженных направлениях максимальных касательных напряжений. Затем, после контактного удара, границы этих полос генерируют вторичные полосы, которые вызывают развитие деформационного скачка амплитудой несколько процентов. Магистральная трещина, как установлено, всегда распространяется по одной из сопряженных полос, зародившихся под индентором.

Сплав АМг6-I, помимо эффекта ПЛШ, демонстрирует нелинейные деформационный и акустический отклики на ударное воздействие, которые образуют вторую группу явлений:

— деформационный отклик носит пороговый и множественный характер: амплитуда индуцированного удара скачка деформации сильно нелинейно зависит от момента нанесения удара относительно начала плато на ступенчатой кривой нагружения. Множественный характер проявляется в том, что одиночный удар индентора длительностью $\sim 50\text{--}100\ \mu\text{s}$ является триггером зарождения и распространения порядка и более десятка деформационных полос ПЛШ в течение около $\sim 1\ \text{s}$ после нанесения удара, т.е. в $\sim 10^4$ раз большей длительности ударного воздействия;

— силовой и акустический отклики затухают не экспоненциально, как в линейных системах, а демонстрируют более сложное поведение в виде последовательных скачков напряжения, синхронизированных с всплесками сигнала АЭ, которые отвечают формированию деформационных полос.

В сплаве АМг6-П, который не демонстрирует эффект ПЛШ, ударное индентирование не вызывает появления деформационных полос и скачков на деформационной кривой. Таким образом, в работе показано, что полосы макролокализованной деформации представляют латентный объемный вид эрозионного повреждения, который снижает долговечность сплава, демонстрирующего эффект ПЛШ, и может вызвать его внезапное разрушение.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-22-00692) на оборудовании Центра коллективного пользования Тамбовского государственного университета им. Г.Р. Державина.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] L.P. Kubin, C. Fressengeas, G. Ananthkrishna. *Dislocat. Solids* **11**, 101 (2002).
- [2] E. Rizzi, P. Hahner. *Int. J. Plast.* **20**, 1, 121 (2004).
- [3] A.J. Yilmaz. *Sci. Technol. Adv. Mater.* **12**, 6, 063001 (2011).
- [4] A.W. McReynolds. *Metals Transact.* **1**, 32 (1949).
- [5] K. Chihab, Y. Estrin, L.P. Kubin, J. Vergnol. *Scripta Metallurg.* **21**, 2, 203 (1987).
- [6] W. Tong, H. Tao, N. Zhang, L.G. Hector. *Scripta Mater.* **53**, 1, 87 (2005).
- [7] G.F. Xiang, Q.C. Zhang, H.W. Liu, X.P. Wu, X.Y. Ju. *Scripta Mater.* **56**, 8, 721 (2007).
- [8] М.М. Криштал, А.К. Хрусталева, А.В. Волков, С.А. Бородин. *Докл. РАН* **426**, 1, 36 (2009).
- [9] А.А. Шибков, М.А. Lebyodkin, Т.А. Lebedkina, М.Ф. Gasanov, А.Е. Zolotov, А.А. Denisov. *Phys. Rev. E* **102**, 4, 043003 (2020).
- [10] А.А. Шибков, А.А. Мазилкин, С.Г. Протасова, Д.В. Михлик, А.Е. Золотов, М.А. Желтов, А.В. Шуклинов. *Деформация и разрушения материалов* **6**, 12 (2008).
- [11] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.Ф. Гасанов, М.А. Желтов, К.А. Проскуряков. *ФТТ* **60**, 9, 1632 (2018). [А.А. Shibkov, А.Е. Zolotov, М.Ф. Gasanov, М.А. Zheltov, К.А. Proskuryakov. *Phys. Solid State* **60**, 9, 1674 (2018).]
- [12] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, С.С. Кочегаров, А.А. Денисов. *ФТТ* **59**, 1, 96 (2017). [А.А. Shibkov, А.А. Denisov, А.Е. Zolotov, S.S. Kochegarov. *Phys. Solid State* **59**, 1, 98 (2018).]
- [13] J. Weiss, J.-R. Grasso, M.-C. Miguel, A. Vespignani, S. Zapperi. *Mater. Sci. Eng. A* **309–310**, 360 (2001).
- [14] J. Weiss, F. Louchet. *Scripta Mater.* **54**, 5, 747 (2006).
- [15] А.А. Шибков, М.А. Zheltov, М.Ф. Gasanov, А.Е. Zolotov, А.А. Denisov, М.А. Lebyodkin. *Mater. Sci. Eng. A* **772**, 138777 (2020).
- [16] Р. Хилл. *Математическая теория пластичности*. Гостехиздат, М. (1956). 408 с. [R. Hill. *The Mathematical Theory of Plasticity*. Clarendon Press, Oxford (1950).]
- [17] А.А. Шибков, М.Ф. Гасанов, М.А. Zheltov, А.Е. Zolotov, В.И. Ivolgin. *Int. J. Plast.* **86**, 37 (2016).
- [18] В.Е. Панин, Л.С. Деревягина, Е.Е. Дерюгин, А.В. Панин, С.В. Панин, Н.А. Антипина. *Физ. мезомех.* **6**, 6, 97 (2003).
- [19] Л.С. Деревягина, В.Е. Панин, А.И. Гордиенко. *Физ. мезомех.* **10**, 4, 59 (2007).
- [20] D.A. Hughes. *Acta Metallurg. Mater.* **41**, 5, 1421 (1993).
- [21] J. Gubicza, N.Q. Chinh, Z. Horita, T.G. Langdon. *Mater. Sci. Eng. A* **387–389**, 55 (2004).
- [22] G. Horváth, N.Q. Chinh, J. Gubicza, J. Lendvai. *Mater. Sci. Eng. A* **445–446**, 186 (2007).
- [23] A.M. Turing. *Phil. Trans. Roy. Soc. London. A* **237**, 641, 37 (1952).
- [24] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. *УФН* **160**, 9, 2 (1990). [B.S. Kerner, V.V. Osipov. *Phys.-Usp.* **33**, 9, 679 (1990).]
- [25] H. Neuhäuser. *Dislocation in Solids / Ed. F.R.N. Nabarro*. North Holland Company **6**, 319 (1983).
- [26] P. Hähner, A. Ziegenbein, E. Rizzi, H. Neuhäuser. *Phys. Rev. B* **65**, 13, 134109 (2002).
- [27] Р. Хоникомб. *Пластическая деформация металлов*. Мир, М. (1972). 408 с. [R.W.K. Honeycombe. *Plastic Deformation of Metals*. Nature (1932).
- [28] Дж. Хирт, И. Лоте. *Теория дислокаций*. Атомиздат, М. (1972). 600 с. [J.P. Hirth, J. Lothe. *Theory of Dislocations*. Cambridge University Press (1968).]
- [29] А.А. Шибков, А.Е. Золотов. *Письма в ЖЭТФ* **90**, 5, 412 (2009). [А.А. Shibkov, А.Е. Zolotov. *JETP Lett.* **90**, 5, 370 (2009).]
- [30] М.Ю. Мурашкин, А.Р. Кильмаметов, Р.З. Валиев. *ФММ* **106**, 1, 93 (2008). [M.Yu. Murashkin, A.R. Kil'mametov, R.Z. Valiev. *Phys. Met. Metallography* **106**, 1, 90 (2008).]
- [31] М.В. Маркушев, М.Ю. Мурашкин. *ФММ* **98**, 2, 116 (2004). [M.V. Markushev, M.Yu. Murashkin. *Phys. Met. Metallography* **98**, 2, 221 (2004).]
- [32] Ю.В. Колесников, Е.М. Морозов. *Механика контактного разрушения*. ЛКИ, М. (2012). 224 с.
- [33] Г.С. Батуев, Ю.В. Голубков, А.К. Ефремов, Н.И. Малинин. *Инженерные методы исследования ударных процессов*. Машиностроение, М. (1977). 240 с.

- [34] Б. Поль. Макроскопические критерии пластического течения и хрупкого разрушения. В кн.: Разрушение. Т. 2. Математические основы теории разрушения / Под ред. Г. Либовица. Мир, М. (1975). С. 336. [B. Paul. Macroscopic Criteria for Plastic Flow and Brittle Fracture. In: Fracture — A Treatise. V. 2. / Ed. H. Liebowitz. Academic Press, London (1968).]
- [35] N. Selyutina, E.N. Borodin, Y. Petrov, A.E. Mayer. *Int. J. Plast.* **82**, 97 (2016).
- [36] Н.С. Селютина, Ю.В. Петров. *ФТТ* **60**, 2, 240 (2018). [N.S. Selyutina, Yu.V. Petrov. *Phys. Solid State* **60**, 2, 244 (2018).]
- [37] А.Д. Евстифеев, Ю.В. Петров, Н.А. Казаринов, Р.Р. Валиев. *ФТТ* **60**, 12, 2320 (2018). [A.D. Evstifeev, Yu.V. Petrov, N.A. Kazarinov, R.R. Valiev. *Phys. Solid State* **60**, 12, 2363 (2018).]
- [38] F. Prata, B. Rose. Volcanic Ash Hazards to Aviation. In: The encyclopedia of volcanoes. / Ed. H. Sigurdsson. 2nd ed. Academic Press (2015). Ch. 52. P. 911.

Редактор Е.В. Толстякова