

07,01

## Исследование *in situ* механизма распространения деформационных полос Портевена—Ле Шателье

© А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.Ф. Гасанов, А.А. Денисов, Р.Ю. Кольцов

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

E-mail: shibkovaleks@mail.ru

Поступила в Редакцию 21 марта 2023 г.

В окончательной редакции 21 марта 2023 г.

Принята к публикации 28 марта 2023 г.

На основе анализа данных высокоскоростной видеосъемки распространяющихся деформационных полос в алюминий-магний-сплав установлено, что подвижная полоса деформации содержит избыток дислокаций одного механического знака, а основным механизмом распространения фронта локализованной пластической деформации вдоль оси образца является эстафетная передача скольжения в антипараллельном направлении для релаксации изгибающего момента, создаваемого первичной полосой деформации. Показано, что „мгновенная“ скорость пластической деформации в течение  $\sim 1$  ms в растущей полосе достигает значения  $\sim 10^3$  s<sup>-1</sup>, сравнимого со скоростью деформации при ударных испытаниях.

**Ключевые слова:** прерывистая деформация, полосообразование, дислокации, механический заряд, алюминий-магний-сплав.

DOI: 10.21883/FTT.2023.05.55500.39

### 1. Введение

Многие конструкционные металлы и сплавы проявляют прерывистую деформацию, которая выражается в появлении повторяющихся скачков напряжения или деформации при испытании с заданной скоростью деформирования ( $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$ ) или нагружения ( $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ ), соответственно — эффект Портевена—Ле Шателье (ПЛШ) [1]. Макроскопические скачки напряжения или деформации сопровождаются локализацией пластической деформации в полосах. Природа их возникновения и распространения длительное время является предметом дискуссий [2–5]. Для изучения механизмов спонтанного формирования деформационных полос необходима информация о самых ранних стадиях их эволюции, включая зарождение, особенности поперечного роста, динамическое взаимодействие с другими полосами и поверхностью и т.д., что требует существенного увеличения быстродействия и пространственного разрешения методов исследования *in situ* динамики деформационных полос ПЛШ. За последние три десятилетия временное разрешение методов увеличилось более, чем на три порядка — от 25 до 50000 кадров в секунду (frames per second, fps), а пространственное — почти на порядок (от  $\sim 100$  до  $\sim 10$   $\mu\text{m}/\text{pixel}$ ) [6–10]. Это дало возможность обнаружить зародышевые полосы, растущие поперек образца в условиях одноосной деформации, выявить стадию саморазгона полосы, измерить максимальные скорости вершины полос и т.д. В последнее время появились работы, которые рассматривали первую миллисекунду эволюции деформационной полосы как самостоятельный объект исследования, используя видеосъемку

со скоростью не менее 5000 fps [7–11]. В настоящей работе исследуются особенности динамики зародышевых полос в плоских образцах с ростом отношения ширины и толщины, особенно в очень тонких образцах, где полосы деформации шириной несколько сотен микрон могут проявлять внутреннюю структуру, связанную с механизмом взаимодействия соседних слоев материала в полосе. Целью настоящей работы является исследование механизма распространения деформационных полос ПЛШ на основе анализа данных высокоскоростной видеосъемки динамики полос на примере алюминий-магниевого сплава АМг6, демонстрирующего прерывистую деформацию и полосообразование при комнатной температуре.

### 2. Методика

Материалом исследования является промышленный алюминий-магний-сплав АМг6: Al — 6.15% Mg — 0.65% Mn — 0.25% Si — 0.21% Fe — 0.1% Cu — 0.12% Zn (wt.%). Плоские образцы различной толщины  $w_0$  от 100 до 500  $\mu\text{m}$  в форме двусторонних лопаток размерами рабочей части  $S_0 = 6 \times 3$  mm вырезали машинным способом из холоднокатаной полосы вдоль направления прокатки. Перед испытанием образцы отжигали при 450°C в течение 1 h и закаливали на воздухе. После термообработки средний размер зерна составил около 10  $\mu\text{m}$ . Результаты исследования микроструктуры сплава и комплекс высокоскоростных методов регистрации деформации и нагрузки, а также схема растяжения описаны в [12–14].

Динамику и морфологию распространяющихся полос деформации исследовали *in situ* с помощью видеосъемки поверхности деформируемого образца в косом освещении со скоростью 5000 fps с помощью высокоскоростной цифровой видеокамеры FASTCAM Mini UX50/100 (Photron). Обработка видеофильма состояла в вычитании с помощью компьютерной программы последовательных во времени кадров видеофильма. Такой метод обработки изображений позволяет выделять контуры подвижных объектов (деформационных полос и трещин), движущихся со скоростью выше пороговой. Подробно методика нагружения и регистрация деформационных полос описана в [14].

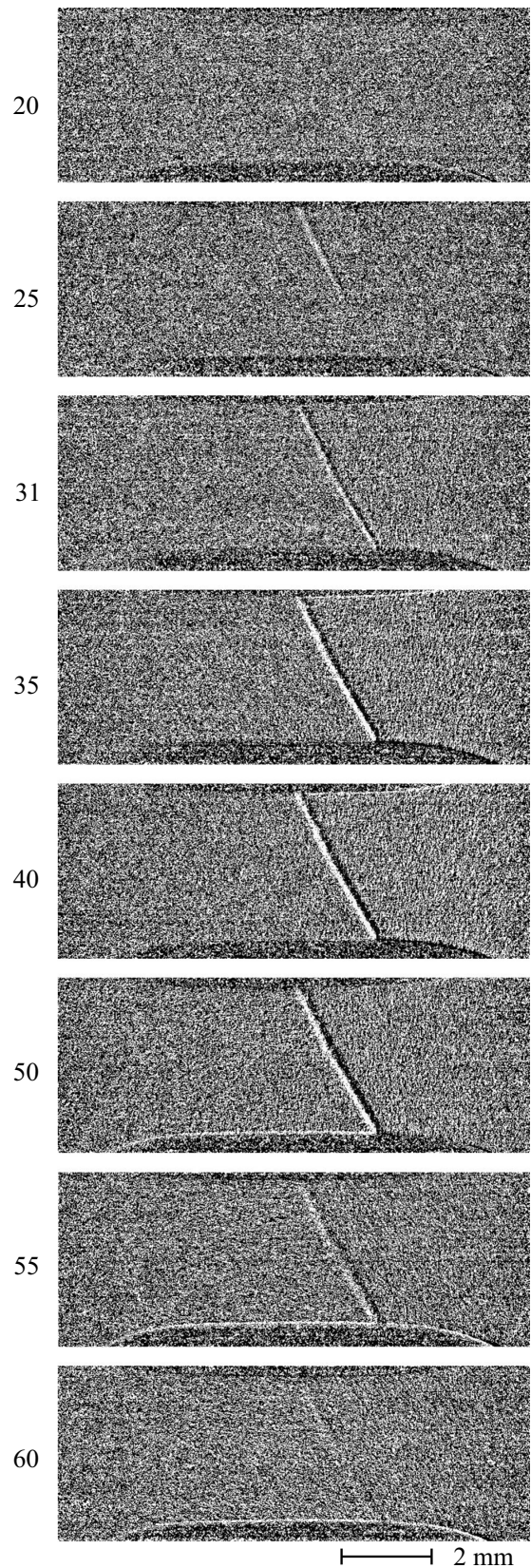
### 3. Результаты и обсуждение

Результаты исследования *in situ* динамики и морфологии деформационных полос в плоских образцах различной толщины показывают, что ширина деформационных полос  $w_b$  на активной стадии их развития сопоставима с толщиной образца,  $w_b \approx 1.5w_0$ . Поэтому с уменьшением толщины образца пропорционально уменьшается ширина полосы, и при толщинах менее  $200 \mu\text{m}$  начинает проявляться внутренняя структура полосы (регистрируемая используемым теневым методом исследования динамики полос), связанная с ее расщеплением, искривлением траектории и т.д. Изучение явлений, связанных с искривлением полос, представляется важным, т.к. изгиб образца с движущейся деформационной полосой непосредственно связан с избытком дислокаций одного механического знака в структуре полосы, который может быть оценен из данных высокоскоростной видеосъемки. Ниже приведены основные результаты исследования „*in situ*“ ранних стадий эволюций индивидуальных полос деформации в образцах толщиной  $120 \mu\text{m}$ .

На рис. 1 представлен фрагмент видеофильма зарождения и роста полосы деформации, которая меняет угол распространения поперек образца. После зарождения на боковой поверхности образца полоса сначала распространяется под углом  $\varphi_1 = 60^\circ$  к оси растяжения (кадр 25), близким к направлению максимальных касательных напряжений (для изотропного пластически деформируемого материала этот угол составляет  $54^\circ 44'$  [15]). Затем в центральной части образца угол между полосой и осью растяжения уменьшается до  $\varphi_2 = 55^\circ$  (кадры 35–50), так что угол поворота полосы  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$  составляет около  $5^\circ$  (рис. 2). Поворот направления скольжения связан с избытком дислокаций одного механического знака известным соотношением [16]:

$$\bar{\rho}_{\text{exc}} = \frac{1}{bR} = \frac{\Delta\varphi}{bl_b \cos \varphi}, \quad (1)$$

где  $\bar{\rho}_{\text{exc}} = \bar{\rho}_+ - \bar{\rho}_-$  — разность средних плотностей дислокаций разных механических знаков,  $b$  — величина



**Рис. 1.** Фрагмент видеофильма развития искривленной полосы деформации в плоском образце сплава АМг6 с размерами рабочей части  $6 \times 3 \times 0.12 \text{ mm}$ . Скорость видеосъемки 5000 fps. Числа — номера кадров.

вектора Бюргера,  $R$  — радиус кривизны полосы деформации,  $l_b = \Delta\varphi R$  — ее длина,  $\varphi = (\varphi_1 + \varphi_2)/2$  — угол между нейтральной линией и полосой деформации. В выражении (1) предполагается, что дислокации равномерно распределены по кристаллу. Связь между  $\bar{\rho}_{\text{exc}}$  и избытком дислокаций одного механического знака в макролокализованной полосе  $\rho_b^{\text{exc}}$  определяется очевидным соотношением (см. [17]):

$$\rho_b^{\text{exc}} = \bar{\rho}_{\text{exc}} V_0 / V_b, \quad (2)$$

где  $V_0$  — объем рабочей части образца,  $V_b$  — объем полосы деформации. Поскольку в плоских образцах полосы ПЛШ сквозные, как установлено видеосъемкой с помощью двух зеркал [18], то  $V_b = S_b w_0$ , где  $S_b$  — площадь полосы, и  $V_0 / V_b = S_0 / S_b = S_0 / l_b w_b$ , и окончательно получим

$$\rho_b^{\text{exc}} = \frac{\Delta\varphi S_0}{b l_b^2 w_b \cos \varphi}. \quad (3)$$

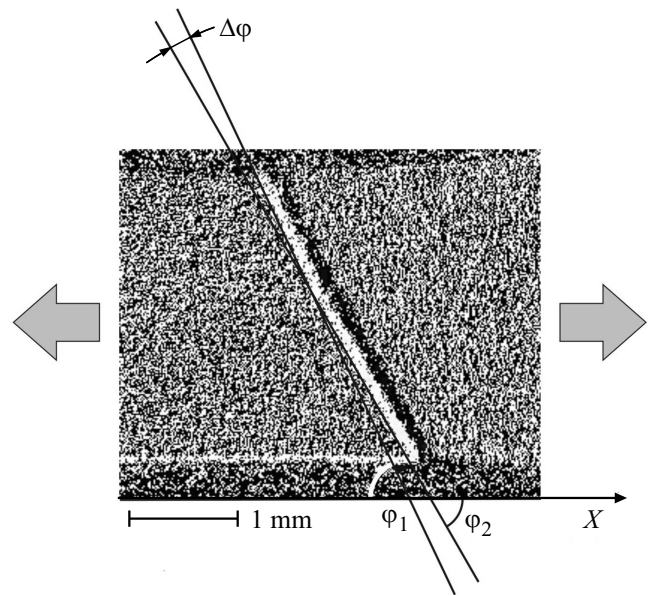
Подставляя типичные значения экспериментальных данных:  $\Delta\varphi = 5^\circ = 8.72 \cdot 10^{-2} \text{ rad}$ ,  $S_0 = 6 \times 3 = 18 \text{ mm}^2$ ,  $w_b \approx 200 \mu\text{m}$ ,  $l_b \approx 4 \text{ mm}$ ,  $b = 0.286 \text{ nm}$ ,  $\varphi \approx 60^\circ$ ,  $\cos \varphi \approx \sqrt{3}/2$ , получим оценку избыточной плотности подвижных дислокаций одного механического знака  $\rho_b^{\text{exc}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ .

Зарождение и развитие полосы деформации сопровождается скачком разгрузки механической системы машина—образец. После остановки полосы ее неподвижные дислокации плотностью  $\rho_+ + \rho_-$  становятся стопорами движению дислокаций и дают вклад в тейлоровское упрочнение материала на величину порядка амплитуды скачка напряжения

$$\Delta\sigma = \alpha m b G \cdot \sqrt{\rho_+ + \rho_-}, \quad (4)$$

где  $m$  — фактор Тейлора (для ГЦК-поликристаллов  $m = 3.08$  [19]),  $\alpha$  — постоянная междислокационного взаимодействия, определяющая сопротивление сдвигу, которая зависит от дислокационной структуры; для сплавов системы Al—Mg с содержанием магния 3–6%  $\alpha = 0.36\text{--}0.45$  [20],  $G = 28 \text{ GPa}$  — модуль сдвига. Из формулы (4) следует оценка плотности остановившихся дислокаций в полосе  $\rho_b = \rho_+ + \rho_- = (\Delta\sigma / \alpha m b G)^2$ . Подставляя типичные значения для сплава АМг6  $\alpha = 0.45$ ,  $\Delta\sigma \approx 15\text{--}20 \text{ MPa}$ , получим оценку  $\rho_b \approx (2\text{--}3.2) \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ , которая лучше чем по порядку величины совпадает с плотностью избытка дислокаций одного знака, т.е.  $\rho_b \approx \rho_{\text{exc}}$ ; отсюда  $\rho_+ \gg \rho_-$ .

Таким образом, полоса деформации, распространяющаяся поперек образца в направлении максимальных касательных напряжений, содержит подвижные дислокации преимущественно одного механического знака плотностью  $\rho_b \approx 3 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ , что позволяет сделать оценку скорости пластической деформации в полосе  $\dot{\epsilon}_b$  на стадии незавершенного роста, которая характеризуется скоростью вершины  $v_t$  и скоростью бокового роста  $v_b$ ,



**Рис. 2.** Изменение направления роста полосы деформации (кадр 50 на рис.1).  $\varphi_1 = 55^\circ$  и  $\varphi_2 = 60^\circ$  — начальный и конечный угол наклона деформационной полосы к оси растяжения  $X$ .

полосы [9]. Полагая, что скорость дислокаций в полосе  $v_d$  не ниже скорости вершины полосы, т.е.  $v_d \approx v_t$ , получим нижнюю оценку  $\dot{\epsilon}_b$ :

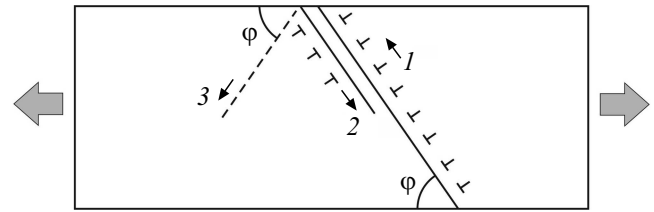
$$\dot{\epsilon}_b \approx b \rho_b v_t. \quad (5)$$

В тонких образцах ( $w_0 \approx 100\text{--}200 \mu\text{m}$ ) при напряжениях  $\sigma \approx 200\text{--}250 \text{ MPa}$  средняя скорость вершины составляет  $v_t \approx (1\text{--}2) \text{ m/s}$ , что дает оценку скорости пластической деформации в полосе  $\dot{\epsilon}_b \approx (0.86\text{--}1.7) \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$  в течение первой миллисекунды ее роста и соответственно оценку пика относительной деформации в полосе  $\epsilon_b \approx 1$ . Столь высокие значения локальных (в пространстве и во времени) деформаций и скоростей деформации характерны для ударных испытаний [21].

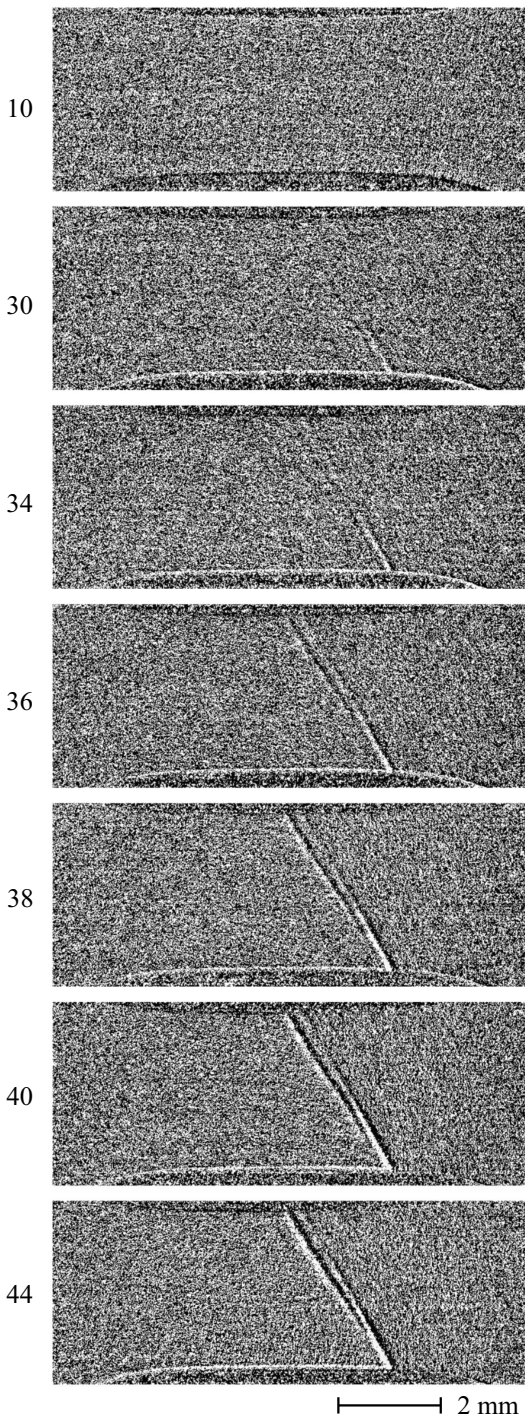
Важно отметить, что незавершенная (зародышевая) полоса из-за избытка дислокаций одного знака представляет механический заряд — источник дальнедействующих упругих полей напряжений в материале. Этот механический заряд создает изгибающий момент в образце, который может быть скомпенсирован за счет зарождения и распространения деформационной полосы с избытком дислокаций противоположного механического знака. На рис. 3 представлен фрагмент видеofilма, демонстрирующий такой механизм.

Первичная полоса зарождается на боковой поверхности (кадр 30, нижняя часть снимка) и распространяется со скоростью  $\sim 1 \text{ m/s}$ . Ширина полосы к моменту выхода на противоположную боковую поверхность составляет около  $200 \mu\text{m}$ . По мере приближения к противоположной боковой поверхности полоса деформации своим

дальнодействующим упругим полем запускает дислокационный источник, который генерирует деформационную полосу в антипараллельном направлении. Вторичная полоса содержит избыток дислокаций противоположного знака (поскольку движется в противоположном направлении при том же приложенном напряжении) и компенсирует изгибающий момент, созданный пер-



**Рис. 4.** Схема эстафетной передачи сдвига, обусловленной релаксацией изгибающего момента: 1 — первичная полоса; 2 — вторичная полоса, распространяющаяся антипараллельно первичной; 3 — сопряженное направление максимальных касательных напряжений.



**Рис. 3.** Фрагмент видеопленки, демонстрирующего „переизлучение“ полосы поверхностью, когда вторичная полоса распространяется антипараллельно первичной полосе. Скорость видеосъемки — 5000 fps.

вичной полосой. Схема этого процесса представлена на рис. 4, где полосы, содержащие избыток одного знака (механические заряды), растущие в поликристаллическом материале, показаны условно в виде плоских скоплений одноименных дислокаций.

По мере развития вторичной полосы расстояние от первичной полосы сокращается от  $\sim 400$  до  $\sim 250 \mu\text{m}$  на дистанции около 4 mm (рис. 3, кадры 36–44), что можно объяснить притяжением дислокаций противоположных знаков, принадлежащих вторичной и первичной полосам. Очевидно, аннигиляция этих дислокаций маловероятна, так как характерное расстояние между ними в десятки раз превышает средний размер зерна и, следовательно, вероятность взаимодействия подвижных дислокаций с „непрозрачными“ границами зерен (с неблагоприятным фактором Шмида) очень велика.

Таким образом, с помощью экспериментов *in situ* установлено, что основным макроскопическим механизмом расширения деформационных полос является эстафетная передача скольжения в антипараллельном направлении за счет генерирования поверхностным источником дислокаций вторичной полосы, содержащей избыток дислокаций противоположного знака, для релаксации изгибающего момента, создаваемого первичной полосой.

Среди обсуждаемых в литературе механизмов пространственной связи следует выделить механизм двойного поперечного скольжения (ДПС) винтовых дислокаций [22] и механизмы, связанные с активацией скольжения избыточным сдвиговым напряжением на фронте деформационной полосы [3]. Из-за сравнительно небольших значений высоты поперечного скольжения  $h_s \approx 1-10 \text{ nm}$  механизм ДПС способен объяснить тонкую структуру и скорость расширения линий и полос скольжения (микро- и мезоуровень) в металлах [17], но для понимания механизма передачи скольжения на расстояние в десятки и сотни микрон предпочтительными являются механизмы активации скольжения дальнодействующими полями напряжений.

Наиболее общей причиной возникновения избыточных напряжений на фронте полосы деформации является упругая аккомодация на границе между пластически деформируемым и недеформируемым слоями матери-

ала. В [18] показано, что различные теории градиентной пластичности дают одинаковую по порядку величины оценку ширины слоя сильно неоднородной пластической деформации — „ширины“ границы полосы — в котором сосредоточены избыточные напряжения,  $l \approx 10\text{--}20 \mu\text{m}$ . Избыточные напряжения в градиентном слое шириной  $l$  способствуют распространению вторичной полосы деформации. Альтернативный вариант релаксации изгибающего момента от первичной полосы, состоящий в формировании вторичной зародышевой полосы противоположного механического знака в сопряженном направлении (направлении 3 на рис. 4), очевидно, менее вероятен по сравнению с зародышевой полосой, растущей антипараллельно первичной полосе (направление 2 на рис. 4), поскольку в последнем случае: а) реализуется наиболее эффективное экранирование дальнедействующих полей напряжений, создаваемых первичной полосой; б) избыточные сдвиговые напряжения на границе первичной полосы создают благоприятные условия для распространения вторичной полосы.

#### 4. Заключение

Проведены высокоскоростные исследования ранней стадии формирования полос деформации Портевена–Ле Шателъе в плоских образцах толщиной  $\sim 100 \mu\text{m}$  алюминий-магниевого сплава. По обнаруженной кривизне направления роста зародышевой полосы сделана оценка плотности избытка дислокаций одного механического знака  $\sim 3 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$  и „мгновенной“ в течение  $\sim 1 \text{ ms}$  пиковой скорости пластической деформации в полосе, которая достигает величины  $\sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ , сопоставимой со скоростью деформации при ударных испытаниях. Выявлен „строчный“ механизм расширения полос, состоящий в том, что выход на поверхность первичной зародышевой полосы запускает процесс формирования вторичной полосы в антипараллельном направлении для компенсации изгибающего момента, создаваемого первичной полосой. Строчный механизм, таким образом, обеспечивает эстафетную передачу сдвиговой пластической деформации в соседние слои материала и отвечает за расширение завершенной полосы деформации.

#### Финансирование работы

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

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] Дж.Ф. Белл. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Ч. 2. Наука, М. (1984). 432 с. [J.F. Bell. *Mechanics of Solids*. Springer (1972). V. 2.]
- [2] P. Hahner, A. Ziegenbein, E. Rizzi, H. Neuhauser. *Phys. Rev. B* **65**, 13, 134109 (2002).
- [3] P. Hahner. *Scripta Metallurgica. Mater.* **29**, 9, 1171 (1993).
- [4] G. Ananthakrishna. *Dislocations in Solids / Eds F.R.N. Nabarro, J.P. Hirth* (2007). V. 13. P. 81.
- [5] A.J. Yilmaz. *Sci. Technol. Adv. Mater.* **12**, 6, 063001 (2011).
- [6] K. Chihab, Y. Estrin, L.P. Kubin, J. Vergnol. *Scripta Metallurgica* **21**, 2, 203 (1987).
- [7] W. Tong, H. Tao, N. Zhang, L.G. Hector Jr. *Scripta Materialia* **53**, 1, 87 (2005).
- [8] М.М. Криштал, А.К. Хрусталева, А.В. Волков, С.А. Бородина. Докл. РАН **426**, 1, 36 (2009). [М.М. Krishtal, A.K. Khrustaleva, A.V. Volkov, S.A. Borodina. *Dokl. Phys.* **54**, 5, 225 (2009).]
- [9] А.А. Шибков, М.А. Желтов, М.Ф. Гасанов, А.Е. Золотов, А.А. Денисов, М.А. Лебыодкин. *Mater. Sci. Eng. A* **772**, 138777 (2020).
- [10] А.А. Шибков, М.А. Лебыодкин, Т.А. Лебедкина, М.Ф. Гасанов, А.Е. Золотов, А.А. Денисов. *Phys. Rev. E* **102**, 4, 043003 (2020).
- [11] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.Ф. Гасанов, А.А. Денисов, Р.Ю. Кольцов, С.С. Кочегаров. ФТТ **64**, 11, 1603 (2022).
- [12] А.А. Шибков, А.А. Мазилкин, С.Г. Протасова, Д.В. Михлик, А.Е. Золотов, М.А. Желтов, А.В. Шуклинов. *Деформация и разрушение материалов* **5**, 24 (2008).
- [13] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, Д.В. Михлик, М.А. Желтов, А.В. Шуклинов, В.А. Аверков, А.А. Денисов. *Деформация и разрушение материалов* **8**, 23 (2009).
- [14] А.А. Шибков, М.Ф. Гасанов, М.А. Желтов, А.Е. Золотов, В.И. Иволгин. *Int. J. Plast.* **86**, 37 (2016).
- [15] Р. Хилл. Математическая теория пластичности. Гостехиздат, М. (1956). 408 с. [R. Hill. *The Mathematical Theory of Plasticity*. Clarendon Press, Oxford (1951).]
- [16] Ж. Фридель. Дислокации. Мир, М. (1967). 660 с. [J. Friedel. *Dislocations*. Elsevier (1964).]
- [17] H. Neuhauser. *Dislocation in Solids / Ed. F.R.N. Nabarro*. North Holland Company **6**, 319 (1983).
- [18] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов. ФТТ **52**, 11, 2223 (2010). [А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов. *Phys. Solid State* **52**, 11, 2376 (2010).]
- [19] U.F. Kocks. *Am. Soc. Mech. Eng. J. Eng. Mater. Tech* **98**, 1, 76 (1976).
- [20] Н.А. Конева, Э.В. Козлов. В сб.: Перспектив. материалы / Под ред. Д.Л. Мерсон. ТГУ, МИСиС, М. (2006). С. 267.
- [21] Н.С. Селютина, Ю.В. Петров. ФТТ **60**, 2, 240 (2018). [N.S. Selyutina, Yu.V. Petrov. *Phys. Solid State* **60**, 2, 244 (2018).]
- [22] V. Jeanclaude, C. Fressengeas. *Scripta Metallurgica* **29**, 9, 1177 (1993).

Редактор Е.В. Толстякова