



УДК 539.213:669.017

DOI 10.17073/0368-0797-2024-3-325-331

Оригинальная статья
Original article

ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ФРОНТОВ ПРИ СКАЧКООБРАЗНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЛЮДЕРСА В α -ЖЕЛЕЗЕ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Д. В. Орлова[✉], В. И. Данилов, В. В. Горбатенко,
Л. В. Данилова, А. В. Бочкарева

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/4)

✉ dvo@ispms.ru

Аннотация. При комнатной температуре деформация большинства ОЦК-металлов, которые содержат небольшое количество элементов внедрения, сопровождается образованием полосы Людерса и ее монотонным распространением на площадке текучести при растяжении. В рамках автоволновой концепции фронт полосы Людерса является автоволной переключения, которая реализует переход из метастабильного упруго деформируемого в стабильное пластически деформируемое состояние. Однако в температурном интервале синеломкости мягких сталей 423 – 510 К, когда имеет место взаимодействие атомов растворенного вещества с подвижными дислокациями, распространение полосы Людерса сопровождается прерывистым течением. В настоящей работе рассмотрены закономерности распространения фронтов Чернова-Людерса в АРМКО-железе в интервале температур от 296 до 503 К и скоростей деформирования от $6,67 \cdot 10^{-6}$ до $3,7 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Установлено, что в этих условиях может реализовываться как монотонная, так и дискретная кинетика движения фронтов. Независимо от характера движения, деформация Людерса и ширина фронта в течение всего процесса остаются неизменными. Локальная скорость деформации на фронте зависит от величины действующего напряжения, причем при монотонной кинетике она возрастает с напряжением по степенному закону, а при дискретной – по линейному закону. Данное различие обусловлено разными автоволновыми модами, которые при этом формируются. Монотонной кинетике соответствует автоволна переключения локализованной пластичности, а дискретной – автоволна возбуждения.

Ключевые слова: деформация Чернова-Людерса, фронты локализованной деформации, локальная скорость деформации, автоволны, локализованная пластичность

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, тема номер FWRW-2021-0011.

Для цитирования: Орлова Д.В., Данилов В.И., Горбатенко В.В., Данилова Л.В., Бочкарева А.В. Особенности кинетики деформационных фронтов при скачкообразной деформации Людерса в α -железе при повышенной температуре. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2024;67(3):325–331. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-3-325-331>

KINETICS OF DEFORMATION FRONTS DURING SERRATED LÜDERS DEFORMATION IN α -IRON AT HIGH TEMPERATURE

D. V. Orlova[✉], V. I. Danilov, V. V. Gorbatenko,
L. V. Danilova, A. V. Bochkareva

Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/4 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

✉ dvo@ispms.ru

Abstract. At room temperature, the deformation of most bcc metals, which contain a small amount of interstitial elements, is accompanied by the formation of a Lüders band and its monotonic propagation over the tensile yield area. Within the framework of the autowave concept, front of the Lüders band is a switching autowave, which realizes the transition from a metastable elastically deformable state to a stable plastically deformable state. However, in the temperature range of blue brittleness of mild steels of 423 – 510 K, when the interaction of atoms of the dissolved substance with mobile dislocations takes place, propagation of the Lüders band is accompanied by a discrete flow. The patterns of propagation of the Chernov-Lüders

fronts in ARMCO iron in the temperature range from 296 to 503 K and strain rates from $6.67 \cdot 10^{-6}$ to $3.7 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ are considered in this paper. It was established that under these conditions both monotonic and discrete kinetics of front movement can be realized. Regardless of the movement nature, the Lüders deformation and width of the front remain unchanged throughout the entire process. The local strain rate at the front depends on magnitude of the effective stress, and with monotonic kinetics it increases with stress according to an exponential law, and with discrete kinetics it increases according to a linear law. This difference is due to different autowave modes that are formed in this case. The autowave of localized plasticity switching corresponds to monotonic kinetics, and the autowave of excitation – to discrete kinetics.

Keywords: Chernov-Lüders deformation, deformation front, local strain rate, autowave, localized plasticity

Acknowledgements: The work was performed within the framework of the state task of the Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, subject No. FWRW-2021-0011.

For citation: Orlova D.V., Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Danilova L.V., Bochkareva A.V. Kinetics of deformation fronts during serrated Lüders deformation in α -iron at high temperature. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(3):325–331.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-3-325-331>

ВВЕДЕНИЕ

При комнатной температуре деформация большинства ОЦК-металлов, которые содержат небольшое количество элементов внедрения, сопровождается образованием полосы Чернова-Людерса и ее монотонным распространением на площадке текучести при растяжении [1 – 4]. Характер распространения полосы Людерса может изменяться в зависимости от размера зерна, температуры, приложенного напряжения и скорости деформации. Расширение полосы на площадке текучести происходит равномерно, и в любой момент вся деформация сосредоточена на ее границах, то есть на деформационных фронтах. Скорости перемещения фронтов пропорциональны скорости, которая задается нагружающим устройством. В рамках автоволновой концепции [5 – 7] фронт полосы Чернова-Людерса является автоволной переключения, которая реализует переход из метастабильного упруго деформируемого состояния в стабильное пластически деформируемое [8; 9]. Однако в температурном интервале синеломкости мягких сталей 423 – 510 К [10 – 12], когда движение дислокаций определяется эффектом динамического деформационного старения, распространение полосы Людерса сопровождается прерывистым течением. В работе [13] установлено, что в интервале температур 393 – 503 К в АРМКО-железе стационарная кинетика движения фронтов Людерса сменяется скачкообразной. Температура перехода к скачкообразному развитию деформации Людерса тем выше, чем больше скорость деформирования. При этом на скачкообразной площадке текучести дискретно распространяющийся фронт полосы Людерса представляет собой автоволну возбуждения локализованной пластичности. Следует отметить, что движение фронта в этом случае происходит только во время спада напряжения в процессе скачка. Возникает вопрос о характере зависимости скорости локальной деформации в области фронта от действующего напряжения в процессе скачка.

Настоящая работа посвящена установлению кинетических закономерностей распространения деформационных фронтов при скачкообразной деформации Людерса в α -железе при повышенной температуре.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве материала для исследования было использовано АРМКО-железо следующего состава (мас. %): С 0,025; Si 0,05; Cu 0,05; Mn 0,035; S 0,025; P 0,015; Fe – остальное. Образцы для испытаний в форме двусторонней лопатки были вырезаны лазером из горячекатаного листа толщиной 1,5 мм. Размер рабочего поля образца 50×10 мм. Для унификации напряженного и структурного состояний перед испытаниями образцы были подвергнуты отжигу второго рода в вакууме по режиму: 1233 К в течение 1 ч, охлаждение с печью до комнатной температуры.

Подготовленные образцы подвергались одноосному растяжению на испытательной машине LFM-125 со скоростями от 0,02 до 10 мм/мин. Испытания проводили при температурах от 296 до 503 К. Использовали печь STE-12Н (Walter + Bai) с независимым контролем температуры в трех зонах. Измерения температуры образца осуществляли с помощью трех термопар, установленных вдоль оси образца на расстоянии 20 мм друг от друга.

Анализ кинетики деформационных фронтов Людерса осуществляли методом корреляции цифровых изображений [14; 15] и методом цифровой статистической спекл-фотографии [16; 17]. Для формирования спекл-структуры образец освещали когерентным светом полупроводникового лазера (635 нм, 15,0 мВт). Изображения образца регистрировали цифровой видеокамерой Point Grey FL3-GE-50S5MC с разрешением 2448×2048 пикселей со скоростью от 2 до 25 кадров в секунду, в зависимости от скорости растяжения. По полученным массивам данных строили хронограммы [18], которые позволяли выявить области зарождения полос Людерса и определить кинетические характеристики их фронтов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показаны площадки текучести деформационной кривой АРМКО-железа, полученные при комнатной и повышенной температурах. При комнатной температуре деформационная кривая содержит типич-

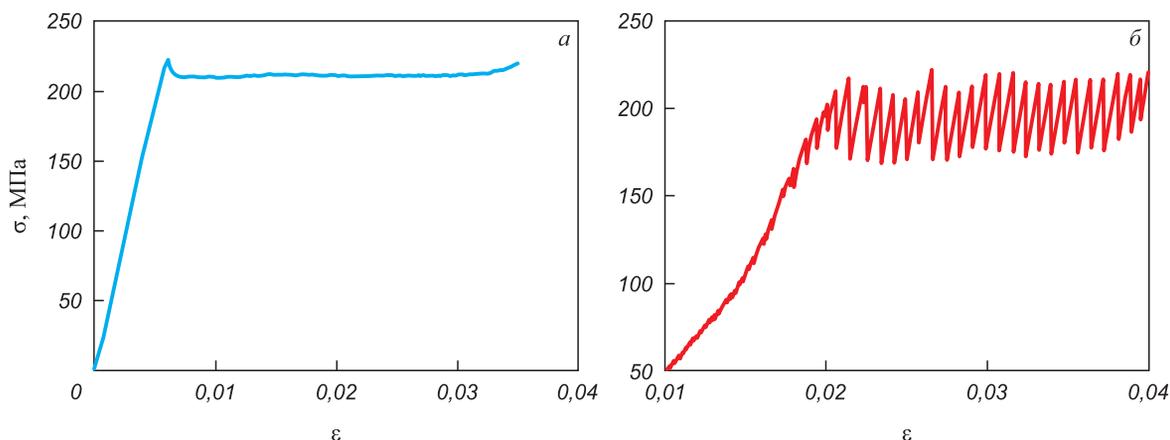


Рис. 1. Площадка текучести образцов α -железа при $T = 295$ К, $\dot{\epsilon} = 6,67 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ (а) и $T = 423$ К, $\dot{\epsilon} = 6,67 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ (б)

Fig. 1. Yield plateau in α -iron samples at $T = 295$ K, $\dot{\epsilon} = 6.67 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (a) and $T = 423$ K, $\dot{\epsilon} = 6.67 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (b)

ные для малоуглеродистых сталей зуб и гладкую площадку текучести. При температуре испытания 423 К и скорости деформирования $6,67 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ на площадке текучести реализуются периодические скачки напряжения.

Известно, что при температуре ниже 393 К в АРМКО-железе должна быть нормальная скоростная чувствительность, то есть напряжение течения на площадке (нижний предел текучести $\sigma_y^{(l)}$) должно возрастать с увеличением скорости деформирования и уменьшаться с ростом температуры [19]. На рис. 2, а видно, что, действительно, при комнатной температуре нижний предел текучести нелинейно возрастает с увеличением скорости деформирования.

Исследования в температурной области скачкообразного развития деформации Людерса показали, что с увеличением скорости деформирования амплитуда скачков уменьшается, причем уровень напряжения, до которого происходит спад $\sigma_y^{(l)}$, остается постоянным

(рис. 2, б). Таким образом, в температурном интервале скачкообразного течения скоростная чувствительность нижнего предела текучести отсутствует. В то же время напряжение начала скачка (верхний предел текучести $\sigma_y^{(u)}$) с увеличением скорости деформирования монотонно снижается.

Исследования характера локализации деформации методом цифровой статистической спекл-фотографии позволили установить, что как на гладкой (рис. 3, а), так и на скачкообразной (рис. 3, б) площадках текучести формируются и движутся фронты локализованной пластической деформации. Однако, если в первом случае фронт движется монотонно с постоянной скоростью V_f , то во втором – дискретно, только во время спада напряжения в процессе скачка.

Исходя из того факта, что деформационный фронт проходит всю длину образца L за время наблюдаемой площадки текучести Δt , то $L = V_f \Delta t$. За это время происходит удлинение образца, выражающееся как $\Delta L = V_d \Delta t$

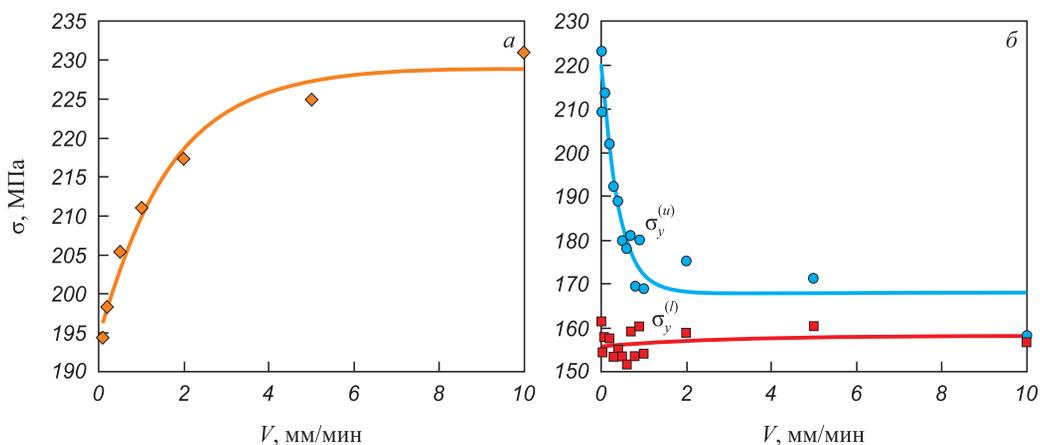


Рис. 2. Скоростная зависимость нижнего предела текучести при $T = 295$ К (а) и скоростная зависимость нижнего (■) и верхнего (●) предела текучести при $T = 423$ К (б)

Fig. 2. Strain rate dependence of the lower yield strength at $T = 295$ K (a) and strain rate dependence of the lower (■) and upper (●) yield strength at $T = 423$ K (b)

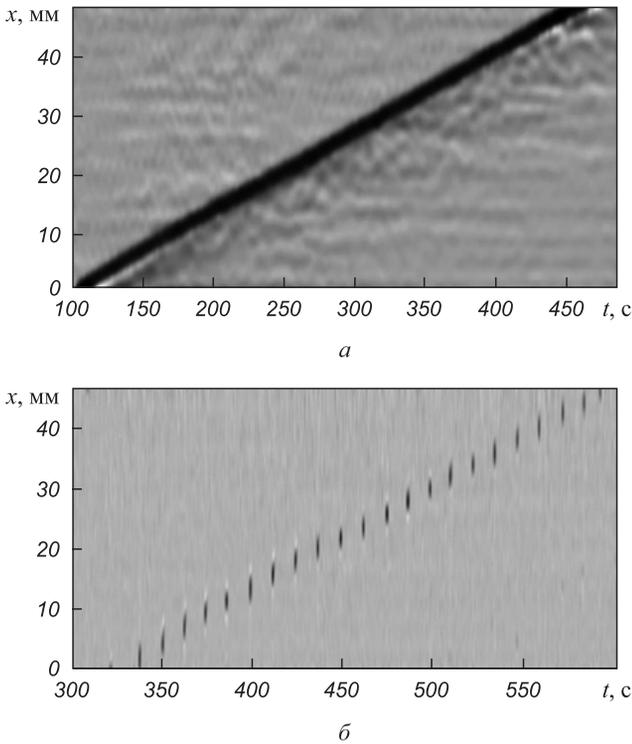


Рис. 3. Хронограммы движения деформационных фронтов на площадках текучести при скорости растяжения $6,67 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ и температурах 293 К (а) и 423 К (б)

Fig. 3. Chronograms of deformation fronts movement on yield plateaus at strain rate of $6.67 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ and temperatures 293 K (a) and 423 K (b)

(где V_d – скорость деформирования, задаваемая нагружающим устройством). Тогда деформация, приобретаемая образцом на площадке текучести, может быть представлена как

$$\varepsilon_L = \frac{\Delta L}{L} = \frac{V_d}{V_f} \quad (1)$$

Отсюда следует, что скорость фронта и скорость деформирования взаимосвязаны соотношением $V_d = \varepsilon_L V_f$. Если пронормировать это соотношение на ширину

фронта δ , то относительная скорость деформации выразится как

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V_d}{\delta} = \varepsilon_L \frac{V_f}{\delta} = \frac{\varepsilon_L}{t_f} \quad (2)$$

где t_f – время движения фронта в процессе скачка с определенной скоростью V_f .

Таким образом, относительная скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ и скорость движения фронта V_f должны быть линейно связаны друг другом, если деформация ε_L в любой момент времени одинакова и сосредоточена на фронте. Кроме того, для выполнения соотношения (2) ширина деформационного фронта δ в процессе движения также должна оставаться постоянной.

Для проверки первого постулата о постоянстве ε_L были проведены измерения смещения маркеров на поверхности образца в ходе деформирования на скачкообразной площадке текучести. На поверхности образца с помощью микротвердомера ПМТ-3М были нанесены маркеры в три ряда на расстоянии 100 мкм друг от друга. Затем на оптическом микроскопе НЕОРНОТ-21 были сделаны две серии снимков этих маркеров до и после деформации. Измерения расстояния между центрами двух соседних маркеров до деформации l и после деформации l_1 позволили определить смещение каждого маркера $\Delta l = l_1 - l$, то есть получить поле смещений $\Delta l(x)$ (где x – координата маркера). Путем численного дифференцирования данного поля была вычислена локальная деформация в каждой точке как $\varepsilon_L = \Delta l / l$. На рис. 4 представлен график распределения ε_L по длине образца. Применение гипотезы о нормально распределенной генеральной совокупности [20] показало, что изменения ε_L носят случайный характер; величина может считаться постоянной, а ее среднее значение составляет $\varepsilon_L = 0,0184 \pm 0,0003$.

Как указано в работе [17], при использовании метода цифровой статистической спекл-фотографии для визуализации деформационных фронтов яркость изображения фронта пропорциональна деформации

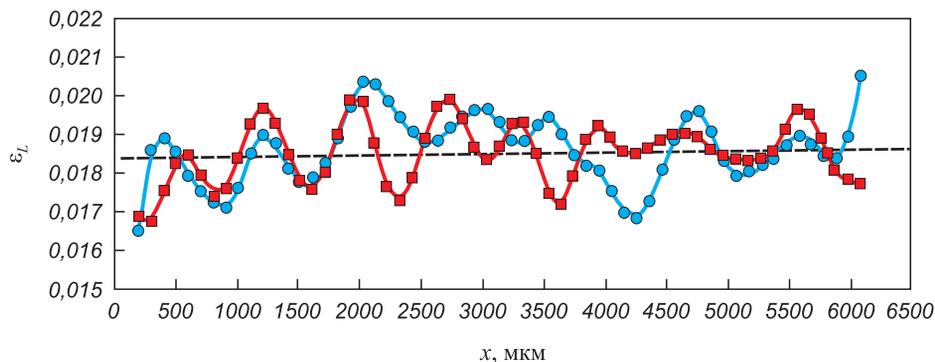


Рис. 4. Зависимость локальной деформации ε_L на площадке текучести от положения маркеров x

Fig. 4. Dependence of local deformation ε_L on yield plateau on the position of markers x

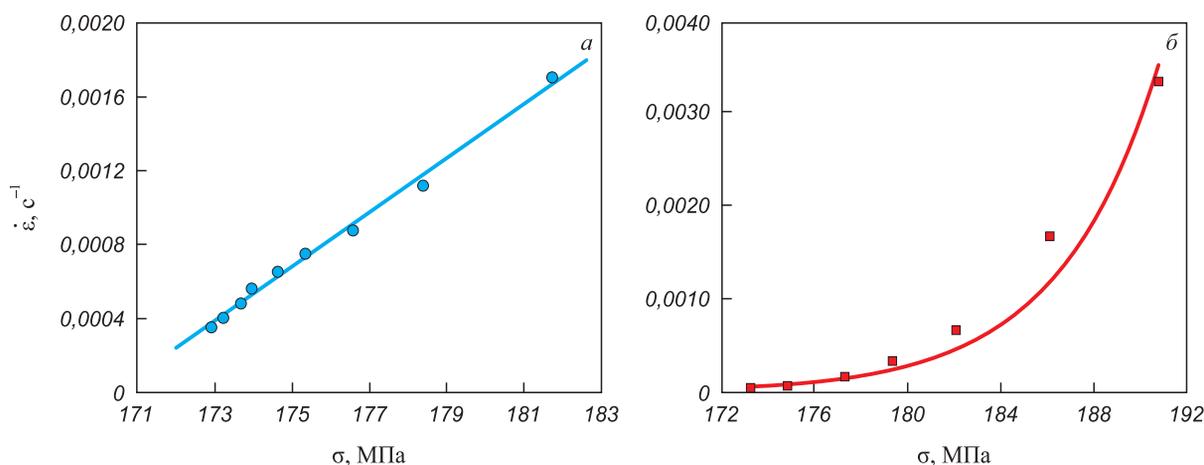


Рис. 5. Изменение скорости деформации при скачкообразном движении фронта (а) и изменение скорости деформации при монотонном движении фронта (б)

Fig. 5. Change of strain rate during serrated movement of the front (a) and change in deformation rate during monotonic movement of the front (b)

в нем. Отсюда может быть определена средняя ширина фронта δ . Такие измерения для фронтов, двигавшихся в процессе всех скачков (рис. 1, б и 3, б), показали, что их ширина постоянна и составляет 105 ± 7 мкм. Таким образом, второй постулат о постоянстве ширины фронтов также выполняется, и выражение (2) может быть использовано для исследования зависимости локальной скорости деформации от напряжения во время реализации скачка.

На рис. 5, а показана эта зависимость. Видно, что $\dot{\epsilon}$ возрастает с ростом напряжения по линейному закону. Коэффициент корреляции интерполирующей зависимости $\rho = 0,99$. С другой стороны, в случае монотонно движущегося фронта, на основании корреляционной зависимости (рис. 2) и выражений (1) и (2) можно рассчитать скорости деформации на фронте для каждого значения $\sigma_y^{(l)}$ (рис. 5, б). Видно, что она не может быть интерполирована линейной функцией. То есть скорости деформации в монотонно движущемся фронте и во фронте, движущемся скачкообразно, по-разному реагируют на изменение напряженного состояния.

Причиной этого различия может быть смена автоволновой моды деформации от автоволны переключения к автоволне возбуждения. В работе [13] показано, что характер кинетики движения фронтов Людерса в АРМКО-железе действительно контролируется эффектом динамического деформационного старения, то есть временем t_w задержки подвижных дислокаций на барьерах, преодолеваемых термически активируемым путем, и временем t_a осаждения примесных атомов углерода на этих дислокациях. При температурах ниже 393 К, когда $t_a \gg t_w$, фронт движется монотонно и является автоволной переключения локализованной пластичности. При этом локальная скорость деформации возрастает с напряжением нелинейно по параболическому закону. Дискретный характер движения

деформационных фронтов возникает в таких температурно-скоростных условиях, когда t_w и t_a соизмеримы. Скачкообразно движущийся деформационный фронт представляет собой автоволну возбуждения локализованной пластичности. В этом случае локальная скорость деформации от действующего напряжения зависит линейно.

Выводы

Деформация, накапливаемая на скачкообразной площадке текучести в α -железе, постоянна. В этих условиях ширина фронта в первом приближении также является постоянной величиной.

Локальная скорость деформации при монотонном движении фронта (296 – 393 К) с ростом напряжения изменяется по степенному закону. При скачкообразном характере деформации Людерса (393 – 503 К) локальная скорость деформации прямо пропорциональна величине действующего напряжения.

Различие в кинетике фронтов определяется характером реакции активных деформируемых сред на внешнее механическое воздействие и контролируется эффектом динамического деформационного старения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Hall E.O. Yield Point Phenomena in Metals and Alloys. New York: Plenum Press; 1970:296.
2. Seeger A., Frank W. Non Linear Phenomena in Materials Science. New York: Trans. Tech. Publ.; 1988:125–137.
3. Fridel J. Dislocations. Oxford – London – Edinburg – N. Y. – Paris – Frankfurt: Pergamon Press; 1964:576.
4. Cottrell A.H. Dislocation and Plastic Flow in Crystals. New York: Oxford Univ. Press.; 1953:223.
5. Zuev L.B. Using a crystal as a universal generator of localized plastic flow autowaves. *Bulletin of the Russian Aca-*

- demy of Sciences: Physics*. 2014;78(10):957–964.
<https://doi.org/10.3103/S1062873814100256>
6. Zuev L.B., Barannikova S.A., Danilov V.I., Gorbatenko V.V. Plasticity: from crystal lattice to macroscopic phenomena. *Progress in Physics of Metals*. 2021;22(1):3–57.
<https://doi.org/10.15407/ufm.22.01.003>
 7. Krinsky V.I. Self-Organization: Autowaves and Structures Far from Equilibrium. Berlin: Springer-Verlag; 1984:270.
 8. Данилов В.И., Горбатенко В.В., Данилова Л.В. Кинетика деформации Людерса как автоволнового процесса. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2022;65(4):261–267.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-4-261-267>
 Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Danilova L.V. Kinetics of Lüders deformation as an autowave process. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022;65(4):261–267. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-4-261-267>
 9. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Данилова Л.В., Горбатенко В.В. Деформируемый материал как нелинейная активная среда. *Известия вузов. Физика*. 2022;65(2):89–97.
<https://doi.org/10.17223/00213411/65/2/89>
 Zuev L.B., Danilov V.I., Danilova L.V., Gorbatenko V.V. Deformable material as a nonlinear active medium. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2022;65(2):89–97. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17223/00213411/65/2/89>
 10. Бабич В.К., Гуль Ю.П., Долженков И.Е. Деформационное старение стали. Москва: Металлургия; 1972:320.
 11. Liu W., Lian J. Stress-state dependence of dynamic strain aging: Thermal hardening and blue brittleness. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2021;28(5):854–866.
<https://doi.org/10.1007/s12613-021-2250-1>
 12. Prokhorov A., Vshivkov A., Plekhov O., Kashaev N., Fomin F., Ozerov M., Zhrebtsov S. The effect of LSP on the structure evolution and self-heating of ARMCO-iron under cyclic loading. *Metals*. 2021;11(8):119.
<https://doi.org/10.3390/met11081198>
 13. Danilov V.I., Orlova D.V., Gorbatenko V.V., Danilova L.V. Effect of temperature on the kinetics of localized plasticity autowaves in Lüders deformation. *Metals*. 2023;13(4):773.
<https://doi.org/10.3390/met13040773>
 14. Sutton M.A. Digital Image Correlation for Shape and Deformation Measurements. Springer Handbooks. Boston MA: Springer; 2008:1100.
 15. Briers J.D., Webster S. Quasi real-time digital version of single-exposure speckle photography for full-field monitoring of velocity or flow fields. *Optics Communication*. 1995;116(1-3):36–42. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(95\)00042-7](https://doi.org/10.1016/0030-4018(95)00042-7)
 16. Erbeck R., Merzkirch W. Speckle photographic measurements of turbulence in an air stream with fluctuating temperature. *Experiments in Fluids*. 1988;6(2):89–93.
<https://doi.org/10.1007/BF00196458>
 17. Zuev L.B., Gorbatenko V.V., Pavlichev K.V. Elaboration of speckle photography techniques for plastic flow analyses. *Measurement Science and Technology*. 2010;21(5):054014.
<http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/21/5/054014>
 18. Sun H.B., Yoshida F., Ohmori M., Ma X. Effect of strain rate on Lüders band propagating velocity and Lüders strain for annealed mild steel under uniaxial tension. *Materials Letters*. 2003;57(29):4535–4539.
[https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00358-6](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00358-6)
 19. Estrin Yu., Kubin L.P. Plastic instabilities: phenomenology and theory. *Materials Science and Engineering: A*. 1991;137:125–134. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(91\)90326-1](https://doi.org/10.1016/0921-5093(91)90326-1)
 20. Зажигаев Л.С., Кишьян А.А., Романников Ю.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. Москва: Атомиздат; 1978:232.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Дина Владимировна Орлова, к.ф.-м.н., научный сотрудник лаборатории физики прочности, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН
ORCID: 0000-0003-0068-2542
E-mail: dvo@ispms.ru

Владимир Иванович Данилов, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории физики прочности, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН
ORCID: 0000-0002-5741-7574
E-mail: dvi@ispms.ru

Вадим Владимирович Горбатенко, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории физики прочности, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН
ORCID: 0000-0001-6464-6159
E-mail: gvv@ispms.ru

Лидия Владиславовна Данилова, к.ф.-м.н., младший научный сотрудник лаборатории физики прочности, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН
ORCID: 0000-0002-4124-0516
E-mail: dlv@ispms.ru

Анна Валентиновна Бочкарева, к.т.н., научный сотрудник лаборатории физики прочности, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН
ORCID: 0000-0002-3140-5292
E-mail: avb@ispms.ru

Dina V. Orlova, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Research Associate of the Laboratory of Strength Physics, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0003-0068-2542
E-mail: dvo@ispms.ru

Vladimir I. Danilov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Strength Physics, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-5741-7574
E-mail: dvi@ispms.ru

Vadim V. Gorbatenko, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher of the Laboratory of Strength Physics, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0001-6464-6159
E-mail: gvv@ispms.ru

Lidiya V. Danilova, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Junior Researcher of the Laboratory of Strength Physics, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-4124-0516
E-mail: dlv@ispms.ru

Anna V. Bochkareva, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Laboratory of Strength Physics, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-3140-5292
E-mail: avb@ispms.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Д. В. Орлова – анализ и обсуждение экспериментальных результатов, написание первичного варианта рукописи.

В. И. Данилов – формирование идеи, утверждение окончательного варианта рукописи.

В. В. Горбатенко – проведение механических испытаний, регистрация эволюции картин локализованной пластичности, анализ и обсуждение хронограмм.

Л. В. Данилова – математическая обработка экспериментальных данных, построение и анализ корреляционных зависимостей.

А. В. Бочкарева – проведение экспериментальных исследований, анализ данных по ширине и скорости деформационного фронта.

D. V. Orlova – analysis and discussion of experimental results, writing the draft version of the manuscript.

V. I. Danilov – formation of the article main concept, revising final version of the manuscript.

V. V. Gorbatenko – carrying out mechanical tests, registration of evolution of localized plasticity patterns, analysis and discussion of chronograms.

L. V. Danilova – mathematical processing of experimental data, construction and analysis of correlation dependencies.

A. V. Bochkareva – conducting experiments, analysis of width and rate of the deformation front.

Поступила в редакцию 27.02.2024

После доработки 12.03.2024

Принята к публикации 18.04.2024

Received 27.02.2024

Revised 12.03.2024

Accepted 18.04.2024