



Оригинальная статья

УДК 669.046:533.9

DOI 10.17073/0368-0797-2022-4-261-267

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2297>



КИНЕТИКА ДЕФОРМАЦИИ ЛЮДЕРСА КАК АВТОВОЛНОВОГО ПРОЦЕССА

В. И. Данилов, В. В. Горбатенко, Л. В. Данилова

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

Аннотация. Исследованы природа и кинетика подвижных фронтов локализованной деформации, которые формируются на упруго-пластическом переходе в материалах с дислокационным и мартенситным микромеханизмами реализации пластического течения при активном растяжении с различными скоростями. Для регистрации и количественного описания движения фронтов использована методика корреляции цифровых изображений. Обсуждение полученных результатов проведено в рамках синергетического подхода. Деформируемый объект рассматривается как открытая, далекая от равновесия система – активная среда, содержащая распределенные источники потенциальной энергии, которые представляют собой микроконцентраторы напряжений. В ходе внешнего воздействия эти концентраторы релаксируют путем реализации микросдвигов и вызывают формоизменение самого объекта. Каждый микроконцентратор может рассматриваться как активный элемент, который имеет два состояния: метастабильное упругонапряженное и стабильное релаксированное. В результате внешнего воздействия переход возможен только из первого состояния во второе. Такие элементы характеризуются как триггерные, а активная среда как бистабильная. В бистабильных средах распространяются автоволны переключения, представляющие собой подвижные границы, которые разделяют метастабильное и стабильное состояния. В рамках этой концепции рассматриваемые фронты локализованной деформации можно интерпретировать как автоволны переключения. Результаты исследования показали, что форма и кинетические параметры фронтов локализованной деформации не зависят от химического состава, структуры и микромеханизма деформации, что подтверждает их автоволновую природу. С другой стороны, кинетика автоволн переключения должна определяться параметрами внешнего воздействия. Действительно, скорость фронтов локализованной деформации возрастает с ростом скорости растяжения. Установлено, что зависимость скорости этих фронтов от скорости деформирования нелинейная параболическая с показателем степени меньше единицы и одинакова для всех исследованных материалов.

Ключевые слова: упругопластический переход, фронты полос Чернова–Людерса, активные среды, автоволны переключения локализованной пластичности, кинетика автоволн переключения, метод корреляции цифровых изображений, скорость автоволн, скорость деформирования

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 21-29-00171.

Для цитирования: Данилов В.И., Горбатенко В.В., Данилова Л.В. Кинетика деформации Людерса как автоволнового процесса // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 4. С. 261–267. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-4-261-267>

Original article

KINETICS OF LÜDERS DEFORMATION AS AN AUTOWAVE PROCESS

V. I. Danilov, V. V. Gorbatenko, L. V. Danilova

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

Abstract. The authors investigated the nature and kinetics of the moving fronts of localized deformation, which are formed at the elastoplastic transition in materials with dislocation and martensitic micromechanisms of plastic deformation under active tension at different velocity. Digital image correlation was used for registration and quantitative specification of front movement. Attained results were discussed under synergistic approach. A deformed subject is considered as open and far-from-equilibrium system (active medium) containing distributed potential energy source stress, which are microconcentrators. In process of external influence these concentrators relax through microslip and cause a form change of the object itself. Each microconcentrator can be considered as an active element, it has two states: metastable elastically stressed and stable relaxed. In external influence, transition is possible only from the first state to the second. Such elements are characterized as trigger elements and active medium is characterized as a bistable medium. In bistable media, switching autowaves propagate. They represent moving boundaries, which separate metastable and stable states. Within this concept considered fronts of localized deformation can be interpreted as switching autowaves. The study showed that shape and kinetic parameters of fronts of localized deformation do not depend on chemical composition, structure and micromechanisms of deformation, it confirms their autowave nature. On the other hand, the kinetics of switching autowaves should be determined by characteristics of the external influence. Genuinely, velocity of localized deformation fronts increases with deformation velocity. It is found that dependence of these fronts on deformation velocity is non-linear parabolic with index less than one and equally for all examining materials.

Keywords: elastoplastic transition, Chernov–Lüders bands fronts, active medium, switching autowaves of localized plasticity, kinetics of switching autowaves, digital image correlation, autowave speed, deformation velocity

Funding: The work was supported by the grant of the Russian Science Foundation (project No. 21-29-00171).

For citation: Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Danilova L.V. Kinetics of Lüders deformation as an autowave process. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 4, pp. 261–267. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-4-261-267>

ВВЕДЕНИЕ

Развитие концепции деформации твердых тел как многоуровневого самоорганизованного процесса закономерно привело к созданию автоволновой теории пластического течения [1], согласно которой деформация есть эволюция автоволновых мод локализации пластического формоизменения. К настоящему времени выявлены основные автоволновые моды, которые могут наблюдаться при пластической деформации, и установлена однозначная связь между стадиями деформационного упрочнения и соответствующими модами в виде правила соответствия [2]. Согласно этому правилу на стадиях легкого скольжения в монокристаллах и на площадках текучести поликристаллических объектов должно происходить образование и распространение автоволн переключения локализованной пластичности.

Автоволновые представления применимы к активным средам (то есть к объектам, содержащим распределенные источники потенциальной энергии), которые в ходе внешнего воздействия возникают, релаксируют и вызывают изменения самого объекта (то есть представляют собой активные элементы среды) [3–7]. Автоволны переключения, согласно данным работы [4], представляют собой уединенные перемещающиеся фронты, они возникают в бистабильных активных средах, элементы которых имеют два состояния: метастабильное и стабильное [3, 4]. Применительно к пластической деформации это упруго-напряженное и релаксированное состояния микроконцентраторов. В этом случае автоволна переключения представляется границей между областью деформируемого образца, где материал находится в упругом состоянии, и областью, где уже реализовались пластические сдвиги. Такой границей является фронт расширяющейся полосы Чернова–Людерса (ПЧЛ) на упругопластическом переходе [8–10].

Микромеханизмы, определяющие существование фронтов ПЧЛ, и феноменология самих полос изучены достаточно подробно. Однако, несмотря на большое количество работ, посвященных данной проблеме [11, 12], до сих пор остаются не вполне понятными вопросы о кинетике процессов на площадке текучести и влиянии на них внешних факторов. Полученные в этих и подобных им экспериментах [13, 14] результаты интересно обсудить в терминах автоволн переключения и получить зависимости параметров последних от внешних условий. В частности, требует решения вопрос о влиянии на скорость распространения фронтов Людерса скорости внешнего механического воздействия.

Целью настоящей работы явилось установление и объяснение на базе существующих микроскопических моделей макроскопических пространственно-временных закономерностей развития ПЧЛ в рамках автоволновой концепции пластического течения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Традиционными материалами для исследования деформации Людерса являются малоуглеродистые сплавы на основе железа [15, 16]. Деформационные кривые этих сплавов после отжига (при температуре 1233 К, в течение 1 ч, вакуум) при комнатной температуре содержат хорошо оформленную протяженную площадку текучести. При этом в большинстве случаев наблюдается зуб текучести. Эти факторы определили выбор материалов для исследования: армко-железо и малоуглеродистая сталь 08пс, составы которых представлены в таблице. Феноменологически подобные деформационные кривые наблюдаются у никелида титана в сверхэластичном состоянии [17, 18], поэтому для демонстрации общности автоволнового описания был использован сплав ТН-1 после выдержки при 1073 К в течение 1 ч в гелиевой атмосфере и закалки в воду.

Составы исследуемых материалов

Composition of the researched materials

Материал	Содержание, % (по массе)									
	C	Mn	Si	Cu	Ni	Ti	S	P	O	Fe
Армко-железо	0,025	0,035	0,05	0,05	–	–	0,025	0,015	–	баланс
Сталь 08пс	0,080	0,500	0,11	<0,30	<0,30	–	<0,040	<0,350	–	баланс
Никелид титана	0,012	–	–	–	55,80	баланс	–	–	0,035	<0,1

В работе использованы плоские образцы типа «двойная лопатка» с размерами рабочей части 50×10 мм и толщиной 2 мм. Испытания на одноосное растяжение проводилось на универсальной машине Walter + Bay AG (модификация LFM 125).

Одновременно методом корреляции цифровых изображений (digital image correlation) [19] регистрировались поля локальных перемещений. Для этого растягиваемый образец освещался когерентным светом полупроводникового лазера мощностью 15 мВт с длиной волны излучения 635 нм. Полученные изображения деформируемого образца с наложенными на них спекл-картинами регистрировались цифровой видеокамерой Point Grey FL3-GE-50S5M-C с частотой 10 с^{-1} , оцифровывались и запоминались. Для расчета векторов перемещения точек образца выбрано рабочее окно продолжительностью 15 с. Сравнивались изображения на концах этого промежутка времени и определялся вектор перемещения произвольной точки образца. Повторяя эту операцию, можно зарегистрировать поле векторов перемещения для всех точек образца в заданный момент времени. Дифференцирование поля по координатам обеспечивает получение пространственного распределения очагов локальных деформаций ε_{xx} для любого момента времени. В таком представлении пространственно-временные положения очагов соответствуют положениям фронтов ПЧЛ в железе или фронтов деформационно-индуцированного фазового превращения в никелиде титана, а эволюция картин локализации деформации отражает кинетику этих фронтов. Графически очаги деформации представляются в виде темных пятен на фоне изображения рабочей поверхности образца, контраст которых определяется амплитудой локализованной деформации. Треки движения этих пятен визуализируют фронты ПЧЛ. Такой способ, извест-

ный как построение хронограмм [20], позволяет измерять скорости движения фронтов и выявлять области их зарождения и аннигиляции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Скорости растяжения варьировались в интервале от $3,33 \cdot 10^{-4} \text{ мм/с}$ ($0,02 \text{ мм/мин}$) до $2 \cdot 10^{-2} \text{ мм/с}$ ($1,2 \text{ мм/мин}$). Установлено, что скорость деформирования не влияет на вид диаграммы нагружения, но меняет ее количественные параметры. На рис. 1 показана площадка текучести диаграмм армо-железа, снятых при разных скоростях. Видно, что увеличение скорости растяжения приводит к увеличению продолжительности площадки (в единицах деформации) и росту напряжения, при которой она наблюдается. В то же время разница между верхним $\sigma_y^{(u)}$ и нижним $\sigma_y^{(l)}$ пределами текучести изменяется синхронно.

Анализ эволюции паттернов локализованной деформации показал, что зародыши ПЧЛ в виде расширяющегося клина формируются на зубе текучести. Если зародыш образуется вблизи захвата, то один из его фронтов уходит с рабочей части образца, а второй движется равномерно до тех пор, пока ПЧЛ не захватит все рабочее поле. Возможно формирование нескольких зародышей в различных местах, тогда поведение фронтов становится более сложным [21]. Тем не менее, независимо от числа формирующихся полос, а, следовательно, от числа подвижных фронтов продолжительность площадки текучести (ε_{pl}) при постоянной скорости деформирования (V_{mach}) не меняется, зато растет при увеличении V_{mach} (рис. 1). Последнее проиллюстрировано на рис. 2, где представлены зависимости $\varepsilon_{pl}(V_{mach})$ для никелида титана (1), стали 08 пс (2) и армо-железа (3). Все они хорошо интерполируются линейным соотношением

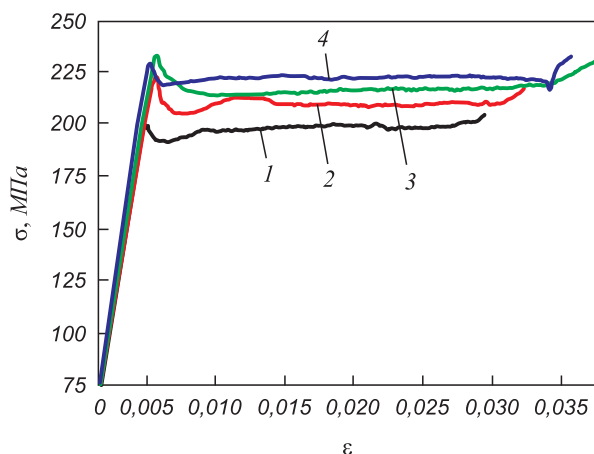


Рис. 1. Площадка текучести в армо-железе при скоростях деформирования $8,33 \cdot 10^{-4} \text{ мм/с}$ (1), $3,33 \cdot 10^{-3} \text{ мм/с}$ (2), $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ мм/с}$ (3), $2 \cdot 10^{-2} \text{ мм/с}$ (4)

Fig. 1. Yield plateau in armco iron at deformation velocity of $8,33 \cdot 10^{-4} \text{ мм/с}$ (1); $3,33 \cdot 10^{-3} \text{ мм/с}$ (2); $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ мм/с}$ (3); $2 \cdot 10^{-2} \text{ мм/с}$ (4)

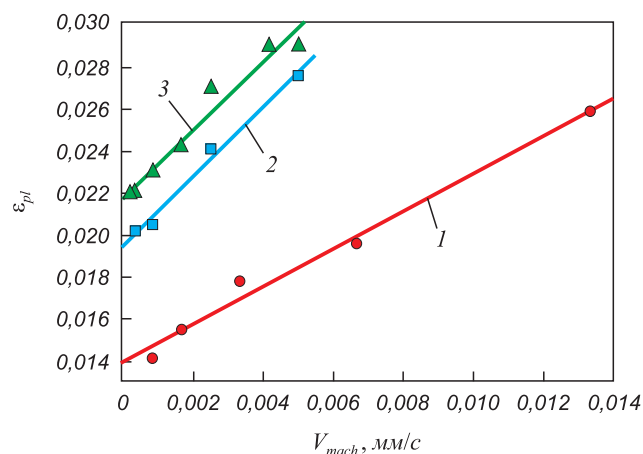


Рис. 2. Зависимость длины площадки текучести от скорости деформирования в никелиде титана (1), армо-железе (2) и стали 08пс (3)

Fig. 2. Dependence of yield plateau length on deformation velocity in titanium nickelide (1), armco iron (2) and low carbon steel (3)

$\varepsilon_{pl} = a + bV_{mach}$, где $\rho > 0,9$ – коэффициент корреляции. Количественным образом соответствующие соотношения можно записать:

– для никелида титана

$$\varepsilon_{pl} = 0,014 + \frac{V_{mach}}{V_0^{(NiTi)}}, \text{ где } V_0^{(NiTi)} \approx 1,11 \text{ мм/с}; \quad (1a)$$

– для армо-железа

$$\varepsilon_{pl} = 0,02 + \frac{V_{mach}}{V_0^{(Fe)}}, \text{ где } V_0^{(Fe)} \approx 0,61 \text{ мм/с}; \quad (1б)$$

– для стали 08пс

$$\varepsilon_{pl} = 0,022 + \frac{V_{mach}}{V_0^{(steel)}}, \text{ где } V_0^{(steel)} \approx 0,62 \text{ мм/с}. \quad (1в)$$

Константы $V_0^{(NiTi)}$, $V_0^{(Fe)}$ и $V_0^{(steel)}$ по своей величине близки к экспериментально полученным значениям скорости роста зародышей полос Людерса в соответствующих материалах [21, 22].

Влияние скорости деформирования этим не ограничивается. В экспериментах с никелидом титана было установлено, что с ростом V_{mach} увеличивается количество образующихся полос, а, следовательно, и подвижных фронтов (рис. 3). Эта зависимость быстро насыщается, так что максимальное число наблюдаемых движущихся фронтов не превышает пяти. Интересно отметить, что при скоростях деформирования менее $8,33 \cdot 10^{-4}$ мм/с в никелиде титана зарождалась одна ПЧЛ, но из двух подвижных фронтов превращения в каждый момент времени двигался только один, то есть фронты полосы превращения двигались в разные стороны попеременно, а не одновременно.

Скорости движения фронтов V_f тем больше, чем больше скорость деформирования V_{mach} , что вполне

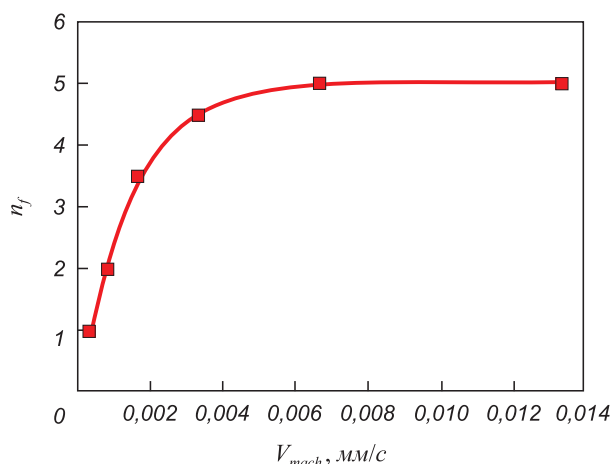


Рис. 3. Зависимость количества фронтов ПЧЛ от скорости деформирования

Fig. 3. Dependence of number of LB fronts on deformation velocity

ожидается. Представленные ниже результаты получены для случаев, когда происходило движение одного фронта. Зависимость $V_f(V_{mach})$ для армо-железа приведена на рис. 4, кривая 3. С коэффициентом корреляции $\rho > 0,9$ она может быть интерполирована степенной зависимостью вида

$$V_f = KV_{mach}^n, \quad (2)$$

где K – размерный коэффициент, определяемый уровнем напряжения на площадке текучести; $n = 0,91 \pm 0,01 < 1$ – показатель параболы.

Слабой нелинейностью обладают аналогичные зависимости $V_f(V_{mach})$, полученные на стали 08пс и на никелиде титана (рис. 4, кривые 2 и 1), несмотря на то, что в никелиде титана на площадке текучести происходит движение фронтов деформационно-индуцированного фазового превращения, а не фронта локализации деформации, обусловленного на микроуровне дислокационными процессами. При этом значения показателя n близки: $0,89 \pm 0,01$ для стали и $0,90 \pm 0,01$ для никелида титана.

Такая общность кинетики фронтов, проявляющаяся даже на количественном уровне, может быть объяснена в рамках автоволновой модели пластического течения. Прохождение деформационного фронта переводит материал из упруго-напряженного состояния в пластически деформированное [2, 7, 15, 16]. Первое состояние обеспечено введением энергии от нагружающего устройства, которая распределяется на микроконцентраторах, формируя активные элементы в метастабильном состоянии. Эти элементы переходят в стабильное состояние, необратимо рассеивая упругую энергию путем испускания и размножения подвижных дислокаций в железе или образования мартенситных ламелей

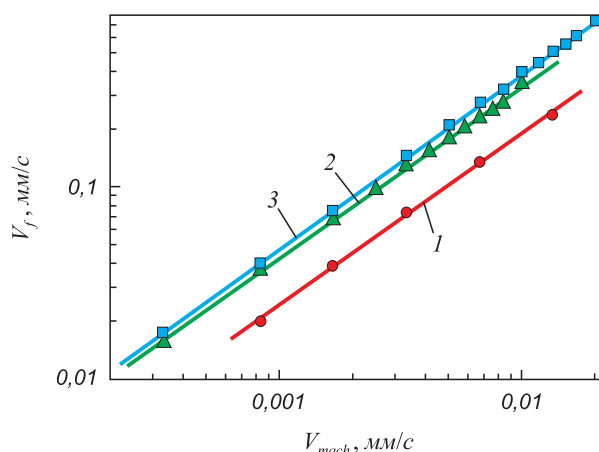


Рис. 4. Зависимость скоростей автоволн переключения от скорости деформирования в никелиде титана (1), стали 08пс (2) и армо-железе (3)

Fig. 4. Dependence of autowave switching velocity on deformation velocity in titanium nickelide (1), low carbon steel (2) and armco iron (3)

в никелиде титана. В обоих случаях процесс рассеяния энергии происходит синхронизованно в пространстве и во времени на движущемся деформационном фронте. Подобные объекты в синергетике интерпретируются как автоволны переключения [4, 5].

В случае движения одного деформационного фронта (то есть одной автоволны переключения) для обеспечения стационарности пластического течения необходимо, чтобы поток мощности от нагружающего устройства полностью рассеивался за счет релаксации активных элементов именно на фронте. Увеличение скорости деформирования подразумевает возрастание вводимого потока мощности и, как следствие, возрастание скорости автоволны переключения, что отражается уравнением (2). Однако способность каждой автоволны рассеивать вводимую упругую энергию ограничена, поэтому рост скорости V_{mach} приводит к увеличению количества одновременно движущихся фронтов (рис. 3). Наоборот, при малых скоростях растяжения становится невозможным одновременное формирование нескольких автоволн переключения.

Другой стороной ограниченности диссипационных возможностей автоволн переключения является нелинейная зависимость (2). Рассмотрим, как накапливается пластическая деформация ε_{cum} на площадке текучести в произвольной точке образца из армко-железа. Графики этого процесса для скоростей $V_{mach} = 10^{-2}$ мм/с и $V_{mach} = 3,33 \cdot 10^{-4}$ мм/с представлены на рис. 5 (кривые 1 и 2 соответственно) (где $t^* = t/t_{pl}$ – безразмерное время; t – текущее время; t_{pl} – время реализации площадки текучести). Скачок на зависимостях $\varepsilon_{cum}(t^*)$ соответствует моменту прохождения фронта ПЧЛ через рассматриваемую точку. Деформация перед скачком соответствует упругой и от значения V_{mach} не зависит. В то же время, если при деформировании с $V_{mach} = 3,33 \cdot 10^{-4}$ мм/с после прохождения фронтом избранной точки величина ε_{cum} значимо не меняется, то при деформировании с $V_{mach} = 10^{-2}$ мм/с происходит дальнейший рост величины ε_{cum} , которая в конце площадки текучести достигает 17 % от всей деформации Людерса ($t^* = 1$ на рис. 5 соответствует окончанию площадки текучести.). То есть позади фронта ПЧЛ образуется нелокализованная пластически деформированная зона, деформация в которой тем больше, чем больше скорость растяжения, то есть, чем больше поток вводимой от нагружающего устройства энергии. Косвенным подтверждением этого является возрастание уровня напряжений на площадке

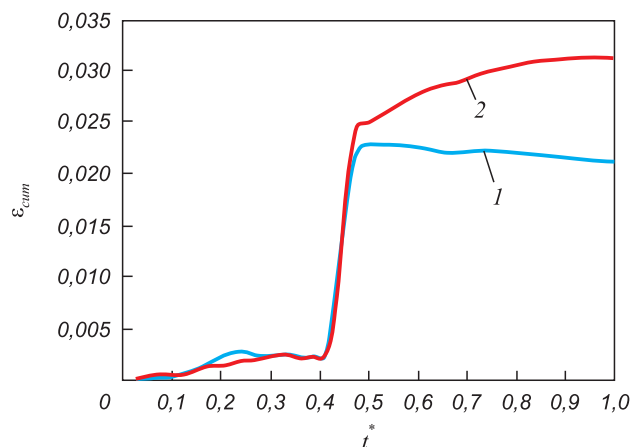


Рис. 5. График накопления деформации в произвольной точке образца при скорости деформирования 10^{-2} мм/с (1), $3,33 \cdot 10^{-4}$ мм/с (2)

Fig. 5. Plot of strain accumulation in arbitrary point of the specimen at deformation velocity of 10^{-2} mm/s (1) and $3.33 \cdot 10^{-4}$ mm/s (2)

текучести и длины самой площадки текучести при увеличении скорости деформирования. Эта зона нелокализованной пластической деформации создает тормозящий эффект, который тем больше, чем больше V_{mach} , что и является физической причиной нелинейности зависимости $V_f(V_{mach})$.

Выводы

Движение фронтов ПЧЛ и фронтов фазового превращения представляет собой распространение автоволн переключения, возникающих в бистабильных активных средах.

Формирование как ПЧЛ, так и полос фазового превращения является процессами, которые рассеивают вводимую в деформируемый объект упругую энергию: чем выше скорость нагружения, тем более интенсивно вводится энергия, в то время как способность автоволн рассеивать энергию ограничена.

При относительно высоких скоростях нагружения диссипационные возможности одиночных автоволн переключения недостаточны, чтобы обеспечить рассеяние вводимой упругой энергии, поэтому на площадках текучести формируются несколько одновременно распространяющихся автоволн или возникают нелокализованные области деформации. Последнее приводит к нелинейной параболической зависимости $V_f(V_{mach})$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Зуев Л.Б. Автоволновая пластичность. Локализация и коллективные моды. М.: Физматлит, 2018. 208 с.
2. 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. Vol. 22. No. 1. P. 3–57.
<https://doi.org/10.15407/ufm.22.01.003>
1. Zuev L.B. *Autowave Plasticity. Localization and Collective Modes*. Moscow: Fizmatlit, 2018, 208 p. (In Russ.).
2. 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, vol. 22, no. 1, pp. 3–57.
<https://doi.org/10.15407/ufm.22.01.003>

3. Krinsky V.I. *Self-Organization: Autowaves and Structures Far from Equilibrium*. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 270 p.
4. Васильев В.А., Романовский Ю.М., Яхно В.Г. Автоволновые процессы. М.: Наука, 1987. 240 с.
5. Mikhailov A.S. *Foundation of Synergetics*. Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 1990. 187 p.
6. Скотт Э. Нелинейная наука. Рождение и развитие когерентных структур / Пер. с англ. И.А. Макарова под ред. А.Л. Фрадкова. М.: Физматлит, 2007. 559 с.
7. Автоволновые процессы в нелинейных средах с диффузией / Е.Ф. Мищенко, В.А. Садовничий, А.Ю. Колесов, Н.Х. Розов. М.: Физматлит, 2010. 399 с.
8. Gilman J.J. Micromechanics of shear banding // *Mechanics of Materials*. 1994. Vol. 17. No. 2-3. P. 83–96.
[https://doi.org/10.1016/0167-6636\(94\)90051-5](https://doi.org/10.1016/0167-6636(94)90051-5)
9. Mughrabi H. On the current understanding of strain gradient plasticity // *Material Science and Engineering: A*. 2004. Vol. 387-389. P. 209–213. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.01.086>
10. Pelleg J. *Mechanical Properties of Materials*. Dordrecht: Springer, 2013. 633 p.
11. Криштал М.М. Взаимосвязь неустойчивости и мезоскопической неоднородности пластической деформации. III. Моделирование и анализ прерывистой текучести с учетом ее зависимости от степени деформации и скорости растяжения // *Физика металлов и металловедение*. 2005. Т. 100. № 3. С. 12–21.
12. Петров Ю.В., Бородин И.Н. Релаксационный механизм пластического деформирования и его обоснование на примере явления зуба текучести в нитевидных кристаллах // *Физика твердого тела*. 2015. Т. 57. № 2. С. 336–341.
<http://doi.org/10.3103/S002565441504007X>
13. Žerovnik A., Pepel V., Prebil I., Kunc R. The yield-point phenomenon and cyclic plasticity of the uniaxially loaded specimens // *Materials and Design*. 2015. Vol. 92. P. 971–977.
<http://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.111>
14. Назаров В.Е. Дислокационная нелинейность и нелинейные волновые процессы в поликристаллах с дислокациями // *Физика твердого тела*. 2016. Т. 58. № 9. С. 1665–1673.
15. Плехов О.А., Наймарк О.Б., Saintier N., Palin-Luc T. Упруго-пластический переход в железе: структурные и термодинамические особенности // *Журнал технической физики*. 2009. Т. 79. № 8. С. 56–61.
16. Vildeman V.E., Lomakin E.V., Tretiakova T.V. Yield delay and space-time inhomogeneity of plastic deformation of carbon steel // *Mechanics of Solids*. 2015. Vol. 50. No. 4. P. 412–420.
<http://doi.org/10.3103/S002565441504007X>
17. Shaw J.A., Kyriakides S. On the nucleation and propagation of phase transformation fronts in NiTi alloy // *Acta Materialia*. 1997. Vol. 45. No. 2. P. 683–700. [http://doi.org/10.1016/S1359-6454\(96\)00189-9](http://doi.org/10.1016/S1359-6454(96)00189-9)
18. Чумляков Ю.И., Киреева И.В., Панченко Е.Ю., Тимофеева Е.Е. Механизмы термоупругих мартенситных превращений в высокопрочных монокристаллах сплавов на основе железа и никелида титана. Томск: Изд-во НТЛ, 2016. 243 с.
19. Sutton M.A. *Digital Image Correlation for Shape and Deformation Measurements*. Springer Handbooks. Boston MA: Springer, 2008. P. 565–600.
20. 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*. 2008. Vol. 57. No. 29. P. 4535–4539.
[https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00358-6](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00358-6)
21. Данилов В.И., Горбатенко В.В., Зуев Л.Б., Орлова Д.В., Данилова Л.В. Исследование деформации Людерса в малоуглеродистой стали // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 10. С. 831–838. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-10-831-838>
3. Krinsky V.I. *Self-Organization: Autowaves and Structures Far from Equilibrium*. Berlin: Springer-Verlag, 1984, 270 p.
4. Vasil'ev V.A., Romanovskii Yu.M., Yakhno V.G. *Autowave Processes*. Moscow: Nauka, 1987, 240 p. (In Russ.).
5. Mikhailov A.S. *Foundation of Synergetics*. Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 1990, 187 p.
6. Scott A. *Nonlinear Science. Emergence and Dynamics of Coherent Structures*. Oxford: University Press, 2003. (Russ. ed.: Scott A. *Nelineinaya nauka. Rozhdenie i razvitie kogerentnykh struktur*. Moscow: Fizmatlit, 2007, 559 p.).
7. Mishchenko E.F., Sadovnichii V.A., Kolesov A.Yu., Rozov N.Kh. *Autowave Processes in Nonlinear Media with Diffusion*. Moscow: Fizmatlit, 2010, 399 p. (In Russ.).
8. Gilman J.J. Micromechanics of shear banding. *Mechanics of Materials*. 1994, vol. 17, no. 2-3, pp. 83–96.
[https://doi.org/10.1016/0167-6636\(94\)90051-5](https://doi.org/10.1016/0167-6636(94)90051-5)
9. Mughrabi H. On the current understanding of strain gradient plasticity. *Material Science and Engineering: A*. 2004, vol. 387-389, pp. 209–213. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.01.086>
10. Pelleg J. *Mechanical Properties of Materials*. Dordrecht: Springer, 2013, 633 p.
11. Krishtal M.M. Interrelation between the instability and mesoscopic inhomogeneity of plastic deformation: III. Simulation and analysis of discontinuous flow with allowance for its dependence on the degree of deformation and rate of tension. *Physics of Metals and Metallography*. 2005, vol. 100, no. 3, pp. 208–217.
12. Petrov Yu.V., Borodin I.N. Relaxation mechanism of plastic deformation and its justification using the example of the sharp yield point phenomenon in whiskers. *Solid State Physics*. 2015, vol. 57, no. 2, pp. 353–359. <https://doi.org/10.1134/S1063783415020286>
13. Žerovnik A., Pepel V., Prebil I., Kunc R. The yield-point phenomenon and cyclic plasticity of the uniaxially loaded specimens. *Materials and Design*. 2015, vol. 92, pp. 971–977.
<http://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.111>
14. Nazarov V.E. Dislocation nonlinearity and nonlinear wave processes in polycrystals with dislocations. *Solid State Physics*. 2016, vol. 58, no. 9, pp. 1719–1728. <https://doi.org/10.1134/S1063783416090249>
15. Plekhov O.A., Naimark O.B., Saintier N., Palin-Luc T. Elastic-plastic transition in iron: Structural and thermodynamic features. *Technical Physics*. 2009, vol. 54, no. 8, pp. 1141–1146.
<https://doi.org/10.1134/S1063784209080088>
16. Vildeman V.E., Lomakin E.V., Tretiakova T.V. Yield delay and space-time inhomogeneity of plastic deformation of carbon steel. *Mechanics of Solids*. 2015, vol. 50, no. 4, pp. 412–420.
<http://doi.org/10.3103/S002565441504007X>
17. Shaw J.A., Kyriakides S. On the nucleation and propagation of phase transformation fronts in NiTi alloy. *Acta Materialia*. 1997, vol. 45, no. 2, pp. 683–700. [http://doi.org/10.1016/S1359-6454\(96\)00189-9](http://doi.org/10.1016/S1359-6454(96)00189-9)
18. Chumlyakov Yu.I., Kireeva I.V., Panchenko E.Yu., Timofeeva E.E. *Mechanisms of Thermoelastic Martensitic Transformations in High-Strength Monocrystals of Alloys Based on Iron and Titanium Nickelide*. Tomsk: NTL, 2016, 243 p. (In Russ.).
19. Sutton M.A. *Digital Image Correlation for Shape and Deformation Measurements*. Springer Handbooks. Boston MA: Springer, 2008, pp. 565–600.
20. 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*. 2008, vol. 57, no. 29, pp. 4535–4539.
[https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00358-6](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00358-6)
21. Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Zuev L.B., Orlova D.V., Danilova L.V. Investigation of Lüders deformation in the mild steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 10, pp. 831–838. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-10-831-838>

22. Данилов В.И., Зуев Л.Б., Горбатенко В.В., Данилова Л.В., Орлова Д.В. Автоволновое описание пластичности материалов с нестабильной фазовой структурой на макромасштабном уровне // Журнал технической физики. 2021. Т. 91. № 2. С. 267–274.
<https://doi.org/10.21883/JTF.2021.02.50361.35-20>

22. Danilov V.I., Zuev L.B., Gorbatenko V.V., Danilova L.V., Orlova D.V. Autowave description of plasticity of materials with unstable phase structure at the macroscale level. *Technical Physics*. 2021, vol. 66, no. 2, pp. 255–262.
<https://doi.org/10.21883/JTF.2021.02.50361.35-20>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Иванович Данилов, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории физики прочности, Институт физики прочности и материаловедения СО 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 СО РАН
ORCID: 0000-0001-6464-6159
E-mail: gvv@ispms.ru

Лидия Владиславовна Данилова, младший научный сотрудник лаборатории физики прочности, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
ORCID: 0000-0002-4124-0516
E-mail: lidaakbo@rambler.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, 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: lidaakbo@rambler.ru

Вклад авторов

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

В. И. Данилов – идея работы, научное руководство, написание окончательного варианта рукописи.

В. В. Горбатенко – проведение механических испытаний и регистрация паттернов локализованной пластичности, анализ и обсуждение результатов.

Л. В. Данилова – обработка экспериментальных данных, построение корреляционных зависимостей, написание первичного варианта рукописи.

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

V. V. Gorbatenko – carrying out mechanical tests and registration of patterns of localized plasticity, analysis and discussion of the research results.

L. V. Danilova – processing of experimental data, obtaining of correlation dependencies, writing the primary version of the manuscript.

Поступила в редакцию 29.12.2021
После доработки 14.01.2022
Принята к публикации 19.01.2022

Received 29.12.2021
Revised 14.01.2022
Accepted 19.01.2022