

Received: 12.02.2024

Revised: 06.05.2024



Accepted: 24.05.2024



DOI: 10.17804/2410-9908.2024.3.064-072



## MACROSCALE PLASTICITY PARAMETER OF METALS AND ALLOYS

L. B. Zuev<sup>a</sup>, S. A. Barannikova<sup>b</sup>, and S. V. Kolosov<sup>c, \*</sup>

*Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
2/4 Akademicheskoy Ave., Tomsk, 634055, Russia*

<sup>a)</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-3991-0207>  lbz@ispms.ru

<sup>b)</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-5010-9969>  bsa@ispms.ru

<sup>c)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-5599-9152>  svk@ispms.ru

\*Corresponding author. E-mail: svk@ispms.ru

Address for correspondence: pr. Akademicheskoy, 2/4, Tomsk, 634055, Russia

Tel: +7 (382) 228-6804; fax: +7 (382) 249-2576

It is shown that plastic flow in solids emerges in a localized manner at a macroscopic scale of  $\sim 10^{-2}$  m. Localized plastic flow zones form patterns of localized strain, which are the projection of the autowave processes of plastic flow, developing in the bulk of the material, onto the specimen surface under study. The speckle photography method was chosen as a source of information about the kinetics of plastic deformation. A common feature of localized plastic flow in solids is the elastic-plastic invariant of deformation, which combines the typical characteristics of localized plastic flow autowaves with those of elastic waves in a crystal lattice. The invariant ratio is defined for nearly forty various materials (BCC, FCC, and HCP metals and alloys, alkali-halide crystals, ceramics, and rocks) under active tension and compression in a temperature range of 143 to 420 K. The origin of the invariant and its relation to other physical characteristics of the crystal lattice, e.g. the Debye temperature, is discussed in physical terms. Besides, numerous corollaries of the elastoplastic invariant are derived, enabling one to describe adequately the regularities of plastic flow. This, in turn, makes it possible to consider the elastic-plastic invariant of deformation as the main equation of the currently developing autowave approach to the physical theory of plastic deformation.

**Keywords:** plasticity, deformation, elasticity, defects, crystal lattice, autowaves, structure, metals

### Acknowledgment

*This work was supported within the framework of the state assignment for the ISPMS SB RAS, project No. FWRW-2021-0011.*

### References

1. Friedel, J. *Dislocations*, Pergamon Press, Oxford, 1964, 512 p.
2. Hull, D. and Bacon, D.J. *Introduction in Dislocations*, Elsevier, Oxford, 2011, 257 p. DOI: 10.1016/C2009-0-64358-0.
3. Seeger, A. and Frank, W. Structure formation by dissipative processes in crystals with high defect densities. *Solid State Phenomena*, 1988, 3–4, 125–138 DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.3-4.125.
4. Haken, H. *Information and Self-Organization*, Springer, Berlin, 2006, 258 p. DOI: 10.1007/3-540-33023-2.
5. Nicolis, G. and Prigogine, I. *Exploring Complexity: An Introduction*, W.H. Freeman & Company, New York, 1989, 328 p.

6. Egorushkin, V.E. and Panin, V.E. Scale invariance of plastic deformation of the planar and crystal subsystems of solids under superplastic conditions. *Physical Mesomechanics*, 2017, 20 (1), 5–13. DOI: 10.1134/s1029959917010015.
7. Zuev, L.B. Autowave plasticity. Localization and collective modes. In: *Proceedings of the First International Conference on Theoretical, Applied and Experimental Mechanics*, Taylor & Francis Group, Cambridge, 2020, 318–321. DOI: 10.1007/978-3-319-91989-8\_65.
8. Zuev, L.B. and Barannikova, S.A. Autowave physics of material plasticity. *Crystals*, 2019, 9 (458), 1–30. DOI: 10.3390/cryst9090458.
9. Zuev, L.B. and Barannikova, S.A. Quasi-particle approach to the autowave physics of metal plasticity. *Metals*, 2020, 10 (11), 1–15. DOI: 10.3390/met10111446.
10. Vildeman, V.E., Lomakin, E.V. and Tretiakova, T.V. Yield delay and space-time inhomogeneity of plastic deformation of carbon steel. *Mechanics of Solids*, 2015, 50 (4), 412–420. DOI: 10.3103/S002565441504007X.
11. Hähner, P. Theory of solitary plastic waves. *Applied Physics A*, 1994, A58 (1), 41–58. DOI: 10.1007/BF00331516.
12. Plekhov, O.A., Naimark, O.B., Saintier, N., and Palin-Luc, T. Elastic-plastic transition in iron: structure and thermodynamic features. *Technical Physics*, 2009, 54 (8), 1141–1146. DOI: 10.1134/S1063784209080088.
13. Reyne, B., Manach, P.-Y., and Moes, N., Macroscopic consequences of Poibert–Luders and Portevin–Le Chatelier bands during tensile deformation in Al–Mg alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 746 (8), 187–196. DOI: 10.1016/j.msea.2019.01.009.
14. Kobelev, N.P., Lebyodkin, M.A., and Lebedkina, T.A. Role of self-organization of dislocations in the onset and kinetics of macroscopic plastic instability. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, 48 (3), 965–974. DOI: 10.1007/s11661-016-3912-x.
15. Taupin, V., Chevy, J., and Fressengeas, C. Effects of grain-to-grain interactions on shear strain localization in Al–C–Li rolled sheets. *International Journal of Solids and Structures*, 2016, 99, 71–81. DOI: 10.1016/j.ijstr.2016.07.023.
16. Tretyakova, T. and Wildemann, V. Study of spatial-time inhomogeneity of inelastic deformation and failure in bodies with concentrators by using the digital image correlation and infrared analysis. *Procedia Structural Integrity*, 2017, 5, 318–324. DOI: 10.1016/j.prostr.2017.07.177.
17. Lebyodkin, M.A., Zhemchuzhnikova, D.A., Lebedkina, T.A., and Aifantis, E.C. Kinematics of formation and cessation of type B deformation bands during the Portevin–Le Chatelier effect in an AlMg alloy. *Results in Physics*, 2019, 12, 867–869. DOI: 10.1016/j.rinp.2018.12.067.
18. Shibkov, A.A., Gasanov, M.F., Zheltov, M.A., Zolotov, A.E., and Ivolgin, V.I. Intermittent plasticity associated with the spatio-temporal dynamics of deformation bands during creep tests in an AlMg polycrystal. *International Journal of Plasticity*, 2016, 86, 37–55. DOI: 10.1016/j.ijplas.2016.07.014.
19. Müller, A., Segel, C., Linderov, M., Vinogradov, A., Weidner, A., and Biermann, H. The Portevin–Le Châtelier effect in a metastable austenitic stainless steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2016, 47, 59–74. DOI: 10.1007/s11661-015-2953-x.
20. Efstathiou, C. and Sehitoglu, H. Strain hardening and heterogeneous deformation during twinning in Hadfield steel. *Acta Materialia*, 2010, 58 (5), 1479–1488. DOI: 10.1016/j.actamat.2009.10.054.
21. Hudson, D.J. Lectures on Elementary Statistics and Probability, 1963, CERN Report 63–29, CERN, Geneva, 1963.
22. Newnham, R.E., *Properties of Materials Anisotropy, Symmetry, Structure*, University Press, Oxford, 2004, 390 p. DOI: 10.1093/oso/9780198520757.001.0001.
23. Zuev, L.B., Barannikova, S.A., Kolosov, S.V., and Nikonova, A.V. Temperature dependence of autowave characteristics of localized plasticity. *Physics of the Solid State*, 2021, 63, 47–53. DOI: 10.1134/S1063783421010236.

Подана в журнал: 12.02.2024



УДК 538.951



DOI: 10.17804/2410-9908.2024.3.064-072



## МАКРОМАСШТАБНЫЙ ПАРАМЕТР ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Л. Б. Зуев<sup>а</sup>, С. А. Баранникова<sup>б</sup>, С. В. Колосов<sup>в, \*</sup>

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук,  
пр-кт Академический, 2/4, г. Томск, 634055, Россия*

<sup>а)</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-3991-0207>  lbz@ispms.ru

<sup>б)</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-5010-9969>  bsa@ispms.ru

<sup>в)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-5599-9152>  svk@ispms.ru

\*Ответственный автор. Электронная почта: svk@ispms.ru

Адрес для переписки: ИФПМ СО РАН, пр-кт Академический, 2/4, Томск, 634055, Россия

Телефон: +7 (382) 249-18-81; факс: +7 (382) 249-25-76

Показано, что пластическое течение в твердых телах возникает локализованно на макроскопическом уровне  $\sim 10^{-2}$  м. Зоны локализованного пластического течения формируют картины локализованной деформации, представляющие собой проекцию автоволновых процессов пластического течения, развивающихся в объеме материала, на наблюдаемую поверхность образца. В качестве источника информации о кинетике пластической деформации выбран метод спекл-фотографии. Общей особенностью локализованного пластического течения в твердых телах является упругопластический инвариант деформации, сочетающий типичные характеристики автоволн локализованного пластического течения с характеристиками упругих волн в кристаллической решетке. Инвариант определен почти для сорока различных материалов (ОЦК-, ГЦК- и ГПУ-металлов и сплавов с решетками, щелочно-галоидных кристаллов, керамики и горных пород) в условиях активного растяжения и сжатия в интервале температур 143–420 К. С физической точки зрения обсуждается происхождение инварианта и его связь с другими физическими характеристиками кристаллической решетки, в частности с температурой Дебая. Выведены также многочисленные следствия упругопластического инварианта, позволяющие адекватно описывать закономерности пластического течения. Это, в свою очередь, позволяет рассматривать упругопластический инвариант деформирования как основное уравнение развивающегося в настоящее время автоволнового подхода к физической теории пластического деформирования.

**Ключевые слова:** пластичность, деформация, упругость, дефекты, кристаллическая решетка, автоволны, структура, металлы

### 1. Введение

С 1930-х годов и по настоящее время жизнеспособные методы описания пластичности традиционно базируются на теории дислокаций [1, 2]. Между тем, несмотря на многочисленные дислокационные модели, предложенные в этот период, отсутствовала строгая и полная физическая теория пластичности твердых тел. Это породило обоснованные сомнения в достоверности электронно-микроскопического анализа тонких металлических фольг как методологической основы дислокационных исследований. Дефицит дислокационных моделей привел к развитию подходов, предложенных авторами A. Seeger, W. Frank, которые рассматривали увеличение плотности дислокаций при деформации как процесс структурообразования [3].

Впоследствии эту идею поддержал Н. Haken, который утверждал, что система считается самоорганизующейся, если она приобретает некоторую пространственную, временную или функциональную структуру без какого-либо специфического внешнего воздействия [4]. На основании этого различные исследователи пришли к выводу, что при пластическом течении возможна самоорганизация дефектной структуры. В то же время G. Nicolis и I. Prigogine четко заявили о невозможности исследования пластичности на чисто механической основе и предложили рассматривать пластичность как часть общей проблемы нелинейных динамических систем, находящихся вдали от равновесия [5]. Это открыло заманчивые перспективы применения понятийного и формального аппаратов теории неравновесных систем (синергетики) при создании и развитии новой механики деформируемого твердого тела.

В результате появилось новое направление в физике пластичности, позволяющее изучать влияние пластического течения в среде со структурными дефектами, а также был достигнут прогресс в понимании сложных аспектов пластического течения. Таким образом, плодотворная концепция многомасштабного явления пластичности позволила прояснить и объяснить ряд проблем, касающихся деформируемых твердых тел [6]. В частности, ранее было показано, что пластическая деформация всегда макроскопически локализована, а закономерности ее локализации на разных стадиях пластического течения принимают форму различных автоволновых процессов [7–9]. В свою очередь, автоволны являются решением реакционно-диффузионной системы параболических уравнений в частных производных

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon} = f(\varepsilon) + D_{\varepsilon\varepsilon}\ddot{\varepsilon}, \\ \dot{\sigma} = g(\sigma) + D_{\sigma\sigma}\ddot{\sigma} \end{cases} \quad (1) \quad (2)$$

для деформации  $\varepsilon$  и напряжения  $\sigma$  соответственно. Для соотношений (1) и (2)  $\varepsilon$  и  $\sigma$  – условные деформация и напряжение и соответствующие им производные;  $D$  – коэффициент диффузии;  $f(\varepsilon)$  и  $g(\sigma)$  –  $N$ -образные функции. Автоволновые эффекты при пластическом деформировании наблюдались и обсуждались также в работах [10–20].

Существование локализованных автоволн пластичности доказано с помощью специально модифицированной для этих целей методики спекл-фотографии [7], позволяющей определять поля векторов смещений точек на поверхности образца и на этой основе рассчитывать компоненты тензора пластической дисторсии. Экспериментально установлено, что локализация пластического течения ведет себя как самопроизвольное разбиение деформируемой среды на чередующиеся в пространстве образца макроскопические деформирующиеся и недеформирующиеся объемы [7]. Сочетание этих объемов образует автоволновую картину локализованной деформации, то есть паттерн локализованной пластичности. Автоволны локализованной пластичности характеризуются длиной  $\lambda \approx 10^{-2}$  м и скоростью распространения  $V_{aw}$  (м/с), обратно пропорциональной коэффициенту деформационного упрочнения  $V_{aw} = V_0 + \Xi/\theta$ . Закон дисперсии автоволн выражается как  $\omega = 1 + k^2$ . В этих соотношениях  $V_0$  и  $\Xi$  – константы,  $\omega$  – частота, а  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число.

В новом подходе были предприняты попытки учесть, что пластическая деформация происходит в открытой системе. Также было обращено внимание на нелинейность деформируемой среды, обусловленную сложным видом зависимости напряжения от деформации  $\sigma(\varepsilon)$ , а также ее активность и неравновесность, связанные с наличием локальных источников потенциальной энергии, распределенных по объему (упругие поля возникающих и релаксирующих концентраторов напряжений) [4].

Таким образом, целью настоящей работы является анализ роли макроскопических эффектов пластической деформации в развитии пластического течения и установление их функциональной связи с решеточными характеристиками деформируемой среды.

## 2. Результаты и обсуждение

### 2.1. Упруго-пластический инвариант автоволновой пластичности

В соответствии с представлениями, сформулированными в работе [7], деформацию твердого тела будем рассматривать как результат взаимодействия упругой и пластической составляющих. Каждый компонент контролируется процессами, происходящими в соответствующих масштабах. Можно предположить, что развитие локализованного пластического течения характеризуется экспериментально определенной длиной автоволны  $\lambda$  и соответствующей скоростью  $V_{aw}$ . Для упругого деформирования такими характеристиками могут быть межплоскостное расстояние  $\chi$  и скорость распространения поперечных ультразвуковых волн  $V_t$ , определяемые по справочной литературе.

### 2.2. Введение упруго-пластического инварианта деформации

Видно, что отношения пространственного и скоростного масштабов процессов пластического и упругого деформирования  $\lambda/\chi \approx V_t/V_{aw} \approx 10^7$  имеют один и тот же порядок величины. Следовательно, произведения  $\lambda V_{aw}$  и  $\chi V_t$ , имеющие размерности кинематической вязкости  $m^2s^{-1}$ , которые совпадают с соответствующими размерностями коэффициентов  $D_{\epsilon\epsilon}$  и  $D_{\sigma\sigma}$  в уравнениях (1) и (2), будем считать характерными для этих процессов. Таким образом, представляется целесообразным проанализировать соотношение величин  $\lambda V_{aw}$  и  $\chi V_t$  для различных материалов. Основа для обобщения такого рода данных приведена в таблице, включающей обновленные и дополненные экспериментальные результаты из работ [7–9]. На рис. 1 а приведены основные корреляционные зависимости произведения  $\lambda V_{aw}$  от температуры  $\Theta_D/T$ , где  $\Theta_D$  – температура Дебая, и атомного номера элемента  $Z$ , а на рис. 1 б – основные корреляционные зависимости между произведениями  $\lambda V_{aw}$  и  $\chi V_t$  и атомным номером элемента  $Z$ .

Экспериментальные значения инварианта

$$\hat{Z} = \lambda V_{aw} / \chi V_t \quad (3)$$

подвергались статистическому анализу по методу, описанному в работе [21]. Для этого данные были преобразованы в вариационный ряд. В качестве нулевой гипотезы предполагалось, что распределение  $\hat{Z}$  является нормальным. Это предположение было проверено с использованием критерия Колмогорова – Смирнова с использованием программного обеспечения Statistica.

Таблица

Условия испытаний для определения характеристик автоволновой пластичности

Вид испытания, материал	Количество измерений
Испытания металлических образцов на растяжение (линейное деформационное упрочнение)	24
Испытания металлических образцов на растяжение (легкое скольжение)	5
Сжатие монокристаллов щелочно-галоидных кристаллов	3
Сжатие горных пород	2
Путь отдельных дислокаций	4

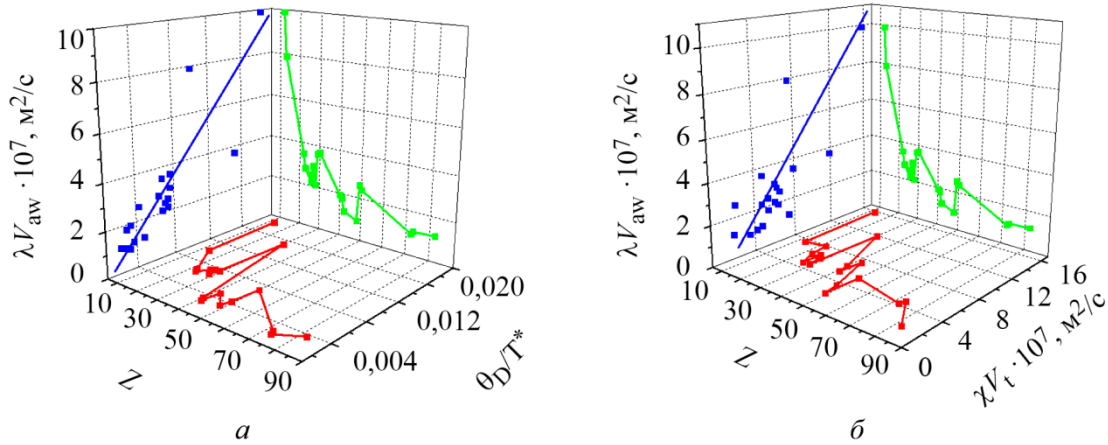


Рис. 1. Зависимости произведения  $\lambda V_{aw}$  от температуры и атомного номера  $Z$  (а); корреляционные зависимости между произведениями  $\lambda V_{aw}$  и  $\chi V_t$  и атомным номером  $Z$  (б)

Стандартное нормальное распределение  $z_j$  для  $j$ -го ранга переменной при количестве измерений  $N = 38$  рассчитывалось как  $z_j = F^{-1}[(3j - 1)/(3N + 1)]$ , где  $F^{-1}$  – обратная функция стандартного нормального распределения, преобразующая нормальную вероятность  $p$  в нормальное значение  $z$ .

Согласно рис. 2 распределение  $\hat{Z}$  действительно является нормальным и характеризуется следующими параметрами:  $\hat{Z}_{min} = 0,2$ ;  $\hat{Z}_{max} = 1,1$ ;  $\sigma^2 = 0,040$ .

На основе этих результатов можно получить безразмерное соотношение

$$\left\langle \frac{\lambda V_{aw}}{\chi V_t} \right\rangle = \hat{Z} = 0,46 \pm 0,03 \approx 1/2, \quad (4)$$

которое здесь и далее называется инвариантом упруго-пластической деформации. Он связывает параметры упругой ( $\chi$  и  $V_t$ ) и пластической ( $\lambda$  и  $V_{aw}$ ) деформации. Соотношение (4) справедливо для стадий линейного деформационного упрочнения материалов, когда  $\sigma \sim \epsilon$ . На этой стадии формируется фазовая автоволна, для которой  $\omega t - kx = \text{const}$ .

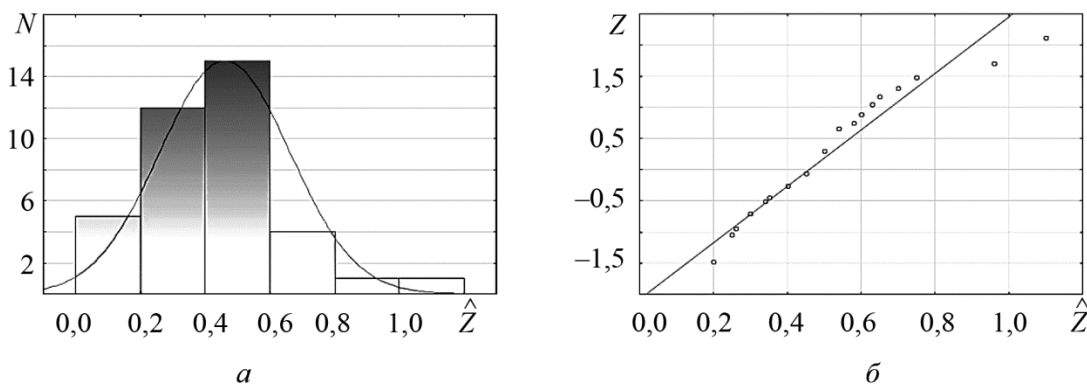


Рис. 2. Нормальное распределение:  $N$  – количество наблюдений,  $\hat{Z}$  – значения инварианта (а); график нормальной вероятности:  $Z$  – значения стандартного нормального распределения,  $\hat{Z}$  – значения инварианта (б)

Графическая интерпретация данных представлена на рис. 3.

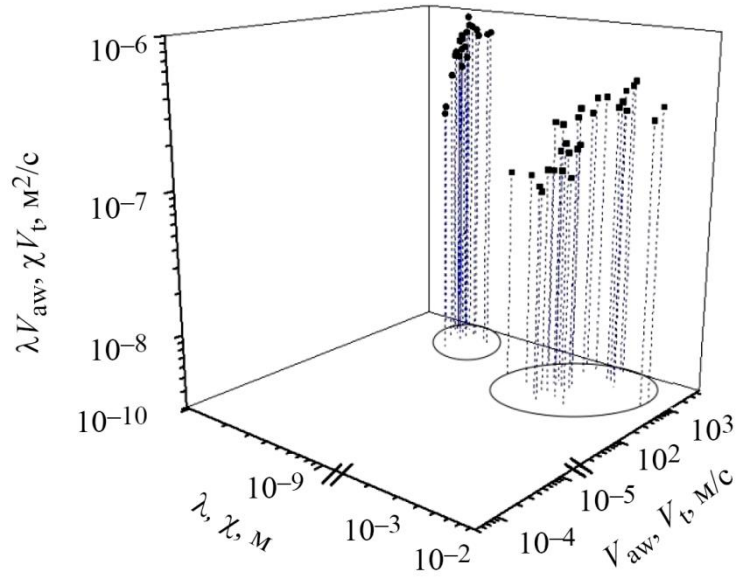


Рис. 3. Сравнение произведений  $\lambda V_{aw}$  и  $\chi V_t$ , входящих в упругопластический инвариант (3)

### 2.3. Упруго-пластический инвариант и характеристики среды

Обсуждая физический смысл инварианта (3), целесообразно найти его корреляцию с другими решеточными характеристиками деформируемых сред. В качестве первого шага можно рассмотреть известные соотношения для модуля сдвига  $G \approx \chi^{-1} \cdot d^2W/du^2$  и скорости  $V_t^2 \approx G/\rho \approx \chi^2 \omega_D^2$ , где  $W$  – межчастичный потенциал,  $u$  – малое смещение,  $\rho$  – плотность среды,  $\omega_D$  – дебаевская частота [22]. В этом случае

$$\lambda V_{aw} \approx \hat{Z} \cdot \frac{d^2W/du^2}{(\omega_D \chi) \rho} \approx \hat{Z} \frac{d^2W/du^2}{\xi_1} \quad (5)$$

где  $\xi_1 = (\omega_D \chi) \rho = V_t \rho$  – акустическое сопротивление среды.

Инвариант (3), записанный в виде

$$\frac{\lambda}{V_t} \approx \hat{Z} \cdot \frac{\chi}{V_{aw}} \approx \hat{Z} \vartheta \approx 10^{-5} \text{ s}, \quad (6)$$

указывает на равенство характерных времен упругой и пластической деформации  $\vartheta$ . Полагая, что пластическая деформация термически активирована [1, 2], можно утверждать, что она имеет вид  $\vartheta \approx \omega_D^{-1} \exp(U/k_B T)$ , где  $k_B$  – постоянная Больцмана, а  $U$  – энергия активации. При  $T = 300$  К значение  $U$  составляет приблизительно 0,5 эВ, что характерно для серии элементарных актов пластического течения [1, 2].

Наконец, переписав уравнение (3) при  $\lambda V_{aw} = \hat{Z} \chi V_t = \hat{Z} \chi^2 \omega_D$  и применив соотношения  $k_B \theta_D = \hbar \omega_D \approx \hbar (V_t/\chi)$ , где  $\hbar$  – постоянная Планка, а  $\theta_D$  – температура Дебая, получаем

$$\lambda V_{aw} \approx \hat{Z} \chi V_t \approx \hat{Z} \chi^2 \frac{k_B \theta_D}{\hbar} \approx \hat{Z} \frac{k_B}{\hbar} \chi^2 \theta_D(T). \quad (7)$$

Таким образом, оказывается, что локализованное пластическое течение  $\lambda V_{aw}$  является функцией температуры Дебая  $\theta_D(T)$  [22]. Уравнение (7) качественно описывает экспериментально наблюдаемые температурные зависимости автоволновых характеристик [23].

Определенная универсальность упругопластического инварианта (3) и его связь с решеточными характеристиками деформируемой среды возводят его в ранг важной закономерности локализованного пластического течения.

### 3. Заключение

При описании развития локализованной пластичности на стадии линейного деформационного упрочнения материалов можно ввести упругопластический инвариант деформации, связывающий характеристики упругой и пластической составляющих полной деформации. Взаимосвязь этих составляющих определяется тем, что формирование автоволновой структуры локализованного пластического течения является упорядочением (самоорганизацией) деформируемой среды, и оно должно протекать с уменьшением энтропии системы.

Инвариант играет роль основного уравнения автоволновой теории пластичности. Отсюда следует ряд факторов, правильно описывающих основные закономерности автоволнового процесса локализованного пластического течения, в частности скорость и дисперсия локализованных автоволн пластичности, обстоятельства, вызывающие явления локализации при деформации, масштабные эффекты, зависимость длины автоволны от размера зерна и т. д.

Таким образом, экспериментальное исследование закономерностей локализованного пластического течения, а также представления о пластическом течении как о структурообразовании позволили объяснить различные важные закономерности пластичности твердых тел с единой точки зрения, что ранее было возможно лишь с помощью внедрения множества конкретных моделей.

### Благодарность

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН (проект № FWRW-2021-0011).*

### Литература

1. Friedel J. Dislocations. – Oxford : Pergamon Press, 1964. – 512 p.
2. Hull D., Bacon D. J. Introduction in Dislocations. – Oxford : Elsevier, 2011. – 257 p. – DOI: 10.1016/C2009-0-64358-0.
3. Seeger A., Frank W. Structure formation by dissipative processes in crystals with high defect densities // Solid State Phenomena. – 1988. – Vols. 3–4. – P. 125–138. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.3-4.125.
4. Haken H. Information and Self-Organization. – Berlin : Springer, 2006. – 258 p. – DOI: 10.1007/3-540-33023-2.
5. Nicolis G., Prigogine I. Exploring Complexity: An Introduction. – New York : W. H. Freeman & Company, 1989. – 328 p.
6. Egorushkin V. E., Panin V. E. Scale invariance of plastic deformation of the planar and crystal subsystems of solids under superplastic conditions // Physical Mesomechanics. – 2017. – Vol. 20, No. 1. – P. 5–13. – DOI: 10.1134/s1029959917010015.
7. Zuev L. B. Autowave plasticity. Localization and collective modes // Proceedings of the First International Conference on Theoretical, Applied and Experimental Mechanics. – Cambridge : Taylor & Francis Group, 2020. – P. 318–321. – DOI: 10.1007/978-3-319-91989-8\_65.
8. Zuev L. B., Barannikova S. A. Autowave physics of material plasticity // Crystals. – 2019. – Vol. 9, No. 458. – P. 1–30. – DOI: 10.3390/cryst9090458.
9. Zuev L. B., Barannikova S. A. Quasi-particle approach to the autowave physics of metal plasticity // Metals. – 2020. – Vol. 10 (11). – P. 1–15. – DOI: 10.3390/met10111446.
10. 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. – DOI: 10.3103/S002565441504007X.
11. Hähner P. Theory of solitary plastic waves // Applied Physics A. – 1994. – Vol. A58, No. 1. – P. 41–58. – DOI: 10.1007/BF00331516.



12. Elastic-plastic transition in iron: structure and thermodynamic features / O. A. Plekhov, O. B. Naimark, N. Saintier, T. Palin-Luc // *Technical Physics*. – 2009. – Vol. 54. – P. 1141–1146. – DOI: 10.1134/S1063784209080088.
13. Reyne B., Manach P.-Y., Moes N. Macroscopic consequences of Poibert–Luders and Portevin–Le Chatelier bands during tensile deformation in Al–Mg alloys // *Materials Science and Engineering: A*. – 2019. – Vol. 746. – P. 187–196. – DOI: 10.1016/j.msea.2019.01.009.
14. Kobelev N. P., Lebyodkin M. A., Lebedkina T. A. Role of self-organization of dislocations in the onset and kinetics of macroscopic plastic instability // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2017. – Vol. 48, No. 3. – P. 965–974. – DOI: 10.1007/s11661-016-3912-x.
15. Taupin V., Chevy J., Fressengeas C. Effects of grain-to-grain interactions on shear strain localization in Al–Cu–Li rolled sheets // *International Journal of Solids and Structures*. – 2016. – Vol. 99. – P. 71–81. – DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2016.07.023.
16. Tretyakova T., Wildemann V. Study of spatial-time inhomogeneity of inelastic deformation and failure in bodies with concentrators by using the digital image correlation and infrared analysis // *Procedia Structural Integrity*. – 2017. – Vol. 5. – P. 318–324. – DOI: 10.1016/j.prostr.2017.07.177.
17. Kinematics of formation and cessation of type B deformation bands during the Portevin–Le Chatelier effect in an AlMg alloy / M. A. Lebyodkin, D. A. Zhemchuzhnikova, T. A. Lebedkina, E. C. Aifantis // *Results in Physics*. – 2019. – Vol. 12. – P. 867–869. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.12.067>.
18. Intermittent plasticity associated with the spatio-temporal dynamics of deformation bands during creep tests in an AlMg polycrystal / A. A. Shibkov, M. F. Gasanov, M. A. Zheltov, A. E. Zolotov, V. I. Ivolgin // *International Journal of Plasticity*. – 2016. – Vol. 86. – P. 37–55. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2016.07.014>.
19. The Portevin–Le Châtelier effect in a metastable austenitic stainless steel / A. Müller, C. Segel, M. Linderov, A. Vinogradov, A. Weidner, H. Biermann // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2016. – Vol. 47. – P. 59–74. – DOI: 10.1007/s11661-015-2953-x.
20. Efstathiou C., Sehitoglu H. Strain hardening and heterogeneous deformation during twinning in Hadfield steel // *Acta Materialia*. – 2010. – Vol. 58, iss. 5. – P. 1479–1488. – DOI: 10.1016/j.actamat.2009.10.054.
21. Hudson D.J. *Lectures on Elementary Statistics and Probability*. – Geneva : CERN, 1963. – 101 p. – DOI: 10.5170/CERN-1963-029.
22. Newnham R. E. *Properties of Materials: Anisotropy. Symmetry. Structure*. – Oxford : University Press, 2004. – 390 p. – DOI: 10.1093/oso/9780198520757.001.0001.
23. Temperature dependence of autowave characteristics of localized plasticity / L. B. Zuev, S. A. Barannikova, S. V. Kolosov, A. V. Nikonova // *Physics of the Solid State*. – 2021. – Vol. 63. – P. 47–53. – DOI: 10.1134/S1063783421010236.