

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 539.372:669:531

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.004

ТОКОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ УПРОЧНЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТА ДЕФОРМАЦИОННОЙ СРЕДЫ КАК ПРИЧИНА ФОРМИРОВАНИЯ БЕГАЮЩЕЙ ШЕЙКИ

**Владимир Александрович Старенченко¹, Яна Данияровна Липатникова^{2†},
Юлия Владимировна Соловьева³, Николай Николаевич Белов⁴,
Лариса Анатольевна Валуйская⁵, Ирина Герасимовна Вовнова⁶**

^{1, 2, 3, 4, 6} Томский государственный архитектурно-строительный университет, пл. Соляная, 2, 634003, Томск, Россия

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, 634050, Томск, Россия

⁵ Сибирский государственный медицинский университет, Московский тракт, 2, 634050, Томск, Россия

¹ star@tsuab.ru

² yana.lipatnikova@list.ru[†]

³ j_sol@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2362-0555>

⁴ n.n.belov@mail.ru

⁵ val_larisa@mail.ru

⁶ irinavov12@mail.ru

Аннотация. Настоящая работа посвящена исследованию влияния «токовой» неустойчивости упрочнения элемента деформационной среды на локализацию деформации на разных масштабных уровнях. Термин «токовая неустойчивость» взят из характеристики токовой неустойчивости электропроводности полупроводников в сильных электрических полях, имеющей характерную кривую ток-напряжение (I-U) [1]. Аналогичная форма кривой упрочнения элемента среды деформирующее напряжение-деформация (σ - ϵ) рассматривается как причина локализации деформации. Рассмотрены и моделируются явления локализации деформации, вызванные «токовой» неустойчивостью различного вида. Показано, что сценарий пластического течения при «токовой» неустойчивости, заложенный на уровне микроэлемента среды, может проявляться на макромасштабном уровне пластического течения в виде локализаций различного вида. Моделирование проведено на основе конечно-элементной двухуровневой модели, предложенной ранее авторами статьи [2]. Рассмотрены случаи, когда в зависимости от вида кривых упрочнения элементарного объема деформируемого образца, описывающих «токовую» неустойчивость, на макроуровне наблюдается либо «устойчивая», либо «бегающая» шейка при одноосном растяжении образца.

Ключевые слова: неустойчивость пластического течения, локализация пластической деформации, моделирование, «бегающая» шейка.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEMN-2020-0004).

Для цитирования: Старенченко В.А., Липатникова Я.Д., Соловьева Ю.В., Белов Н.Н., Валуйская Л.А., Вовнова И.Г. Токовая неустойчивость упрочнения микроэлемента деформационной среды как причина формирования бегающей шейки // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 4. С. 454–462. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.004.

Original article

CURRENT INSTABILITY OF HARDENING OF DEFORMABLE MEDIUM MICROELEMENT AS A REASON OF NECK PROPAGATION

Vladimir A. Starenchenko¹, Yana D. Lipatnikova^{2†}, Yuliya V. Solov'eva³, Nikolai N. Belov⁴,
Larisa A. Valyiskaya⁵, Irina G. Vovnova⁶

^{1, 2, 3, 4, 6} Tomsk State University of Architecture and Building, Solyanaya Sq., 2, Tomsk, 634003, Russia

² National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Pr., 30, Tomsk, 634050, Russia

³ Siberian State Medical University, Moskovsky trakt, 2, Tomsk, 634050, Russia

¹ star@tsuab.ru

² yana.lipatnikova@list.ru†

³ j_sol@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2362-0555>

⁴ n.n.belov@mail.ru

⁵ val_larisa@mail.ru

⁶ irinavov12@mail.ru

Abstract. The influence of “current” instability of the deformable medium element hardening to the localization of deformation at different scale levels was studied. The term the “current instability” was used as an analogy with the current instabilities of the semiconductors electrical conductivity in strong electric fields with the specific current-voltage curves (I-U) [1]. The similar shapes of the hardening curves of an element of a deformable medium (σ - ϵ) were considered as the cause of deformation localization. The phenomena of deformation localization caused by “current” instabilities of various types were considered and modeled. It was shown that the scenario of plastic flow in the case of “current” instability at the level of a microelement of the medium can manifest itself at the macro scale level of plastic flow in the form of various types of localizations. The simulation was carried out on the basis of a two-level finite element model proposed earlier by the authors [2]. The cases when either a “stable” neck or neck propagation at the macrolevel during uniaxial tension of the sample were observed. Ones depended on the shape of the hardening curves of the elementary volume of the deformed sample similar the current instability curves.

Keywords: instability of plastic flow, localization of plastic deformation, modeling, neck propagation.

Acknowledgements: The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FEMN-2020-0004).

For citation: Starenchenko, V. A., Lipatnikova, Y. D., Solov'eva, Yu. V., Belov, N. N., Valyiskaya, L. A. & Vovnova, I. G. (2022). Current instability of hardening of deformable medium microelement as a reason of neck propagation. *Fundamental'nye problemy sovremennoy materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 4(19), 454–462. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.004.

Введение

Хорошо известно, что явления микролокализации пластического течения являются естественными механизмами, обеспечивающими сдвиговую деформацию кристаллических материалов и формирование линий скольжения. В то же время, макролокализации пластической деформации, в особенности суперлокализации [3–5], являются весьма нежелательными с практической точки зрения: приводят к существенным проблемам при обработке и формовании металлических изделий, предшествуют и являются причиной разрушения материала. Понимание и выяснение базовых причин, приводящих к различным видам неоднородностей в процессе пластической деформации металлических материалов, является чрезвычайно важной

научно-практической задачей. Можно показать, что неоднородная пластическая деформация на различных масштабных уровнях может быть связана с «токовой» неустойчивостью микро- и макросдвигов под воздействием внешних приложенных напряжений по аналогии с явлением токовой неустойчивости электропроводности полупроводников в сильных электрических полях [1].

Формирование линий скольжения

Элементарным актом пластической деформации является срабатывание под действием внешнего напряжения источника Франка-Рида и испускание серии дислокационных петель, результатом которого является возникновение линий скольжения на поверхности кристалла.

Рассмотрим этот процесс более подробно. Пусть источником Франка-Рида является свободный дислокационный сегмент длиной l (рис.1). Под воздействием внешнего напряжения τ свободный дислокационный сегмент прогибается до значений радиуса прогиба R , определяемого из соотношения

$$\tau = \frac{Gb}{R},$$

где G – модуль сдвига, b – вектор Бюргера.

Именно такое сопротивление внешнему напряжению оказывает прогибающийся свободный сегмент дислокации. Это происходит до тех пор, пока радиус сегмента уменьшается, а напряжение не достигнет критического значения, соответствующего минимальному радиусу прогиба ($R_{\min}=l/2$) равному половине длины дислокационного сегмента. Дальнейшее движение сегмента приводит к увеличению радиуса прогиба и дислокационного сегмента и, соответственно, к уменьшению сопротивления движению дислокационного сегмента. Движение дислокационного сегмента приводит к возникновению сдвига, пропорционального площади, описываемой этим сегментом. Это означает, что после достижения критической величины сдвига $a_{\text{кр}} \sim l^2$ источник Франка-Рида будет неограниченно число раз испускать дислокационные петли, что приведет, в идеальном случае, к неограниченному развитию сдвига в условиях уменьшающегося сопротивления деформированию.

Схематично этот процесс показан на рис.2, кривая 1. В реальности этот процесс ограничен барьерами, останавливающими движение дислокационной петли. Тогда, обратные напряжения от остановившейся у барьера дислокации заблокируют источник и дальнейший сдвиг потребует увеличения внешних напряжений (см. рис.2, кривая 2). Такая зависимость аналогична токовой неустойчивости [1].

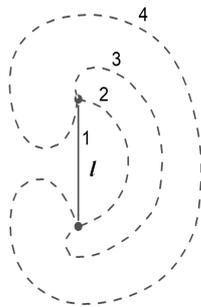


Рис.1. Схема действия источника Франка-Рида

Fig.1. Diagram of the operation of the Frank-Read source

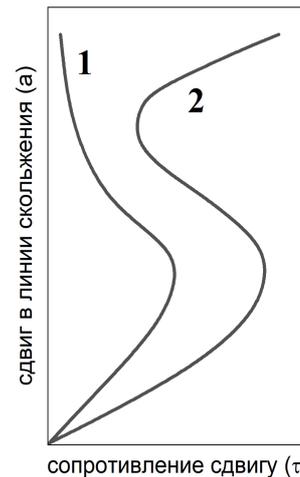


Рис.2. Зависимость сдвига в линии скольжения, формируемой источником Франка-Рида от действующего напряжения (токовая неустойчивость микросдвига)

Fig.2. Dependence of the shift in the slip line formed by the Frank-Read source on the operating voltage (microshear current instability)

Другая возможность формирования линии скольжения связана с несовершенством источника Франка-Рида, отягощенного порогами, либо слабыми междислокационными реакциями, и способностью самоочищаться под действием приложенного напряжения. Однако, и в этом случае будет возникать неустойчивость такого же типа.

В монокристаллах Ni_3Ge нами было обнаружено явление высокотемпературной суперлокализации пластической деформации, связанными с интенсивными субструктурными превращениями в дислокационном хаосе [3-5]. Было обнаружено, что в определенных условиях флуктуация макросдвига приводит к формированию и неограниченному развитию суперполосы деформации. Это происходило в том случае, когда не было препятствий для движения полосы макросдвига. При этом развитие полосы происходило на фоне падающих деформирующих напряжений (рис.3). В случае, если ограничить развитие суперполосы пуансоном деформирующей машины, получим иную картину деформационного упрочнения (рис.4). Нетрудно заметить, что и в случае макроскопической суперлокализованной полосы имеет место, как и для источника Франка-Рида, «токовая» неустойчивость. Можно полагать, что суперлокализацию можно рассматривать как развитие макросдвига, вызванного неустойчивым движением «макродислокации», сопровождаемым субструктурными превращениями (рис.5) при падающем сопротивлении движению «мак-

родислокации». Другими словами, можно допустить, что в обоих случаях имеет место одинаковый характер неустойчивости сдвига.

Рассмотренные примеры механизмов формирования линий скольжения и полос суперлокализации сдвига показывают, что развитие неоднородностей пластического течения как на микроуровне, так и на макроуровне может быть связано с токовой неустойчивостью микросдвигов и макросдвигов при воздействии внешнего напряжения.

Чтобы изучить влияние характера упрочнения элементарных объемов материала деформируемого образца, проявляющегося в «токовой» неустойчивости, на картину макродеформации были проведены конечно-

элементные расчёты деформации прямоугольного образца при одноосном растяжении. При этом исследованы сценарии, при которых возможно образование стабильной шейки, либо локализация пластической деформации в виде «бегающей» шейки. «Бегающая» шейка в литературных данных рассматривается как периодический, колебательный процесс образования в деформируемом образце областей разупрочненного материала задолго до возникновения «устойчивой» локализации или «устойчивой» шейки и последующего разрушения [6-8]. Это явление наблюдалось на разных материалах: алюминии и алюминиевых сплавах [8, 9], цинк-алюминиевом сплаве ЦА22 (Zn-22Al) [10], циркониевом сплаве Э110 [8] и др.

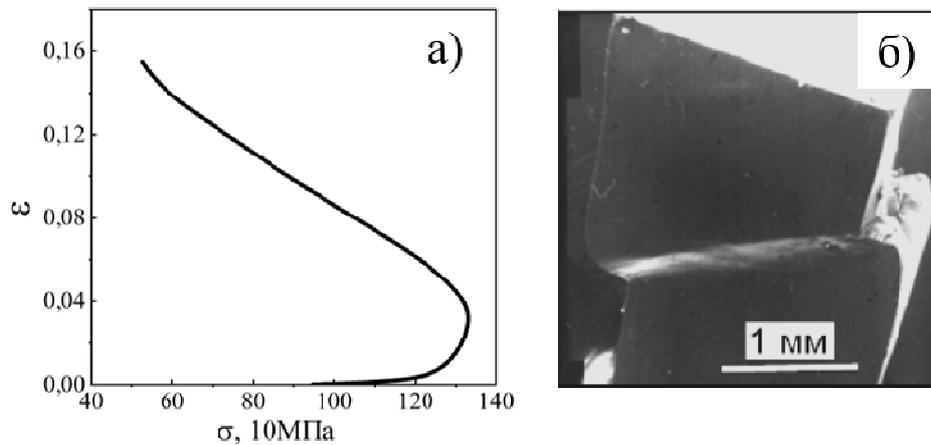


Рис.3. Экспериментальная кривая деформации (а) и образец монокристалла Ni_3Ge с суперполосой после деформации (б) ($T = 750\text{ }^{\circ}C$, ориентировка оси сжатия [001])

Fig.3. Experimental strain curve (a) and a sample of a Ni_3Ge single crystal with a superband after deformation (b) ($T = 750\text{ }^{\circ}C$, [001] compression axis orientation)

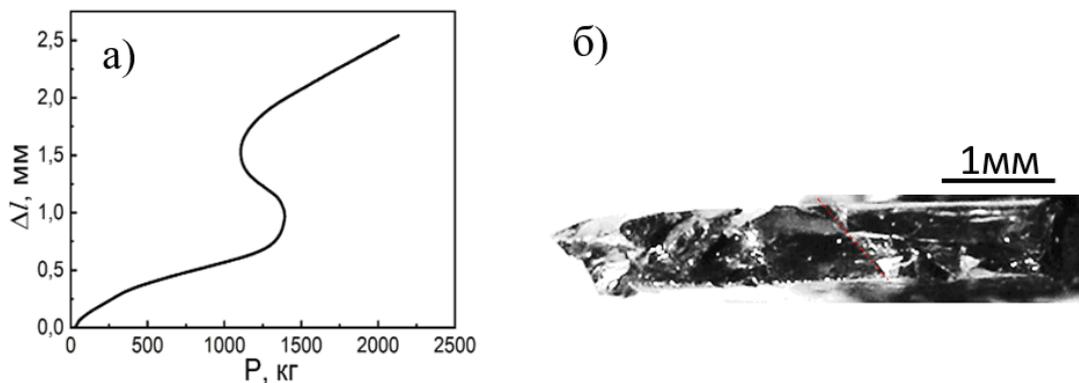


Рис.4. Экспериментальная кривая деформации (а) и образец монокристалла Ni_3Ge (б) ($T = 700\text{ }^{\circ}C$, ориентировка оси сжатия [001]) после деформирования с ограничением полос макролокализации

Fig.4. Experimental strain curve (a) and Ni_3Ge single crystal sample (b) ($T = 700\text{ }^{\circ}C$, compression axis orientation [001]) after deformation with limitation of macrolocalization bands

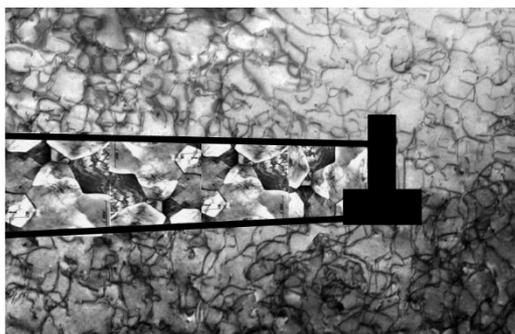


Рис.5. Схема развития макросдвига

Fig.5. Scheme of development of a macroshear

Методика исследования

Исследования проводились теоретическим методом путем конечно-элементного моделирования деформации металлического стержня при одноосном растяжении. В основе численного расчета деформации лежит модель упругопластической среды [2]. Данная модель включает классические законы сохранения массы и импульсов и энергии, определяющие соотношения теории пластического течения и уравнение состояния в форме Ми-Грюнаизена. Механические характеристики были взяты для сплава ЦА22. Частично эти данные были взяты из литературных источников [11, 12], частично вычислялись по формулам для смеси [13].

Ранее в работах [14, 15] были модельно получены результаты по сильно локализованной деформации в сплавах со сверхструктурой $L1_2$ при сжатии, которая выражалась в образовании полосы суперлокализации, и шейки – при растяжении. Этот результат удалось получить благодаря объединению модели механики упругопластической среды и физической модели дислокационной кинетики. Физическая модель задавала эволюцию дефектной структуры и, как результат, упрочнение и разупрочнение элемента деформационной среды, использующиеся в механической модели.

В данном исследовании упрочнение и разупрочнение задавалось введением кривой деформации элемента среды с «токовой» неустойчивостью в критерии текучести Мизеса. При этом для описания явления «бегающей» шейки, как явления периодически сменяющегося процессы упрочнения и разупрочнения в локальных областях образца, была выбрана немонотонная кривая упрочнения с несколькими максимумами. Колебания напряжения этих кривой выбраны в диапазоне согласно значениям, найденным в литературных данных [11, 12].

Численная реализация данной модели проведена в программном комплексе «РАНЕТ-3» [16].

По мнению авторов настоящего исследования для возникновения деформации, в образце по типу «бегающей» шейки необходим сценарий развития деформации элемента деформационной среды, содержащей токовую неустойчивость и отвечающий кривой упрочнения, представленной на рис.6.

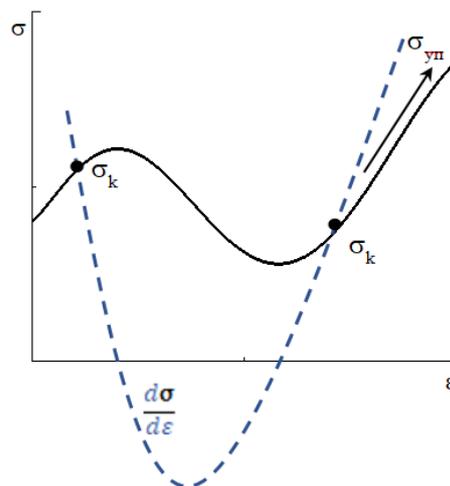


Рис.6. Схематичное представление кривой упрочнения элемента деформационной среды, соответствующей токовой неустойчивости, при которой возможно появление бегающей шейки

Fig.6. Schematic representation of the hardening curve of the element of the deformation medium, corresponding to current instability, at which the appearance of the neck propagation is possible

При таком сценарии критерий Консидера выполняется в любом случае. При достижении напряжений значения σ_{k1} начнется формирование шейки, которое продолжится до достижения значений σ_{k2} . В этой точке процесс локализации будет приостановлен в шейке (согласно критерию Консидера), но соседние с шейкой области будут находиться на стадии кривой, благоприятной для развития локализации деформации, и, таким образом, локализация деформации должна будет перейти на соседние с шейкой области. Это может привести к повторяющемуся процессу и распространению шейки на весь образец. Также возможно образование нескольких шеек, которые, распространяясь, взаимодействуют между собой. Это приводит, в целом, к однородному развитию деформации без катастрофической локализации, приводящей к разрушению. Данный процесс будет проиллюстрирован результатами конечно-элементного моделирования в следующем разделе.

Результаты моделирования

Для проверки изложенной гипотезы проведены расчеты деформации прямоугольного стержня на одноосное растяжение. Стержень длиной 14 мм, скорость деформации 30 м/с. Далее будут представлены результаты расчетов с разными зависимостями σ – ε , которые описывают процессы упрочнения и разупрочнения элементарного объема деформирующегося образца.

В первом случае была выбрана немонотонная зависимость с одним пиком максимума (рис.7а), которая не предполагает возникновения «бегающей» шейки, но создает условия для возникновения стабильной шейки. Действительно, в начальных стадиях деформации начинает формироваться шейка (рис.7б), которая носит устойчивый характер вплоть до разрушения при значении общей деформации 29 %. При этом остальная часть образца остается практически не деформированной.

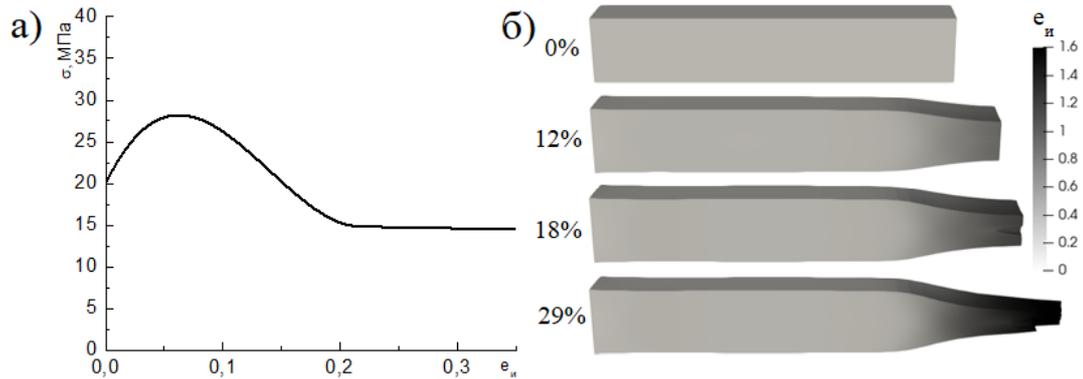


Рис.7. Кривая упрочнения элементарного объема деформационной среды, благоприятствующая развитию стабильной шейки (а) и картины распределения интенсивности пластических деформаций (ε_n), соответствующие различным степеням деформации (б)

Fig.7. Curve of hardening of the elementary volume of the deformation medium, favoring the development of a stable neck (a) and patterns of distribution of the intensity of plastic deformations (ε_n), corresponding to different degrees of deformation (b)

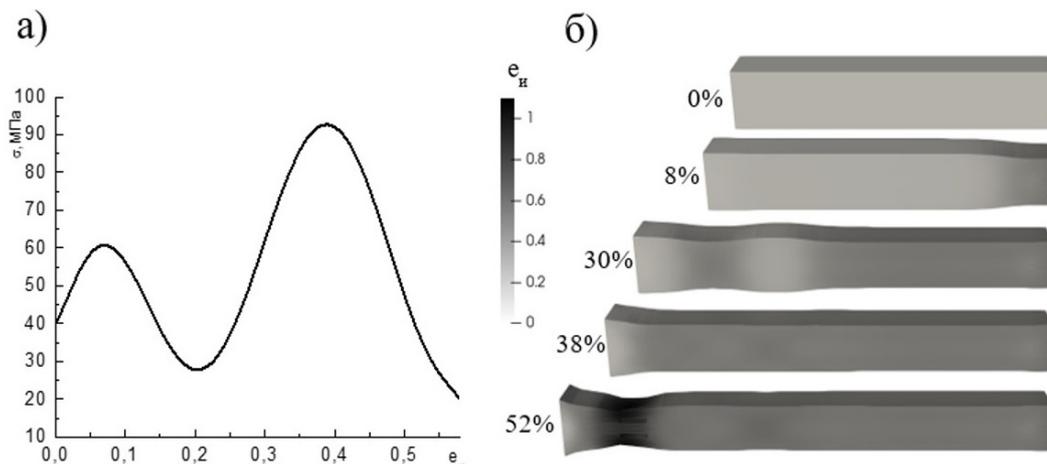


Рис.8. Повторная токовая неустойчивость упрочнения элементарного объема деформационной среды, благоприятствующая развитию «бегающей» шейки (а), картины распределения интенсивности пластических деформаций (ε_n), соответствующие различным степеням деформации (б)

Fig.8. Repeated current instability of hardening of an elementary volume of a deformation medium, favoring the development of a neck «propagation» (a), patterns of distribution of the intensity of plastic deformations (ε_n), corresponding to different degrees of deformation (b)

Во втором случае зависимость σ – ε с двумя пиками максимума характеризовала упрочнение элементарных объемов стержня (рис.8а).

По результатам моделирования (рис.8б) видно, что при 8 % деформации формируется локализация ближе к краю стержня, которая не усили-

вается в этом же месте, а распространяется по объему образца. Одновременно с этим возникает еще одна шейка, которая так же распространяется по остальному объему навстречу первой, в результате чего к 38 % общей деформации распределение величины интенсивности пластических деформаций по всему объему образца практически однородное, а стержень имеет форму практически подобную первоначальному состоянию. Дальнейшее растяжение приводит к еще одной локализации деформации, в которой происходит разрушение материала.

Заключение

В настоящей работе представлены условия развития деформации элементарного объема деформационной среды, которые могут быть обобщены на более широкий класс материалов, необходимые для формирования «бегающих» шеек при растяжении образца. Эти условия заключаются в том, что для появления «бегающих» шеек обязателен сценарий развития деформации элемента деформационной среды по типу «токовой» неустойчивости (упрочнение – разупрочнение – упрочнение). При этом реализуется сценарий «однородная деформация → появление шеек → их распространение → однородная деформация». В тоже время необходимо, чтобы кривая «токовой» неустойчивости упрочнения демонстрировала общий рост напряжения течения. То есть каждая следующая стадия неустойчивости упрочнения должна достигать больших значений напряжения, чем предыдущая стадия. В противном случае формируется стабильная шейка, локализация деформации в которой приводит к разрушению. Это связано с тем, что при возникновении шейки локализация деформации в ней продолжается до достижения точки, в которой выполняется условие $\sigma = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$, на кривой упрочнения. После прохождения этой точки локализация в шейке прекращается и начинает распространяться на соседние области. Если упрочнение, следующее за этой точкой, достигает значений напряжения меньших или равного предыдущего пика максимума и сменяется на разупрочнение, то шейка не становится «бегающей», локализация усиливается в образовавшейся шейке, образуется стабильная шейка.

Список литературы

1. Игумнов В.Н. Физические основы микроэлектроники: учебное пособие – изд. 2-е, исправленное. Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2010. 272 с.
2. Старенченко В.А., Валуйская Л.А., Фахрутдинова Я.Д., Соловьева Ю.В., Белов Н.Н. Исследование процессов локализации пластической деформации методом компьютерного моделирования // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55, № 2. С. 76–87.
3. Старенченко В.А., Соловьева Ю.В., Фахрутдинова Я.Д., Валуйская Л.А. Суперлокализация деформации в монокристаллах Ni_3Ge со сверхструктурой $L1_2$ // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55, № 1. С. 62–73.
4. Соловьева Ю.В., Липатникова Я.Д., Старенченко С.В., Соловьев А.Н., Старенченко В.А. Суперлокализация и формирование зёрновой структуры при деформации монокристаллов сплава Ni_3Ge разных ориентаций // Известия высших учебных заведений. Физика. 2017. Т. 60, № 5. С. 77–86.
5. Соловьева Ю.В., Старенченко С.В., Анчаров А.И., Старенченко В.А. Структурно-фазовые превращения в полосе суперлокализации монокристаллов Ni_3Ge // Известия высших учебных заведений. Физика. 2018. Т. 61, № 11. С. 35–41.
6. Криштал М.М. Неустойчивость и мезоскопическая неоднородность пластической деформации (аналитический обзор). Ч. 1. Феноменология зуба текучести и прерывистой текучести // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7, № 5. С. 5–29.
7. Полетика Т.М., Нариманова Г.Н., Колосов С.В. Закономерности локализации пластической деформации при формировании шейки в сплаве циркония // Журнал технической физики. 2006. Т. 76, № 3. С. 44–49.
8. Пресняков А.А. Локализация пластической деформации. М.: Машиностроение, 1983. 56 с.
9. Wu Y., Zhang K. Numerical and experimental analysis of superplastic-like uniaxial tensile necking of coarse-grained LY-12 // Mechanics of Materials. 2003. N 35. P. 1127–1138.
10. Kotake S., Ito K. Multiple necking in superplastic Zn–22Al under uniaxial tension // Inter-

national Journal of Mechanical Sciences. 2010. N 52. P. 339–342.

11. Demirtas M., Kawasaki M., Yanar H., Purcek G. High temperature superplasticity and deformation behavior of naturally aged Zn-Al alloys with different phase compositions // *Materials Science & Engineering A*. 2018. N 730. P. 73–83.

12. Demirtas M., Purcek G., Yanar H., Zhang Z.J., Zhang Z.F. Effect of different processes on lamellar-free ultrafine grain formation, room temperature superplasticity and fracture mode of Zn-22Al alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. N 663. P. 775–783.

13. Белов Н.Н., Копаница Д.Г., Югов Н.Т. Математическое моделирование динамической прочности конструкционных материалов. Т. 3. Физика ударных волн. Динамическое разрушение твердых тел. Томск: STT, 2010. 318 с.

14. Липатникова Я.Д., Соловьева Ю.В., Старенченко В.А., Белов Н.Н., Валуйская Л.А. Исследование потери высокотемпературных свойств жаропрочных интерметаллидов методом многоуровневого моделирования // *Деформация и разрушение материалов*. 2021. № 5. С. 3–10.

15. Старенченко В.А., Липатникова Я.Д., Соловьева Ю.В. Устойчивость однородной пластической деформации монокристаллов сплавов со сверхструктурой $L1_2$ в условиях растяжения и сжатия // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2018. Т. 61, № 4(724). С. 106–112.

16. Югов Н.Т., Белов Н.Н., Югов А.А. Расчет адиабатических нестационарных течений в трехмерной постановке (РАНЕТ-3). Пакет программ для ЭВМ. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Свидетельство о гос. Регистрации программы для ЭВМ № 2010611042, 2010 г.

Информация об авторах

В. А. Старенченко – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Я. Д. Липатникова – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики Томского государственного архитектурно-строительного университета; доцент отделения математики и информатики Нацио-

нального исследовательского Томского политехнического университета.

Ю. В. Соловьева – доктор физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой физики, химии и теоретической механики Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Н. Н. Белов – доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Л. А. Валуйская – кандидат технических наук, доцент кафедры медицинской и биологической кибернетики Сибирского государственного медицинского университета.

И. Г. Вовнова – старший преподаватель кафедры прикладной математики Томского государственного архитектурно-строительного университета.

References

1. Igumnov, B. H. (2010) Physical foundations of microelectronics. Yoshkar-Ola: Mari State Technical University. P. 272. (In Russ.).

2. Starenchenko, V. A., Valuisckaya, L. A., Fakhrutdinova, Y. D., Solov'eva, Y. V. & Belov, N. N. (2012). A synthetic computer model for plastic strain localization. *Russian Physics Journal*, 55 (2), P. 211–222.

3. Starenchenko, V. A., Solov'eva, Y. V., Fakhrutdinova, Y. D. & Valuisckaya, L. A. (2012). Superlocalization of deformation in Ni_3Ge single crystals with the $L1_2$ superstructure. *Russian Physics Journal*, 55 (1), 69–83.

4. Solov'eva, Y. V., Lipatnikova, Y. D., Starenchenko, S. V., Solov'ev, A. N. & Starenchenko, V. A. (2017). Modeling of high-temperature plastic deformation of layered composites based on alloys with $L1_2$ superstructure. *Russian Physics Journal*, 60 (5), 830–840.

5. Solov'eva, Y. V., Starenchenko, S. V., Ancharov, A. I. & Starenchenko, V. A. (2019). Structural and phase transformations in superlocalization band in Ni_3Ge single crystal. *Russian Physics Journal*, 61 (11), 1985–1991.

6. Krishtal, M. M. (2004). Instability and mesoscopic inhomogeneity of plastic deformation (analytical review). Part I. Phenomenology of yield drop and jerky flow. *Physical Mesomechanics*, 7(5), 5–29.

7. Poletika, T. M., Narimanova, G. N. & Kolosov, S. V. (2006). Plastic strain localization

and necking in Zr-Nb alloy. *Technical Physics*, 51(3), 336–341.

8. Presnyakov, A. A. (1983). Localization of the plastic deformation. *Mechanical Engineering*, P. 56. (In Russ.).

9. Wu, Y. & Zhang, K. (2003). Numerical and experimental analysis of superplastic-like uniaxial tensile necking of coarse-grained LY-12. *Mechanics of Materials*, (35), 1127–1138.

10. Kotake, S. & Ito, K. (2010). Multiple necking in superplastic Zn–22Al under uniaxial tension. *International Journal of Mechanical Sciences*, (52), 339–342.

11. Demirtas, M., Kawasaki, M., Yanar, H. & Purcek, G. (2018). High temperature superplasticity and deformation behavior of naturally aged Zn-Al alloys with different phase compositions. *Materials Science & Engineering A*, (730), P. 73–83.

12. Demirtas, M., Purcek, G., Yanar, H., Zhang, Z. J. & Zhang, Z. F. (2016). Effect of different processes on lamellar-free ultrafine grain formation, room temperature superplasticity and fracture mode of Zn-22Al alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, (663), 775–783.

13. Belov, N. N., Kopanitsa, D. G. & Yugov, N. T. (2010). Mathematical simulation of dynamic strength of constructional materials. V. 3. Physics of shock wave. *Dynamic fracture of solids*. STT. P. 318. (In Russ.).

14. Lipatnikova, Y. D., Solov'eva, Y. V., Starenchenko, V. A., Belov, N. N. & Valuiskaya, L. A. (2021). Multilevel simulation of the loss of high-temperature properties of heat-resistant intermetallics. *Russian Metallurgy (Metally)*, (10), 1188–1195.

15. Starenchenko, V. A., Lipatnikova, Y. D. & Solov'eva, Y. V. (2018). Stability of homogenous plastic deformation in alloy single crystals with

L₁₂ structure under tension and compression. *Russian Physics Journal*, 61 (4), 722–729.

16. Yugov, N. T., Belov, N. N. & Yugov, A. A. (2010). Calculation of adiabatic unsteady flows in three-dimensional formulation (RANET-3). Computer software package. Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks. Certificate of state Registration of the computer program No. 2010611042.

Information about the authors

V. A. Starenchenko – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Higher Mathematics, Tomsk State University of Architecture and Building.

Y. D. Lipatnikova – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of Department of Higher Mathematics, Tomsk State University of Architecture and Building; Assistant Professor of Department of Mathematics and Informatics, National Research Tomsk Polytechnic University.

Yu. V. Solov'eva – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor, Head of the Department of Physics, chemistry and theoretical mechanics, Tomsk State University of Architecture and Building.

N. N. Belov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Higher Mathematics, Tomsk State University of Architecture and Building.

L. A. Valuiskaya – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of Medical and Biological Cybernetics, Siberian State Medical University.

I. G. Vovnova – Senior Lecturer of the Department of Applied Mathematics, Tomsk State University of Architecture and Building.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 14.11.2022; одобрена после рецензирования 24.11.2022; принята к публикации 29.11.2022.

The article was received by the editorial board on 14 Nov. 22; approved after reviewing 24 Nov. 22; accepted for publication 29 Nov. 22.