

УДК 539.372:669:531

## СВОЙСТВА ЭЛЕМЕНТА ДЕФОРМАЦИОННОЙ СРЕДЫ, КАК ФАКТОР СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

© 2023 г. Ю. В. Соловьева<sup>а, \*</sup>, Я. Д. Липатникова<sup>а, b</sup>,  
И. Г. Вовнова<sup>а, \*\*</sup>, В. А. Старенченко<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
Томск, 634003 Россия

<sup>b</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Томск, 634050 Россия

\*e-mail: j\_sol@mail.ru

\*\*e-mail: irinavov12@mail.ru

Поступила в редакцию 20.12.2022 г.

После доработки 15.02.2023 г.

Принята к публикации 15.02.2023 г.

Работа посвящена теоретическому исследованию явления сверхпластичности металлических материалов. Выполнены численные расчеты на основе конечно-элементной двухуровневой модели упругопластической среды. Были определены пластические свойства элемента деформационной среды, при которых деформация одноосным растяжением осуществляется в режиме сверхпластичности. Показано, что в зависимости от формы кривой напряжение–деформация элемента среды ( $\sigma$ – $\epsilon$ ) на макромасштабном уровне происходит локализация пластического течения различного вида. Немонотонная зависимость  $\sigma$ – $\epsilon$  элемента деформационной среды с одним максимумом является условием возникновения стабильной шейки разрушения. В случае, когда зависимость  $\sigma$ – $\epsilon$ , характеризующая упрочнение элементарных объемов, имела два максимума, появлялась распространяющаяся (“бегающая”) шейка деформации, затем возникала вторая (встречная) шейка, дальнейшее растяжение приводило к еще одной локализации деформации образца, в которой происходило разрушение материала. Более сложная форма кривой  $\sigma$ – $\epsilon$ , имеющая осциллирующий характер, приводила к формированию множественных бегающих шеек. Распространяясь вдоль образца, движение шеек приводит, в конечном счете, к однородной картине деформации и позволяет достичь значений деформации, наблюдаемых при сверхпластичности.

**Ключевые слова:** сверхпластичность, металлические материалы, моделирование, одноосное растяжение, элемент деформационной среды, локализация пластической деформации, бегающая шейка.

**DOI:** 10.31857/S102809602309011X, **EDN:** ZFAFRC

### ВВЕДЕНИЕ

Способность металлических материалов при определенных условиях пластически деформироваться без разрушения, достигая степеней деформации равных сотням и даже тысячам процентов, получило название в научной литературе сверхпластичности. Из-за большого практического и научного интереса проблему определения режимов деформации, при которых реализуются особые — сверхпластические — свойства металлических материалов, неоднократно обсуждали на конференциях [1], в многочисленных монографиях [2–7], обзорных [8, 9] и исследовательских работах [10–15], приведенный здесь перечень которых, является далеким от полноты. Следует отметить многообразие механизмов, определяющих высокопластичные свойства обширной

группы металлов и сплавов, которые они способны проявлять при определенных условиях. Традиционно выделяют два вида сверхпластичности, которые существенно различаются по типам ведущих микромеханизмов: это структурная сверхпластичность материалов с ультрамелким зерном и сверхпластичность, связанная с фазовыми превращениями. Вне зависимости от того к какому виду сверхпластичности относится поведение того или иного материала, характерной особенностью деформации в сверхпластическом режиме является то, что аномально высокие значения деформаций при одноосном растяжении сопровождаются формированием распространяющейся или “бегающей” шейки деформации [3, 16–18]. В этом случае наблюдают сопротивление сверхпластичного материала образованию обычной, устойчивой шейки разрушения. Происходит упроч-

нение в зоне формирующейся шейки (замораживание), препятствующее дальнейшей локализации деформации в ней, и, как следствие, распространение фронта деформации вдоль образца, обеспечивающее высокие степени деформации при растяжении. Весьма перспективным и неоднократно обсуждаемым является, также, вопрос о реализации высокоскоростной сверхпластичности с аномально высокими скоростями деформации ( $10^0 - 10^3 \text{ c}^{-1}$ ) [19, 20]. В связи с этим, представляет интерес теоретическое исследование возможности реализации больших пластических деформаций ( $\epsilon > 1$ ) в динамической модели механики деформируемого твердого тела. В работах авторов настоящего исследования ранее были проведены численные расчеты на основе конечно-элементной двухуровневой динамической модели упругопластической среды, которые показали, что в зависимости от свойств элемента деформационной среды возможны различные варианты макроскопического поведения металлических материалов в условиях пластической деформации. При определенных свойствах элемента среды реализуется высокооднородное пластическое течение, в других случаях наблюдаются полосы локализации деформации, вплоть до возможности формирования полос макролокализации (суперлокализации) пластической деформации [21, 22], или формирования шейки деформации при растяжении [23]. Было показано, что возможность появления “бегающей” шейки деформации, определяется токовой неустойчивостью упрочнения элемента деформационной среды [24].

Задачей настоящей работы являлось теоретическое исследование в рамках двухуровневой динамической модели упругопластической среды с целью определения свойств элемента деформационной среды, которые приводят к достижению значительных степеней деформации, и, в конечном итоге, к сверхпластическим свойствам металлических материалов.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проведено теоретическим методом конечно-элементного моделирования деформации металлического стержня при одноосном растяжении. В основе численного расчета деформации лежит модель упругопластической среды [25]. Данная модель включает классические законы сохранения массы импульсов и энергии, определяющие соотношения теории пластического течения и уравнение состояния в форме Ми–Грюнаизена:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = 0, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{u} dV = \int_{\Sigma} \mathbf{n} \bar{\sigma} dS, \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho E dV = \int_{\Sigma} \mathbf{n} \bar{\sigma} \mathbf{u} dS, \quad (3)$$

$$\mathbf{e} = \frac{\bar{\mathbf{s}}^V}{2\mu} + \lambda \mathbf{s}, \quad (4)$$

$$\mathbf{s} : \mathbf{s} = \frac{2}{3} \bar{\sigma}_T^2(q), \quad (5)$$

$$p(\nu, \epsilon) = \frac{\rho_0 c_0^2 \left(1 - \frac{\epsilon \gamma_0}{2}\right)}{(1 - \beta \epsilon)^2} \epsilon + \rho_0 \gamma_0 \epsilon, \quad (6)$$

где  $t$  – время;  $V$  – объем моделируемого объекта;  $\Sigma$  – его поверхность;  $\mathbf{n}$  – единичный вектор внешней нормали к поверхности  $\Sigma$ ;  $\rho$  – плотность;  $\bar{\sigma} = -p\mathbf{g} + \mathbf{s}$  – тензор напряжений;  $\mathbf{s}$  – его девиатор;  $p$  – давление;  $\mathbf{g}$  – метрический тензор;  $\mathbf{u}$  – вектор скорости;  $E = \epsilon + \mathbf{u}\mathbf{u}/2$  – удельная полная энергия;  $\epsilon$  – удельная внутренняя энергия;  $\mathbf{e} = \mathbf{d} - (\mathbf{d} : \mathbf{g})\mathbf{g}/3$  – девиатор тензора скоростей деформаций;  $\mathbf{d} = (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)/2$  – тензор скоростей деформаций;  $\bar{\mathbf{s}}^V$  – объективная мера скорости изменения напряжения;  $\mu$  – модуль сдвига;  $\bar{\sigma}_T$  – предел текучести;  $\bar{\omega} = (\nabla \mathbf{u}^T + \nabla \mathbf{u})/2$  – тензор вихря;  $q$  – параметр, который принят равным величине пластической деформации;  $\epsilon = 1 - V$ ;  $c_0$  – объемная скорость звука в материале;  $\gamma_0$  – термодинамический коэффициент Грюнаизена;  $\beta$  – угловой коэффициент ударной адиабаты.

В модели [25] в качестве локального критерия сдвигового разрушения принята предельная величина интенсивности пластических деформаций:

$$e_u^* = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{3T_2 - T_1^2}, \quad (7)$$

где  $T_1, T_2$  – первый и второй инварианты тензора пластических деформаций.

Локальным критерием отрывного разрушения служит предельная величина относительного объема пустот:

$$\xi^* = \frac{\alpha_{\text{кр}} - 1}{\alpha_{\text{кр}}},$$

$\alpha_{\text{кр}}$  – величина пористости, при которой происходит разрушение материала.

Предел текучести материала  $\bar{\sigma}_T$  в общем случае является функцией степени деформации, скорости деформации, давления, температуры, а также некоторых других параметров. Для того чтобы учесть влияние пластических свойств элемента

деформируемой среды, при проведении расчетов использовали различные сценарии изменения величины  $\sigma_T$  в процессе деформации. Данные сценарии были получены в рамках моделирования в терминах дислокационной кинетики пластической деформации металлов и сплавов [26]. К решениям системы уравнений кинетики накопления дефектов в процессе пластической деформации принадлежат основные типы расчетных кривых упрочнения: периодически или аperiodически затухающие кривые течения, монотонно возрастающие кривые упрочнения, достигающие стационарного насыщения [26]. Физическая модель описывает эволюцию дефектной структуры и, как результат, упрочнение и разупрочнение элемента деформационной среды, которые затем учитываются в критерии текучести Мизеса — уравнение (5) — модели механики деформированного твердого тела.

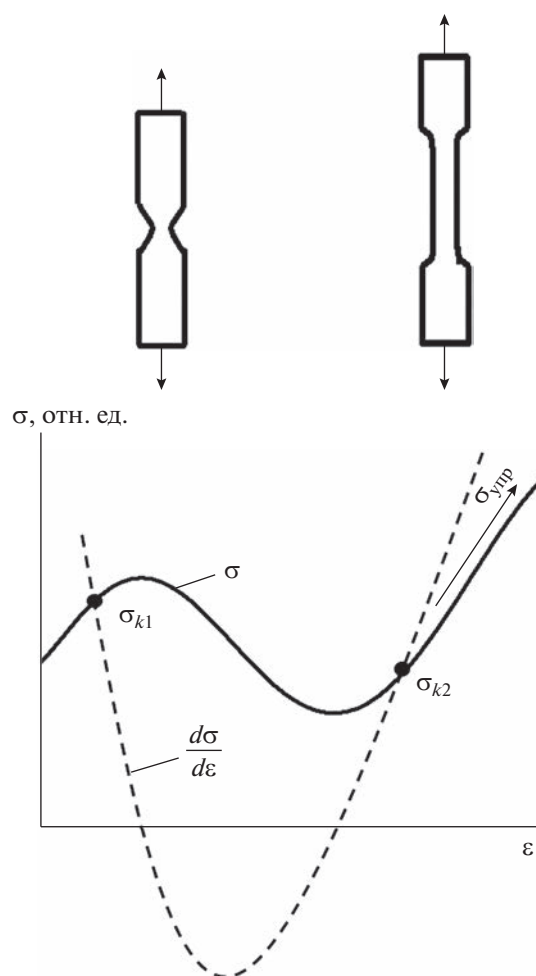
Как было упомянуто выше, достижение больших степеней деформации при растяжении связано с явлением “бегающей” шейки деформации. В работе [24] нами было показано, что для модельного описания “бегающей” (распространяющейся) шейки деформации должна быть выбрана немонотонная кривая упрочнения определенного типа, схематично изображенная на рис. 1.

Действительно, согласно критерию Консидера, при достижении значения напряжений  $\sigma_{k1} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$  в некоторой области стержня начнется формирование шейки, которое продолжится до достижения значений  $\sigma_{k2}$ . Локализация деформации в шейке будет приостановлена (в соответствии с критерием Консидера), а соседние с шейкой области будут находиться на стадии, благоприятной для развития локализации деформации. Таким образом, локализация деформации должна будет перейти на соседние области. Данный процесс может повторяться и приводить к распространению шейки на весь образец.

В настоящей работе проведено теоретическое поисковое исследование с целью определения вида кривой немонотонной зависимости упрочнения элемента деформационной среды  $\sigma$ — $\varepsilon$ , который способствует формированию сверхпластических свойств металлических материалов. Для проведения расчетов использованы константы и механические характеристики для сплава ЦА22 [27, 28]. Численная реализация данной модели проведена с помощью авторского программного комплекса “РАНЕТ-3” [29].

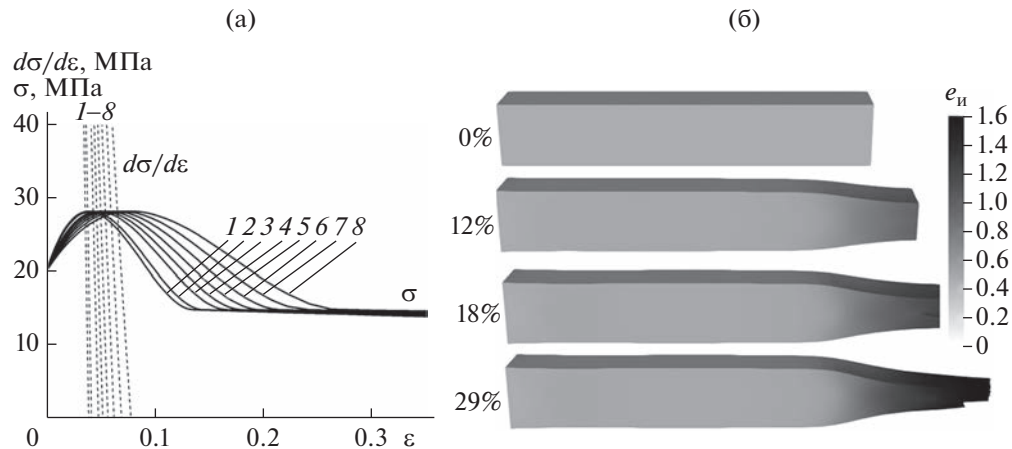
## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Задачу одноосного растяжения прямоугольного стержня длиной 14 мм при скорости деформа-

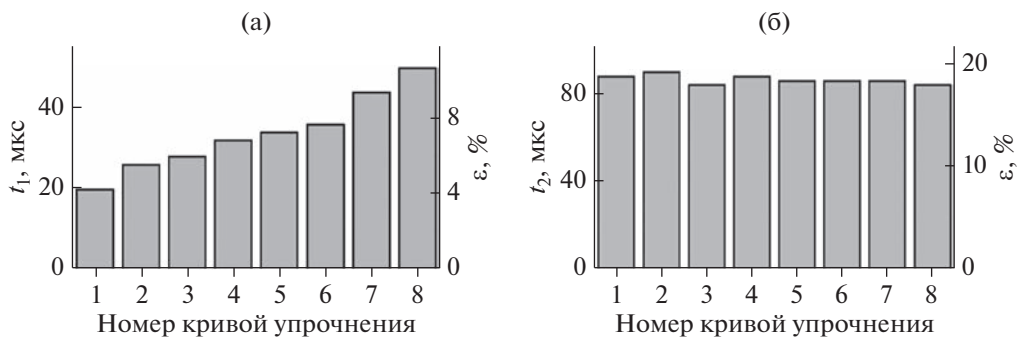


**Рис. 1.** Схематичное представление кривой упрочнения элемента деформационной среды, при которой возможно появление “бегающей” шейки деформации. Над графиком показана соответствующая форма образца.

ции 30 м/с решали в полной трехмерной постановке. Выбирали различные типы зависимостей  $\sigma$ — $\varepsilon$ , описывающие процессы упрочнения и разупрочнения элементарного объема деформируемого образца. Наиболее подробно был изучен случай немонотонной зависимости  $\sigma$ — $\varepsilon$ , характеризующейся однократным упрочнением и однократным разупрочнением, с выходом напряжений на стационарное значение (рис. 2–5). Такой тип зависимости  $\sigma$ — $\varepsilon$  с одним максимумом создает условия для возникновения устойчивой шейки разрушения. Вариации параметров кривой, приводящие к смещению пика (рис. 2а) или к изменению общего уровня напряжений (рис. 4а), показали, что картина изменения формы образца и распределения интенсивности пластических деформаций (рис. 2б и 4б) во всех случаях остается качественно неизменной. На начальных стадиях деформации начинает формироваться локальное



**Рис. 2.** Кривые упрочнения элементарного объема деформационной среды (а) и картины распределения интенсивности пластических деформаций ( $e_{ii}$ ), соответствующие различным степеням деформации для кривой 7 (б).

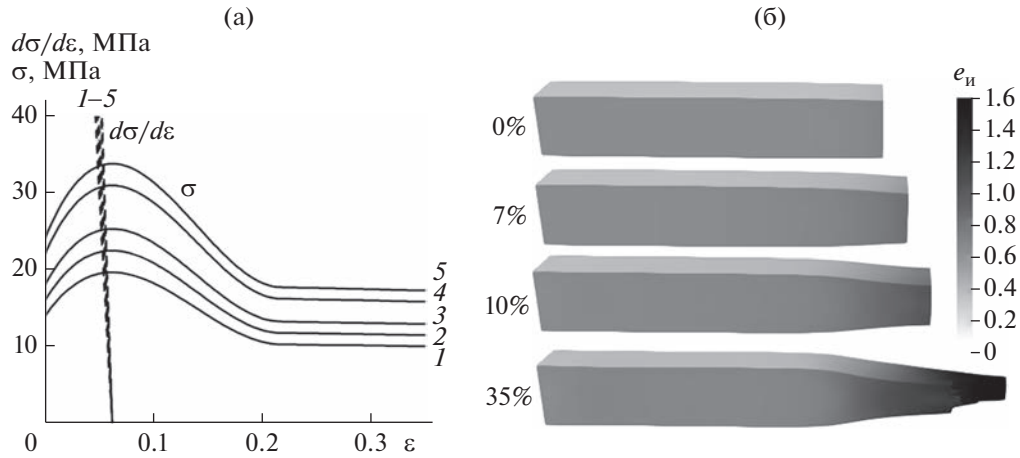


**Рис. 3.** Диаграммы, иллюстрирующие время появления шейки  $t_1$  (а) и время появления первых признаков разрушения  $t_2$  (б) для кривых 1–7, показанных на рис. 2а.

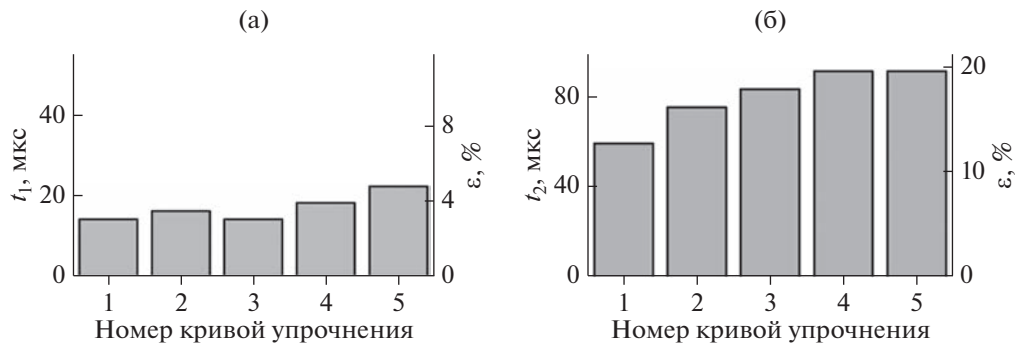
сужение образца, характеризующееся высокой величиной интенсивности пластических деформаций ( $e_{ii}$ ) (рис. 2б и 4б), однако большая часть образца остается практически недеформированной. Смещение пика немонотонной зависимости и изменение уровня напряжений кривой оказывают влияние на время появления шейки разрушения и первые признаки разрушения. На диаграмме, приведенной на рис. 3а, хорошо видно, что по мере смещения пика кривой  $\sigma$ – $\varepsilon$  в область более высоких степеней деформации наблюдается увеличение времени появления локального сужения образца (шейки). Данный факт объясняется смещением в область более высоких значений напряжения точки выполнения критерия Консидера ( $\sigma = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ ). Следует отметить, что время появления первых признаков разрушения и соответствующая степень деформации образца почти не меняются (рис. 3б), поскольку для всех кривых стационарное напряжение совпадает. Иную картину можно наблюдать в случае изменения об-

щего уровня напряжений кривой без смещения положения пика (рис. 4а). В этом случае точка выполнения критерия Консидера почти не смещается при переходе от одной кривой к другой. Расчеты показывают, что время появления локального сужения (шейки) стержня также изменяется незначительно (рис. 5а). Это говорит в пользу того, что время появления шейки слабо зависит от уровня приложенных напряжений и, прежде всего, определяется положением максимума на зависимости  $\sigma$ – $\varepsilon$ . Следует отметить, что уровень приложенных напряжений влияет на время появления первых признаков разрушения (рис. 5б). Показано, что рассмотренные вариации напряжений зависимости  $\sigma$ – $\varepsilon$  элемента среды, имеющей один максимум, не приводят к значимому увеличению степени деформации до разрушения, которая в среднем составляет 30–35%.

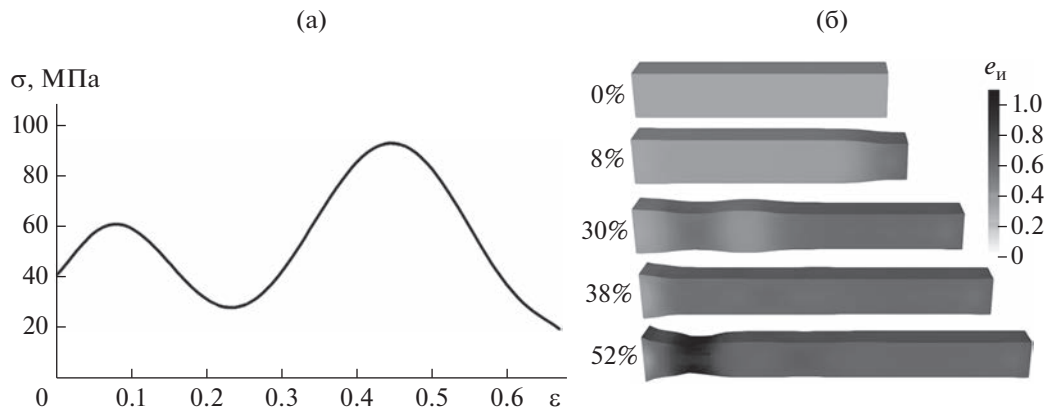
Во втором случае деформационное поведение элементарных объемов стержня характеризовала зависимость  $\sigma$ – $\varepsilon$ , имеющая два максимума упрочнения (рис. 6а). Поскольку данная зависимость



**Рис. 4.** Кривые упрочнения элементарного объема деформационной среды (а) и картины распределения интенсивности пластических деформаций ( $e_{\text{и}}$ ), соответствующие различным степеням деформации для кривой 3 (б).



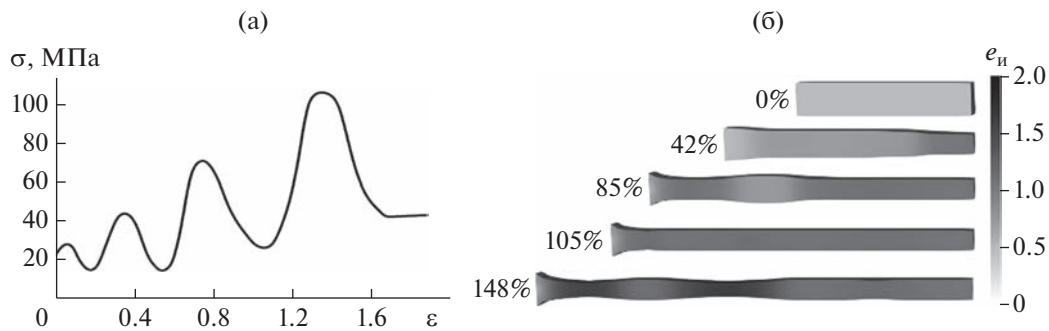
**Рис. 5.** Диаграммы, иллюстрирующие время появления шейки  $t_1$  (а) и время появления первых признаков разрушения  $t_2$  (б) для кривых 1–5, показанных на рис. 4а.



**Рис. 6.** Кривая упрочнения элементарного объема деформационной среды (а), картины распределения интенсивности пластических деформаций ( $e_{\text{и}}$ ), соответствующие различным степеням деформации (б).

соответствует общей кривой, приведенной на рис. 1, ожидаемо было в результате расчетов получить картину деформации “бегающей” (распространяющейся) шейки деформации. Дей-

ствительно, проведенные расчеты (рис. 6б) показали, что ближе к краю стержня, также, как и в случае, рассмотренном выше, формируется локальное сужение образца, которое при достиже-



**Рис. 7.** Кривая упрочнения элементарного объема деформационной среды (а), картины распределения интенсивности пластических деформаций ( $e_n$ ), соответствующие различным степеням деформации (б).

нии определенного значения напряжения в этой области начинает распространяться вдоль образца. Одновременно с этим процессом, с противоположной стороны образца возникает вторая шейка, которая, в свою очередь, распространяется навстречу первой в недеформированном объеме образца. В результате чего к моменту, когда общая деформация стержня составила 38% (рис. 6б), можно было наблюдать однородное распределение величины интенсивности пластических деформаций почти во всем объеме образца, а стержень принял форму, подобную первоначальному состоянию. Дальнейшее растяжение приводит к формированию третьей — устойчивой — шейки деформации, в которой и происходит разрушение материала. Степень деформации до разрушения увеличивается почти в два раза по сравнению с рассмотренным выше случаем наличия одного максимума упрочнения для элемента среды и составляет 52–55%.

Задание упрочнения элементарных объемов материала образца в виде зависимости  $\sigma$ – $\epsilon$  имеющей осциллирующий характер (рис. 7а), приводило к формированию более сложной картины деформации, характеризующейся появлением и развитием множества бегающих шеек (рис. 7б). Распространение шейки деформации вдоль образца приводило, в конечном счете, к однородной картине деформации стержня, увеличивая более чем на порядок величину степени деформации до разрушения (более 340%).

## ВЫВОДЫ

В работе в рамках теоретического исследования в динамической модели упругопластической среды получены данные о влиянии характеристик элемента деформационной среды на пластические свойства металлических материалов и возможности проявления ими сверхпластических

свойств. Было показано, что в случае немонотонной зависимости  $\sigma$ – $\epsilon$ , характеризующейся однократным упрочнением и однократным разупрочнением, с выходом напряжений на стационарное значение, при растяжении наблюдается формирование устойчивой шейки разрушения, а материал проявляет ограниченные пластические свойства.

В случае, когда деформационное поведение элементарных объемов стержня задавалось зависимостью  $\sigma$ – $\epsilon$ , имеющей два максимума упрочнения, наблюдали две “бегающие” шейки деформации и увеличение степени деформации до разрушения.

Задание упрочнения элементарного объема материала образца в виде осциллирующих зависимостей  $\sigma$ – $\epsilon$  приводило к формированию множественных “бегающих” шеек деформации, которые, распространяясь вдоль образца, приводили к однородной картине деформации стержня и существенному увеличению степени деформации до разрушения (на порядок), по сравнению со случаем наличия одного максимума на кривой  $\sigma$ – $\epsilon$ .

Таким образом, показано, что для того, чтобы образец демонстрировал сверхпластические свойства, необходимо неоднократное повторение следующего сценария развития деформации: однородная деформация → появление шеек → их распространение → однородная деформация. Увеличение числа колебаний кривой упрочнения  $\sigma$ – $\epsilon$  элементарного объема среды приводит к значительному росту степени деформации до разрушения.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEMN-2023-0003).



**Конфликт интересов:** авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Metal Forming: Interrelation Between Theory and Practice. Proceedings of a symposium on the Relation Between Theory and Practice of Metal Forming, held in Cleveland, Ohio, in October, 1970 / Ed. Hoffmann A.L. Springer, Boston, MA, 2012. 503 p.
2. Новиков И.И., Портной В.К. Сверхпластичность сплавов с ультрамелким зерном. М.: Металлургия, 1981. 168 с.
3. Смирнов О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности. М.: Машиностроение, 1979. 184 с.
4. Утяшев Ф.З., Рааб Г.И. Научные основы деформационных технологий формирования ультрамелкозернистых и наноструктурных объемных материалов. Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 160 с.
5. Alexander P. Zhilyaev, Anatoly I. Pshenichnyuk, Farid Z. Utyashev, Georgy I. Raab. Superplasticity and Grain Boundaries in Ultrafine-Grained Materials. Elsevier, 2020. 416 p.
6. Утяшев Ф.З., Рааб Г.И., Валитов В.А. Деформационное наноструктурирование металлов и сплавов. Монография. СПб.: Научное издание, 2020. 185 с.
7. Padmanabhan K.A., Balasivanandha Prabu S., Mulyukov R.R., Ayrat Nazarov, Imaev R.M., Ghosh Chowdhury S. Superplasticity. Common Basis for a Near-Ubiquitous Phenomenon / Springer-Verlag GmbH Germany, 2018. 526 p.
8. Barnes A. // J. Mater. Eng. Perform. 2007. V. 16. P. 440. <https://www.doi.org/10.1007/s11665-007-9076-5>
9. Гвоздев Е., Сергеев А.Н., Чуканов А.Н., Кутепов С.Н., Малий Д.В., Цой Е.В., Калинин А.А. // Чебышевский сб. 2019. Т. 20. Вып. 1. С. 354. <https://www.doi.org/10.22405/2226-8383-2019-20-1-354-371>
10. Myshlyaev M., Mironov S., Korznikova G., Konkova T., Korznikova E., Aletdinov A., Khalikova G., Raab G., Semiatin S.L. // J. Alloys Compd. 2022. V. 898. P. 162949. <https://www.doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162949>
11. Корзникова Г.Ф., Халикова Г.Р., Миронов С.Ю., Алетдинов А.Ф., Корзникова Е.А., Конькова Т.Н., Мышляев М.М. // Физическая мезомеханика. 2022. Т. 25. № 2. С. 47. [https://www.doi.org/10.55652/1683-805X\\_2022\\_25\\_2\\_47](https://www.doi.org/10.55652/1683-805X_2022_25_2_47)
12. Еникеев Ф.У. // Известия вузов. Цветная металлургия. 2008. № 1. С. 43.
13. Варгин А.Н. и др. // Международный научный журн. 2013. № 6. С. 65.
14. Рудаев Я.И. // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2005. № 2. С. 57.
15. Китаева Д.А. // Вестник КРСУ. 2017. Т. 17. № 1. С. 22.
16. Криштал М.М. // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. № 5. С. 5.
17. Полетика Т.М., Нариманова Г.Н., Колосов С.В. // Журн. технической физики. 2006. Т. 76. № 3. С. 44.
18. Hutchinson J.W. // J. Mech. Phys. Solids. 1983. V. 31. № 5. P. 405.
19. Перевезенцев В.Н., Свирина Ю.В. // Журн. технической физики. 1998. Т. 68. № 12. С. 39.
20. Higashi K., Nieh T.G., Mabuchi M., Wadsworth J. // Scripta Metallurgica et Materialia. 1995. V. 32. № 7. P. 1079.
21. Старенченко В.А., Валуйская Л.А., Фахрутдинова Я.Д., Соловьева Ю.В., Белов Н.Н. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 2. С. 76.
22. Фахрутдинова Я.Д., Соловьева Ю.В., Валуйская Л.А., Белов Н.Н., Старенченко В.А. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2012. Т. 9. № 4. С. 527.
23. Липатникова Я.Д., Соловьева Ю.В., Старенченко В.А., Белов Н.Н., Валуйская Л.А. // Деформация и разрушение материалов. 2021. № 5. С. 3. <https://www.doi.org/10.31044/1814-4632-2021-5-3-10>
24. Старенченко В.А., Липатникова Я.Д., Соловьева Ю.В., Белов Н.Н., Валуйская Л.А., Вовнова И.Г. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19. № 4. С. 454. <https://www.doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.004>
25. Белов Н.Н., Югов Н.Т., Копаница Д.Г., Югов А.А. Динамика высокоскоростного удара и сопутствующие физические явления. Нортхэмптон—Томск: Изд-во СТТ, 2005. 354 с.
26. Старенченко В.А., Соловьева Ю.В., Фахрутдинова Я.Д., Валуйская Л.А. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2011. Т. 54. № 8. С. 47.
27. Demirtas M., Kawasaki M., Yanar H., Purcek G. // Mater. Sci. Engineer. A. 2018. № 730. P. 73. <https://www.doi.org/10.1016/j.msea.2018.05.104>
28. Demirtas M., Purcek G., Yanar H., Zhang Z.J., Zhang Z.F. // J. Alloys Compd. 2016. № 663. P. 775. <https://www.doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.12.142>
29. Патент. 2010611042 (РФ) Расчет адиабатических нестационарных течений в трехмерной постановке (РАНЕТ-3). Пакет программ для ЭВМ / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Югов Н.Т., Белов Н.Н., Югов А.А. // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. 2010.

## Properties of Deformable Medium Element as a Factor of Superplasticity of Metallic Materials

Yu. V. Solov'eva<sup>1, \*</sup>, Ya. D. Lipatnikova<sup>1, 2</sup>, I. G. Vovnova<sup>1</sup>, V. A. Starenchenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, 634003 Russia*

<sup>2</sup>*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050 Russia*

*\*e-mail: j\_sol@mail.ru*

Theoretical study of the phenomenon of superplasticity of metallic materials has been carried out. Numerical calculations were performed on the basis of a two-level finite element model of an elastoplastic medium. The plastic properties of the deformable medium element determining the deformation by uniaxial tension in superplasticity mode were found. It was shown that depending on the shape of the stress-strain curve ( $\sigma$ – $\epsilon$ ) of the medium element, the various types of plastic flow localizations were observed at the macroscale level. The nonmonotonic dependence  $\sigma$ – $\epsilon$  of the deformable medium element having single maximum was determined as the condition for the appearance of a stable fracture neck. In the case when the dependence  $\sigma$ – $\epsilon$  characterized by the strengthening of the elementary volumes with two maxima, a propagating (running) neck was observed, then a second (counter) neck appeared, while further tension led to the appearance of the third stable neck in which fracture occurred. In the case of more complex oscillating shape of  $\sigma$ – $\epsilon$  curve the multiple running necks were observed. The movement of the multiple necks propagating along the sample leads, ultimately, to a uniform picture of the deformation and made it possible to achieve the strain values observed in superplasticity mode.

**Keywords:** superplasticity, metallic materials, modeling, uniaxial tension, deformable medium element, localization of plastic deformation, neck propagation.