

## МЕХАНИКА

УДК 539.379.4

DOI 10.17223/19988621/52/3

С.А. Баранникова, Ю.В. Ли, Л.Б. Зуев

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ  
ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ  
ПРИ РАСТЯЖЕНИИ КОРРОЗИОННОСТОЙКОГО БИМЕТАЛЛА<sup>1</sup>**

Рассматривается эволюция очагов локализации пластической деформации коррозионно-стойкого биметалла на основе соединения аустенитной нержавеющей стали марки 12Х18Н9Т и низкоуглеродистой конструкционной стали Ст3 в условиях агрессивной водородосодержащей среды. Методом корреляции цифровых спекл-изображений получены картины локализации пластической деформации в процессе одноосного растяжения. Рассмотрен характер разрушения биметаллического материала в исходном состоянии и после электролитического наводороживания. Проведен анализ стадийности деформационных кривых.

**Ключевые слова:** локализация деформации, пластическое течение, корреляция цифровых спекл-изображений, водородное охрупчивание, сталь.

Локализация пластической деформации проявляется на всех масштабных уровнях процесса в виде полос и пачек скольжения, дислокационных субструктур (ячейки, полосовые структуры, фрагменты), фронтов пластической деформации, полос сброса, пространственно-временных осцилляций пластической деформации и т.п. [1–5]. Явления пространственно-временной локализации пластической деформации в твердых телах являлись предметом большого интереса на протяжении последних десятилетий, были предприняты значительные усилия их интерпретации в рамках современных подходов к описанию процессов самоорганизации в системах, далеких от равновесия. Процесс неоднородного развития пластической деформации, по крайней мере в металлах, подвергаемых одноосной пластической деформации, имеет многомасштабную природу, зависящую от величины средней пластической деформации, ее скорости, температуры и других факторов. Изученные к настоящему времени закономерности пластической деформации на микро-, мезо- и макроскопическом масштабных уровнях установлены на широком классе чистых металлов или сплавов [1–5]. Различные формы процесса локализации пластической деформации на макроскопическом уровне могут рассматриваться как разные типы автоволн, зависящие от действующего на данной стадии закона деформационного упрочнения [4, 5].

Деформационному поведению многослойных материалов при интенсивной пластической деформации посвящено ограниченное количество работ. Такие ма-

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Государственной академии наук в 2013-2020 гг. и гранта РФФИ №16-08-00385-а.

териалы могут быть изготовлены с помощью соединения разнородных металлов в монолитную композицию, сохраняющую надежную связь составляющих при дальнейшей технологической обработке и в условиях эксплуатации. К числу таких материалов относятся двухслойные металлические композиты – биметаллы, в том числе и антикоррозионные биметаллы, которые достаточно устойчивы к воздействию агрессивных сред и обладают высокими механическими характеристиками [6–9]. Наибольшая доля в выпуске коррозионно-стойкого биметалла приходится на композиции углеродистых и коррозионно-стойких сталей в виде тонких и толстых листов, а также в виде труб в химической, нефтеперерабатывающей и целлюлозно-бумажной, пищевой промышленности и судостроении.

Водородосодержащая среда, проникая в объем элементов конструкции и деталей, приводит к значительным ухудшениям кратковременных и длительных механических характеристик материала, что вызывает изменение напряженно-деформированного состояния и приводит к значительному уменьшению несущей способности и сокращению долговечности конструкций [10–13]. Коррозия и водородное охрупчивание металлических материалов тесно связаны с определенными элементами их микроструктуры и, в частности, с сегрегационными и диффузионными процессами, протекающими на внутренних структурно-фазовых поверхностях (границах) раздела и ассоциированных дефектах дислокационного типа; микромеханизмы таких процессов мало изучены. Фундаментальные знания о природе водородного охрупчивания металлов и сварных соединений необходимы для стандартизации материалов, применяемых при создании водородной инфраструктуры. Необходимы фундаментальные исследования для раскрытия механизмов локализации деформации, водородной деградации и разрушения, что позволит усовершенствовать конструкционные материалы.

Настоящая работа посвящена изучению особенностей пластической деформации и разрушения биметаллической композиции на основе соединения углеродистой стали и высокохромистой нержавеющей стали при одноосном растяжении в условиях агрессивной водородосодержащей среды.

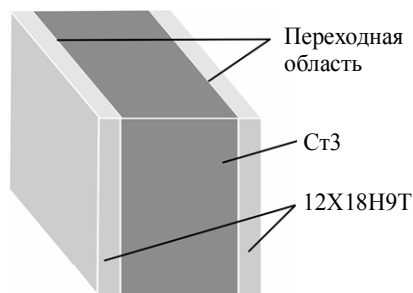
### Материалы и методы исследования

Исследовались образцы биметаллического соединения, вырезанные из полосы, полученной по следующей схеме: между вставленными в изложницу листами плакирующего металла – 12Х18Н9Т – в качестве основного металла заливалась Ст3 ( $T = 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) с последующей горячей прокаткой полученного трехслойного листа при  $T = 1200\text{--}1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . По внешнему краю образца с обеих сторон расположен плакирующий слой из стали 12Х18Н9Т толщиной  $\approx 750\text{ мкм}$ , в центре – основной металл  $\approx 6.7\text{ мм}$  Ст3 [6–9].

Насыщение водородом исследуемого металла проводилось электролитическим методом в трехэлектродной электрохимической ячейке при постоянном контролируемом катодном потенциале в 1N растворе серной кислоты в течение 6 [14].

Механические испытания на одноосное растяжение проводились при  $T = 300\text{ К}$  со скоростью деформации  $6.67 \cdot 10^{-5}\text{ с}^{-1}$  на испытательной машине LFM-125 плоских образцов в исходном состоянии – 1 и после электролитического насыщения водородом – 2 (рис. 1).

Требования к методике исследования локализации пластического течения в деформируемых материалах являются ключевыми при поиске главных закономерностей пластического течения. Эти требования практически очевидны: методика



**Рис. 1.** Схематическое изображение образца биметаллического материала  
**Fig. 1.** Schematic representation of a sample of bimetal material

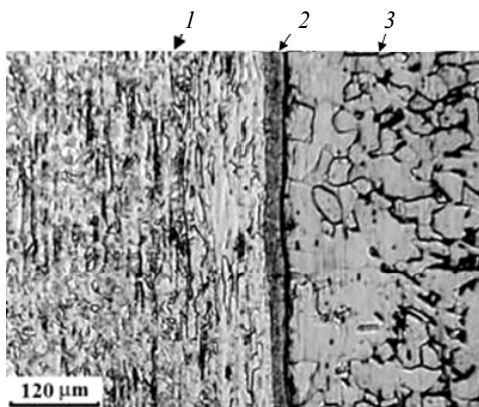
должна сочетать точность измерения количественных характеристик процесса пластического течения на уровне разрешения оптического микроскопа ( $\sim 10^{-6}$  м) с размером поля зрения порядка длины исследуемого образца ( $\sim 10^{-1}$  м). Выполнение первого требования необходимо для обеспечения достаточной чувствительности прибора, а второго – продиктовано необходимостью наблюдения деформации образца в целом. Детальное исследование картин локализации пластического течения на макромасштабном уровне проводилось с использованием универсального измерительного комплекса ALMEC-tv для цифровой регистрации полей векторов смещений и компонент тензора пластической дисторсии [15]. При использовании этого комплекса растягиваемый образец освещается когерентным светом полупроводникового лазера с длиной волны 635 нм и мощностью 15 мВт. Полученные изображения деформируемого образца с наложенными спекл-картинами регистрируются цифровой видеокамерой PixeLink PL-B781. Для каждой точки изображения формируется последовательность отсчетов, характеризующая временной ход ее яркости, вычисляются дисперсия и математическое ожидание яркости мерцания спеклов, которые используются для отображения зон локализации деформации. Используя такую методику, удастся *in situ* регистрировать области, в которых при заданном приросте общего удлинения образца локализуется деформация материала.

### Экспериментальные результаты

Изучение микроструктуры методами оптической металлографии позволило выявить 3 основные области материала: основной материала Ст3, переходную область и плакирующий слой материала из аустенитной нержавеющей стали 12X18H9T (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что в трехслойном образце после прокатки границы раздела разнородных материалов четкие и тонкие, поры и неметаллические включения отсутствуют, что свидетельствует о сплошности и высоком качестве соединения. В стали Ст3 основной фазой является феррит, а в стали 12X18H9T – аустенит. Структура основного металла (стали Ст3) на расстоянии  $\approx 2$  мм от границы соединения предоставляет собой матрицу феррита с колониями перлита, что является типично для низкоуглеродистой стали. На расстоянии около 200 мкм от границы соединения обнаружена область частичного обезуглероживания, которая является переходной от структуры основного металла к ферритной структуре. По границе соединения металлов со стороны стали Ст3 образовался обезуглероженный

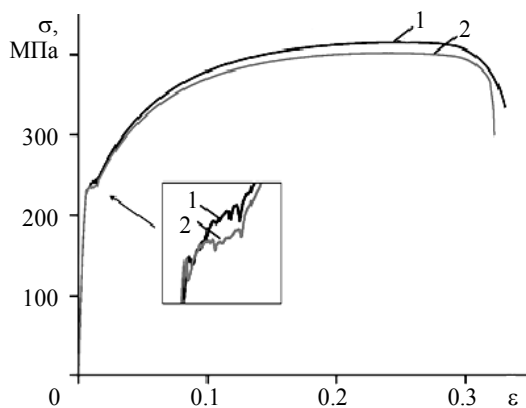
слой, состоящий полностью из зерен феррита. В зоне частичного обезуглероживания стали Ст3 по границам ферритных зерен выявлены отдельные включения и прослойки перлита.



**Рис. 2.** Оптическая металлография биметалла: 1 – область плакирующего слоя металла 12X18H9T; 2 – переходная область (зона соединения); 3 – область основного металла Ст3

**Fig. 2.** Optical metallography of bimetal: 1, area of the cladding layer of 12X18H9T (12H18N9T); 2, transition area (interface); and 3, area of the basic metal Ст3 (St3)

В результате проведения механических испытаний были получены деформационные кривые биметалла в исходном состоянии 1 и состоянии 2 после насыщения водородом в течение 6 ч (рис. 3).



**Рис. 3.** Диаграмма нагружения биметалла в исходном состоянии 1 и состоянии 2 после электролитического насыщения водородом в течении 6 часов

**Fig. 3.** Loading diagram for bimetal (1) in the initial state and (2) after 6-hour electrolytic hydrogenation

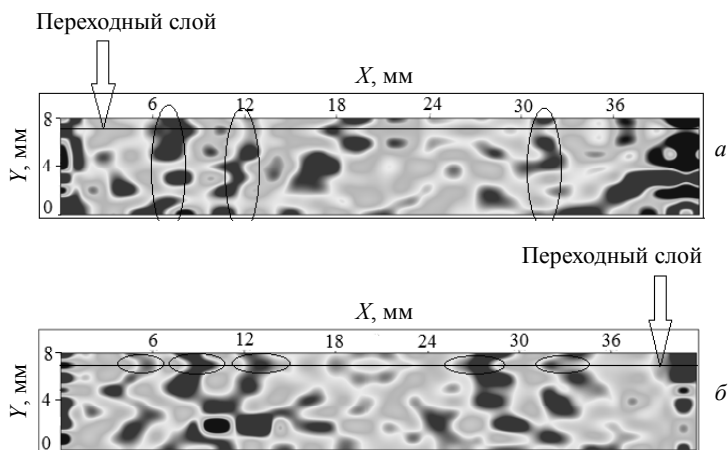
Деформационные кривые в состояниях 1 и 2 можно отнести к диаграммам общего типа, которые принято описывать параболической функцией вида

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент деформационного упрочнения;  $n \leq 1$  – показатель деформационного упрочнения.

Анализ стадийности деформационных кривых в состояниях 1 и 2 позволил выделить следующие стадии пластического течения: зуб и площадку текучести, стадию линейного деформационного упрочнения, стадию параболического деформационного упрочнения и стадию предразрушения. В результате электролитического насыщения водородом в течение 6 ч произошло незначительное уменьшение прочности и увеличение пластичности биметалла.

Использование метода корреляции цифровых спекл-изображений позволило на всех стадиях деформационного упрочнения для образцов состояний 1 и 2 рассмотреть эволюцию картин локализации пластической деформации во внешнем слое нержавеющей стали 12Х18Н9Т, основном слое низкоуглеродистой стали Ст3 и переходном слое (зоне соединения) материала. Прирост деформации растяжения между отдельными кадрами составил 0.002. Контраст для изображений обычно выбирается таким образом, чтобы темные области соответствовали деформирующимся в данный момент объемам, а светлые указывали на пассивные объемы, где пластического течения в момент наблюдения нет. Интенсивность окраски пропорциональна амплитуде локальной деформации (рис. 4).



**Рис. 4.** Картина распространения фронтов локализации пластической деформации для материала в состоянии 2, при общей деформации:  $a$  – 1,7 %,  $b$  – 2,6 %

**Fig. 4.** Pattern of the propagation of localized bands of plastic deformation for material in the state 2 at the total deformation  $\varepsilon$  of (a) 1.7 % and (b) 2.6 %

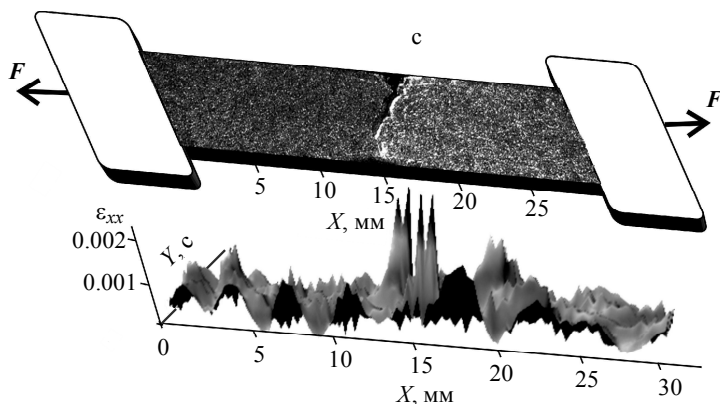
Анализ картин локализации пластической деформации биметалла в состоянии (1) и (2) показал, что на площадки текучести в области внешнего и переходного слоя материала формируется общая система подвижных очагов локализации пластической деформации (рис. 4,  $a$ ). Далее, в процессе деформирования от них, в области переходного слоя на глубине 0,7 мм от поверхности, отделяются одиноч-

ные фронты, которые продолжают согласованное движение вдоль оси растяжения материала, но уже с другими скоростями, в отличие от очагов локализации деформации слоя нержавеющей стали (рис. 4, б).

На стадии линейного деформационного упрочнения для состояний 1 и 2 помимо описанной выше картины в области основного материала Ст3 формируются четыре эквидистантно расположенных подвижных очага локализации пластической деформации. Однако подвижные очаги в нержавеющей стали 12Х18Н9Т и очаги пластической деформации в переходной области материала препятствуют их распространению с постоянной скоростью по длине образца.

На стадии параболического деформационного упрочнения при общей деформации  $\varepsilon = 12\%$  для состояния 1 и  $\varepsilon = 13\%$  для состояния 2 формируются стационарные системы эквидистантно расположенных очагов локализации пластической деформации.

На стадии предразрушения в состоянии 1 и 2 неподвижные ранее очаги локализации пластической деформации начинают согласованное движение с тенденцией к их слиянию к высокоамплитудному максимуму локальных деформаций, который формируется в том месте образца, где происходит разрушение (рис. 5).

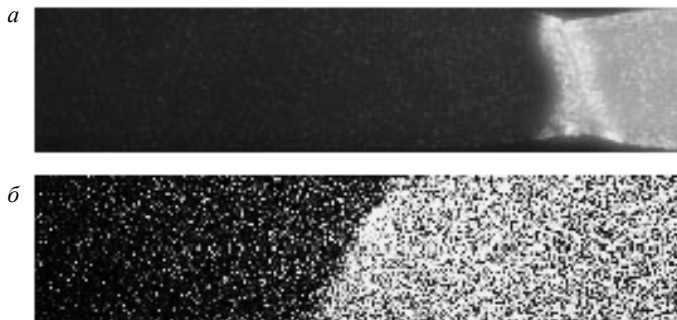


**Рис. 5.** Образование трещины образца в состоянии 2 и распределение локальных удлинений на стадии предразрушения

**Fig. 5.** Formation of a sample crack in the state 2 and distribution of the local extensions at the prefracture stage

Характер разрушения материала в двух состояниях 1 и 2 отличен друг от друга. В состоянии 2 разрушение имеет более вязкий характер. В исходном состоянии 1 в области макроконцентратора напряжений на стадии образования шейки при общей деформации  $\varepsilon = 32,6\%$  формируются две макрополосы локализованной пластической деформации, распространяющиеся по направлениям максимальных касательных напряжений, образуя магистральную трещину. Магистральная трещина зарождается в области защитного слоя биметалла и быстро распространяется через все сечение образца (рис. 6, а).

В состоянии 2 после электролитического наводороживания биметалла, при общей деформации  $\varepsilon = 31,7\%$ , формируется одна макрополоса локализованной пластической деформации (рис. 6, б) и наблюдается повышенное сопротивление разрушению по сравнению с состоянием 1. В процессе движения основная магистральная трещина разделяется на ряд отдельных мелких трещин, которые



**Рис. 6.** Визуализация полос локализованной пластической деформации на стадии предразрушения: *а* – в состоянии 1 при общей деформации  $\varepsilon = 32,6 \%$ , *б* – в состоянии 2 при общей деформации  $\varepsilon = 31,7 \%$

**Fig. 6.** Visualization of the localized bands of plastic deformation at the prefracture stage: (*a*) in the state 1 at the total deformation of  $\varepsilon = 32.6 \%$  and (*b*) in the state 2 at the total deformation of  $\varepsilon = 31.7 \%$

уменьшают скорость распространения магистральной трещины и увеличивают вязкость разрушения материала. Магистральная трещина имеет зигзагообразный вид и распространяется рывками, меняя свое положение и направление распространения в процессе движения. Следует отметить, что траектория трещины обусловлена расположением зон локализации пластической деформации на ранних стадиях пластического течения, которые являются предвестниками будущего разрушения.

### Заключение

В настоящей работе установлено, что при растяжении биметаллических образцов Ст3+12Х18Н9Т как в исходном состоянии поставки 1, так и в состоянии 2 после электролитического наводороживания в течение 6 ч на всем протяжении пластического течения в основном, защитном и переходном слое биметалла формируются и эволюционируют очаги локализации пластической деформации. Установлено, что в исходном состоянии 1 в биметалле со стороны стали Ст3, образуется обезуглероженный слой, а со стороны стали 12Х18Н9Т – науглероженный слой. Процесс разрушения биметалла в состояниях 1 и 2 обусловлен формированием концентраторов напряжений в области переходного слоя биметалла. Картины распределения локальных удлинений на стадии предразрушения в виде высокоамплитудного максимума локальных деформаций позволяют за 5 % до предела прочности определить место зарождения и распространения трещины. Характер разрушения образцов после легирования водородом имеет более вязкий характер по сравнению с исходным материалом, что свидетельствует о том, что в данном случае атомы водорода способствует увеличению пластичности слоя нержавеющей аустенитной стали рассматриваемого биметалла.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Mudrock R.N., Lebyodkin M.A., Kurath P., et al. Strain-rate fluctuations during macroscopically uniform deformation of a solution-strengthened alloy // Scr. Mater. 2011. V. 65. P. 1093–1096. DOI: 1093–95. 10.1016/j.scriptamat.2011.09.025.

2. Tretiakova T.V., Vildeman V.E. Relay-race deformation mechanism during uniaxial tension of cylindrical samples of carbon steel: using digital image correlation technique // *Fratt. Integ. Strut.* 2013. V. 24. P. 1–6. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.24.01.
3. Баранникова С.А. Локализация деформации растяжения в монокристаллах легированного  $\gamma$ -Fe с углеродом // *ЖТФ*. 2000. Т. 70. С. 138–140.
4. Zuev L.B., Barannikova S.A. Experimental study of plastic flow macro-scale localization process: pattern, propagation rate, dispersion // *Int. J. Mec. Sci.* 2014. V. 88. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.06.012.
5. Баранникова С.А. Дисперсия волн локализации пластической деформации // *Письма в ЖТФ*. 2004. Т. 8. С. 75–80.
6. Sallam H.E.M., El-Aziz Kh. Abd., El-Raouf H. Abd, et al. Failure analysis and flexural behavior of high chromium white cast iron and AISI4140 Steel bimetal beams // *Mater. Des.* 2013. V. 52. P. 974–980.
7. Chen I., Yang Z., Jhan B., Xia J., et al. Clad metals, roll bonding and their applications for SOFC interconnects // *J. Power Sources*. 2005. V. 152. P. 40–45. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2005.01.055.
8. Jin J.Y., Hong S.I. Effect of heat treatment on tensile deformation characteristics and properties of Al 3003/STS 439 clad composite // *Mater. Sci. Eng.* 2014. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.msea.2013.12.019.
9. Lee J.E., Bae D.H., Chung W.S., et al. Effects of annealing on the mechanical and interface properties of stainless steel/aluminum/copper clad-metal sheets // *J. Mater. Process. Technol.* 2007. V. 187–188. P. 546–549. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.121.
10. Ramunni V.P., Paiva Coelho T. De., de Miranda P.E.V. Interaction of hydrogen with the microstructure of low-carbon steel // *Mater. Sci. Eng.* 2006. V. A 435–436. P. 504–514. DOI: 10.1016/j.msea.2006.07.089.
11. Sofronis P., Liang Y., Aravas N. Hydrogen induced shear localization of plastic flow in metals and alloys // *Eur. J. Mech. A: Solids*. 2001. V. 20. P. 857–872. DOI: 10.1016/S0997-7538(01)01179-2.
12. Robertson I.M. The effect of hydrogen on dislocation dynamics // *Eng. Frac. Mech.* 2001. V. 68. P. 671–692. DOI: 10.1016/S0013-7944(01)00011-X.
13. Yagodzinskyy Y., Saukkonen T., Kilpeläinen S., et al. Effect of hydrogen on plastic strain localization in single crystals of austenitic stainless steel // *Scripta Mater.* 2010. V. 62. P. 155–158. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2009.10.005.
14. Баранникова С.А., Надеждин М.В., Мельничук В.А., Зуев Л.Б. О локализации пластической деформации растяжения монокристаллов аустенитной стали, электролитически насыщенных водородом // *Письма в ЖТФ*. 2004. Т. 37. С. 9–17.
15. Zuev L.B., Gorbatenko V.V., Pavlichev K.V. Elaboration of speckle photography techniques for plastic flow analyses // *Measur. Sci. & Technol.* 2010. V. 21(054014). P. 1–5.

Статья поступила 29.01.2018 г.

Barannikova S.A., Li Yu.V., Zuev L.B. (2018) INVESTIGATION OF A PLASTIC DEFORMATION INHOMOGENEITY AND FAILURE OF THE CORROSION-RESISTANT BIMETAL UNDER UNIAXIAL TENSION. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 52. pp. 25–34

DOI 10.17223/19988621/52/3

This paper is aimed to study particularities of the plastic deformation and fracture of bimetal composition based on the compound of carbon steel and high-chromium stainless steel exposed to a uniaxial tension in aggressive hydrogen-containing medium.

The investigation of microstructure in a region of bimetal compounds is carried out by optical microscopy. A detailed macro-scale study of the patterns of plastic flow localization was carried out using the DIC method.



Bimetal plastic deformation arises from the nucleation of stress concentration in the bimetal transition area. In the basic layer, localized deformation areas propagate along a bimetal axis with different velocity. Cladding layer does not suppress the formation of localized deformation areas in the basic layer. As a result of 6-hour electrolytic hydrogenation, the strength of bimetal has decreased insignificantly while its plasticity has increased. The fracture of the samples after hydrogenation is more ductile as compared with that of primary material.

In this study, it was found that the localized plastic deformation areas are formed and evolve during the tension of 301 bimetal samples as in the initial state 1 and after 6-hour electrolytic hydrogenation throughout the plastic flow in the primary, protective, and transitional layers of bimetal.

Keywords: deformation localization, plastic flow, digital image correlation, hydrogen embrittlement, steel.

*BARANNIKOVA Svetlana Aleksandrovna* (Doctor of Physics and Mathematics, Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS (ISPMS), National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: bsa@ispms.tsc.ru

*LI Yuliya Vladimirovna* (Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS (ISPMS), Tomsk, Russian Federation). E-mail: jul2207@mail.ru

*ZUEV Lev Borisovich* (Doctor of Physics and Mathematics, Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS (ISPMS), National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: lbz@ispms.ru

#### REFERENCES

1. Mudrock R.N., Lebyodkin M.A., Kurath P., et al. (2011) Strain-rate fluctuations during macroscopically uniform deformation of a solution-strengthened alloy. *Scr. Mater.* 65(12). pp. 1093–1096. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2011.09.025.
2. Tretiakova T.V., Vildeman V.E. (2013) Relay-race deformation mechanism during uniaxial tension of cylindrical samples of carbon steel: using digital image correlation technique. *Fratt. Integ. Strut.* 24. pp. 1–6. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.24.01.
3. Barannikova S.A. (2000) Localization of stretching strain in doped carbon gamma-Fe single crystals. *Tech. Phys.* 45(10). pp. 1368–1370. DOI: 10.1134/1.1318982.
4. Zuev L.B., Barannikova S.A. (2014) Experimental study of plastic flow macro-scale localization process: pattern, propagation rate, dispersion. *Int. J. Mec. Sci.* 88. pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.06.012.
5. Barannikova S.A. (2004) Dispersion of the plastic strain localization waves. *Tech. Phys. Lett.* 30(4). pp. 338–340. DOI: 10.1134/1.1748618.
6. Sallam H.E.M., Abd El-Aziz Kh., Abd El-Raouf H., et al. (2013) Failure analysis and flexural behavior of high chromium white cast iron and AISI4140 Steel bimetal beams. *Mater. & Des.* 52. pp. 974–980. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.06.045.
7. Chen I., Yang Z., Jhan B., Xia J., et al. (2005) Clad metals, roll bonding and their applications for SOFC interconnects. *J. Power Sources.* 152. pp. 40–45. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2005.01.055.
8. Jin J.Y., Hong S.I. (2014) Effect of heat treatment on tensile deformation characteristics and properties of Al3003/STS439 clad composite. *Mater. Sci. & Eng. A* 596. pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.msea.2013.12.019.
9. Lee J.E., Bae D.H., Chung W.S., et al. (2007) Effects of annealing on the mechanical and interface properties of stainless steel/aluminum/copper clad-metal sheets. *J. Mater. Process. Technol.* 187–188. pp. 546–549. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.121.
10. Ramunni V.P., de Paiva Coelho T., de Miranda P.E.V. (2006) Interaction of hydrogen with the microstructure of low-carbon steel. *Mater. Sci. Eng. A* 435–436. pp. 504–514. DOI: 10.1016/j.msea.2006.07.089.

11. Sofronis P., Liang Y., Aravas N. (2001) Hydrogen induced shear localization of plastic flow in metals and alloys. *Eur. J. Mech. A: Solids*. 20(6). pp. 857–872. DOI: 10.1016/S0997-7538(01)01179-2.
12. Robertson I.M. (2001) The effect of hydrogen on dislocation dynamics. *Eng. Frac. Mech.* 68(6). pp. 671–692. DOI: 10.1016/S0013-7944(01)00011-X.
13. Yagodzinsky Y., Saukkonen T., Kilpeläinen S., et al. (2010) Effect of hydrogen on plastic strain localization in single crystals of austenitic stainless steel. *Scripta Mater.* 62(3). pp. 155–158. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2009.10.005.
14. Barannikova S.A., Nadezhkin M.V., Mel'nichuk V.A., et al. (2011) Tensile plastic strain localization in single crystals of austenite steel electrolytically saturated with hydrogen. *Tech. Phys. Let.* 37. pp. 793–796. DOI: 10.1134/S1063785011090057.
15. Zuev L.B., Gorbatenko V.V., Pavlichev K.V. (2010) Elaboration of speckle photography techniques for plastic flow analyses. *Measur. Sci. & Technol.* 21(5). pp. 1–5. DOI: 10.1088/0957-0233/21/5/054014.