

стью, длительностью службы не менее 8000 часов, стабильностью электросопротивления, высокой адгезионной прочностью ( $28,12 \pm 0,29$ ) Н к металлическим поверхностям [5], равномерным температурным полем. Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, свидетельствуют о возможности использования КРМ на основе полиуретанового лака VM 700 GLOSS и токопроводящего наполнителя С-1 (24 мас. %) в виде греющих покрытий в конструкциях электрических нагревателей технологического оборудования.

#### Литература

1. Ying Li. Advances in carbon black filled conductive polymer composites // Yinxi From Suliao. – 2005. – Vol. 34, № 2. – P. 7–11.
2. Zeng M. Application of carbon series fillers in polymer-based conductive composite materials // Xiangjiao Gongye. – 2010. – Vol. 57, № 6. – P. 378–382.
3. Prokes J. Electrically conduction polymeric composites and nanocomposites // Handbook of Multiphase Polymer Systems. – 2011. – Vol. 25, № 4. – P. 425–477.
4. Xiu Z. Conductive polymeric materials // Jilin Huagong Xueyuan Xuebao. – 2005. – Vol. 22, № 1. – P. 65–67.
5. Потекаев А.И., Малиновская Т. Д., Мелентьев С.В., Шулупов И.А. Исследование механических свойств резистивного материала на основе углероднаполненного полиуретана // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – Т. 59, № 1. – С. 126–128.

#### Сведения об авторах

Мелентьев Сергей Владимирович, к.т.н., заведующий лабораторией «Наноматериалы и нанотехнологии», доцент кафедры прикладной механики и материаловедения Томского государственного архитектурно-строительного университета, Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная 2, тел. раб.: +7(3822)650852; e-mail: sergey.melentev.88@mail.ru.

Павлов Сергей Вячеславович, студент третьего курса, группа 323/2, механико-технологический факультет Томского государственного архитектурно-строительного университета, Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная 2, тел. раб.: +7(3822)650852; e-mail: sergey\_pavlov1994@mail.ru.

Мищенко Максим Александрович, студент первого курса, группа 3125, механико-технологический факультет Томского государственного архитектурно-строительного университета, Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная 2, тел. раб.: +7(3822)650852; e-mail: 406217@sibmail.com.

УДК 620.186

doi:10.18.101/978-5-9793-0883-8-35-37

### Изучение локализации пластической деформации двухслойного металлического материала на макромасштабном уровне

С. А. Баранникова<sup>1,2</sup>, А. В. Бочкарева<sup>1,3</sup>, Ю. В. Ли<sup>1</sup>, Л. Б. Зуев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, г. Томск, пр. Академический 2/4, 634055

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г. Томск, ул. Ленина 36, 634050, e-mail: bsa@ispms.tsc.ru

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, ул. Ленина 30 634050, e-mail: avb@ispms.tsc.ru

#### Аннотация

В работе исследованы закономерности распространения фронтов локализации пластической деформации биметаллического материала на основе соединения ферритной низкоуглеродистой стали и аустенитной нержавеющей хромоникелевой стали. Для выявления и визуализации зон локализованной деформации был использован метод корреляции цифровых спекл-изображений, позволяющий определить поле векторов смещения в плоском образце при растяжении и рассчитать компоненты тензора пластической дисторсии (локальные удлинения  $\epsilon_{xx}$ , сдвиг  $\epsilon_{xy}$  и поворот  $\omega_z$ ).

**Ключевые слова:** биметалл, локализация пластической деформации, пластическая деформация, метод корреляция цифровых спекл-изображений

### Study of the Plastic Deformation Localization of the Bimetal on the Macroscale Level

S. A. Barannikova<sup>1,2</sup>, A. V. Bochkareva<sup>1,3</sup>, Yu. V. Li<sup>1</sup>, L. B. Zuev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch Russian Academy of Sciences «ISPMS SB RAS»,  
Russia, Tomsk, 2/4 Akademicheskii Ave., 634055

<sup>2</sup>National Research Tomsk State University «TSU» Russia, Tomsk, 36 Lenin Ave., 634050, e-mail: bsa@ispms.tsc.ru

<sup>3</sup>National Research Tomsk Polytechnic University «TPU», 30 Lenina Ave., Russia, Tomsk, 634055,  
e-mail: avb@ispms.tsc.ru

#### Abstract

Evolution of localized plastic deformation in bimetal material casting in configuration: the working part (layer) from austenitic stainless steel and bearing part from low-carbon steel has been investigated in the work. The pictures of localization of the plastic flow during the process of uniaxial tension have been obtained by the digital image correlation method (DIC). With the method the vector field and the plastic distortion tensor components (local elongation, shear and rotation) have been investigated.

**Keywords:** bimetal, localized of the plastic deformation, plastic deformation, digital image correlation method.

В настоящее время биметаллы занимают важное место в современной промышленности, так как присутствующие в них свойства разнородных материалов, дополняя друг друга, образуют новую, нехарактерную для известных монометаллов и сплавов совокупность свойств [1]. Однако существует ряд недостатков технологических процессов производства биметаллов, поводящих к снижению их качества. Диффузионные процессы, развивающиеся в зоне сопряжения биметаллов (углеродистая сталь – хромоникелевая нержавеющая сталь) в процессе совместной горячей прокатки разнородных металлов и при последующих технологических нагревах, формируют переходные зоны, обладающие химической и структурной неоднородностью. Характер зарождения и развития микроразрушений в переходной зоне отличается от основных слоев, что отражается на свойствах изделий и характере деформирования материалов из биметалла. В связи с этим необходимо расширение знаний о процессах соединения разнородных металлов их совместной пластической деформации и изменении свойств в процессе эксплуатации [1,2].

Изучение природы пластической деформации твердых тел привело к заключению о том, что пластическое течение неоднородно на любом своем этапе от предела текучести до разрушения. Универсальность этого тезиса прослеживается на микро-, мезо- и макроскопическом масштабных уровнях [3-5].

Для исследований были изготовлены плоские образцы с размерами рабочей части  $40 \times 8 \times 2$  мм из двухслойной композиции X18H9T+Ст.3. Предварительно подготовленные образцы в форме двойной лопатки мм растягивались при  $T=300$  К со скоростью  $6,67 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  на испытательной машине LFM 125, снабженной для изучения макролокализации деформации автоматизированным лазерным измерительным комплексом методом корреляции цифровых спекл-изображений [5] (ALMEC-tv).

Деформационная кривая, полученная в результате проведения механических испытаний на одноосное растяжение показана на рисунке 1.

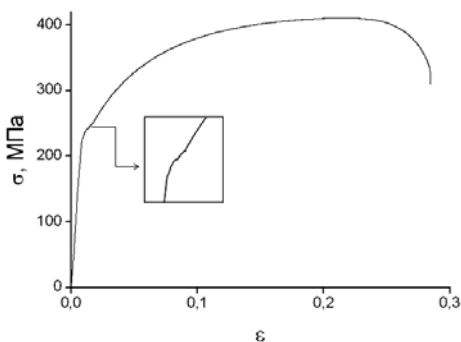


Рис. 1. Кривая нагружения биметаллического материала

Анализ стадийности деформационных кривых  $\sigma$ - $\epsilon$  показал, что характерной особенностью упрочнения данного материала является наличие трёх стадий деформационного упрочнения: после переходного участка от упругой части к пластическому течению наблюдается площадка текучести,

стадия линейного деформационного упрочнения, стадия параболического деформационного (Тейлоровского) упрочнения и стадия предразрушения.

Методом корреляции цифровых спекл-изображений показано, что на протяжении площадки текучести основного материала Ст.3 фронты Людерса возникают на границах раздела разнородных материалов, перемещаются с разными скоростями и “гасятся” при встрече друг с другом (рис. 2).



Рис. 2. Визуализация распространения полос Людерса по длине образца триметалла при общей деформации: 0,8% (а) и 1,2% (б)

На стадии линейного деформационного упрочнения зафиксированы движущиеся эквидистантно расположенные очаги локализации пластической деформации. На стадии параболического деформационного упрочнения картина локализации пластического течения имела вид стационарной системы очагов пластического течения по длине образца с характерным расстоянием между ними  $\lambda = 4$  мм. И далее при общей деформации  $\epsilon = 14\%$  из системы стационарных очагов локализованной деформации формируется высокоамплитудный очаг предразрушения (рис. 3а). С момента появления этого пика практически вся деформация локализуется в узкой зоне образца, что позволяет на ранних стадиях спрогнозировать область формирования деформационной шейки и определить место будущего разрушения материала.

В области макроконцентратора напряжений на стадии образования шейки при общей деформации  $\varepsilon = 28,1\%$  формируется две макрополосы локализованной пластической деформации. Они распространяются по сопряженным направлениям максимальных касательных напряжений через все сечение образца, трещины зарождаются на концентраторах напряжений в вершине трехгранных призм, постепенно сливаясь и проходя через все сечение биметаллической композиции (рис. 3б).

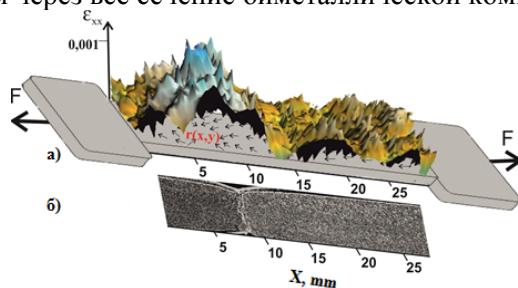


Рисунок 3 – Формирование очага предразрушения при общей деформации  $\varepsilon = 14\%$  (а) и образование трещины в биметалле при общей деформации  $\varepsilon = 28,1\%$

Проведенные исследования позволили выявить основные закономерности деформирования пластичных биметаллов. В целом картина распространения зон локализации соответствует стадиям деформационного упрочнения, полученным ранее при растяжении ГЦК, ОЦК и ГПУ чистых металлов и сплавов [6]. Однако вопрос о зарождении и распространении очагов локализации пластической деформации в промежуточном слое “нержавеющая сталь – низкоуглеродистая сталь” требует дальнейших исследований.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 16-19-10025.

#### Литература

1. Трыков Ю.П., Сергиенко А.С., Гуревич Л.М., С.А Булаева, Даненко В.Ф. Изменение микромеханических свойств биметаллической проволоки при деформировании // Известия Вологодского государственного технического университета. 2009. Т.59. № 11. С. 54.
2. Даненко В.Ф., Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Понкраторова Г.В. О неоднородности деформации в переходной зоне биметалла углеродистая сталь – сталь 12Х18Н10Т // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. № 6. С. 36-41.
3. Kuhlmann-Wilsdorf D. The low energetic structures theory of solid plasticity. Dislocations in Solid. ad. by F.R.N. Nabarro and M.S. Duesbery Amsterdam: Elsevier, 2002, pp. 213-338.
4. Panin V.E. Plastic deformation and fracture of solid at the mesoscale level. Material Science and Engineering, 2001, vol. 319-321, pp. 197-200.
5. Зуев Л.Б., Баранникова С.А. Физика прочности и экспериментальная механика. Новосибирск: Наука, 2011, 350 с.
6. Баранникова С.А., Надежкин М.В., Лунев А.Г., Горбатенко В.В., Шляхова Г.В., Зуев Л.Б. Влияние водорода на локализацию пластического течения при растяжении низкоуглеродистой стали // Металлофизика и новейшие технологии. 2014. Т. 36. № 2. С. 229-245.

#### Сведения об авторах

Баранникова Светлана Александровна

1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), г. Томск, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: bsa@ispms.tsc.ru

2) Национальный исследовательский Томский государственный университет (НИ ТГУ), профессор кафедры «Механика деформируемого твердого тела», e-mail: bsa@ispms.tsc.ru

Бочкарева Анна Валентиновна

1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), г. Томск, Российская Федерация, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, e-mail: avb @ispms.tsc.ru

2) Национальный исследовательский Томский политехнический университет (НИ ТПУ), доцент кафедры «Теоретической и прикладной механики» avb @ispms.tsc.ru

Ли Юлия Владимировна

1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), г. Томск, Российская Федерация, аспирант лаборатории физики прочности, e-mail: jul2207@mail.ru

Зуев Лев Борисович

1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), г. Томск, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: lbz@spms.tsc.ru

2) Национальный исследовательский Томский государственный университет (НИ ТГУ), профессор кафедры «Теории прочности и проектирования», e-mail: lbz@spms.tsc.ru