МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ / MATERIALS SCIENCE



удк 669:539.381.296 DOI 10.17073/0368-0797-2023-5-580-586



Оригинальная статья Original article

О ВЛИЯНИИ НАГРЕВА НА НЕОДНОРОДНОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ БИМЕТАЛЛА УГЛЕРОДИСТАЯ СТАЛЬ – НЕРЖАВЕЮЩАЯ СТАЛЬ

С. П. Буякова¹, К. Н. Каюров², С. А. Баранникова¹

¹ Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/4)

² Научно-производственное предприятие геофизической аппаратуры «ЛУЧ» (Россия, 630051, Новосибирск, ул. 2-я Юргинская, 34)

📨 sbuyakova@ispms.ru

Аннотация. Работа посвящена изучению влияния отжига на механические свойства и неоднородность пластической деформации биметаллической пластины из нержавеющей/углеродистой сталей с размерами рабочей части 50×7×2 мм. Для отработки лазерной технологии получения биметаллов различных композиций наибольший интерес представляет изучение зоны контакта двух разнородных сталей. Поскольку от структуры и свойств данной зоны зависят эксплуатационные характеристики всего изделия в целом, взаимодействие составляющих биметалла в процессе его изготовления приводит к возникновению неоднородности различных видов вблизи границы раздела и в объемах, прилегающих к ней. Материал исследований получали методом лазерной наплавки проволоки нержавеющей стали AISI 304 на пластину из низкоуглеродистой стали Ст3. Биметаллические образцы с наплавкой подвергали вакуумному нагреву при температуре 700 °C в течение различного времени (от 2 до 8 ч). Использование данных о распределениях локальных деформаций методом спекл-фотографии позволило рассмотреть процесс пластического течения на начальном участке диаграммы растяжения и установить влияние температуры отжига на локализацию пластической деформации в процессе механических испытаний. Для количественной оценки неоднородности деформации в основном и плакирующем слоях использовали пространственно-временные распределения локальных удлинений и соответствующие величины коэффициента вариации. Установлено, что уровень неоднородности деформации микрообъемов на интерфейсе в процессе растяжения выше, чем основных слоев биметалла. С увеличением времени отжига отмечается повышение значений коэффициента вариации в зоне соединения, более значительное со стороны нержавеющей стали, что увеличивает вероятность зарождения микротрещин. Повышенный уровень неоднородности деформации микрообъемов науглероженной зоны плакирующего слоя обусловлен усилением локализации деформации в близлежащих микрообъемах из-за структурной неоднородности.

Ключевые слова: пластическая деформация, локализация, биметаллы, низкоуглеродистая сталь, нержавеющая сталь

Благодарности: Работа выполнена в рамках комплексного проекта «Организация высокотехнологичного производства роторных управляемых систем для вскрытия сложных пластов и бурения скважин с большим отходом от вертикали в сложных геологических условиях, Арктике» (соглашение о предоставлении субсидии от 6 апреля 2022 № 075-11-2022-019), реализуемого Институтом физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках постановления Правительства РФ от 09.04.2010 № 218.

Для цитирования: Буякова С.П., Каюров К.Н., Баранникова С.А. Влияние термической обработки на неоднородность деформации биметалла углеродистая сталь – нержавеющая сталь. Известия вузов. Черная металлургия. 2023;66(5):580–586. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-580-586

EFFECT OF HEAT TREATMENT ON DEFORMATION INHOMOGENEITY OF CARBON STEEL / STAINLESS STEEL BIMETAL

S. P. Buyakova¹, K. N. Kayurov², S. A. Barannikova¹

¹Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/4 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

² Scientific Production Enterprise of Geophysical Equipment "LUCH" (34 2nd Yurginskaya Str., Novosibirsk 630051, Russian Federation)

sbuyakova@ispms.ru

Abstract. The work is devoted to the study of the effect of annealing on mechanical properties and inhomogeneity of plastic deformation of a bimetallic plate made of stainless / carbon steel with the dimensions of the working part 50×7×2 mm. To develop laser technology for produc-

ing bimetals of various compositions, the contact zone of two dissimilar steels is of greatest interest. Since the performance characteristics of the entire product as a whole depend on the structure and properties of this zone, interaction of the components of the bimetal in the process of its manufacture leads to appearance of heterogeneity of various types near the interface and in the volumes adjacent to it. The research material was obtained by laser cladding of wire AISI 304 stainless steel on a plate of low-carbon steel St3. Bimetallic samples were subjected to vacuum heating at a temperature of 700 °C at various times from 2 to 8 h. The use of data on the distributions of local strains by the speckle photography method made it possible to consider the process of plastic flow in the initial section of tension diagram and to establish the effect of annealing temperature on plastic strain localization during mechanical tests. For a quantitative assessment of deformation inhomogeneity in the main and cladding layers, we used spatiotemporal distributions of local elongations and the corresponding values of the variation coefficient. It was established that the level of deformation inhomogeneity of microvolumes at the interface during tension is higher than that of the bimetal main layers. With increase in the annealing time, increase in the variation coefficient in the joint zone is noted, which is more significant on the stainless steel side, and this increases the probability of microvracks initiation. The increased level of deformation inhomogeneity of microvolumes of the cladding layer carburized zone is contingent on the increased localization of deformation in nearby microvolumes due to structural heterogeneity.

Keywords: plastic deformation, localization, bimetal, low carbon steel, stainless steel

Acknowledgements: The work was performed within the framework of the complex project "Organization of high-tech production of rotary controlled systems for opening complex formations and drilling wells with a large deviation from the vertical in difficult geological conditions, in the Arctic" (grant agreement No. 075-11-2022-019 dated April 06, 2022), the financial support of the Ministry of Science and Education of the Russian Federation (decree of the Government of the Russian Federation dated 09.04.2010 No. 218).

For citation: Buyakova S.P., Kayurov K.N., Barannikova S.A. Effect of heat treatment on deformation inhomogeneity of carbon steel/stainless steel bimetal. Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2023;66(5):580–586. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-580-586

Введение

Эксплуатация материалов в условиях одновременного воздействия механических нагрузок и высоких температур в энергетическом или нефтеперерабатывающем оборудовании требует разработки новых методов оценки их работоспособности [1], которые учитывают влияние различных видов структурно-механической неоднородности [2-4]. Несмотря на то, что биметаллические материалы обладают высокой прочностью, они весьма чувствительны к расслоению на интерфейсе. Дефекты типа расслоение могут появляться в процессе изготовления и эксплуатации биметаллических материалов, что в определенной степени сдерживает их применение в промышленности [5-8]. Неравномерность деформации биметаллических композиций при прокатке зависит от соотношения сопротивлений деформации составляющих, исходных толщин слоев и порядка их укладки, параметров очага деформации, а также от контактных сил трения и касательных напряжений на интерфейсе [9-12]. Такая неравномерность деформации биметаллических композиций оказывает отрицательное влияние на процесс прокатки и свойства биметалла, так как приводит к возникновению значительных остаточных напряжений, которые могут вызывать расслоение биметалла, его изгиб, коробление и разрыв более твердых слоев [13 – 16].

Весьма перспективное направление развития технологии лазерной наплавки с помощью мощных лазеров – использование наплавляемого материала в виде сплошных и порошковых металлических лент [17; 18]. Основным стимулом к переходу от традиционных технологий получения покрытий (термическое напыление, дуговая наплавка) к лазерным служит более высокое качество получаемых покрытий, что обусловлено низким коэффициентом перемешивания наплавляемого материала с материалом подложки при более высоких адгезионных характеристиках [19].

В связи с тем, что протекающие вблизи интерфейса процессы при лазерной наплавке могут оказывать воздействие на свойства материала [20], целью настоящей работы являлось изучение влияния температурно-временных факторов на неоднородность пластической деформации биметаллической пластины.

Материалы и методы исследования

Для исследований неоднородности деформаций выбран биметалл низкоуглеродистая сталь марки Ст3/нержавеющая сталь AISI 304, полученный методом лазерной наплавки. Толщина основного слоя низкоуглеродистой стали СтЗ составляет примерно 6 мм, толщина наплавленного слоя из нержавеющей стали AISI 304 – примерно 1 мм. Лазерную наплавку с использованием присадочной проволоки проводили на пластины из низкоуглеродистой стали Ст3 на экспериментальной установке Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН. Подачу присадочной проволоки в зону лазерного воздействия осуществляли с помощью стандартной дуговой горелки и сварочного полуавтомата ПДГО-601. В качестве наплавляемого материала при такой схеме лазерной наплавки использовали присадочную проволоку из нержавеющей стали AISI 304 (диаметр 1,0 мм). Производительность лазерной наплавки присадочной проволоки с помощью волоконного лазера ЛС-15 (мощностью 15 кВт) составляла 130-170 г/мин при ширине наплавленных валиков 0,8 – 1,5 мм. Режимы наплавки подбирали таким образом, чтобы обеспечить однородное монолитное покрытие по заранее отработанным технологическим режимам: ширина сканирования (примерно 30 мм), мощность лазерного излучения

(4 кВт), скорость (65 мм/мин). Сканирование осуществляли в «треугольном» режиме с частотой 25 Гц. Металлографические исследования шлифов и рентгеновский анализ показали, что во всех образцах отсутствуют поры, трещины и нерасплавленные частицы порошка.

При нагреве биметаллов различного химического состава скорость и направление диффузии углерода и легирующих элементов зависят от температуры нагрева [3]. После термической обработки образцов (вакуумный нагрев до 700 °C с выдержкой в течение 2, 4, 6 и 8 ч) распределение химических элементов в составе сталей по толщине биметаллической пластины фиксировали на растровом электронном микроскопе LEO EVO 50 (Carl Zeiss, Германия) с приставкой Охford Insruments для рентгеновского дисперсионного микроанализа (Центр коллективного пользования «НАНО-ТЕХ» ИФПМ СО РАН). Для измерений микротвердости методом восстановленного отпечатка в соответствии с ГОСТ 9450 – 76 использовали микротвердомер ПМТ-3.

Регистрацию полей деформаций плоских образцов с размерами рабочей части 50×7×2 мм осуществляли в процессе механических испытаний на одноосное растяжение на испытательной машине Walter+Bai LFM-125 со скоростью деформации 6,67 · 10⁻⁵ с⁻¹ при комнатной температуре синхронно с использованием адаптированной методики спекл-фотографии, описанной в работах [21-23]. Наиболее естественной для визуализации и анализа компонентой тензора пластической дисторсии обычно является локальное удлинение в направлении оси растяжения образца є, Распределения сдвиговых и поворотных компонент имеют более сложный вид и поэтому менее удобны для анализа. Получаемые таким образом распределения отражают приросты локальных деформаций, а не их интегральные значения с начала процесса нагружения. На рис. 1, а приведен типичный пример такого распределения локальных деформаций $\varepsilon_{xx}(x, y)$ по образцу в состоянии после лазерной наплавки при общей деформации растяжения 0,01. Из представленных данных следует, что за пределом текучести пластическая деформация локализована в определенных зонах образца, в то время как другие объемы материала при заданном приросте деформации практически не деформируются. Для количественной оценки степени неоднородности деформации разных слоев биметалла (подложки и наплавки) использовался коэффициент вариации локальных деформаций ε_{xx} как отношение стандартного отклонения к средней арифметической величине *n* измерений:

$$\nu = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\left\langle \varepsilon_{xx}\right\rangle - \varepsilon_{xx_{i}}\right)^{2}}}{\left\langle \varepsilon_{xx}\right\rangle}$$
где $\left\langle \varepsilon_{xx}\right\rangle = \frac{\sum_{i=1}^{n}\varepsilon_{xx_{i}}}{1}$.

Считается, что при v > 0,4 распределение локальных удлинений ε_{xx} в образце становится существенно неоднородным, а величина $\langle \varepsilon_{xx} \rangle$ является не репрезентативной [24].

Результаты исследований и их обсуждение

Твердость в зоне соединения биметалла оказалась значительно выше твердости подложки и наплавки вне этой зоны (рис. 1, δ). После термической обработки с увеличением времени нагрева средний уровень твердости подложки и наплавки становится значительно ниже, но вблизи зоны соединения сохраняется градиент упрочнения двух сталей.



Рис. 1. Распределение локальных деформаций ε_{xx} в подложке (1) и наплавке (2) на начальной стадии пластического течения (a) и изменение микротвердости по ширине образца (δ) после лазерной наплавки (1) и после термической обработки в течение 2 (2), 4 (3), 6 (4) и 8 ч (5) (пунктирной линией (I) отмечена зона соединения)

Fig. 1. Distribution of local deformations ε_{xx} in the substrate (1) and surfacing (2) at the initial stage of plastic flow (a) and the change in microhardness along the width of the sample (δ) after laser surfacing (1) and after heat treatment at 2 (2), 4 (3), 6 (4) and 8 h (5) (dotted line (I) marks the junction zone)

На рис. 2 показано влияние времени нагрева на распределение основных элементов (железа, хрома, никеля, марганца) по толщине образца. Видно, что влияние нагрева оказывается не существенным в каждой из сталей по сравнению с исходным состоянием без термической обработки.

Между низкоуглеродистой и нержавеющей сталью фиксируется переходный слой (I), в котором содержания



Рис. 2. Влияние времени отжига на распределение железа (*a*), хрома (*б*), никеля (*в*) и марганца (*г*) по толщине образца:
 I – низкоуглеродистая сталь; *2* – нержавеющая сталь;
 I – переходный слой в зоне соединения

Fig. 2. Effect of annealing time on distribution of iron (*a*), chromium (δ), nickel (*s*) and manganese (*c*) over the thickness of the sample:

I – low-carbon steel; *2* – stainless steel;

I – transition layer in the junction zone

железа, хрома, никеля и марганца изменяются по линейному закону. Глубина диффузии хрома и никеля в основной слой низкоуглеродистой стали достигает 20 мкм. При нагреве происходят диффузия легирующих элементов из аустенитной стали в углеродистую (перлитную) и диффузия углерода в обратном направлении.

На рис. 3, *а* показано влияние времени нагрева на распределение углерода по толщине образца.

В распределении содержания углерода в направлении от углеродистой стали к нержавеющей за переходным слоем (*I*) выделяются обезуглероженный (*II*) и науглероженный (*III*) слои, толщина которых изменяется с продолжительностью нагрева. С ростом длительности отжига увеличивающаяся обезуглероженная ферритная зона со стороны углеродистой стали характеризуется низкой прочностью, и это отражается на снижении предела прочности биметалла (рис. 3, δ). Диффузия хрома из аустенитной фазы и углерода в обратном направлении приводит к образованию тонкого карбидного слоя со стороны углеродистой стали.



Рис. 3. Распределение углерода по толщине образца
с наплавкой (a), а также глубина обезуглероживания δ основного слоя и предел прочности σ биметалла в зависимости от длительности отжига t (б): *I* – низкоуглеродистая сталь; 2 – нержавеющая сталь; *I* – переходный слой в зоне соединения

Fig. 3. Carbon distribution over the thickness of the surfaced sample (*a*), depth of decarburization δ of the base layer and tensile strength σ of the bimetal depending on annealing duration $t(\delta)$: l – low-carbon steel; 2 – stainless steel;

I – transition layer in the junction zone

Структурная и химическая неоднородности вблизи поверхности раздела слоев подложки и наплавки оказывают влияние на характер развития пластической деформации вблизи переходной зоны. Условием совместности деформации на поверхности раздела биметалла является равенство деформации микрообъемов металла, прилегающих непосредственно к поверхности раздела. Как следствие, должны быть одинаковыми и уровни неоднородности деформации микрообъемов слоев на поверхности раздела, оцениваемые с помощью коэффициента вариации локальных деформаций v. Обеспечение указанных условий сопровождается усложнением напряженного состояния в этих областях.

На рис. 4 показано влияние термической обработки на изменение коэффициента вариации v, отражающего степень неоднородности деформации, вблизи переходной зоны биметалла на начальных этапах деформации. В биметалле в состоянии после лазерной наплавки уровни неоднородности деформации микрообъемов приграничных зон со стороны нержавеющей и углеродистой сталей различаются почти в два раза (рис. 4, кривая *I*). Для микрообъемов обезуглероженной зоны, непосредственно примыкающих к поверхности раздела, характерен, как и для состояния после наплавки (рис. 4, кривая I), пониженный уровень неоднородности деформации. Наличие карбидной прослойки приводит к зарождению микротрещин и более неоднородному распределению локальных деформаций и в науглероженном слое аустенитной стали при общей деформации $\varepsilon = 0.01$. В работе [23] показано, что на площадке текучести биметалла зародившаяся в основном слое стали СтЗ полоса Людерса может играть



Рис. 4. Изменение уровня неоднородности деформации v по толщине слоев образца на начальной стадии пластического течения в состоянии после лазерной наплавки (1) и после отжига в течение 2 (2), 4 (3), 6 (4) и 8 ч (5)

Fig. 4. Change in the level of inhomogeneity of deformation v by thickness of the sample layers at the initial stage of plastic flow in the state after laser surfacing (1) and after annealing at 2 (2), 4 (3), 6 (4) and 8 h (5)

роль «клина» согласно модели расклинивания Баренблатта [25], и тем самым инициировать зарождение трещины в плакирующем слое. Благодаря высокому уровню локальных напряжений на границе раздела полоса Людерса способствует образованию мартенситной α'-фазы и зарождению одиночных зон локализованной деформации в наплавленном слое на начальном участке пластического течения.

После термической обработки с увеличением времени отжига (рис. 4, кривые 2 – 5) коэффициенты вариации неоднородности деформации подложки и наплавленного металла становятся значительно выше, и вблизи зоны соединения сохраняется различный уровень неоднородности деформаций двух сталей. Статистический анализ с использованием метода двойного *t*-критерия [24] показал, что отличие коэффициентов вариации неоднородности деформации для подложки и наплавленного металла «значимо».

Таким образом, в настоящей работе показано влияние структурной неоднородности вблизи поверхности раздела слоев на распределения локальных деформаций в условиях одноосного растяжения биметалла, полученного методом лазерной наплавки. Характер неоднородности деформации в переходной зоне и основных слоях отличается, что может отражаться на свойствах изделий из биметалла. Для предотвращения снижения механических свойств биметаллов типа углеродистая сталь – нержавеющая сталь необходимо выбирать технологические режимы их получения, обеспечивающие минимальный уровень неоднородности деформации микрообъемов в переходной зоне.

Выводы

В зоне соединения наблюдается значительное упрочнение биметалла, полученного методом лазерной наплавки. Последующий нагрев до 700 °C с выдержкой от 2 до 8 ч не уменьшает градиент упрочнения, что связано с образованием карбидной прослойки вследствие диффузии компонентов.

Термическая обработка приводит к росту обезуглероженного слоя со стороны углеродистой стали и снижению предела прочности биметалла.

Высокие значения коэффициента вариации локальных деформаций в науглероженном слое наплавленного металла обусловлены повышением концентрации деформаций из-за наличия карбидов хрома и микротрещин. Увеличение длительности отжига приводит к росту коэффициентов вариации неоднородности деформации подложки и наплавленного металла.

Список литературы / References

1. Khodadad Motarjemi A., Koçak M., Ventzke V. Mechanical and fracture characterization of a bi-material steel plate. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2002;79(3):181-191. https://doi.org/10.1016/S0308-0161(02)00012-1

- Gao X., Jiang Z., Wei D., Jiao S., Chen D., Xu J., Zhang X., Gong D. Effects of temperature and strain rate on microstructure and mechanical properties of high chromium cast iron/low carbon steel bimetal prepared by hot diffusion-compression bonding. *Materials and Design*. 2014;63:650–657. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.067
- Биметаллический прокат / П.Ф. Засуха, В.Д. Корщиков, О.Б. Бухвалов, А.А. Ершов. Москва: Металлургия; 1971:264.
- Akramifard H.R., Mirzadeh H., Parsa M.H. Estimating interface bonding strength in clad sheets based on tensile test results. *Materials and Design*. 2014;64:307–309. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.066
- Li L., Nagai K., Yin F. Progress in cold roll bonding of metals. Science and Technology of Advanced Materials. 2008;9(2):023001.

http://doi.org/10.1088/1468-6996/9/2/023001

 Li Z., Zhao J., Jia F., Zhang Q., Liang X., Jiao S., Jiang Z. Analysis of bending characteristics of bimetal steel composite. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018;148:272–283.

https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.08.032

 DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2018;92:112–224.

https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001

- Hinojos A., Mireles J., Reichardt A., Frigola P., Hosemann P., Murr L.E., Wicker R.B. Joining of Inconel 718 and 316 Stainless Steel using electron beam melting additive manufacturing technology. *Materials and Design*. 2016;94:17–27. http://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.041
- Dhib Z., Guermazi N., Ktari A., Gasperini M., Haddar N. Mechanical bonding properties and interfacial morphologies of austenitic stainless steel clad plates. *Materials Science and Engineering: A.* 2017;696:374–386. https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.04.080
- **10.** Li Z., Lin Y.C., Zhang L., Jia F., Jiang Z., Jiao S. Investigation of compact tensile and fracture mechanical properties of a duplex stainless steel bimetal composite with the interfacial zone. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;19:809–820.

https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.085

- Li Z., Zhao J., Jia F., Liang X., Zhang Q., Yuan X., Jiao S., Jiang Z. Interfacial characteristics and mechanical properties of duplex stainless steel bimetal composite by heat treatment. *Materials Science and Engineering: A.* 2020;787:139513. http://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139513
- Li L., Niu X., Han B., Song L., Li X. Microstructure and properties of laser cladding coating at the end of L415/316L bimetal composite pipe. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2022;195:104568. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104568
- Chen N., Ali Khan H., Wan Z., Lippert J., Sun H., Shang S.-L., Liu Z.-K., Li J. Microstructural characteristics and crack formation in additively manufactured bimetal material of 316L stainless steel and Inconel 625. *Additive Manufacturing*. 2020;32:101037.

https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101037

- 14. Li Z., Zhao J., Jia F., Lu Y., Liang X., Yuan X., Jiao S., Zhou C., Jiang Z. Hot deformation behaviour and interfacial characteristics of bimetal composite at elevated temperatures. *Intermetallics*. 2020;125:106893. http://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106893
- 15. Li Z., Zhao J., Jia F., Lu Y., Zhang Q., Jiao S., Jiang Z. Analysis of flow behaviour and strain partitioning mechanism of bimetal composite under hot tensile conditions. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020;169:105317. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105317
- **16.** Фудзии Т., Дзако М. *Механика разрушения композиционных материалов*. Москва: Мир: 1982:232.
- 17. Бирюков В., Татаркин Д., Хриптович Е., Фишков А. Разработка технологий и оборудования для лазерного упрочнения и наплавки деталей станков и машин. Станкоинструмент. 2017;009(4):42–47. http://dx.doi.org/10.22184/24999407.2017.9.4.42.47

Biryukov V., Tatarkin D., Khriptovich E., Fishkov A. Development of technologies and equipment for laser strengthening and melting of mills and machine parts. *Stankoinstrument*. 2017;9:42–47. (In Russ.).

http://dx.doi.org/10.22184/24999407.2017.9.4.42.47

- Bandyopadhyay A., Heer B. Additive manufacturing of multi-material structures. *Materials Science and Engineering: R: Reports.* 2018;129:1–16. https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.04.001
- Xi W., Song B., Zhao Y., Yu T., Wang J. Geometry and dilution rate analysis and prediction of laser cladding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;103: 4695–4702. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03932-7
- 20. Kwiecień M., Kopyściański M., Błoniarz R., Muszka K., Majta J. Influence of deformation conditions on the inhomogeneity of plastic flow of structurally graded bimetal systems. *Procedia Manufacturing*. 2018;15:1649–1655. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.272
- Баранникова С.А., Косинов Д.А., Зуев Л.Б., Громов В.Е., Коновалов С.В. Влияние водорода на макролокализацию пластической деформации низкоуглеродистой стали. Известия вузов. Черная металлургия. 2016;59(12):891–895. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-12-891-895

Barannikova S.A., Kosinov D.A., Zuev L.B., Gromov V.E., Konovalov S.V. Hydrogen effect on macrolocalization of plastic deformation of low carbon steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016;59(12):891–895. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-12-891-895

22. Данилов В.И., Баранникова С.А., Зуев Л.Б. Автоволны локализованной деформации на начальных стадиях пластического течения монокристаллов. *Журнал технической физики*. 2003;73(11):69–75.

Danilov V.I., Barannikova S.A., Zuev L.B. Autowaves of localized deformation at initial stages of plastic flow of single crystals. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2003;73(11): 69–75. (In Russ.).

23. Баранникова С.А., Ли Ю.В. Кинетика развития фронтов пластического течения на границе раздела металлов. *Известия вузов. Физика.* 2020;63(5):19–24. https://doi.org/10.17223/00213411/63/5/19

Barannikova S.A., Li Yu.V. Development kinetics of the plastic wave front at the metal interface. *Russian Physics Journal*. 2020;63(5):731–737. https://doi.org/10.1007/s11182-020-02091-7 Mendenhall W.M., Sincich T.L. Statistics for Engineering and the Sciences. New York: Chapman and Hall/CRC; 2016:1182. https://doi.org/10.1201/b19628

Светлана Петровна Буякова, д.т.н., главный научный сотруд-

ник, заведующий лабораторией физической мезомеханики и нераз-

рушающих методов контроля, Институт физики прочности и

Константин Николаевич Каюров, генеральный директор,

Научно-производственное предприятие геофизической аппара-

Светлана Александровна Баранникова, д.б.-м.н., ведуший науч-

ный сотрудник лаборатории физики прочности, Институт физики

материаловедения Сибирского отделения РАН

ORCID: 0000-0002-6315-2541

ORCID: 0000-0001-9545-5400

E-mail: kayurov@looch.ru

E-mail: sbuyakova@ispms.ru

Сведения об авторах

Принята к публикации 10.05.2023

25. Barenblatt G.I. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Advances in Applied Mechanics*. 1962;7: 55–129. https://doi.org/10.1016/S0065-2156(08)70121-2

Information about the Authors Svetlana P. Buyakova, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Head of the

Svetlana P. Buyakova, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Head of the Laboratory of Physical Mesomechanics and Non-Destructive Testing, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences ORCID: 0000-0002-6315-2541 *E-mail:* sbuyakova@ispms.ru

Konstantin N. Kayurov, General Director, Scientific Production Enterprise of Geophysical Equipment "LUCH" ORCID: 0000-0001-9545-5400 *E-mail:* kayurov@looch.ru

Svetlana A. Barannikova, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Leading Researcher of the Laboratory of Strength Physics, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences ORCID: 0000-0001-5010-9969 E-mail: bsa@ispms.ru

Вклад авторов	Contribution of the Authors
<i>С. П. Буякова</i> – формулирование концепции работы, обзор литературы, анализ результатов. <i>К. Н. Каюров</i> – подбор режимов лазерной наплавки, обсуждение результатов. <i>С. А. Баранникова</i> – проведение исследований механических характеристик и локализации деформации, обсуждение результатов, написание текста статьи.	 S. P. Buyakova – formulation of the concept, literary review, analysis of the results. K. N. Kayurov – selection of laser cladding modes, discussion of the results. S. A. Barannikova – conducting studies of mechanical characteristics and localization of deformation, discussion of the results, writing the text.
Поступила в редакцию 09.03.2023 После доработки 20.04.2023	Received 09.03.2023 Revised 20.04.2023

Accepted 10.05.2023

туры «ЛУЧ»