

УДК 539.424

**ФИЗИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ
АМОРФНОГО И КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА****И.В. Ушаков, А.Д. Ошоров, И.С. Сафронов***Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»*

В работе исследуются физические механизмы деформирования и разрушения в области границы аморфного и кристаллического металлического сплава при низких температурах. Экспериментальные исследования проводились на композиционных образцах, образованных аморфным сплавом 82К3ХСР и сплавом ПОСК 50-18 при температурах 152 К, 219 К и 293 К. Исследована специфика изменения прочности и пластичности материала при данных температурах. Полученные результаты могут быть использованы для разработки новых материалов, способных работать при низких температурах. Обсуждены физические закономерности пластического деформирования и разрушения на границе аморфного и кристаллического металлического сплава при разных температурах.

Ключевые слова: физика деформирования, аморфный сплав, легкоплавкий сплав, композит, одноосное растяжение, низкотемпературная деформация.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-7-15

Введение

Исследование физики деформирования и разрушения на границе аморфного и кристаллического металлического сплава представляет теоретический и практический интерес. В тонком пограничном слое между аморфным и «традиционным» поликристаллическим металлическими сплавами пластическая деформация может иметь ряд особенностей, связанных с взаимным влиянием аморфной и кристаллической структур друг на друга.

На характеристики пластического деформирования в тонком пограничном слое будет сильно влиять температура, при которой будет происходить механическое воздействие. Выполнить такие исследования при высоких температурах достаточно сложно, так как даже при незначительном повышении температуры в аморфном металлическом сплаве будут инициированы процессы структурной релаксации/кристаллизации [1–3]. Поэтому представляет интерес исследование специфики деформирования и разрушения при понижении температуры.

По мере понижения температуры происходит охрупчивание металлических сплавов. В случае кристаллической структуры эффекты охрупчивания достаточно хорошо изучены. Они зависят от типа кристаллической решетки, химического состава металлического сплава и т. д. [4–6]. По мере понижения температуры изменяется характер деформирования аморфных металлических сплавов от гомогенного к негомогенному. В аморфных металлических сплавах температурную зависимость микротвердости и напряжения течения, как и для кристаллических материалов, можно разделить на термическую и атермическую компоненты [4]. Атермическая компонента для металла зависит от химического состава и кристаллической решетки. Температурная зависимость микротвердости для аморфных металлических сплавов зависит от атермической компоненты и практически не зависит от структурного химического состава.

Выявление физических закономерностей деформирования и разрушения на границе аморфного и кристаллического металлического сплава позволит расширить теоретические представления о физике разрушения в таких материалах. Это позволит сформулировать условия получения композиционных соединений легкоплавких металлических сплавов с многокомпонентными аморфными металлическими сплавами.

Целью данной работы является выявление физических закономерностей деформирования и разрушения на границе аморфного и кристаллического металлического сплава.

1. Методика эксперимента

Исследование проводилось на основе аморфной ленты марки 82К3ХСР (химический состав: 83,7 % Co + 3,7 % Fe + 3,2 % Cr + 9,4 % Si (вес. %)). Толщина аморфной ленты 30 мкм, ширина 20 мм (изготовитель – Ашинский металлургический завод). Для изготовления композитного материала спаивали две полоски аморфной ленты легкоплавким сплавом.

В ходе экспериментального поиска были апробированы различные легкоплавкие сплавы (и припой). Критерием выбора сплава была температура плавления, которая должна быть ниже температуры кристаллизации аморфного металлического сплава. В данной работе изготовили композиционный материал на основе сплавов 82К3ХСР и ПОСК 50-18 (химический состав ПОСК 50-18: 50 % Sn + 32 % Pb + 18 % Cd (вес. %)). Подготавливали две полоски аморфной ленты с толщиной 30 мкм, шириной 20 мм и длиной в 100 мм. Размеры образцов приводили в соответствии с ГОСТ 1497–84 [7]. Композит подвергали сжатию в специальной конструкции, и отправляли ее на изотермический отжиг при $T = (423 \pm 5)^\circ\text{K}$, в течение 5 мин.

При изготовлении образцов добивались, чтобы толщина легкоплавкой составляющей была не более 200 мкм. Для испытаний выбирались образцы с одинаковой толщиной по всей длине.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В данной работе из всего многообразия металлических сплавов были выбраны легкоплавкие сплавы, так как они из-за низкой температуры кристаллизации характеризуются специфическими зависимостями микротвердости и хрупкости от температуры, а также не разрушают аморфную структуру при сплавлении с аморфной лентой. В композите могут присутствовать компоненты с ОЦК и ГПУ решетками. Кроме того, эти материалы имеют хорошую адгезию с аморфной лентой на основе кобальта [8, 9].

Механические свойства образцов, получаемых сплавлением двух пленок аморфного металлического сплава легкоплавким материалом, во многом будут определяться состоянием материала вблизи границы аморфной ленты и кристаллического сплава. Это позволит выявить физические закономерности протекания процессов деформирования и разрушения на границе таких материалов. Состояние материала в граничной области будет сильно влиять на свойства образца в целом в том случае, если толщины будут достаточно малы. Этому условию соответствуют тонкие ленты аморфного сплава (30 мкм), которые спаивались с легкоплавким сплавом, помещенным между слоями ленты.

Экспериментальные исследования были направлены на выявление физических механизмов деформирования и разрушения на границе аморфного и кристаллического сплава с разной структурой при различных температурах. Проводили механические испытания полученных композиционных образцов путем одноосного

растяжения на разрывной машине Instron 3365. Испытания проводили при трех температурах 152 К, 219 К и 293 К. Испытания проводили по ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытаний на разрыв» [7].

На рис. 1 показана диаграмма растяжения аморфных образцов при различных температурах.

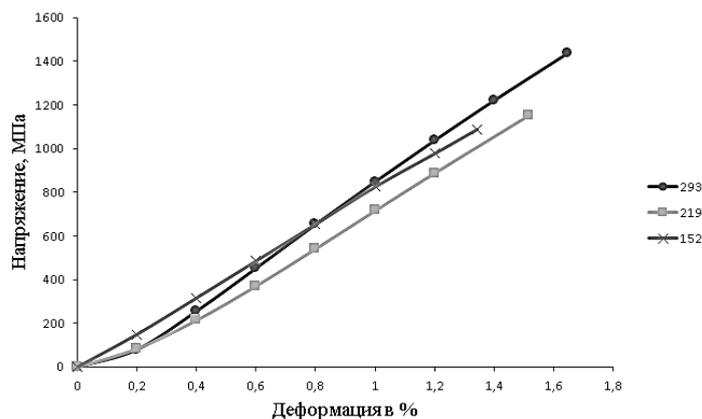


Рис. 1 – Диаграмма растяжения аморфных образцов при температурах:
а – 293 К; б – 219 К; в – 152 К

Fig. 1 – Tensile diagram of amorphous samples at temperatures:
а – 293 К; б – 219 К; в – 152 К

При 219 К среднее временное сопротивление (σ_B) падает до 1151 МПа, а среднее относительное удлинение – до 1,5 %; при 152 К среднее временное сопротивление составляет 1061 МПа, а среднее относительное удлинение 1,3 %.

На рис. 2 показана диаграмма растяжения композиционных образцов со сплавом ПОСК 50-18 при различных температурах. Временное сопротивление при 293 К в среднем равно 314 МПа, а среднее относительное удлинение составляет 2,28 %.

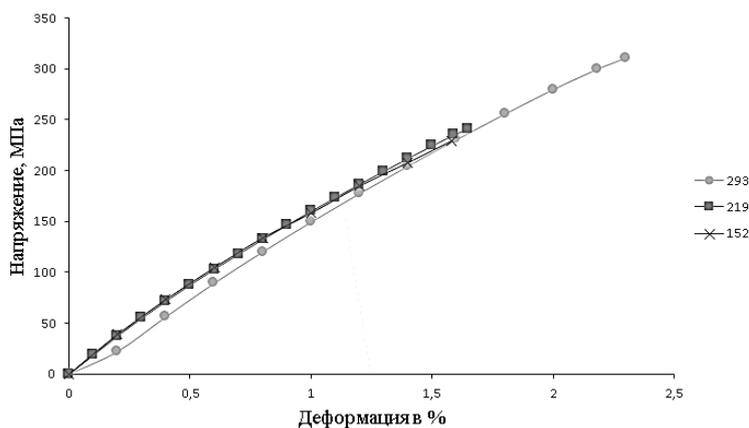


Рис. 2 – Диаграмма растяжения композиционных образцов аморфного металлического сплава со сплавом ПОСК 50-18 при температурах:

а – 293 К; б – 219 К; в – 152 К

Fig. 2 – Tensile diagram of composite samples of an amorphous metal alloy with the alloy ПОСК 50-18 at temperatures:

а – 293 К; б – 219 К; в – 152 К

При 219 К временное сопротивление в среднем равно 240 МПа, а среднее относительное удлинение составляет 1,65 %. Временное сопротивление материала при низкой температуре составляет в среднем 234 МПа. Это означает, что материал достаточно пластичный и способен пластически деформироваться при низких температурах.

Композиционные образцы ухудшают свои пластические свойства при понижении температуры. Однако для каждой из трех температур (152 К, 219 К и 293 К), пластические свойства композита оказываются лучше, чем для аморфного образца (см. таблицу).

Данные механических испытаний
Mechanical test data

| Сплав | Температура испытания, К | Модуль Юнга, МПа | σ_b , МПа | δ , % |
|----------------|--------------------------|------------------|------------------|--------------|
| Композит | 293 | 16174,65 | 311 | 2,3 |
| | 219 | 18232,32 | 241 | 1,65 |
| | 152 | 16841,23 | 229 | 1,58 |
| Аморфный сплав | 293 | 100371,1 | 1436 | 1,65 |
| | 219 | 87469,31 | 1153 | 1,52 |
| | 152 | 86508,29 | 1088 | 1,34 |

С понижением температуры до 219 К меняется характер разрушения аморфного сплава, который становится хрупким. При температуре 152 К образец разрушается хрупко. Трещины прямые, образец в зоне роста магистральной трещины/трещин разрушается на несколько частей.

При растяжении композиционного материала на основе аморфного металлического сплава 82К3ХСР и кристаллического сплава ПОСК 50-18 происходит вязкое разрушение. Охрупчивание не носит столь выраженного характера. В отличие от аморфного образца композиционный образец всегда разрушается на две части, отсутствуют мелкие «отколы». Существует большое количество ветвящихся трещин с криволинейными траекториями (рис. 3). Такой рост трещин свидетельствует о вязком разрушении, часть энергии тратится на пластическое деформирование, что повышает энергоёмкость разрушения [10, 11]. Механизм роста общей «прочности» композита понятен и многократно описан [12]. Примечательно, что в данной работе отмечены следы пластического деформирования аморфной ленты, входящей в композиционное соединение. Это подтверждает, что в материале сохраняется возможность пластического деформирования даже при низких температурах.

Такое поведение материала может быть обусловлено процессами пластического деформирования, протекающими на границе между аморфным материалом и кристаллическим металлическим сплавом.

Композиционные образцы со сплавом ПОСК 50-18 имеют низкое временное сопротивление (314 МПа при 293 К, 234 МПа при 219 К и 152 К), но высокое относительное удлинение (2,28 % при 293 К, 1,5 % при 219 К и 1,54 % при 152 К). Зона перехода на границе аморфного сплава и кристаллического может обладать выраженными пластическими свойствами.

Экспериментально наблюдаемые результаты можно объяснить, если предположить, что в известной формуле, связывающей предел текучести с параметрами материала [4], происходит снижение активационного объема V на границе между двумя сплавами (за счет локального воздействия на группы атомов в микрорегионах сплавления двух материалов при одноосном растяжении):

$$\sigma = \frac{U - kT \ln M / \dot{\epsilon}}{V}, \quad (1)$$

где σ – предел текучести; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации; U – высота потенциального барьера для движения дислокаций; k – постоянная Больцмана; V – активационный объем, где $M \approx \text{const}$.



Рис. 3 – Микрофотография области разрушения композиционного соединения аморфного металлического сплава со сплавом ПОСК 50-18 с ветвящейся трещиной. Стрелками указаны микротрещины

Fig. 3 – Micrograph of the fracture region of the composite compound of an amorphous metallic alloy with the alloy POCK 50-18 with a branching crack. The arrows indicate microcracks

Согласно модели пластического течения [4], «зона сдвига» может включать область от нескольких атомов до нескольких сотен атомов. В модели Спейнера предполагается, что процесс пластической деформации проявляется в виде серии атомных прыжков в области свободного/избыточного объема. В результате наблюдается эффект перемещения «свободного объема» по аморфному металлическому сплаву. Это механизм деформации диффузионного типа. В случае инициирования такого процесса на границе аморфного и кристаллического металлического сплава перемещение «свободного объема» будет сопровождаться кратковременным локальным повышением температуры. Это и будет обуславливать повышение пластических свойств аморфного сплава в условиях низкотемпературного нагружения.

Композит на основе аморфного металлического сплава и легкоплавкого сплава обладает большей относительной деформацией по сравнению с чистым аморфным металлическим сплавом и менее чувствителен к изменению температуры. Одним из возможных механизмов повышения относительной деформации композита является торможение трещин на границе аморфной и кристаллической фазы. Как следствие, будет иметь место повышение энергоемкости разрушения за счет пластической деформации в соответствии с критерием Гриффитса:

$$\sigma_{\text{крит}} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi c}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{крит}}$ – наименьшее напряжение растяжения, необходимое для распространения трещины как хрупкой; E – модуль Юнга; γ – поверхностная энергия стенок трещины, отнесенная к единице ее площади; c – половина длины трещины.

Улучшение пластических свойств композиционного соединения вполне объяснимо с точки зрения имеющихся представлений. На поверхности композиционных соединений (внешняя поверхность аморфной ленты) отмечается вязкое разрушение и элементы пластичности (рис. 3). Это может быть связано с тем, что в месте контакта кристаллического металлического сплава и аморфного металлического сплава при низкотемпературном одноосном растяжении будет меняться физический механизм деформирования.

Заключение

1. Одноосное растяжение композиционного материала на основе аморфного металлического сплава 82К3ХСР и кристаллического сплава ПОСК 50-18 сопровождается вязким разрушением даже при понижении температуры до 152 К. В отличие от аморфного образца охрупчивание композиционного соединения не носит столь выраженного характера. В композиционном образце существует большое количество ветвящихся трещин с криволинейными траекториями, что свидетельствует о вязком разрушении, пластическом деформировании и высокой энергоемкости разрушения.

2. Физические особенности деформирования и разрушения на границе аморфного и кристаллического металлического сплава связаны с уменьшением активационного объема и локальным разогревом материала в области деформирования по механизму Спейнера с серией атомных прыжков и соответствующим перемещением свободного объема. Данный механизм будет обуславливать повышение пластических свойств композита на основе аморфного сплава в условиях низкотемпературного одноосного растяжения.

3. Выявление закономерностей деформирования на границе аморфного и кристаллического сплава позволит разрабатывать композиционные соединения аморфных и легкоплавких кристаллических металлических сплавов со значительными пластическими свойствами в области низких температур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Температура хрупко-вязкого перехода трубной стали К65 – экспериментальное определение и сопутствующие признаки / А.Б. Арабей, А.Г. Глебов, Л.М. Капуткина, И.Ю. Пышминцев, С.Е. Яковлев, А.И. Абакумов, Д.Е. Капуткин // Вести газовой науки. – 2020. – № 2 (44). – С. 152–161.
2. *Shinkin V.N.* Analytical calculus of sheet curvature on four-roll mills at tubes production // CIS Iron and Steel Review. – 2022. – Vol. 23. – P. 50–55.
3. *Капуткин Д.Е.* Reversible martensitic transformation, ageing and low-temperature tempering of iron-carbon martensite // Materials Science and Engineering: A. – 2006. – Vol. 438–440. – P. 207–211. – DOI: 10.1016/j.msea.2006.02.182.
4. *Мильман Ю.В., Козырев Д.В.* О механизмах деформации в аморфных металлических сплавах // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2014. – Т. 57, № 8. – С. 50–55.
5. *Шинкин В.Н.* Кривизна биметаллического бруса после его осевого упругопластического растяжения // Черные металлы. – 2023. – № 4. – С. 60–64. – DOI: 10.17580/chm.2023.04.10.

6. Шинкин В.Н. Предварительная правка стальной полосы // Черные металлы. – 2018. – № 5. – С. 34–40.
7. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 22 с.
8. Ushakov I.V., Oshorov A.D. Viscosity of microdestruction of multilayer composite and method of its revealing // Materials Science Forum. – 2022. – Vol. 1052. – P. 110–115.
9. Ушаков И.В., Ошоров А.Д. Микроразрушение многослойного композита на основе аморфно-нанокристаллического металлического сплава // Вестник Московского авиационного института. – 2022. – Т. 29, № 3. – С. 246–252.
10. Ushakov I.V., Safronov I.S. Directed changing properties of amorphous and nanostructured metal alloys with help of nanosecond laser impulses // CIS Iron and Steel Review. – 2021. – Vol. 22. – P. 77–81.
11. Safronov I.S., Ushakov A.I. Targeted alternation in properties of solid amorphous-nanocrystalline material in exposing to nanosecond laser radiation // Defect and Diffusion Forum. – 2021. – Vol. 410. – P. 469–474.
12. Comparative analysis of the crystallization mechanisms and kinetics in the Ti50Ni25Cu25 alloy amorphized by melt quenching or severe plastic deformation / R.V. Sundeev, A.V. Shalimova, A.V. Krivoruchko, A.M. Glezer, A.A. Veligzhanin, V.A. Khonik // Intermetallics. – 2022. – Vol. 141. – P. 107372. – DOI: 10.1016/j.intermet.2021.107372.

PHYSICS OF DEFORMATION AND FRACTURE AT THE INTERFACE OF AMORPHOUS AND CRYSTALLINE METAL ALLOYS

Ushakov I.V., Oshorov A.D., Safronov I.S.

National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia

This study is aimed at studying the physical mechanisms of deformation and fracture in the region of the boundary between amorphous and crystalline alloys at low temperatures. Experimental studies were carried out on composite samples with the solder ПОСК 50-18 at different temperatures (152 K, 219 K and 293 K). The results showed that when the temperature decreases, the strength and ductility of the material decrease, which can lead to the formation of defects and cracks. Composite samples with the solder ПОСК 50-18 behave quite stably at low temperatures, but still deteriorate their mechanical properties when the temperature drops to 219 K. The results obtained can be used for the development of new materials and technologies for joining amorphous and crystalline alloys for low-temperature applications.

Keywords: physics of deformation, amorphous alloy, fusible alloy, composite, uniaxial tension, low-temperature deformation.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-7-15

REFERENCES

1. Arabey A.B., Glebov A.G., Kaputkina L.M., Pyshmitsnev I.Yu., Yakovlev S.E., Abakumov A.I., Kaputkin D.E. Temperatura khрупko-vyazkogo perekhoda trubnoi stali K65 – eksperimental'noe opredelenie i soputstvuyushchie priznaki [Experimental determination and concomitant signs of a brittle-ductile transition temperature for K65-grade pipe steel]. *Vesti gazovoi nauki*, 2020, no. 2 (44), pp. 152–161. (In Russian).
2. Shinkin V.N. Analytical calculus of sheet curvature on four-roll mills at tubes production. *CIS Iron and Steel Review*, 2022, vol. 23, pp. 50–55.
3. Kaputkin D.E. Reversible martensitic transformation, ageing and low-temperature tempering of iron-carbon martensite. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, vol. 438–440, pp. 207–211. DOI: 10.1016/j.msea.2006.02.182.
4. Milman Yu.V., Kozyrev D.V. O mekhanizmaxh deformatsii v amorfnykh metallicheskiikh splavakh [On the deformation mechanisms in metallic glasses]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh*

- zavedenii. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2014, vol. 57, no. 8, pp. 50–55.
5. Shinkin V.N. Krivizna bimetallichesкого brusa posle ego osevogo uprugoplasticheskogo rastyazheniya [The curvature of steel bimetallic beam after its axial elastoplastic stretching]. *Chernye metally*, 2023, no. 4, pp. 60–64. DOI: 10.17580/chm.2023.04.10. (In Russian).
 6. Shinkin V.N. Predvaritel'naya pravka stal'noi polosy [Preliminary straightening of steel strip]. *Chernye Metally*, 2018, no. 5, pp. 34–40. (In Russian).
 7. GOST 1497–84. *Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie* [State Standard 1497–84. Metals. Methods of tension test]. Moscow, Standards Publ., 1986. 22 p.
 8. Ushakov I.V., Oshorov A.D. Viscosity of microdestruction of multilayer composite and method of its revealing. *Materials Science Forum*, 2022, vol. 1052, pp. 110–115.
 9. Ushakov I.V., Oshorov A.D. Mikrorazrushenie mnogosloinogo kompozita na osnove amorfno-nanokristallichesкого metallichesкого сплава [Micro-fracture of multilayer composites based on morphous-nanocrystalline metal alloy]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta = Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 246–252.
 10. Ushakov I.V., Safronov I.S. Directed changing properties of amorphous and nanostructured metal alloys with help of nanosecond laser impulses. *CIS Iron and Steel Review*, 2021, vol. 22, pp. 77–81.
 11. Safronov I.S., Ushakov A.I. Targeted alternation in properties of solid amorphous-nanocrystalline material in exposing to nanosecond laser radiation. *Defect and Diffusion Forum*, 2021, vol. 410, pp. 469–474.
 12. Sundeev R.V., Shalimova A.V., Krivoruchko A.V., Glezer A.M., Veligzhanin A.A., Khonik V.A. Comparative analysis of the crystallization mechanisms and kinetics in the Ti50Ni25Cu25 alloy amorphized by melt quenching or severe plastic deformation. *Intermetallics*, 2022, vol. 141, p. 107372. DOI: 10.1016/j.intermet.2021.107372.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Ушаков Иван Владимирович – родился в 1972 году, д-р техн. наук, профессор кафедры физики НИТУ «МИСИС», Действительный член Российской академии естественных наук. Область научных интересов: формирование свойств твердых материалов селективной лазерной обработкой неоднородных нано- и микромасштабных областей. Опубликовано 260 научных работ. (Адрес: 119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4. E-mail: ushakoviv@mail.ru).

Ushakov Ivan Vladimirovich (b. 1972) – Doctor of Sciences (Eng.), professor at the Physics Department NUST MISIS, academician of the Russian Academy of Natural Sciences. His research interests are currently focused on formation of properties of solid materials by selective laser treatment of inhomogeneous nano- and micro-scale regions. He is the author of 260 scientific papers. (Address: 4, Leninskii Av., Moscow, 119049, Russia. E-mail: ushakoviv@mail.ru).



Ошоров Аюр Дашеевич – родился в 1996 году, аспирант, ассистент кафедры физики НИТУ «МИСИС». Область научных интересов: металлические сплавы, механические свойства аморфных, аморфно-нанокристаллических металлов и композиционных материалов на их основе. Опубликовано 15 научных работ. (Адрес: 119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4. E-mail: oshorovayur@gmail.com).

Oshorov Ayur Dashevich (b. 1996) – postgraduate student, assistant lecturer, at the Physics Department, NUST MISIS. His research interests are currently focused on metal alloys, mechanical properties of amorphous, amorphous-nanocrystalline metals and composite materials on their basis. He is the author of 15 scientific papers. (Address: 4, Leninskii Av., Moscow, 119049, Russia. E-mail: oshorovayur@gmail.com).



Сафронов Иван Сергеевич – родился в 1989 году, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики НИТУ «МИСИС». Область научных интересов: формирование физико-механических свойств аморфных и нанокристаллических металлических сплавов селективной лазерной обработкой; физико-химические свойства поверхности твердых материалов на границе различных сред. Опубликовано более 40 научных работ. (Адрес 119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4. E-mail: issafronov@yandex.ru).

Safronov Ivan Sergeevich (b. 1989) – Candidate of Sciences (Phys. & Math.), associate professor at the Physics Department, NUST MISIS. His research interests include formation of physical and mechanical properties of amorphous and nanocrystalline metal alloys by selective laser treatment; physico-chemical properties of the surface of solid materials at the boundary of various media, as well as amorphous and nanostructured materials, including the study of new substances, the development of materials and nanomaterials with specified properties and functions. He is the author of 40 scientific papers. (Address: 4, Leninskii Av., Moscow, 119049, Russia. E-mail: issafronov@yandex.ru).

*Статья поступила 17 мая 2023 г.
Received May 17, 2023*

To Reference:

Ushakov I.V., Oshorov A.D., Safronov I.S. Fizika deformirovaniya i razrusheniya na granitse amorfnoho i kristallicheskogo metallicheskogo splava [Physics of deformation and fracture at the interface of amorphous and crystalline metal alloys]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2023, no. 2 (59), pp. 7–15. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-7-15.