

**Оригинальная статья**

УДК 621:538.911:538.951

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-2(48)-33-42

**ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНСТРУМЕНТА ИЗ СПЛАВА ЖС6У И  
АДДИТИВНО ПОЛУЧЕННОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПРИ ФРИКЦИОННОЙ  
ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ**

© 2024 г. А. М. Черемнов, Д. А. Гурьянов, А. В. Чумаевский, А. Е. Кобзев, В. Е. Рубцов

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

**Аннотация.** Исследованы особенности взаимодействия титанового сплава ВТ6св, подложки из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т и инструмента из никелевого жаропрочного сплава ЖС6У при фрикционной перемешивающей обработке. Показано, что механизм взаимодействия инструмента и материала при фрикционной перемешивающей обработке может претерпевать значительные изменения за счет внедрения в зону контакта второго материала. Последовательность процесса изнашивания инструмента в виде постепенного формирования трибологического слоя из механической смеси интерметаллидных фаз и карбидов сохраняется, но интенсивность износа увеличивается. Обнаружено, что даже небольшое избыточное внедрение пина инструмента в подложку приводит к замешиванию ее фрагментов в материал заготовки, что изменяет процесс течения и переноса металла по контуру инструмента. Исследования с применением методики быстрой остановки процесса обработки с вырезкой участка с внедренным в заготовку инструментом позволили определить, каким образом в материал заготовки внедряются фрагменты инструмента и подложки. Обнаружено, что это происходит за счет образования узких потоков по контуру инструмента с ярко выраженной вертикальной направленностью. Внедрение фрагментов инструмента в материал зоны перемешивания происходит непрерывно в процессе обработки, показывая реализацию как ламинарных, так и вихревых потоков металла. Взаимодействие потоков металла титанового сплава и потоков от подложки имеет сложный и неоднородный характер. Это связано с давлением, оказываемым инструментом на заготовку за счет силы прижима и усилия сопротивления продольному перемещению инструмента.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая аддитивная технология, подача двух проволок в ванну расплава, функционально-градиентный материал, механические свойства, фрикционная перемешивающая обработка, взаимодействие инструмента и материала

**Благодарность.** Исследования проводились с использованием оборудования Центра коллективного пользования ИФПМ СО РАН «НАНОТЕХ».

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-29-20172, <https://rscf.ru/project/22-29-20172/>.

**Для цитирования:** Черемнов А.М., Гурьянов Д.А., Чумаевский А.В., Кобзев А.Е., Рубцов В.Е. Особенности взаимодействия инструмента из сплава ЖС6У и аддитивно полученного титанового сплава при фрикционной перемешивающей обработке. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;2(48):33–42. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2\(48\)-33-42](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2(48)-33-42)

**Original article**

**FEATURES OF INTERACTION BETWEEN TOOL MADE OF ZHS6U ALLOY AND  
ADDITIVELY PRODUCED TITANIUM ALLOY DURING FRICTION STIR  
PROCESSING**

© 2024 A. M. Cheremnov, D. A. Gurianov, A. V. Chumaevskii, A. E. Kobzev, V. E. Rubtsov

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

**Abstract.** In the work the characteristics of interaction of titanium alloy Ti–6Al–4V, substrate from stainless steel SS321 and tool from nickel-based superalloy ZhS6U at friction stir processing are studied. It is shown that the mechanism of tool-material interaction during friction stir processing can undergo significant changes due to the penetration of a second material into the contact zone. The basic sequence of tool wear process in the form of gradual formation of tribological layer from mechanical mixture of intermetallic phases and carbides is preserved, but the wear intensity increases. It was found that even a small excessive penetration of the tool pin into the substrate leads to stirring of its fragments into the workpiece material, which changes the process of flow and metal transfer along the tool contour. Studies using the technique of quick stopping the processing with cutting out the area with the tool penetrated into the workpiece allowed us to determine how tool and substrate fragments are penetrated into the workpiece material. It was found that the substrate material is penetrated into the stir zone by the formation of narrow streams along the contour of the tool with a pronounced vertical orientation. The penetration of tool fragments into the material of the stir zone occurs continuously during the processing, showing the realization of both laminar and vortex metal flows. The interaction between the metal flows of the titanium alloy and the flows from the substrate has a complex and heterogeneous character and is related to the pressure exerted by the tool on the workpiece due to the clamping force and the force resisting the longitudinal movement of the tool.

**Keywords:** electron beam additive manufacturing, two wire-feed into melt bath, functional gradient material, mechanical properties, friction stir processing, tool-material interaction

**Acknowledgements:** The studies were carried out using the equipment of the NANOTECH Shared-use Center of ISPMS SB RAS.

**Funding:** This research project was supported by the Russian Science Foundation under grant no. 22-29-20172, <https://rscf.ru/en/project/22-29-20172/>.

**For citation:** Cheremnov A.M., Gurianov D.A., Chumayevskii A.V., Kobzev A.E. Rubtsov V.E. Features of interaction between tool made of ZhS6U alloy and additively produced titanium alloy during friction stir processing. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;2(48):33–42. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2\(48\)-33-42](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2(48)-33-42)

## Введение

Технологии аддитивного производства позволяют изготавливать детали машин и механизмов из различных металлов и сплавов в широком диапазоне возможных форм и размеров [1]. Одними из наиболее ярко выраженных положительных сторон аддитивного получения деталей из металлов и сплавов являются снижение времени производства, затрат ресурсов и возможность получения в изделии уникальных сочетаний механических и эксплуатационных характеристик. В настоящее время интенсивно развиваются технологии высокопроизводительного аддитивного производства изделий с использованием для печати проволоочных филаментов [2; 3]. К ним относится проволоочная дуговая [2] и электронно-лучевая [3] аддитивные технологии. Электронно-лучевая аддитивная технология за счет осуществления процесса в вакууме, возможности плавного изменения теплового баланса, управления структурой и свойствами изделий в процессе печати и других положительных

сторон является одним из наиболее актуальных способов аддитивного производства для промышленного применения [4]. К основным недостаткам рассматриваемой технологии относятся формируемые при печати титановых сплавов крупные столбчатые зерна, вытянутые в направлении выращивания [4]. Их измельчение для повышения механических свойств возможно с использованием дополнительных воздействий при печати или проведения постобработки [4]. Одной из наиболее эффективных для измельчения структуры металлов или сплавов методик является фрикционная перемешивающая обработка [5; 6]. Она позволяет упрочнять различные детали, в том числе непосредственно между нанесением слоев материала при печати, что применяется при проволоочной дуговой печати [6]. Помимо обработки различных материалов рассматриваемой технологией позволяет получать различные композиты [7; 8] и формировать биметаллические [9; 10] или мультиметаллические изделия [11; 12]. При обработке в изделиях формируется

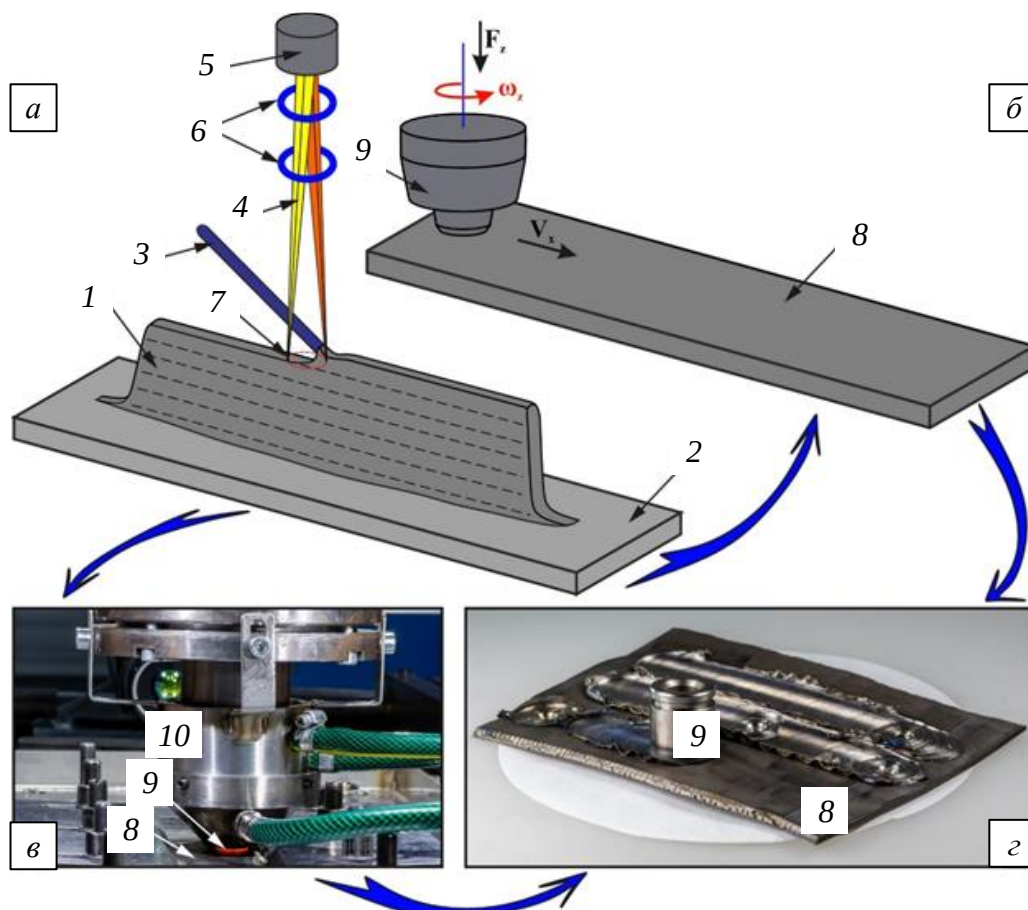


Рис. 1. Схема процесса проволоочной электронно-лучевой печати (а), фрикционной перемешивающей обработки (б), снимок процесса обработки (в) и внешний вид полученного образца (з):

1 – напечатанный образец; 2 – подложка; 3 – подаваемая проволока; 4 – электронный пучок; 5 – электронная пушка; 6 – система фокусировки; 7 – развертка пучка; 8 – подготовленная для обработки пластина; 9 – инструмент; 10 – система охлаждения инструмента и подачи аргона

Fig. 1. Schematic diagram of the wire electron beam printing process (a), friction stir processing (б), snapshot of the processing (в) and appearance of the obtained sample (з):

1 – printed sample; 2 – substrate; 3 – fed wire; 4 – electron beam; 5 – electron gun; 6 – focusing system; 7 – beam sweep; 8 – plate prepared for processing; 9 – tool; 10 – tool cooling and argon supply system

в основном ультрамелкодисперсная структура с высокими механическими свойствами. Особенно актуально применение фрикционной перемешивающей обработки является с точки зрения упрочнения именно титановых сплавов, механические свойства которых являются достаточно невысокими после электронно-лучевой печати [13]. При этом, процесс обработки титановых сплавов является одним из наиболее сложных с технологической точки зрения, что обусловлено интенсивным диффузионным, химическим и деформационным взаимодействием материала и применяемого инструмента из кобальтовых [14], вольфрамовых [15], никелевых [16; 17], твердых сплавов [18; 19], поликристаллического кубического нитрида бора [20; 21] и др. Такое положение приводит к изменению структуры и свойств обрабатываемых материалов, так как продукты износа инструмента в виде крупных фрагментов или мелких частиц замешиваются в материал вместе с потоками металла. По этой причине

важным является понимание процессов структурно-фазового взаимодействия инструмента и потоков материала при обработке титановых сплавов, в том числе полученных аддитивными методами, что и является целью настоящей работы.

### Материалы и методы исследования

Образцы были получены на экспериментальном оборудовании в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН (рис. 1). Образцы 1 титанового сплава ВТ6св получали на подложке 2 из сплава ВТ1-0 за счет плавления проволоки 3 электронным пучком 4 от электронной пушки 5, проходящим через систему магнитной фокусировки 6 и формирующим в зоне печати развертку в виде эллипса 7. Применение развертки электронного пучка обусловлено необходимостью одновременного оплавления подложки или нижележащих слоев и плавления проволоки. Это необходимо по причине доста точно неравномерной проволоки с высокими остаточными

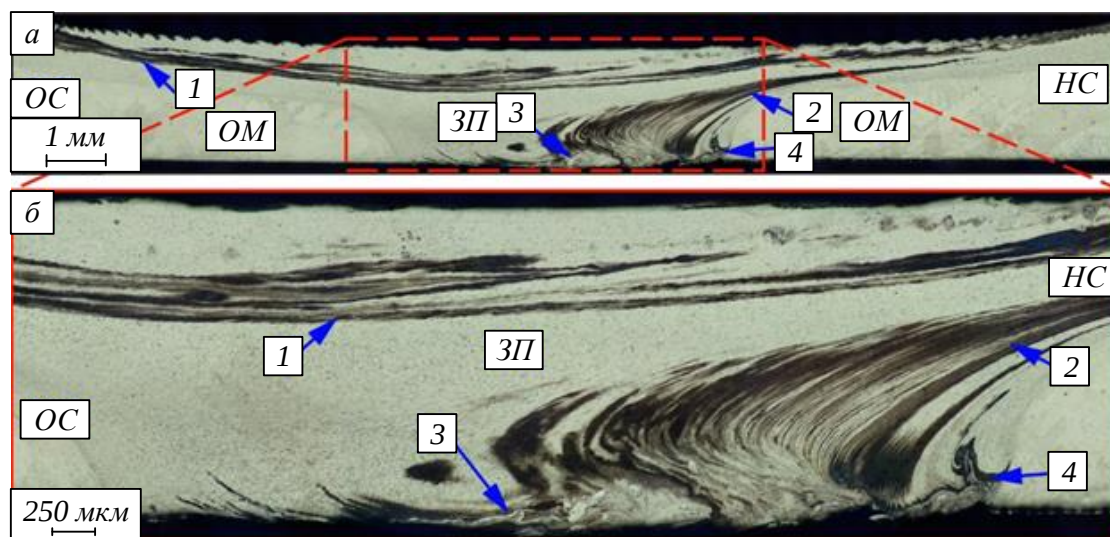


Рис. 2. Формирование структуры в зонах обработки (а) и перемешивания (б) при фрикционной обработке:  
 1 – внедрение фрагментов инструмента в подплечевой части зоны перемешивания; 2 – внедрение фрагментов инструмента с наступающей стороны зоны перемешивания; 3 – внедрение частиц подложки в материал; 4 – внедрение крупного агломерата частиц инструмента в нижней части наступающей стороны зоны перемешивания  
 Fig. 2. Structure formation in the processing zone (a) and the stir zone (б) during friction processing:  
 1 – penetration of tool fragments in the shoulder part of the stir zone; 2 – penetration of tool fragments from the advancing side of the stir zone; 3 – penetration of substrate particles into the material; 4 – penetration of a large agglomerate of tool particles in the lower part of the advancing side of the stir zone

напряжениями, имеющейся на рынке, что обуславливает невозможность точной фокусировки на ней при печати. Печать осуществляли при ускоряющем напряжении 30 кВ, токе пучка 45 мА и скорости печати 440 мм/мин. Диаметр проволоки из сплава ВТ6св составлял 2,0 мм.

После печати полученные образцы в виде вертикальных стенок размером  $8 \times 120 \times 80$  мм разрезали на пластинки толщиной 2,2 мм электроэрозионным станком Dk7750. Дальнейшую обработку полученных пластин 8 после шлифовки проводили инструментом 9. Пластины помещали на поверхности подложки из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Усилие прижима инструмента к заготовке составляло 33 – 34 кН, скорость перемещения инструмента – 90 мм/мин, скорость вращения инструмента – 400 об/мин. Инструмент был изготовлен из сплава ЖС6У с коническим гладким пином и гладкими плечами диаметром 20 мм. Для обработки использовали систему подачи защитного газа в виде аргона и охлаждение инструмента 10.

Для изучения характерных особенностей процесса взаимодействия инструмента и материала использовали технику остановки процесса обработки (stop action technic). После завершения нескольких проходов инструментом до достижения не менее одного метра суммарной наработки на последнем проходе проводили остановку процесса с оставлением инструмента в поверхности заготовки (рис. 1, з). После завершения эксперимента вырезали металлогра-

фические шлифы из зоны обработки перпендикулярно оси шва и из зоны с остановленным инструментом в продольном сечении. Дальнейшие исследования полированных шлифов проводили с использованием оптической (Altami MET 1С), лазерной сканирующей (Olympus LEXT 4100) и растровой электронной (Zeiss LEO EVO 50) микроскопии, а также энергодисперсионного химического анализа.

### Результаты и их обсуждение

В процессе печати в материале формируется крупнокристаллическая структура из вытянутых в направлении печати столбчатых зерен. Фрикционная перемешивающая обработка приводит к значительным изменениям в структуре материала, особенно при проведении нескольких проходов инструментом вдоль линии обработки. Структура аддитивного титанового сплава после обработки состоит из измельченного зерна титанового сплава и замешанных частиц инструмента различного размера (рис. 2). Наиболее обогащенной фрагментами никелевого инструмента является подплечевая область зоны 1 перемешивания и ее наступающая сторона 2. В нижней части зоны перемешивания избыточное внедрение пина инструмента на глубину до 0,1 – 0,2 мм обуславливает замешивание частиц подложки 3. Совокупность таких эффектов в нижней части зоны перемешивания на наступающей стороне привела к образованию дефекта в виде трещины 4.



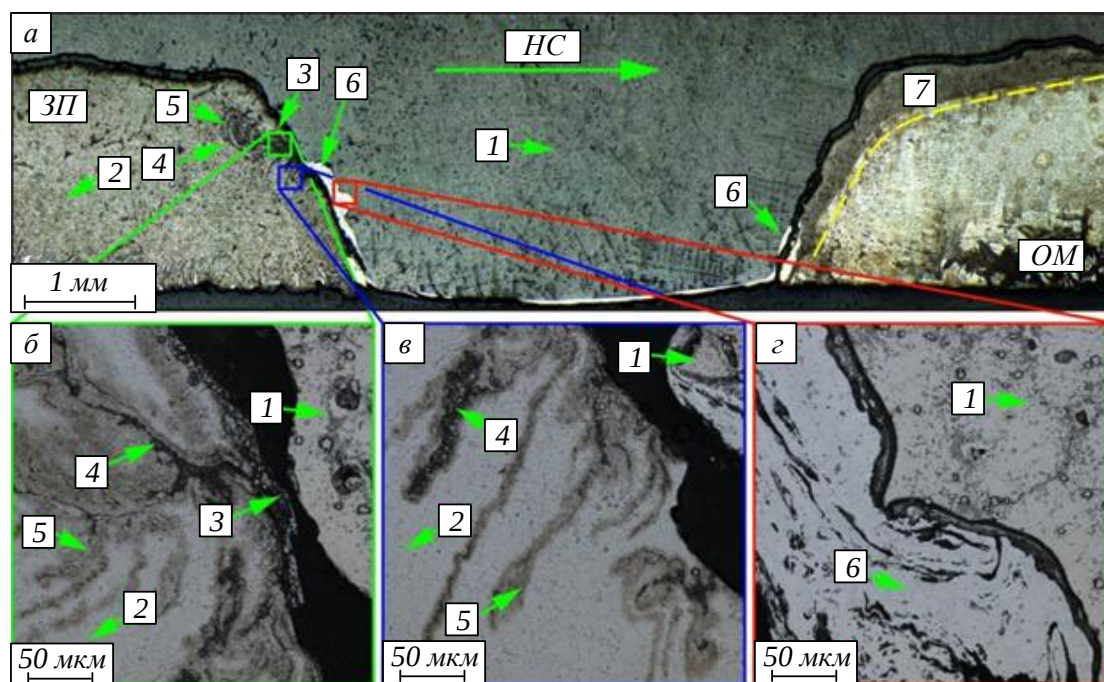


Рис. 3. Структура в продольном сечении инструмента и материала заготовки (а), внедрение фрагментов инструмента в материал заготовки (б, в) и фрагмент подложки на поверхности центральной части пина инструмента (з): НС – направление обработки; ОМ – основной металл; ЗП – зона перемешивания; 1 – инструмент; 2 – зерна титана; 3 – механически перемешанный слой из материала инструмента и титанового сплава; 4 – частицы инструмента; 5 – твердые растворы и интерметаллидные фазы на основе титана и никеля; 6 – фрагмент подложки; 7 – слой деформированного материала перед инструментом

Fig. 3. Structure in longitudinal section of tool and workpiece material (a), penetration of tool fragments into the workpiece material (б, в) and substrate fragment on the surface of the central part of the tool pin (з):

НС – processing direction; ОМ – base metal; ЗП – stir zone; 1 – tool; 2 – titanium grains; 3 – mechanically mixed layer of tool material and titanium alloy; 4 – tool particles; 5 – solid solutions and intermetallic phases based on titanium and nickel; 6 – substrate fragment; 7 – layer of deformed material in front of the tool

После наработки порядка одного метра обработки был проведен эксперимент с остановкой инструмента в процессе обработки с его оставлением в материале пластины (рис. 3). Как показывает структура металла в области контакта титанового сплава 2 и никелевого инструмента 1 происходит образование механически перемешанного слоя 3, фрагменты 4 которого внедряются в потоках металла внутрь зоны перемешивания при взаимодействии с титановым сплавом, образуя слои с плавно изменяющимся содержанием никеля. По контуру инструмента отмечается замешивание стали 6 на расстояние порядка 2/3 длины пина от подложки.

Такое положение обусловлено значительным давлением, оказываемым инструментом на материал, и высокой степенью деформации как титанового сплава, так и подложки. Таким образом, пластифицированный металл подложки увлекается адгезионными силами и давлением вверх вдоль инструмента, образуя отдельные потоки вокруг пина. При этом, внедрение стали характерно также и спереди инструмента, где значительная деформация титанового сплава приводит к образованию ультрамелкодисперсной структуры с размером зерна менее 1 мкм.

Ширина деформированного слоя перед инструментом составляет 350 – 400 мкм. Вокруг инструмента формирование потоков металла происходит с реализацией как ламинарного, так и вихревого течений (рис. 3, б, в).

Исследования химического состава материала механически перемешанного слоя методом энергодисперсионного анализа показывают, что в нем образуются интерметаллидные частицы преимущественного состава  $Ti_2Ni$  (рис. 4). В замешанных в титановый сплав фрагментах слоя происходит образование достаточно крупных частиц интерметаллидов 6 рассматриваемого типа (рис. 4, б, в). В слоях с плавно изменяющейся структурой 7 содержание никеля значительно меньше и соответствует твердым растворам на основе титана. Внедрение частиц стали 8 в материал зоны перемешивания по данным энергодисперсионного анализа не приводит к образованию крупных зон с диффузионным перемешиванием компонентов или с интерметаллидной структурой вокруг частиц (рис. 4, д). Для частиц стали характерно преимущественно механическое перемешивание и формирование достаточно тонких интерметаллидных прослоек.

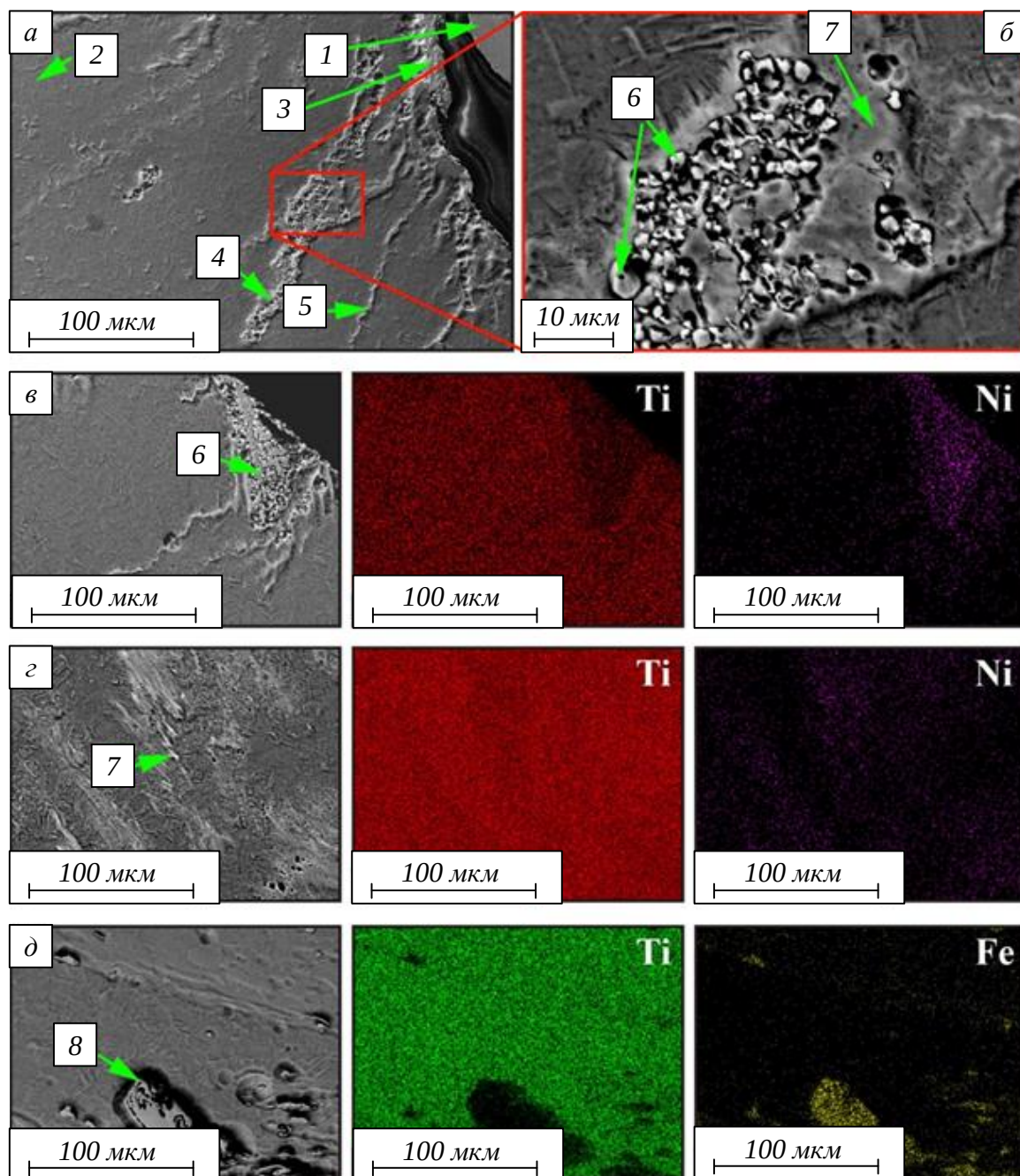


Рис. 4. Растровые электронные изображения структуры металла вблизи инструмента (а, б), структура и карты распределения химических элементов во включениях никелевого сплава (в, г) и подложки (д) в материале зоны перемешивания: 1 – инструмент; 2 – зерна титана; 3 – механически перемешанный слой из материала инструмента и титанового сплава; 4 – частицы инструмента; 5 – твердые растворы и интерметаллидные фазы на основе титана и никеля;

6 – частицы интерметаллидов; 7 – твердый раствор на основе титана; 8 – частицы подложки

Fig. 4. Scanning electron microscopy images of the metal structure near the tool (а, б), structure and distribution maps of chemical elements in the inclusions of nickel alloy (в, г) and substrate (д) in the material of the stir zone:

1 – tool; 2 – titanium grains; 3 – mechanically mixed layer of tool material and titanium alloy; 4 – tool particles;

5 – solid solutions and intermetallic phases based on titanium and nickel; 6 – intermetallic particles;

7 – solid solution based on titanium; 8 – substrate particles

Проведенные исследования показывают, что в процессе обработки в материал зоны перемешивания внедряются частицы инструмента (рис. 5), причем механизм их внедрения основан на взаимной диффузии компонентов, образовании механически перемешанного слоя, его изнашивании и замешивании частиц износа в потоки переносимого титанового сплава. Давление ин-

струмента на материал и внедрение пина в подложку приводят к вовлечению в процесс стали с ее замешиванием в нижней части зоны обработки и образованием потоков по контуру инструмента на разную глубину с наступающей 1 и отступающей 2 сторон. Это обусловлено динамикой процесса обработки, формированием потоков металла по контуру инструмента адгези-



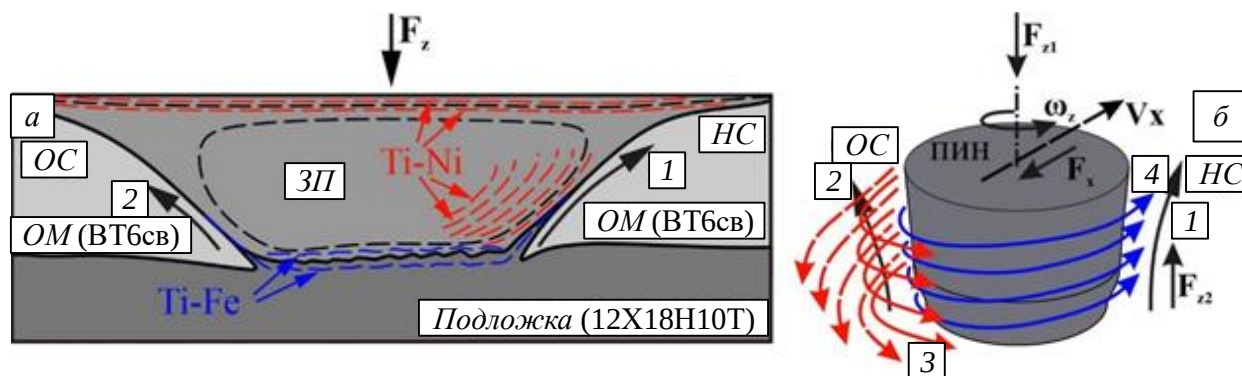


Рис. 5. Схематическое изображение внедрения частиц инструмента и подложки в материал при фрикционной перемешивающей обработке (а) и течения металла по контуру пина (б):

1 и 2 – вертикальное течение металла на наступающей и отступающей сторонах; 3 – течение металла за инструментом; 4 – потоки металла вокруг пина

Fig. 5. Schematic illustration of tool and substrate particles penetrating in the material during friction stir processing (а) and metal flow along the pin contour (б):

1 and 2 – vertical flow of metal on the advancing and retreating side; 3 – metal flow behind the tool; 4 – metal flows around the pin

онной и экструзионной природы. По контуру пина инструмента наиболее близкие потоки металла 4 имеют адгезионную природу, основанную на контакте материала и инструмента. Давление инструмента на деформированный материал при его продольном перемещении приводит к реализации в более широких слоях потоков металла с несколько отличной физической природой, основанной на экструдировании 3 металла из зоны перед инструментом – за инструмент (рис. 5, б). При этом помимо горизонтальной направленности формируемых потоков имеется и вертикальная составляющая, обуславливающая перемещение металла снизу-вверх от отступающей стороны – к наступающей. Это приводит к большей высоте замешивания стали от подложки и никеля от инструмента на наступающей стороне в сравнении с отступающей. Внедрение стали в процесс обработки не только усложняет течение металла по контуру инструмента, но и ускоряет износ рабочего инструмента при обработке.

### Выводы

Проведенные исследования показывают, что в процессе фрикционной перемешивающей обработки аддитивно-полученного титанового сплава реализуются процессы, аналогичные происходящим при обработке листового проката. Деформационное воздействие, оказываемое на материал, и фрикционный нагрев приводят к пластификации материала, его фрагментации, диффузионному, адгезионному и механическому взаимодействиям с инструментом. По контуру инструмента при этом формируются потоки металла различной конфигурации, а образующиеся частицы износа уносятся в потоках и попадают в материал зоны перемешивания. Образующая структура зоны перемешивания является

макроскопически неоднородной и содержит обогащенные продуктами взаимодействия инструмента и материала области в верхней подплечевой части и на наступающей стороне зоны перемешивания. Внедрение стали от подложки усложняет процесс взаимодействия инструмента и материала, а также интенсифицирует износ инструмента.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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>
2. Ван Я., Коновалов С.В., Чэн С., Панченко И.А., Коток М.М. Исследование влияния термической обработки на сплавы системы Cu – Al, полученные проволоочно-дуговым аддитивным способом. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023;1(43):89–97. EDN: DWMDLS. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-89-97](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-89-97)
3. Astafurova E.A., Astafurov S.V., Reunova K.A., Melnikov E.V., Moskvina V.A., Panchenko M.Yu., Maier G.G., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Structure Formation in Vanadium-Alloyed Chromium-Manganese Steel with a High Concentration of Interstitial Atoms C + N = 1.9 wt % during Electron-Beam Additive Manufacturing. *Physical Mesomechanics*. 2022;25(1):1–11. EDN: FXWPYU. <https://doi.org/10.1134/S1029959922010015>
4. Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Chumaevsky A.V., Astafurova E.G. Micro-, Meso- and Macrostructural Design of Bulk Metallic and Polymetallic Materials by Wire-Feed Electron-

- Beam Additive Manufacturing. *Physical Mesomechanic*. 2022;25(6):479–491.  
<http://doi.org/10.1134/S1029959922060017>
5. Mironov S.Yu., Sato Y.S., Kokawa H. Grain Structure Evolution during Friction-Stir Welding. *Physical Mesomechanic*. 2020;23(1):21–31. EDN: QUSALM.  
<https://doi.org/10.1134/S1029959920010038>
  6. Qie M., Wei J., He C. Microstructure evolution and mechanical properties of wire-arc additive manufactured Al–Zn–Mg–Cu alloy assisted by interlayer friction stir processing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;24:2891–2906.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.205>
  7. Jayalakshmi S., Arvind Singh R., Vivek Anand A., Srinivas Rao K., Konovalov S. Microstructure dependence of AL6061 surface composite on tool rotation speed during friction stir processing. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022;3 (41):45–55.
  8. Qian J., Li J., Xiong J., Zhang F., Lin X. In situ synthesizing Al<sub>3</sub>Ni for fabrication of intermetallic-reinforced aluminum alloy composites by friction stir processing. *Materials Science and Engineering: A*. 2012;550:279–285.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.070>
  9. Bhattacharjee R. Biswas P. Review on thermo-mechanical and material flow analysis of dissimilar friction stir welding. *Welding International*. 2021;35(7-9):295–332.  
<http://doi.org/10.1080/09507116.2021.1992256>
  10. Isa M.S.M., Moghadas K., Ariffin M.A., Raja S., Muhamad M.R.B., Yusof F., Jamaludin M.F., Yusoff N.B., Ab Karim M.S.B. Recent research progress in friction stir welding of aluminium and copper dissimilar joint: A review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;15:2735–2780.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.037>
  11. Sharma S., Handa A., Singh S.S., Verma D. Influence of tool rotation speeds on mechanical and morphological properties of friction stir processed nano hybrid composite of MWCNT-Graphene-AZ31 magnesium. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2019;7(3):487–500.  
<https://doi.org/10.1016/j.jma.2019.07.001>
  12. Zykova A.P., Tarasov S.Y., Chumaevskiy A.V., Kolubaev E.A. A review of friction stir processing of structural metallic materials: Process, properties, and methods. *Metals*. 2020;10(6):772.  
<https://doi.org/10.3390/met10060772>
  13. Klimenov V., Kolubaev E., Klopotov A., Chumaevskii A., Ustinov A., Strelkova I., Rubtsov V., Gurianov D., Han Z., Nikonov S. et al. Influence of the Coarse Grain Structure of a Titanium Alloy Ti-4Al-3V Formed by Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing on Strain Inhomogeneities and Fracture. *Materials*. 2023;16(11):3901.  
<https://doi.org/10.3390/ma16113901>
  14. Du S., Liu H., Jiang V., Zhou L., Gao F. The performance of a Co-based alloy tool in the friction stir welding of TA5 alloy. *Wear*. 2022;488–489:204180.  
<http://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204180>
  15. Mashinini P.M., Dinaharan I., David Raja Selvam J., Hattingh D.G. Microstructure evolution and mechanical characterization of friction stir welded titanium alloy Ti – 6Al – 4V using lanthanated tungsten tool. *Materials Characterization*. 2018;139:328–336.  
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.03.020>
  16. Zykova A., Vorontsov A., Chumaevskii A., Gurianov D., Gusarova A., Kolubaev E., Tarasov S. Structural evolution of contact parts of the friction stir processing heat-resistant nickel alloy tool used for multi-pass processing of Ti6Al4V/(Cu + Al) system. *Wear*. 2022;488–489:204138. EDN: SPJDGX;  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204138>
  17. Costa A.M.S., Oliveira J.P., Pereira V.F., Nunes C.A., Ramirez A.J., Tschiptschin A.P. Ni-based Mar-M247 superalloy as a friction stir processing tool. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018;262:605–614.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.07.034>
  18. Fall A., Fesharaki M.H., Khodabandeh A.R., Jahazi M. Tool Wear Characteristics and Effect on Microstructure in Ti – 6Al – 4V Friction Stir Welded Joints. *Metals*. 2016;6:275.
  19. Farias A., Batalha G.F., Prados E.F., Magnabosco, R., Delijaicov S. Tool Wear Evaluations in Friction Stir Processing of Commercial Titanium Ti – 6Al – 4V. *Wear*. 2013;302:1327–1333.
  20. Wu L.H., Wang D., Xiao B.L., Ma Z.Y. Tool wear and its effect on microstructure and properties of friction stir processed Ti – 6Al – 4V. *Materials Chemistry and Physics*. 2014;146(3):512–522.  
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.04.002>
  21. Zhang Y., Sato Y.S., Kokawa, H., Park S.H.C., Hirano S., Du S. Stir zone microstructure of commercial purity titanium friction stir welded using pcBN tool. *Materials Science and Engineering A*. 2008;488:25–30.  
<https://doi.org/10.1179/136217110X12785889549624>

## REFERENCES

1. 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>
2. Van Ya., Konovalov S.V., Chen S., Panchenko I.A., Kotok M.M. Investigation of the effect of thermal treatment on alloys of the Si–Al system obtained by the wire-arc additive method. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;1(43):89–97. EDN: DWMDLS.  
[https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-89-97](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-89-97)
3. Astafurova E.A., Astafurov S.V., Reunova K.A., Melnikov E.V., Moskvina V.A., Panchenko M.Yu., Maier G.G., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Structure Formation in Vanadium-Alloyed Chromium-Manganese Steel with a High Concentration of Interstitial Atoms C + N = 1.9 wt % during Electron-Beam Additive Manufacturing. *Physical Mesomechanic*. 2022;25(1):1–11. EDN: FXWPYU.  
<https://doi.org/10.1134/S1029959922010015>
4. Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Chumaevsky A.V., Astafurova E.G. Micro-, Meso- and Macrostructural Design of Bulk Metallic and Polymetallic Materials by Wire-Feed Electron-Beam Additive Manufacturing. *Physical Mesomechanic*. 2022;25(6):479–491.  
<http://doi.org/10.1134/S1029959922060017>
5. Mironov S.Yu., Sato Y.S., Kokawa H. Grain Structure Evolution during Friction-Stir Welding. *Physical Mesomechanic*. 2020;23(1):21–31. EDN: QUSALM.  
<https://doi.org/10.1134/S1029959920010038>
6. Qie M., Wei J., He C. Microstructure evolution and mechanical properties of wire-arc additive manufactured Al – Zn – Mg – Cu alloy assisted by interlayer friction stir processing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;24:2891–2906.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.205>
7. Jayalakshmi S., Arvind Singh R., Vivek Anand A., Srinivas Rao K., Konovalov S. Microstructure dependence of AL6061 surface composite on tool rotation speed during friction stir processing. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022;3 (41):45–55.
8. Qian J., Li J., Xiong J., Zhang F., Lin X. In situ synthesizing Al<sub>3</sub>Ni for fabrication of intermetallic-reinforced aluminum alloy composites by friction stir processing. *Materials Science and Engineering: A*. 2012;550:279–285.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.070>
9. Bhattacharjee R. Biswas P. Review on thermomechanical and material flow analysis of dissimilar friction stir welding. *Welding International*. 2021;35(7-9):295–332.  
<http://doi.org/10.1080/09507116.2021.1992256>
10. Isa M.S.M., Moghadasi K., Ariffin M.A., Raja S., Muhamad M.R.B., Yusof F., Jamaludin M.F., Yusoff N.B., Ab Karim M.S.B. Recent research progress in friction stir welding of aluminium and copper dissimilar joint: A review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;15:2735–2780.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.037>
11. Sharma S., Handa A., Singh S.S., Verma D. Influence of tool rotation speeds on mechanical and morphological properties of friction stir processed nano hybrid composite of MWCNT-Graphene-AZ31 magnesium. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2019;7(3):487–500.  
<https://doi.org/10.1016/j.jma.2019.07.001>
12. Zykova A.P., Tarasov S.Y., Chumaevskiy A.V., Kolubaev E.A. A review of friction stir processing of structural metallic materials: Process, properties, and methods. *Metals*. 2020;10(6):772.  
<https://doi.org/10.3390/met10060772>
13. Klimenov V., Kolubaev E., Klopotov A., Chumaevskii A., Ustinov A., Strelkova I., Rubtsov V., Gurianov D., Han Z., Nikonov S. et al. Influence of the Coarse Grain Structure of a Titanium Alloy Ti – 4Al – 3V Formed by Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing on Strain Inhomogeneities and Fracture. *Materials*. 2023;16(11):3901.  
<https://doi.org/10.3390/ma16113901>
14. Du S., Liu H., Jiang V., Zhou L., Gao F. The performance of a Co-based alloy tool in the friction stir welding of TA5 alloy. *Wear*. 2022;488–489:204180.  
<http://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204180>
15. Mashinini P.M., Dinaharan I., David Raja Selvam J., Hattingh D.G. Microstructure evolution and mechanical characterization of friction stir welded titanium alloy Ti – 6Al – 4V using lanthanated tungsten tool. *Materials Characterization*. 2018;139:328–336.  
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.03.020>
16. Zykova A., Vorontsov A., Chumaevskii A., Gurianov D., Gusarova A., Kolubaev E., Tarasov S. Structural evolution of contact parts of the friction stir processing heat-resistant nickel alloy tool used for multi-pass processing of Ti6Al4V/(Cu + Al) system. *Wear*. 2022;488–489:204138. EDN: SPJDGX.  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204138>
17. Costa A.M.S., Oliveira J.P., Pereira V.F., Nunes C.A., Ramirez A.J., Tschiptschin A.P. Ni-based Mar-M247 superalloy as a friction stir processing tool. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018;262:605–614.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.07.034>

18. Fall A., Fesharaki M.H., Khodabandeh A.R., Jahazi M. Tool Wear Characteristics and Effect on Microstructure in Ti – 6Al – 4V Friction Stir Welded Joints. *Metals*. 2016;6:275.
19. Farias A., Batalha G.F., Prados E.F., Magnabosco, R., Delijaicov S. Tool Wear Evaluations in Friction Stir Processing of Commercial Titanium Ti – 6Al – 4V. *Wear*. 2013;302:1327–1333.
20. Wu L.H., Wang D., Xiao B.L., Ma Z.Y. Tool wear and its effect on microstructure and properties of friction stir processed Ti – 6Al – 4V. *Materials Chemistry and Physics*. 2014;146(3):512–522.  
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.04.002>
21. Zhang Y., Sato Y.S., Kokawa, H., Park S.H.C., Hirano S., Du S. Stir zone microstructure of commercial purity titanium friction stir welded using pcBN tool. *Materials Science and Engineering A*. 2008;488:25–30.  
<https://doi.org/10.1179/136217110X12785889549624>

**Сведения об авторах:**

**Андрей Максимович Черемнов**, младший научный сотрудник лаборатории структурного дизайна перспективных материалов, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН  
**Email:** amc@ispms.ru.

**Денис Андреевич Гурьянов**, к.т.н., младший научный сотрудник лаборатории локальной металлургии в аддитивных технологиях, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН  
**Email:** desa-93@mail.ru  
**ORCID:** 0000-0003-0725-1219

**Андрей Валерьевич Чумаевский**, д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории локальной металлургии в аддитивных технологиях, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН  
**Email:** tch7av@gmail.com  
**ORCID:** 0000-0002-1983-4385

**Александр Евгеньевич Кобзев**, младший научный сотрудник лаборатории контроля качества материалов и конструкций, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН  
**Email:** kobzev.tomsk@mail.ru  
**ORCID:** 0000-0003-0348-1869

**Валерий Евгеньевич Рубцов**, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией контроля качества материалов и конструкций, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

**Email:** rvy@ispms.ru  
**ORCID:** 0000-0003-0348-1869

**Information about the authors:**

**Andrey M. Cheremnov**, postgraduate student, Junior researcher at the Laboratory of Structural Design of Advanced Materials, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences  
**Email:** amc@ispms.ru.

**Denis A. Gurianov**, Cand. Sci. (Eng.), Junior researcher at the Laboratory of Local Metallurgy in Additive Technologies, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences  
**Email:** desa-93@mail.ru  
**ORCID:** 0000-0003-0725-1219

**Andrey V. Chumaevskii**, Cand. Sci. (Eng.), Leading researcher of Laboratory of Local Metallurgy in Additive Technologies, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences  
**Email:** tch7av@gmail.com  
**ORCID:** 0000-0002-1983-4385

**Aleksandr E. Kobzev**, Junior researcher of Laboratory of quality control of materials and structures, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences  
**Email:** rvy@ispms.ru  
**ORCID:** 0000-0003-0348-1869

**Valery E. Rubtsov**, Cand. Sci. (Phys.-math.), Leading researcher, Head of Laboratory of quality control of materials and structures, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences  
**Email:** rvy@ispms.ru  
**ORCID:** 0000-0003-0348-1869

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 11.12.2023  
После доработки 10.01.2024  
Принята к публикации 22.01.2024

Received 11.12.2023  
Revised 10.01.2024  
Accepted 22.01.2024