

УДК 620.17

DOI: 10.15593/2224-9982/2023.74.09

**А.В. Ильиных, А.М. Паньков, Е.М. Струнгарь, Г.Л. Пермяков**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИ СДВИГЕ И КРУЧЕНИИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 316LSI, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ**

В работе проведено комплексное экспериментальное исследование механических свойств при сдвиге и кручении нержавеющей стали 316LSi, полученной по технологии аддитивного производства проволоочно-дуговой наплавки, в частности, был использован метод холодного переноса металла. Из наплавленной пластины были вырезаны образцы в горизонтальном и вертикальном направлениях по отношению к плоскости наплавляемых слоев для испытаний на сдвиг и кручение.

Для построения диаграмм деформирования при квазистатическом нагружении использовались испытательные системы фирмы Instron и метод цифровой корреляции изображений. Показана эволюция полей деформаций на поверхности образцов в испытаниях на сдвиг и кручение. На основе диаграмм деформирования определены упругие, пластические и прочностные свойства нержавеющей стали 316LSi. Отмечается, что наибольший статистический разброс в результатах испытаний наблюдается для величины модуля сдвига во всех экспериментах. Произведено сопоставление результатов испытаний на сдвиг и кручение. Показано, что упругие и пластические свойства стали 316LSi значительно отличаются в испытаниях на кручение и их значения зависят от направления вырезки образцов из пластины. Установлено, что при кручении модуль сдвига отличается на 30 %, а предел пропорциональности и условный предел текучести – на 20 % по отношению к наибольшей величине. В испытаниях на сдвиг направление вырезки образцов не значительно сказывается на значениях аналогичных механических свойств.

Определенные механические характеристики могут быть использованы для численного моделирования процессов неупругого деформирования элементов конструкций сложной геометрии и оценки качества выбранных режимов аддитивного производства.

**Ключевые слова:** аддитивное производство, нержавеющая сталь, экспериментальное исследование, статические испытания, корреляция цифровых изображений, сдвиг, кручение.

**A.V. Ilinykh, A.M. Pankov, E.M. Strungar, G.L. Permyakov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **EXPERIMENTAL STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES DURING SHEAR AND TORSION OF 316LSI STAINLESS STEEL PRODUCED BY ARC SURFACING METHOD**

The work carried out a comprehensive experimental study of the mechanical properties in shear and torsion of 316LSi stainless steel produced using the additive manufacturing technology of wire-arc surfacing, in particular, the cold metal transfer method was used. Samples were cut from the fused on plate in horizontal and vertical directions relative to the plane of the fused layers for shear and torsion tests.

To construct strain diagrams under quasi-static loading, Instron testing systems and the digital image correlation method were used. The evolution of strain fields on surface samples in shear and torsion tests is shown. Based on the strain diagrams, the elastic, plastic and strength properties of 316LSi stainless steel were determined. It is noted that the greatest statistical scatter in the test results is observed for the shear modulus in all experiments. The results of shear and torsion tests were compared. It is shown that the elastic and plastic properties of 316LSi steel differ significantly in torsion tests and their values depend on the direction of cutting samples from the plate. It has been established that during torsion the shear modulus differs by 30 %, and the proportionality limit and conditional yield strength differ by 20 % with respect to the largest value. In shear tests, the direction of cutting samples does not significantly affect the values of similar mechanical properties.

Certain mechanical characteristics can be used to numerically simulate the processes of inelastic deformation of structural elements of complex geometry and assess the quality of selected additive manufacturing modes.

**Keywords:** additive manufacturing, stainless steel, experimental study, static tests, digital image correlation, shear, torsion.

Внедрение аддитивных технологий при производстве перспективных авиационных двигателей позволяет проектировать и изготавливать детали и элементы конструкций сложной геометрии. При этом достигается значительное снижение массовых характеристик и повышается коэффициент использования материалов по сравнению с традиционными методами изготовления [1–3].

Элементы конструкций, изготовленные при помощи различных аддитивных технологий, как правило, обладают значительной анизотропией механических свойств. Анизотропия упругих, пластических, прочностных и усталостных характеристик связана с физической природой послойного формирования изделия [4–7] и с разнообразными технологическими параметрами и режимами работы оборудования [8–10].

Для численного моделирования процессов неупругого деформирования и разрушения аддитивных элементов конструкций сложной геометрии требуется значительная база экспериментальных исследований при разных видах статического и циклического нагружения [11–13]. При проведении комплексных экспериментальных исследований для анализа полей деформаций и механизмов разрушения конструкционных материалов широко используются дополнительные диагностические системы [14–19]: акустическая эмиссия, термосканирование, вибродиагностика, оптическая система анализа полей деформаций на поверхности образца и др. В частности, использование цифровых оптических систем на основе метода корреляции цифровых изображений [20–23] позволяет отслеживать изменение полей перемещений и деформаций на поверхности образцов сложной геометрии и строить диаграммы деформирования в терминах напряжение-деформация без использования навесных экстензометров.

Целью работы является экспериментальное исследование вопросов реализации механических свойств нержавеющей стали 316LSi, полученной методом дуговой наплавки, при квазистатических испытаниях на кручение и сдвиг образцов, вырезанных в вертикальном и горизонтальном направлениях по отношению к плоскости наплавленных слоев, с использованием метода корреляции цифровых изображений.

### **Объект исследования**

Объектом исследования являются образцы для испытаний на сдвиг, кручение и растяжение, вырезанные в двух направлениях из пластины толщиной 10 мм. Пластина была изготовлена по технологии аддитивного производства проволоочно-дуговой наплавкой из нержавеющей стали 316LSi в Лаборатории методов создания и проектирования систем «материал-технология-конструкция» ПНИПУ, имеющей компетенции в области аддитивного производства изделий из разных конструкционных сплавов [24–27]. Для снятия остаточных напряжений пластина была подвергнута термообработке.

Образцы для испытаний на кручение были вырезаны в форме бруска с квадратным поперечным сечением и подвергнуты последующей токарной обработке для получения цилиндрической формы рабочей части диаметра 5,5 мм и длиной 20 мм. Образцы для испытаний растяжение и сдвиг вырезались электроэрозионной резкой без последующей механической обработки. Толщина вырезанных образцов составила около 3,0 мм. Длина образцов равнялась 70 мм для образцов на растяжение и 75 мм для образцов на кручение и сдвиг. Выбор длины и размеров образцов связан с ограничениями по ширине наплавленной пластины. Схема вырезки образцов и фотография части наплавленной пластины приведены на рис. 1. Под вертикальной ориентацией образцов понимается такое расположение, при котором наибольший размер располагается вдоль направления выращивания пластины. Соответственно при горизонтальной ориентации образцов наибольший размер расположен параллельно плоскости наплавленных слоев.

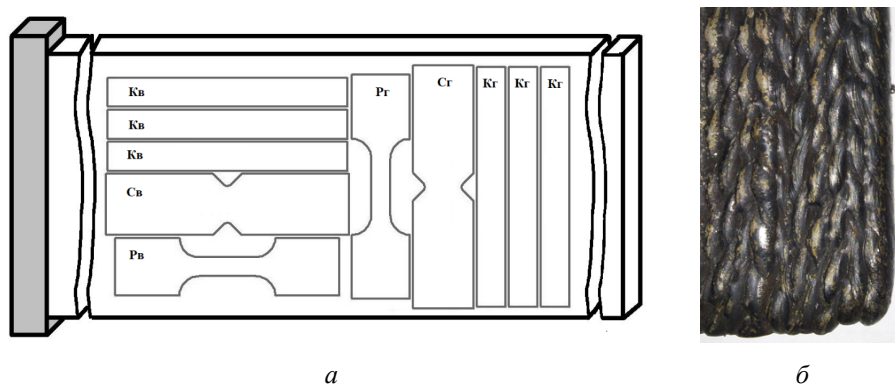


Рис. 1. Схема вырезки образцов из наплавленной пластины (а) и фотография наплавленного фрагмента пластины (б): К, С и Р – образцы для испытаний кручение, сдвиг и растяжение соответственно; индексы «в» и «г» обозначают вертикальную и горизонтальную ориентацию образцов по отношению к направлению выращивания пластины

### Методика испытаний

Экспериментальные исследования вырезанных из пластины образцов на квазистатическое одноосное нагружение при сдвиге и кручении выполнялись на универсальных испытательных системах Instron 5882 и Instron E10000 с максимальными осевыми усилиями 100 кН и 10 кН соответственно. Машина Instron E10000 помимо испытаний на растяжение и сжатие позволяет проводить эксперименты при кручении с максимальным крутящим моментом 100 Нм. Обе испытательные системы имеют аналоговые выходы в контроллерах, при помощи которых можно синхронизировать показания с дополнительными диагностическими системами.

В процессе квазистатического нагружения при кручении и сдвиге проводилась регистрация сдвиговых деформаций на поверхности образца при помощи метода корреляции цифровых изображений. Образцы перед испытаниями специальным образом окрашивались в черно-белое контрастное покрытие для получения полей перемещений и деформаций. Поля сдвиговых деформаций получаются после постобработки серии фотографий, получаемых с помощью цифровых камер, имеющихся в комплекте оптической системы Vic 3D. Использование Vic 3D в процессе нагружения позволило построить диаграммы деформирования при сдвиге и кручении на образцах небольших размеров, не используя при этом навесные датчики деформаций. Использование образцов относительно небольших размеров позволяет существенно экономить на наплавленном материале при их изготовлении и расширяет базу различных видов экспериментов при существенном ограничении габаритов наплавленной пластины с целью определения комплекса механических характеристик.

Испытания на кручение проводили на испытательной системе Instron E10000 с постоянной скоростью поворота нагружающего элемента машины 10 °/мин для определения упругих и пластических свойств нержавеющей стали 316LSi и скоростью поворота 60 °/мин для получения предела прочности и полного разрушения образца. Испытания на кручение проводились для трех образцов типов Kv и Kг.

Испытания на сдвиг проходили на испытательной системе Instron 5882. Скорость перемещения траверсы составляла 2 мм/мин. Образцы для этих испытаний устанавливались в специальную оснастку, конструкция которой позволяет реализовать условие чистого сдвига на образцах Sv и Cr. Фотографии оснастки с установленным в ней образцом и используемой в испытаниях видеосистемы Vic 3D приведены на рис. 2.

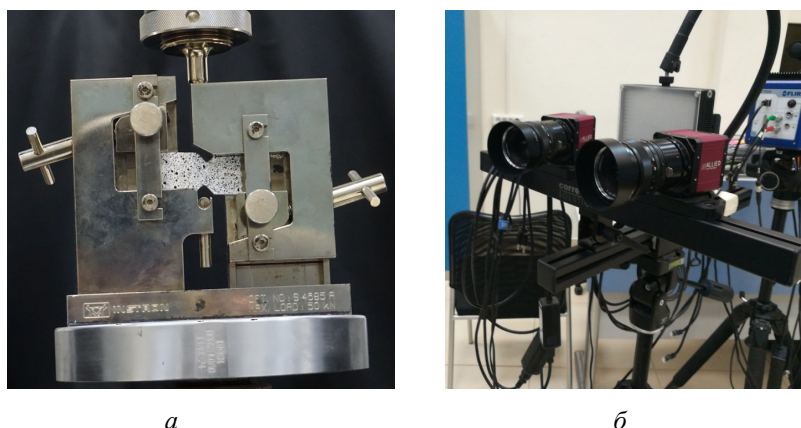


Рис. 2. Внешний вид оснастки для испытаний на сдвиг с покрашенным образцом (а) и фотография цифровых камер оптической системы Vic 3D (б)

### Результаты и обсуждение

**Кручение.** С использованием видеосистемы удалось построить диаграммы деформирования до значения угла сдвига  $\approx 10\%$ , после которого часть окрашенной области рабочей части образца, используемая для получения полей деформаций методом цифровой корреляции, «выпадала» из зоны видимости камер. Из полученных диаграмм деформирования (см. рис. 3, а) при кручении были определены модуль сдвига  $G$ , предел пропорциональности  $\tau_{\text{пл}}$  и условный предел текучести  $\tau_{0,3}$  (см. табл. 1). Предел прочности  $\tau_B$  при кручении определялся при последующем нагружении образца до разрушения без использования Vic 3D.

Полученные результаты испытаний показывают, что наплавленная пластина имеет ярко выраженную анизотропию упругих и пластических свойств. В частности, средние значения модуля сдвига, определенные для вертикальных и горизонтальных образцов, отличаются более чем на 30 % по отношению к модулю сдвига большей величины. Пределы пропорциональности и условные пределы текучести отличаются более чем на 20 %. Пределы прочности при кручении получились примерно равными по величине (см. табл. 1) как для вертикальных, так и горизонтальных образцов.

Наибольший статистический разброс в результатах испытаний наблюдается для значений модуля сдвига у образцов Кв и Кг. По мнению авторов, такая ситуация обусловлена, в том числе, следующими причинами: малым по продолжительности упругим участком и низким пределом пропорциональности (что является характерным для некоторых нержавеющей сталей); качеством нанесения контрастного черно-белого покрытия на поверхность образца (наличие черных пятен большого размера на поверхности рабочей части образцов заметно снижает точность определения перемещений и деформаций при помощи метода корреляции цифровых изображений).

Таблица 1

Механические свойства стали 316LSi при кручении

Номер образца	$G$ , ГПа	$\tau_{\text{пл}}$ , МПа	$\tau_{0,3}$ , МПа	$\tau_B$ , МПа
Вертикальные образцы				
Кв-1	99	215	290	690
Кв-2	114	215	295	670
Кв-3	110	210	300	685
<i>Среднее значение</i>	<i>108</i>	<i>215</i>	<i>295</i>	<i>680</i>
Горизонтальные образцы				
Кг-1	80	180	240	680
Кг-2	81	175	235	670
Кг-3	67	175	230	670
<i>Среднее значение</i>	<i>76</i>	<i>175</i>	<i>235</i>	<i>670</i>

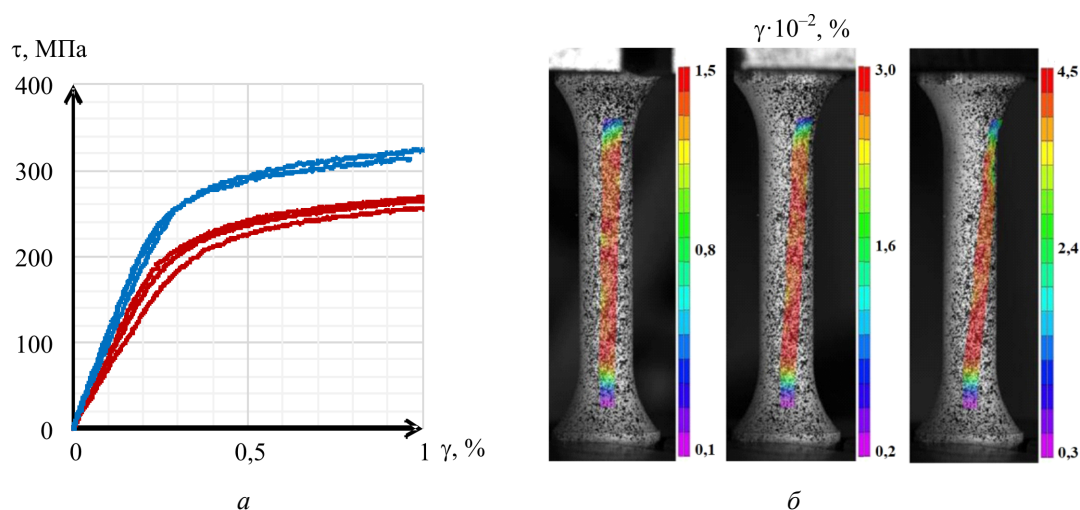


Рис. 3. Диаграммы деформирования Кв (кривые синего цвета) и Кг (кривые красного цвета) образцов из стали 316LSi при кручении (а) и пример эволюции полей деформаций под действием крутящего момента 4,5 Нм, 9 Нм и 10 Нм (б), полученной с помощью метода корреляции цифровых изображений для одного вертикального образца

Полученные значительные отличия в величинах упругих и пластических механических свойств, определенные на образцах с разным направлением вырезки, являются характерными для конструкционных материалов, изготовленных с использованием аддитивных технологий. Так авторами ранее было показано, что сопоставимая анизотропия механических свойств проявляется и в испытаниях на растяжение образцов Рв и Рг [28], и, например, в испытаниях на растяжение и кручение нержавеющей стали 12Х18Н10Т [29], образцы из которой были изготовлены по технологии селективного лазерного сплавления.

**Сдвиг.** Квазистатические испытания на сдвиг рассматриваются как альтернатива экспериментам на кручение. Используемые для испытаний на сдвиг образцы Св и Сг более компактны по сравнению с образцами Кв и Кг за счет размера по толщине. Из одинакового объема наплавленной пластины можно изготовить или 3 образца на сдвиг, или 2 образца на кручение.

Измерение сдвиговых деформаций при нагружении поперечной силой осуществлялось в прямоугольной области, располагающейся между V-образными вырезами на образце. В отличие от испытаний на кручение при данной схеме нагружения удалось построить диаграммы деформирования до значения угла сдвига  $\approx 30\%$ . После чего испытания останавливались без разрушения образца из-за невозможности продолжения испытания на сдвиг в имеющейся оснастке, в которой конструктивно ограничены поперечные перемещения.

На рис. 4 представлены диаграммы деформирования при сдвиге (см. рис. 4, а) и эволюция полей сдвиговых деформаций при двух значениях поперечной силы для вертикального и горизонтального образца (см. рис. 4, б). На основе полученных экспериментальных диаграмм для каждого образца были определены основные механические характеристики, величины которых приведены в табл. 2. В отличие от испытаний на кручение упругие и пластические свойства при поперечном сдвиге не проявляют ярко выраженной анизотропии в зависимости от направления вырезки образцов из наплавленной пластины. Полученные средние значения модуля сдвига по величине близки к модулю сдвига при кручении вертикальных образцов. А значения предела пропорциональности и условного предела текучести ближе по величине к аналогичным характеристикам при кручении горизонтальных образцов.

Таблица 2

## Механические свойства стали 316LSi при сдвиге

Номер образца	$G$ , ГПа	$\tau_{\text{пл}}$ , МПа	$\tau_{0,3}$ , МПа
Вертикальные образцы			
Св-1	87	160	230
Св-2	116	160	210
Св-3	99	150	210
<i>Среднее значение</i>	<i>101</i>	<i>160</i>	<i>220</i>
Горизонтальные образцы			
Сг-1	86	150	210
Сг-2	114	150	200
Сг-3	99	160	220
<i>Среднее значение</i>	<i>100</i>	<i>150</i>	<i>210</i>

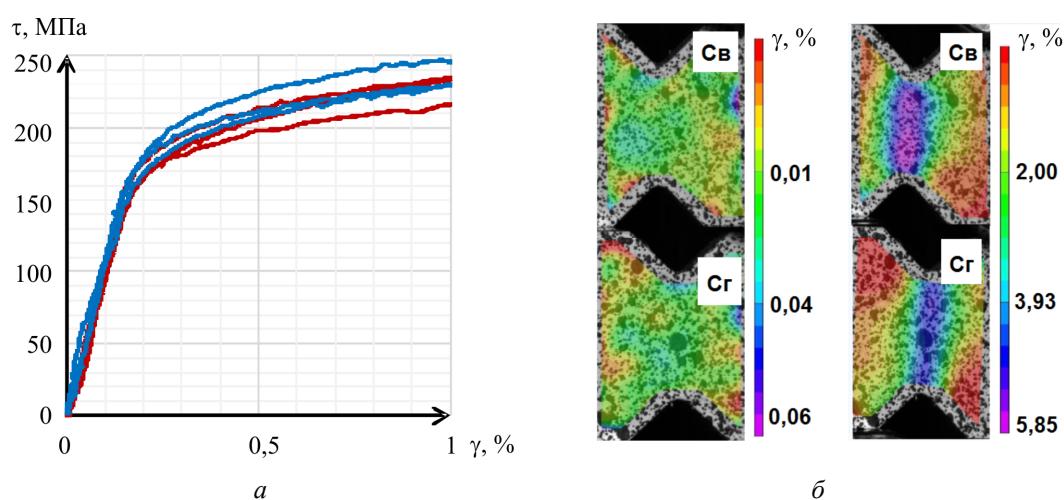


Рис. 4. Диаграммы деформирования Св (кривые синего цвета) и Сг (кривые красного цвета) образцов из стали 316LSi при сдвиге (а) и пример эволюции полей деформаций под действием поперечной силы 2 кН и 12 кН (б), полученной с помощью метода корреляции цифровых изображений для вертикального и горизонтального образца

### Заключение

Проведены сравнительные квазистатические испытания на кручение и сдвиг образцов, вырезанных в двух направлениях из наплавленной пластины нержавеющей стали 316LSi. С использованием цифровой видеосистемы Vic 3D построены поля сдвиговых деформаций на поверхности исследуемых образцов. По результатам экспериментальных исследований построены диаграммы деформирования при сдвиге и кручении, на основе которых определены стандартные механические свойства нержавеющей стали 316 LSi, полученной по аддитивной технологии методом холодного переноса металла.

Показано, что реализация механических свойств аддитивной стали 316LSi зависит от направления вырезки образцов из наплавленной пластины. Установлено, что наибольшая анизотропия упругих и пластических свойств наблюдается в экспериментах на кручение. В представленных испытаниях на поперечный сдвиг анизотропия механических свойств проявляется значительно меньше.

Наибольший статистический разброс результатов испытаний наблюдается у модуля сдвига, определенного в испытаниях на сдвиг и кручение для всех образцов, вырезанных в вертикальном и горизонтальном направлениях по отношению к плоскости наплавленных слоев.



Значения предела пропорциональности, условного предела текучести и предела прочности обнаруживают наименьший статистический разброс.

Полученные результаты испытаний будут востребованы при численном моделировании механического поведения наплавленных элементов конструкций, обладающих значительной анизотропией механических характеристик. Испытания на кручение рекомендуется использовать для подбора оптимальных технологических параметров процесса дуговой наплавки массивных изделий и элементов конструкций сложной геометрии с целью снижения анизотропии механических свойств.

### Библиографический список

1. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. – 2019. – № 7–8. – С. 54–58.
2. Перспективы применения аддитивных технологий для создания деталей и узлов авиационных газотурбинных двигателей и прямоточных воздушно-реактивных двигателей / Л.А. Магеррамова, Ю.А. Ножницкий, С.А. Волков, М.Е. Волков, В.Ж. Чепурнов, С.В. Белов, И.С. Вербанов, С.В. Заикин // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2019. – Т. 18, № 3. – С. 81–98. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-3-81-98
3. Обзор проблем создания сверхзвукового пассажирского самолёта нового поколения в части силовой установки / А.Д. Алendarь, А.И. Ланшин, А.А. Евстигнеев, К.Я. Якубовский, М.В. Силуянова // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2023. – Т. 22, № 1. – С. 7–28. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-1-7-28
4. Dirk Herzog, Additive manufacturing of metals / Vanessa Seyda, Eric Wycisk, Claus Emmelmann // Acta Materialia 117 (2016) 371–392.
5. Luca Facchini, Ductility of a Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting of prealloyed powders / Emanuele Magalini, Pierfrancesco Robotti, Alberto Molinari, Simon Hoges, Konrad Wissenbach // Rapid Prototyping Journal 16/6 (2010) 450–459.
6. John J. Lewandowski, Mohsen Seifi, Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties // Annu. Rev. Mater. Res. 2016. 46: 14.1–14.36
7. Tarik Hasib, M Fatigue crack growth behavior of laser powder bed fusion additive manufactured Ti-6Al-4V: Roles of post heat treatment and build orientation / Ostergaard, H.E., Li, X., & Kruzic, J.J. // International Journal of Fatigue, 142 (2021) DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105955
8. Haijun Gong, Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4 V components produced by selective laser melting and electron beam melting / Khalid Rafi, Hengfeng Guc, G.D. Janaki Ramd, Thomas Starr, Brent Stucker // Materials and Design 86 (2015) 545–554.
9. Mahmoud D. The influence of selective laser melting defects on the fatigue properties of Ti6Al4V porosity graded gyroids for bone implants / Al-Rubaie, K.S., & Elbestawi, M.A. // International Journal of Mechanical Sciences, 193 (2021) DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106180
10. Xie C. Defect-correlated fatigue resistance of additively manufactured al-Mg4.5Mn alloy with in situ micro-rolling. / Wu S., Yu Y., Zhang H., Hu Y., Zhang M., & Wang G. // Journal of Materials Processing Technology, 291 (2021) DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.117039
11. Anisotropy of Mechanical Properties and Residual Stress in Additively Manufactured 316L Specimens / A. Fedorenko, B. Fedulov, Y. Kuzminova, S. Evlashin, O. Staroverov, M. Tretyakov, E. Lomakin, I. Akhatov // Materials 2021, 14, 7176. <https://doi.org/10.3390/ma14237176>
12. Bao H. A machine-learning fatigue life prediction approach of additively manufactured metals / Wu S., Wu Z., Kang G., Peng X., & Withers P.J. // Engineering Fracture Mechanics, 242 (2021) DOI: 10.1016/j.engfracmech.2020.107508
13. Zhan Z., & Li H. Machine learning based fatigue life prediction with effects of additive manufacturing process parameters for printed SS 316L / International Journal of Fatigue, 142 (2021) DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105941
14. Экспериментальное исследование закономерностей усталостного разрушения толстых стержней из слоистого углепластика / А.А. Балакирев, И.Л. Гладкий, Г.В. Мехоношин, А.Д. Куракин, М.Ш. Нихамкин, Н.А. Саженов, С.В. Семенов, Д.Г. Соломонов // Вестник Пермского национального

исследовательского политехнического университета. *Аэрокосмическая техника*. – 2023. – № 72. – С. 111–124. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.72.09

15. Нихамкин М.Ш., Соломонов Д.Г., Зильбершмидт В.В. Идентификация характеристик упругости композита по экспериментальным данным о модальных характеристиках образцов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2019. – № 1. – С. 108–120.

16. Nikhamkin M.Sh., Solomonov D.G. Change of the elastic characteristics of a fiber-reinforced laminate as a result of progressive fatigue damage // *Solid State Phenomena*. – 2021. – Vol. 316. – P. 955–960.

17. The study of a fatigue crack propagation in titanium grade 2 using analysis of energy dissipation and acoustic emission data / A.N. Vshivkov, A.Y. Iziumova, I.A. Panteleev, O.A. Plekhov, A.V. Ilinykh, V.E. Wildemann // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2019. – Т. 210. – С. 312–319.

18. Струнгарь Е.М., Староверов О.А., Лунегова Е.М. Комплексная оценка процессов усталостного накопления повреждений и разрушения образцов с концентраторами напряжений эксплуатационного характера // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. – 2022. – № 4. – С. 37–49.

19. Staroverov O.A., Strungar E.M., Wildemann V.E. Evaluation of the survivability of CFRP honeycomb-cored panels in compression after impact tests // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 56 (2021). P. 1–15.

20. Experimental study of shear properties of 3d woven composite using digital image correlation and acoustic emission / E.M. Strungar, A.S. Yankin, E.M. Zubova, A.V. Babushkin, A.N. Dushko // *Acta Mechanica Sinica*. – 2020. – Ass. 36. – Vol 2. – P. 448–459.

21. Deformation and failure of carbon fiber composite specimens with embedded defects during tension-torsion test / V.E. Wildemann, T.V. Tretyakova, E.M. Strungar, M.P. Tretyakov // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2018. – Ass. 12. – Vol 46. – P. 295–305.

22. Strungar E., Lobanov D., Wildemann V. Evaluation of the Sensitivity of Various Reinforcement Patterns for Structural Carbon Fibers to Open Holes during Tensile Tests. *Polymers* 2021, 13, 4287. <https://doi.org/10.3390/polym13244287>

23. Ice vs. steel: Ballistic impact of woven carbon/epoxy composites. Part I – Deformation and damage behavior / L.A. Coles, A. Roy, N. Sazhenkov [et al.] // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2020. – Vol. 222. – 18 p.

24. Microstructure and Properties of the 308LSi Austenitic Steel Produced by Plasma-MIG Deposition Welding with Layer-by-Layer Peening / T. Olshanskaya, D. Trushnikov, A. Dushina, A. Ganeev, A. Polyakov, I. Semenova // *Metals*. – 2022 – Vol. 12, Iss. 1, January. – Art. 82. – 14 p. – URL: [www.mdpi.com/2075-4701/12/1/82/htm](http://www.mdpi.com/2075-4701/12/1/82/htm). - DOI 10.3390/met12010082.

25. Structure and Mechanical Properties of AlMg Alloy Workpieces in Multilayer Surfacing with Interlayer Deformation / G.L. Permyakov, D.N. Trushnikov, T.V. Olshanskaya, Y.D. Shchitsyn, M.F. Kartashev, T. Hassel // *Russian Engineering Research*. – 2022 – Vol. 42, № 10. – P. 1061–1064.

26. Formation of Structure and Properties of Two-Phase Ti-6Al-4V Alloy during Cold Metal Transfer Additive Deposition with Interpass Forging / Y. Shchitsyn, M. Kartashev, E. Krivososova, T. Olshanskaya, D. Trushnikov // *Materials*. – 2021 – Vol. 14, Iss. 16, August (II). – Art. 4415. – 18 p. – URL: [www.mdpi.com/1996-1944/14/16/4415](http://www.mdpi.com/1996-1944/14/16/4415). - DOI 10.3390/ma14164415.

27. Characteristics of Structure and Properties of Magnesium Alloys during Plasma Additive Deposition / Y.D. Shchitsyn, E.A. Krivososova, S.D. Neulybin, R.G. Nikulin, T. Hassel, D.N. Trushnikov // *Physical Mesomechanics*. – 2021 – Vol. 24, № 6. – P. 716–723.

28. А.В. Ильиных, А.М. Паньков, Е.В. Феклистова, Е.М. Струнгарь, Г.Л. Пермяков Анализ вопросов реализации упругих свойств наплавленной нержавеющей стали 316LSi / Тезисы докладов. XXIII Зимняя школа по механике сплошных сред 13–17 февраля 2023 г., Пермь. – 2023. – С. 145

29. Ильиных А.В. Механические свойства стали 12X18H10T, полученной методом селективного лазерного сплавления // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. – 2018. – № 55. – С. 103–109. DOI: 10.15593/2224-9982/2018.55.11

## References

1. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14 [VIAM: materialy novogo pokoleniya dlya PD-14]. *Krylya Rodiny*, 2019, No. 7–8, pp. 54–58.

2. Magerramova L.A., Nozhnitsky Yu.A., Volkov S.A., Volkov M.E., Chepurnov V.Zh., Belov S.V., Verbano I.S., Zaikin S.V. Prospects of application of additive technologies to develop parts and components of



gas turbine engines and ramjets. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. V. 18, no. 3. P. 81-98. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-3-81-98

3. Alendar A.D., Lanshin A.I., Evstigneev A.A., Yakubovsky K.Ya., Siluyanova M.V. The problems of creating a propulsion system of a new generation supersonic passenger aircraft (review). *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2023. V. 22, no. 1. P. 7-28. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-1-7-2

4. Dirk Herzog, Additive manufacturing of metals / Vanessa Seyda, Eric Wycisk, Claus Emmelmann // *Acta Materialia* 117 (2016) 371-392

5. Luca Facchini, Ductility of a Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting of prealloyed powders/ Emanuele Magalini, Pierfrancesco Robotti, Alberto Molinari, Simon Hoges, Konrad Wissenbach // *Rapid Prototyping Journal* 16/6 (2010) 450-459

6. John J. Lewandowski, Mohsen Seifi, Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties // *Annu. Rev. Mater. Res.* 2016. 46: 14.1-14.36

7. Tarik Hasib, M Fatigue crack growth behavior of laser powder bed fusion additive manufactured Ti-6Al-4V: Roles of post heat treatment and build orientation. / Ostergaard, H.E., Li, X., & Kruzic, J.J. // *International Journal of Fatigue*, 142 (2021) doi: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105955

8. Haijun Gong, Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4 V components produced by selective laser melting and electron beam melting/ Khalid Rafi, Hengfeng Guc, G.D. Janaki Ramd, Thomas Starr, Brent Stucker // *Materials and Design* 86 (2015) 545-554

9. Mahmoud, D. The influence of selective laser melting defects on the fatigue properties of Ti6Al4V porosity graded gyroids for bone implants. / Al-Rubaie, K.S., & Elbestawi, M.A. // *International Journal of Mechanical Sciences*, 193 (2021) doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106180

10. Xie, C. Defect-correlated fatigue resistance of additively manufactured al-Mg4.5Mn alloy with in situ micro-rolling. / Wu, S., Yu, Y., Zhang, H., Hu, Y., Zhang, M., & Wang, G. // *Journal of Materials Processing Technology*, 291 (2021) doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.117039

11. Fedorenko, A.; Fedulov, B.; Kuzminova, Y.; Evlashin, S.; Staroverov, O.; Tretyakov, M.; Lomakin, E.; Akhatov, I. Anisotropy of Mechanical Properties and Residual Stress in Additively Manufactured 316L Specimens. *Materials* 2021, 14, 7176. <https://doi.org/10.3390/ma14237176>

12. Bao, H. A machine-learning fatigue life prediction approach of additively manufactured metals. / Wu, S., Wu, Z., Kang, G., Peng, X., & Withers, P.J. // *Engineering Fracture Mechanics*, 242 (2021) doi: 10.1016/j.engfracmech.2020.107508

13. Zhan, Z., & Li, H. Machine learning based fatigue life prediction with effects of additive manufacturing process parameters for printed SS 316L. / *International Journal of Fatigue*, 142 (2021) doi: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105941

14. Balakirev A.A., Gladkiy I.L., Mekhonoshin G.V., Kurakin A.D., Nikhamkin M.Sh., Sazhenkov N.A., Semenov S.V., Solomonov D.G. Experimental study of the patterns of fatigue failure of thick rods made of laminated carbon fiber. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2023, no. 72, pp. 111-124. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.72.09

15. Nikhamkin M.Sh., Solomonov D.G., Silberschmidt V.V. Identification of elastic parameters of composite using experimental data on modal characteristics of samples. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 1, pp. 108-120.

16. Nikhamkin M.Sh., Solomonov D.G. Change of the elastic characteristics of a fiber-reinforced laminate as a result of progressive fatigue damage // *Solid State Phenomena*. – 2021. – Vol. 316. – P. 955-960

17. Vshivkov A.N., Iziyeva A.Y., Pantelev I.A., Plekhov O.A., Ilinykh A.V., Wildemann V.E. The study of a fatigue crack propagation in titanium grade 2 using analysis of energy dissipation and acoustic emission data // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2019. – T. 210. – C. 312-319.

18. Strungar E.M., Staroverov O.A., Lynegova E.M. Comprehensive evaluation of fatigue damage accumulation and failure of specimens with operational stress concentrators // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. – 2022. – Vol. 4. – P. 37-49.

19. Staroverov O.A., Strungar E.M., Wildemann V.E. Evaluation of the survivability of CFRP honeycomb-cored panels in compression after impact tests // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 56 (2021). P. 1-15.

20. Strungar E.M., Yankin A.S., Zubova E.M., Babushkin A.V., Dushko A.N. Experimental study of shear properties of 3d woven composite using digital image correlation and acoustic emission // *Acta Mechanica Sinica*. 2020. Ass. 36. Vol 2. P. 448-459.

21. Wildemann V.E., Tretyakova T.V., Strungar E.M., Tretyakov M.P. Deformation and failure of carbon fiber composite specimens with embedded defects during tension-torsion test // *Frattura ed Integrita Strutturale*. 2018. Ass. 12. Vol 46. P. 295-305.

22. Strungar, E.; Lobanov, D.; Wildemann, V. Evaluation of the Sensitivity of Various Reinforcement Patterns for Structural Carbon Fibers to Open Holes during Tensile Tests. *Polymers* 2021, 13, 4287. <https://doi.org/10.3390/polym13244287>

23. Ice vs. steel: Ballistic impact of woven carbon/epoxy composites. Part I – Deformation and damage behavior / L.A. Coles, A. Roy, N. Sazhenkov [et al.] // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2020. – Vol. 222. – 18 p.

24. Microstructure and Properties of the 308LSi Austenitic Steel Produced by Plasma-MIG Deposition Welding with Layer-by-Layer Peening / T. Olshanskaya, D. Trushnikov, A. Dushina, A. Ganeev, A. Polyakov, I. Semenova // *Metals*. - 2022 - Vol. 12, Iss. 1, January. - Art. 82 - 14 p. - URL: [www.mdpi.com/2075-4701/12/1/82/htm](http://www.mdpi.com/2075-4701/12/1/82/htm). - DOI 10.3390/met12010082.

25. Structure and Mechanical Properties of AlMg Alloy Workpieces in Multilayer Surfacing with Interlayer Deformation / G.L. Permyakov, D.N. Trushnikov, T.V. Olshanskaya, Y.D. Shchitsyn, M.F. Kartashev, T. Hassel // *Russian Engineering Research*. - 2022 - Vol. 42, № 10 - P. 1061-1064.

26. Formation of Structure and Properties of Two-Phase Ti-6Al-4V Alloy during Cold Metal Transfer Additive Deposition with Interpass Forging / Y. Shchitsyn, M. Kartashev, E. Krivosova, T. Olshanskaya, D. Trushnikov // *Materials*. - 2021 - Vol. 14, Iss. 16, August (II). - Art. 4415 - 18 p. - URL: [www.mdpi.com/1996-1944/14/16/4415](http://www.mdpi.com/1996-1944/14/16/4415). - DOI 10.3390/ma14164415.

27. Characteristics of Structure and Properties of Magnesium Alloys during Plasma Additive Deposition / Y.D. Shchitsyn, E.A. Krivosova, S.D. Neulybin, R.G. Nikulin, T. Hassel, D.N. Trushnikov // *Physical Mesomechanics*. - 2021 - Vol. 24, № 6 - P. 716-723.

28. Ilinykh A.V., Pankov A.M., Feclistova E.V., Strungar E.M., Permyakov G.L. Analysis of the implementation of elastic properties of deposited stainless steel 316LSi / *Book of Abstracts. XXIII Winter School on Continuum Mechanics February 13-17, 2023, Perm*. – 2023. – P. 145

29. Ilinykh A.V. Mechanical tensile properties of X12CrNiTi-18-10 steel, obtained by the method of selective laser melting // *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. – 2018. – Vol. 55. – P. 103-109. DOI: 10.15593/2224-9982/2018.55.11

#### Об авторах

**Ильиних Артем Валерьевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Центра экспериментальной механики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, доцент кафедры «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: [ilinih@yandex.ru](mailto:ilinih@yandex.ru)).

**Паньков Александр Михайлович** (Пермь, Россия) – младший научный сотрудник Центра экспериментальной механики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: [cem.pankov@gmail.com](mailto:cem.pankov@gmail.com)).

**Струнгарь Елена Михайловна** (Пермь, Россия) – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Центра экспериментальной механики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, доцент кафедры «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: [cem.spaskova@mail.ru](mailto:cem.spaskova@mail.ru)).

**Пермяков Глеб Львович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории методов создания и проектирования систем «материал – технология – конструкция», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: [gleb.permyakov@yandex.ru](mailto:gleb.permyakov@yandex.ru)).

#### About the authors

**Artem V. Ilinykh** (Perm, Russian Federation) – PhD in Technical Sciences, Senior Researcher, Center for Experimental Mechanics, Associate Professor, Department of Experimental Mechanics and Structural Materials Science, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: [ilinih@yandex.ru](mailto:ilinih@yandex.ru)).

**Alexandr M. Pankov** (Perm, Russian Federation) – Junior Researcher, Center for Experimental Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: [cem.pankov@gmail.com](mailto:cem.pankov@gmail.com)).

**Elena M. Strungar** (Perm, Russian Federation) – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Center for Experimental Mechanics, Associate Professor, Department of Experimental Mechanics and Structural Materials Science, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: cem.spaskova@mail.ru).

**Gleb L. Permyakov** (Perm, Russian Federation) – PhD in Technical Sciences, Researcher, Laboratory of Methods for Creating and Designing Material – Technology – Construction Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: gleb.permyakov@yandex.ru).

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке РЦНИ и Пермского края (проект № 20-48-596007-р\_НОЦ\_Пермский край).

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Поступила: 30.09.2023

Одобрена: 03.10.2023

Принята к публикации: 12.10.2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Экспериментальное исследование механических свойств при сдвиге и кручении нержавеющей стали 316LSi, полученной методом дуговой наплавки / А.В. Ильиных, А.М. Паньков, Е.М. Струнгарь, Г.Л. Пермяков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2023. – № 74. – С. 96–106. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.74.09

Please cite this article in English as: Ilinykh A.V., Pankov A.M., Strungar E.M., Permyakov G.L. Experimental study of the mechanical properties during shear and torsion of 316LSI stainless steel produced by arc surfacing method. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2023, no. 74, pp. 96-106. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.74.09