

Научная статья

УДК 620.17

DOI 10.46845/1997-3071-2022-65-107-117

**Исследование физико-механических свойств образцов,
полученных по технологии SLM. Часть 1. Предел прочности**

**Павел Геннадьевич Зобов¹, Александр Владимирович Дектярев²,
Кирилл Валерьевич Казаченко³, Владимир Николаевич Морозов⁴**

¹Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова,
Северодвинск, Россия

^{2,3,4}Калининградский государственный технический университет, Калининград,
Россия

²nwasanches@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3756-7233>

Аннотация. Аддитивные технологии в настоящее время активно внедряются на предприятиях судостроительной отрасли. После успешной апробации технологий моделирования методом наплавления (fused deposition modeling, FDM), стереолитографии (stereolithography, SLA), многоструйного моделирования (multi jet modeling, MJM) в части прототипирования и производства полимерных изделий общий вектор развития стремится к освоению технологий металлической печати заготовок и готовых деталей. Работы в этом направлении ведутся на ряде предприятий, и наибольшей популярностью в данном аспекте пользуются технологии селективного лазерного плавления (selective laser melting, SLM), дуговой сварки для сплавления металлической проволоки (wire arc additive manufacturing, WAAM) и высокоскоростного прямого лазерного выращивания (high-speed direct laser deposition, HSDL). На текущий момент интерес ряда судостроительных компаний вызывает возможность производства заготовок деталей по чертежам отливок с применением технологии SLM. Однако стоит отметить, что в литературных источниках приводятся противоречивые данные о свойствах получаемых образцов, в частности в вопросах наличия анизотропии прочностных характеристик и соответствия геометрических отклонений имеющимся стандартам. Интересно в этом плане производство изделий сложной геометрии из нержавеющей стали, что может быть использовано при изготовлении рычагов, вилок, корпусов спецоборудования, а также суперкавитирующих винтов и элементов консолей подводных крыльев для маломерных судов. В данной работе описываются физико-механические характеристики и геометрические отклонения образцов, полученных по технологии SLM на установке Laser Cusing M2 из нержавеющей стали 316L. Даются конкретные представления об анизотропии прочностных свойств и соответствии геометрии образцов требованиям к выпускаемой продукции. Представленные материалы могут служить отправной точкой для проведения прочностных расчетов изделий с учетом специфики аддитивных технологий и, в частности, SLM-процесса.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, судостроение, 316L, SLM, селективное лазерное плавление, прочность, физико-механические характеристики

Для цитирования: Зобов П. Г., Дектярев А. В., Казаченко К. В., Морозов В. Н. Исследование физико-механических свойств образцов, полученных по технологии SLM. Часть 1. Предел прочности // Известия КГТУ. 2022. № 65. С. 107–117.

Original article

Study of physical and mechanical properties of samples obtained by SLM technology. Part 1. Strength limit

Pavel G. Zobov¹, Aleksandr V. Dektyarev², Kirill V. Kazachenko³, Vladimir N. Morozov⁴

¹Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, Severodvinsk, Russia

^{2,3,4}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

²nwasanches@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3756-7233>

Abstract. Additive technologies are currently being actively implemented at the enterprises of the shipbuilding industry. After the successful testing of fused deposition modeling (FDM), stereolithography (SLA) and multi jet modeling (MJM) technologies in terms of prototyping and production of polymer products, the general vector of development seeks to master the technologies of metal printing of blanks and finished parts. Work in this direction is being carried out at a number of enterprises and the most popular technologies in this aspect are selective laser melting (SLM), wire arc additive manufacturing (WAAM) and high-speed direct laser deposition (HSDLD). At the moment, the interest of a number of shipbuilding companies is the possibility of producing blanks for parts according to castings drawings using the SLM technology. However, it should be noted that in the literature there are conflicting data on the properties of the samples obtained, in particular, regarding the presence of anisotropy of strength characteristics and the compliance of geometric deviations with existing standards. It is interesting in this regard to manufacture products of complex geometry from stainless steels, which can be used in the manufacture of levers, forks, housings of special equipment, as well as supercavitating screws and elements of hydrofoil consoles for small vessels. This paper describes the physicomachanical characteristics and geometric deviations of samples obtained by the SLM technology on a Laser Cusing M2 setup made of 316L stainless steel. Specific ideas are given about the anisotropy of strength properties and the compliance of the geometry of the samples with the requirements for the manufactured products. The presented materials can serve as a starting point for carrying out strength calculations of products, taking into account some specifics of additive technologies and, in particular, the SLM process.

Keywords: additive technologies, 3D printing, shipbuilding, 316L, SLM, selective laser melting, strength, physical and mechanical characteristics

For citation: Zobov P. G. Study of physical and mechanical properties of samples obtained by SLM technology. Part 1. Strength limit. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2022; (65):107–117. (In Russ).

ВВЕДЕНИЕ

Нержавеющие стали служат основой современного судостроения. Подавляющее большинство корпусных конструкций и изделий машиностроительной части выполняются из подобных материалов. Внедрение аддитивных технологий в отечественной отрасли судостроения планомерно переходит от первых экспериментов по прототипированию к широкомасштабной интеграции 3D-печати в технологическом процессе предприятий. Важной ступенью на текущем этапе является освоение технологий получения металлических заготовок, одна из которых – SLM.

Продукция, изготовленная по технологии SLM, может иметь достаточно сложную геометрическую форму. Это явление обеспечивает высокий потенциал применения селективного лазерного сплавления в судостроительной отрасли. Однако, согласно исследованиям, SLM может привести как к анизотропии [1–3], так и к изотропии [2, 4, 5] свойств напечатанных объектов. Имеются сведения о зависимости анизотропии и уровней механических свойств от микроструктурных особенностей материала [6, 7].

В представленной работе рассматриваются образцы из нержавеющей стали AISI 316L. Цель проводимых испытаний – определение влияния геометрического расположения слоев внутри объекта на анизотропию его прочностных характеристик и искажений геометрии в процессе синтеза, оценка анизотропии свойств на возможность производства изделий по технологии SLM в соответствии с имеющимися стандартами.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Перед работой ставится задача исследовать 3D-печатные образцы из нержавеющей стали AISI 316L, выращенные по технологии SLM, на растяжение согласно ГОСТ 1497-84.

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Использование металлических порошков в аддитивном производстве имеет некоторые особенности по сравнению с их применением в качестве сырья в традиционной порошковой металлургии. В классических методах производства порошку необходимо придать форму изделия, а затем подвергнуть заготовку жидко- или твердофазному спеканию. Благодаря этому велика вероятность получения анизотропии свойств продукта, поскольку при сжатии порошка одна из составляющих тензора деформации будет больше других.

При аддитивном производстве, в частности по технологии SLM, направление теплового воздействия уже задано в кинематике процесса, и это влияет на свойства готовой детали. На рис. 1 наглядно показано, что горизонтальные линии демонстрируют распределение слоев порошка, а стрелки указывают направление

смещения лазерного луча. При однонаправленном движении луча (рис. 1, слева) вдоль оси X на порошок реализуется намеренно однонаправленное тепловое воздействие, в результате чего возникает анизотропная структура. Этот эффект осложняется возвращением луча по соседней траектории с изменением направления на 180° . Указанный метод получил название зигзагообразной штриховки [3]. Чтобы избежать анизотропии на оси X, обычно используется разнонаправленное движение луча в плоскости XY из-за изменения направления штриховки от слоя к слою (рис. 1, справа). Угол между направлениями штриховки соседних слоев может быть разным, но обычно составляет 90° [2].

Как видно из рис. 1, уравновесить тепловой эффект можно только в плоскости XY. На оси Z порошок наслаивается, и каждый слой плавится только после образования предыдущего. Это создает условия для развития неоднородной структуры металла, что приводит к анизотропии готовой детали [2]. Направленные микроstructures в разных плоскостях также вызывают анизотропные свойства материала, такие как пластичность, ударная вязкость, усталостная прочность, электропроводность и пр.

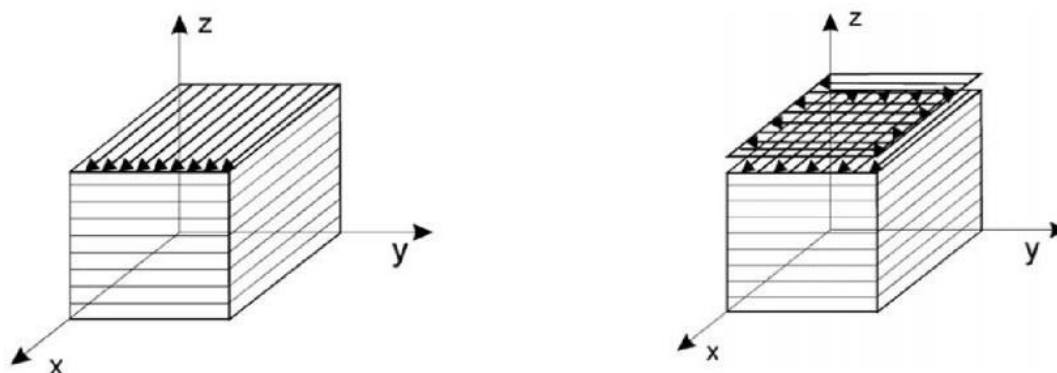


Рис. 1. Схема движения луча при технологии SLM: слева – однонаправленное по оси X; справа – изменение направлений по оси X и оси Y от слоя к слою [2]
Fig. 1. Beam pattern with SLM technology: on the left – unidirectional along the X axis; on the right – changing directions along the X-axis and Y-axis from layer to layer [2]

Также стоит отметить, что продукция, производимая по технологии SLM, имеет, как правило, уникальную структуру столбчатого зерна [8], которая необычна для изделий, изготовленных традиционными методами литья иликовки. Готовые детали обладают мартенситной структурой [9]. После термообработки микроstructure изменяется и состоит из более толстых пластинчатых зерен [10], что делает ее похожей на микроstructure материала в традиционных процессах обработки [11].

В исследованиях [6, 7] отмечается, что анизотропия и уровни механических свойств изделий могут быть различными. Это зависит от микроstructureных особенностей, в частности от текстуры, которая связана с распределением характера границ зерен.

Согласно описанным данным, был составлен план эксперимента, который заключается в печати 8 образцов для испытаний на растяжение по ГОСТ 1497-84.

Исходя из полей печати имеющейся установки и доступных материалов, в качестве исследуемых выбраны образцы типа III по ГОСТ 1497-84 из стали 316L (аналог 03X16H15M3), которые были разбиты на 2 группы по 4 единицы. Первая группа печаталась с вертикальным расположением слоев, вторая – с горизонтальным. Синтез производился на установке Concept Laser M2 по технологии SLM/LaserCusing. Внешний вид образцов после испытаний представлен на рис. 2.



Рис. 2. Горизонтальный и вертикальный образец после испытаний
Fig. 2. Horizontal and vertical specimen after testing

После завершения синтеза и проведения всех необходимых технологических операций образцы были измерены поверенным штангенциркулем Absolute Digimatic серии 500 №14039601 и микрометром цифровым серии 293 №35199639 для выявления геометрических отклонений образцов в процессе печати. Схема расположения образцов представлена на рис. 3. Таким образом, результаты испытаний двух групп образцов позволяют судить о разнице прочностных свойств и геометрических отклонений при восприятии нагрузок в плоскости XY (параллельно к опорной поверхности синтеза) и ZY (по нормали к опорной поверхности синтеза).

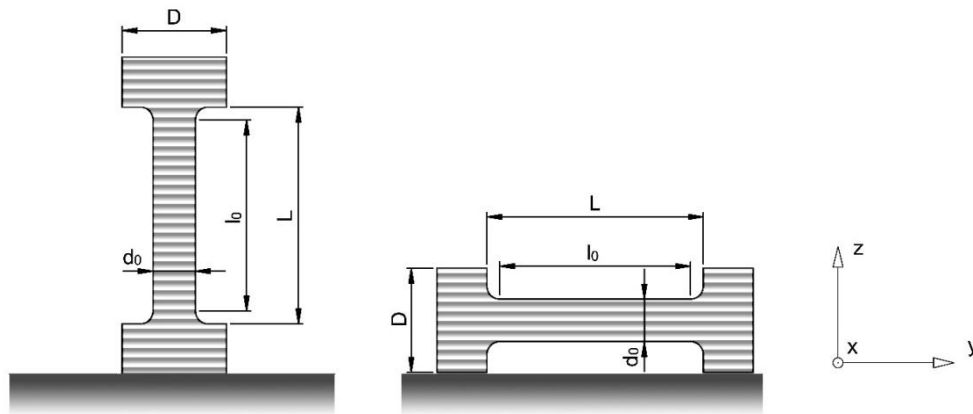


Рис. 3. Схема расположения образцов при синтезе
Fig. 3. Arrangement of samples during synthesis

ОБСУЖДЕНИЕ

Данные по измерениям геометрии образцов представлены в табл. 1. Для каждого показателя проведена серия из 5 измерений, в таблице указано среднее значение.

Таблица 1. Данные по измерениям геометрии образцов
Table 1. Sample geometry measurements

Обозначение образца		l_0 , мм	l , мм	d_0 , мм	D , мм
Вертикальные	1	99,900	103,700	10,000	15,975
	2	100,100	103,750	10,005	16,055
	3	99,900	103,850	10,020	16,040
	4	99,650	103,900	10,000	16,015
Горизонтальные	1	99,900	103,700	9,850	15,990
	2	100,100	103,850	9,760	16,000
	3	99,900	103,800	9,665	15,790
	4	99,650	103,450	9,620	15,760
Номинал		100,000	104,000	10,000	16,000

Средние отклонения для каждой группы образцов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Средние отклонения для каждой группы образцов
Table 2. Average deviations for each group of samples

Обозначение образца	dl_0 , мм	dl , мм	dd_0 , мм	dD , мм
Вертикальные	- 0,112	- 0,200	0,006	0,021
Горизонтальные	- 0,112	- 0,300	- 0,276	- 0,115

Ранее проведенные исследования размеров образцов схожей геометрии, произведенных по технологии FDM [12], показали, что для адекватной оценки влияния процесса синтеза на геометрию детали необходимо тщательное устранение из анализа погрешностей, вносимых постобработкой. В случае технологии

SLM такой отбор имеет важное значение ввиду отсутствия возможности выполнения растворимых поддержек и необходимости физического отделения дополнительных структур и самой детали от подложки при помощи режущего инструмента. Беря во внимание данный факт, распределим отклонения в зависимости от плоскостей XY и ZY; отклонения, обусловленные технологией постобработки, отметим литерой «т», их не будем учитывать при расчете среднеквадратичного отклонения в выбранной плоскости. Данные распределения представлены в табл. 3, среднеквадратичное отклонение по плоскости приведено в табл. 4.

Таблица 3. Данные распределения

Table 3. Distribution data

Группа образцов	Плоскости построения			
	XY		ZY	
	Переменная	Значение, мм	Переменная	Значение, мм
Горизонтальные	dl0	- 0,112	dD (т)	- 0,115
	dl	- 0,300	dd0 (т)	- 0,276
Вертикальные	dd0	0,006	dl0	- 0,112
	dD	0,021	dl	-0,200

Таблица 4. Данные по среднеквадратичному отклонению

Table 4. Standard deviation data

Плоскость	Среднеквадратичное отклонение	ZY/ZX
ZY	0,110	1,418
ZX	0,156	

Числовые значения показателей испытаний образцов на растяжение отображены в табл. 5.

Таблица 5. Данные испытаний на растяжение

Table 5. Tensile test data

Группа	№	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное сужение, %
Вертикальные	1	635	526	42
	2	632	524	42
	3	635	516	44
	4	634	527	38
Горизонтальные	1	758	624	20
	2	777	645	33
	3	828	684	55
	4	821	715	53

Усредненные значения показателей внесены в табл. 6.

Таблица 6. Усредненные значения прочностных характеристик
Table 6. Average values of strength characteristics

Группа	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное сужение, %
Вертикальные	634	523	42
Горизонтальные	796	667	40

Исходя из приведенных данных (запятая) можно сделать заключение о наличии анизотропии. Отношение прочностных свойств XY/ZY показано в табл. 7.

Таблица 7. Отношение прочностных свойств
Table 7. Strength ratio

XY/ZY, временное сопротивление	XY/ZY, предел текучести
1,26	1,27

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основываясь на имеющихся теоретических данных о причинах появления анизотропии в изделиях, произведенных по технологии SLM, следует вывод: линейные отклонения размеров в плоскости построения указывают на наличие дефектов микроструктуры металла, что в свою очередь обуславливает различие прочностных свойств в разных плоскостях. Данные эксперимента явно указывают на наличие зависимости прочностных свойств от размера отклонений. Исходя из этого предположения получим формулу (1):

$$\frac{\sigma_{T/BXY}}{\sigma_{T/BZY}} = \tau \frac{sdzy}{sdx} . \quad (1)$$

Для приведенной выборки значение коэффициента равняется 0,896. Данная переменная, по всей видимости, зависит от типа материала и его изначальных физических свойств. Практическая значимость зависимости заключается в возможности определения коэффициента анизотропии прочностных свойств расчетным методом до процесса синтеза, так как программное обеспечение для расчета геометрических отклонений в процессе синтеза по технологии SLM в настоящий момент разработано и успешно применяется.

Обращаясь к требованиям стандарта ASTM A240, отметим, что заявленный минимальный предел временного сопротивления для проката из стали 316L составляет 485 МПа. В представленном эксперименте минимальное полученное значение – 632 МПа, что говорит о соответствии изделий, произведенных по технологии SLM, требованиям стандарта ASTM A240. В случае использования рекомендованного предела текучести (170 МПа) и предела временного сопротивления (485 МПа) учет анизотропии прочностных свойств не требуется.

Приведенные данные геометрических измерений также позволяют сделать вывод о соответствии изделий, полученных по технологии SLM, требованиям к отливкам III класса точности по ГОСТ 26645-85.

Итоговая совокупность геометрических и прочностных показателей образцов говорит о возможности применения SLM-технологии для замены литья при производстве изделий из коррозионностойких сталей с сохранением стандартных значений пределов временного сопротивления и предела текучести без учета их анизотропии.

Список источников

1. Anisotropic response of Ti-6Al-4V alloy fabricated by 3D printing selective laser melting / L. Y. Chen et al. // *Materials Science and Engineering*. 2017. V. 682. P. 389–395.
2. Anisotropy of additively manufactured Ti-6-4 lattice structure / Y. N. Loginov et al. // *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC. 2019. V. 2176. N 1. P. 020002-1 – 020002-4.
3. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V / L. Thijs et al. // *Acta materialia*. 2010. V. 58. N 9. P. 3303–3312.
4. Fatigue characterization of Titanium Ti-6Al-4V samples produced by Additive Manufacturing / A. Chastand et al. // *Procedia Structural Integrity*. 2016. V. 2. P. 3168–3176.
5. Zhai Y., Galarraga H., Lados D.A. Microstructure evolution, tensile properties, and fatigue damage mechanisms in Ti-6Al-4V alloys fabricated by two additive manufacturing techniques // *Procedia Engineering*. 2015. V. 114. P. 658–666.
6. Characterization of texture and grain boundary character distributions of selective laser melted Inconel 625 alloy / X. Y. Fang et al. // *Materials Characterization*. 2018. V. 143. P. 182–190.
7. Microstructure anisotropy and its implication in mechanical properties of biomedical titanium alloy processed by electron beam melting / M. Wang et al. // *Materials Science and Engineering: A*. 2019. V. 743. P. 123–137.
8. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V / F. Wang et al. // *Metallurgical and materials transactions A*. 2013. V. 44. N 2. P. 968–977.
9. Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties / B. Vrancken et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. 2012. V. 541. P. 177–185.
10. Kasperovich G., Hausmann J. Improvement of fatigue resistance and ductility of TiAl6V4 processed by selective laser melting // *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. V. 220. P. 202–214.
11. Influence of microstructure on high-cycle fatigue of Ti-6Al-4V: Bimodal vs. lamellar structures / R. K. Nalla et al. // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2002. V. 33. N 3. P. 899–918.
12. Зобов П. Г., Дектярев А. В., Морозов В. Н. Современные методы 3D-сканирования при размерном анализе судовых моделей с учетом их аддитивного изготовления // *Известия КГТУ*. 2019. № 53. С. 151–161.

References

1. Chen L. Y., Huang J. C., Lin C. H., Pan C. T., Chen S. Y., Yang T. L., Lin D. Y., Lin H. K., Jang J. S. C. Anisotropic response of Ti-6Al-4V alloy fabricated by 3D printing selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, vol. 682, pp. 389–395.
2. Loginov Y. N., Stepanov S. I., Naschetnikova I. A., Muller-Kamskii G. Anisotropy of additively manufactured Ti-6-4 lattice structure. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC, 2019, vol. 2176, no. 1, pp. 020002-1–020002-4.
3. Thijs L., Verhaeghe F., Craeghs T., Van Humbeeck J., Kruth J.P. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Acta materialia*, 2010, vol. 58, no. 9, pp. 3303–3312.
4. Chastand V., Tezenas A., Cadoret Y., Quaegebeur P., Maia W., Charkaluk E. Fatigue characterization of Titanium Ti-6Al-4V samples produced by Additive Manufacturing. *Procedia Structural Integrity*, 2016, vol. 2, pp. 3168–3176.
5. Zhai Y., Galarraga H., Lados D.A. Microstructure evolution, tensile properties, and fatigue damage mechanisms in Ti-6Al-4V alloys fabricated by two additive manufacturing techniques. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 114, pp. 658–666.
6. Fang X. Y., Li H. Q., Wang M., Li C., Guo Y. B. Characterization of texture and grain boundary character distributions of selective laser melted Inconel 625 alloy. *Materials Characterization*, 2018, vol. 143, pp. 182–190.
7. Wang M., Li H. Q., Lou D. J., Qin C. X., Jiang J., Fang X. Y., Guo Y. B. Microstructure anisotropy and its implication in mechanical properties of biomedical titanium alloy processed by electron beam melting. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 743, pp. 123–137.
8. Wang F., Williams S., Colegrove P., Antonysamy A. A. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V. *Metallurgical and materials transactions A*, 2013, vol. 44, no. 2, pp. 968–977.
9. Vrancken B., Thijs L., Kruth J. P., Van Humbeeck J. Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, vol. 541, pp. 177–185.
10. Kasperovich G., Hausmann J. Improvement of fatigue resistance and ductility of TiAl6V4 processed by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, vol. 220, pp. 202–214.
11. Nalla R. K., Ritchie R. O., Boyce B. L., Campbell J. P., Peters J. O. Influence of microstructure on high-cycle fatigue of Ti-6Al-4V: Bimodal vs. lamellar structures. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2002, vol. 33, no. 3, pp. 899–918.
12. Zobov P. G., Dektyarev A. V., Morozov V. N. Sovremennye metody 3D-skanirovaniya pri razmernom analize sudovykh modeley s uchyotom ikh additivnogo izgotovleniya [Modern 3D-scanning methods for dimensional analysis of ship models taking into account their additive manufacturing]. *Izvestiya KGTU*, 2019, no. 53, pp. 151–161.

Информация об авторах

П. Г. Зобов – магистрант по направлению «кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры», pavelzobov98@mail.ru

А. В. Дектярев – аспирант кафедры кораблестроения по специальности «технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства»

К. В. Казаченко – магистрант по направлению «кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры», kazak16ks@mail.ru

В. Н. Морозов – кандидат технических наук, доцент кафедры кораблестроения, академик РАЕН, mvn3613@gmail.com

Information about authors

P. G. Zobov – Master student («Shipbuilding, ocean engineering and system engineering of marine infrastructure facilities»), pavelzobov98@mail.ru

A. V. Dektyarev – Postgraduate student («Technology of shipbuilding, ship repair and organization of shipbuilding production») of the Department of Shipbuilding

K. V. Kazachenko – Master student («Shipbuilding, ocean engineering and system engineering of marine infrastructure facilities»), kazak16ks@mail.ru

V. N. Morozov – PhD in Engineering, Associate Professor, Academician of RANS, mvn3613@gmail.com

Статья поступила в редакцию 10.03.2022; одобрена после рецензирования 17.03.2022; принята к публикации 23.03.2022.

The article was submitted 10.03.2022; approved after reviewing 17.03.2022; accepted for publication 23.03.2022.