

УДК 620.178.7 + 620.172.

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi70.245>

Оценка влияния термической обработки на параметры структуры и хладостойкость металлов, полученных аддитивным электродуговым выращиванием

Ю.Г. Кабалдин¹

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4300-6659>

М.С. Аносов¹

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8150-9332>

Д.А. Рябов¹

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0486-598X>

Д.А. Шатагин¹

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1293-4487>

А.А. Хлыбов¹

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6559-7819>

Ю.И. Матвеев²

¹*Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия*

²*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. Надежность эксплуатации деталей судового оборудования в значительной степени зависит от способов получения заготовок и последующей термической обработки. Учитывая, что в настоящее время развивается судостроение в районах крайнего Севера, повышение работоспособности судовых машин и механизмов при низких (отрицательных) температурах является весьма актуальным. В работе проведено исследование влияния вида и режима термической обработки на структуру и параметры хладостойкости сталей 09Г2С и 07Х25Н13, полученных аддитивным электродуговым выращиванием. Показано, что на оптимальных режимах печати в стали 09Г2С наблюдается относительно равномерная и мелкозернистая структура материала, тогда как в сплаве 07Х25Н13 наблюдается дендритная структура. Термическая обработка исследуемых сплавов приводит к более равномерному распределению структурных составляющих в металлах, а в стали 07Х25Н13 дендриты разрушаются, что приводит к уменьшению анизотропии свойств материала. Также термическая обработка приводит к значительному снижению внутренних остаточных напряжений в материале. Результаты исследования ударной вязкости в широком диапазоне пониженных температур показывают, что в исходном состоянии после наплавки исследуемые сплавы обладают значительной анизотропией ударной вязкости (до 8 и 25% для сплава 09Г2С и 07Х25Н13 соответственно). Термическая обработка значительно снижает анизотропию свойств исследуемых сплавов, и повышает значения ударной вязкости. Так, для стали 09Г2С после термической обработки наблюдается повышение ударной вязкости более чем в 1,5 раза во всем диапазоне температур. Проведенные исследования позволили выявить диапазон температур вязко-хрупкого перехода и показатели ударной вязкости сплавов 09Г2С и 07Х25Н13, что имеет большое практическое значение при изготовлении деталей и элементов конструкций Северного исполнения для судов, работающих в арктических условиях.

Ключевые слова: судовое оборудование, 09Г2С, 07Х25Н13, хладостойкость, электродуговая наплавка, ударная вязкость, анизотропия, вязко-хрупкий переход, термическая обработка.

Evaluation of the effect of heat treatment on the structure parameters and cold resistance of metals produced by additive electric arc growth

Yuri G. Kabaldin¹

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4300-6659>

Maksim S. Anosov¹

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8150-9332>

Dmitry A. Ryabov¹

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0486-598X>

Dmitry A. Shatagin¹

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1293-4487>

Alexander A. Khlybov¹

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6559-7819>

Yuri I. Matveev²

¹*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Russia*

²*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. The reliability of operation of ship equipment parts largely depends on the methods of obtaining blanks and subsequent heat treatment. Taking into account the fact that shipping is currently developing in the regions of the Far North, improving the performance of ship machinery and mechanisms at low (negative) temperatures is very relevant. In this work, we studied the influence of the type and mode of heat treatment on the structure and parameters of cold resistance of 09Mn2Si and 07Cr25Ni13 steels obtained by additive electric arc growth. It is shown that, under optimal printing conditions, a relatively uniform and fine-grained material structure is observed in 09Mn2Si steel, while a dendritic structure is observed in the 07Cr25Ni13 alloy. Heat treatment of the alloys investigated leads to a more uniform distribution of structural components in metals, and in steel 07Cr25Ni13 the dendrites are destroyed, which leads to a decrease in the anisotropy of material properties. Also, heat treatment leads to a significant reduction in internal residual stresses in the material. The results of the study of impact strength in a wide range of low temperatures show that in the initial state after surfacing, the investigated alloys have a significant anisotropy of impact strength (up to 8 and 25% for alloy 09Mn2Si and 07Cr25Ni13, respectively). Heat treatment significantly reduces the anisotropy of the properties of the studied alloys and increases the values of impact strength. So for steel 09Mn2Si after heat treatment, an increase in impact strength by more than 1.5 times is observed over the entire temperature range. The studies carried out made it possible to identify the temperature range of the ductile-brittle transition and the impact strength of 09Mn2Si and 07Cr25Ni13 alloys, which is of great practical importance in the manufacture of parts and structural elements of the Northern version for ships operating in arctic conditions.

Keywords: marine equipment, 09Mn2Si, 07Cr25Ni13, cold resistance, electric arc surfacing, impact strength, anisotropy, ductile-brittle transition, heat treatment.

Введение

Работоспособность деталей судового оборудования непосредственно зависит от технологии их изготовления на всех этапах производственного процесса. С развитием современных технологий получения изделий методами 3D-печати [1] открываются большие возможности по получению деталей и конструкций сложной формы на одном рабочем месте с использованием гибридных технологий (печать и механическая обработка). Среди большого разнообразия методов 3D-печати одним из наиболее универсальных является метод электродуговой наплавки проволокой [2-6].

Для изделий, работающих в условиях пониженных температур, необходим учет механических характеристик и показателей хладостойкости в широком диапазоне температур. Как показывает анализ литературных данных, в настоящее время есть большое количество работ, где проведена оценка хладостойкости и механических свойств при пониженных температурах металлов, полученных методом обработки из проката [7,8]. Подобные исследования для металлов, полученных путем 3D-печати электродуговой наплавкой в литературе отсутствуют.

Также известно, что при наплавке наблюдается анизотропия механических свойств материала [9]; величину и характер ее изменения при понижении температуры также необходимо исследовать в рамках проводимых исследований.

В связи с этим целью исследования является оценка показателей хладостойкости и анизотропии свойств металла, полученного электродуговой наплавкой.

Материалы и методы исследования

В работе исследовались образцы, полученные на специализированном стенде для 3D-печати электродуговой наплавкой с возможностью последующей механической обработки [10]. В качестве материалов для исследования выступали стали 09Г2С и 07Х25Н13, выбранные с учетом их хорошей свариваемости и обладающие высокими показателями хладостойкости. Образцы были получены на определенных ранее оптимальных режимах печати материалов [11]

Для изготовления образцов были получены стенки шириной порядка 10 мм габаритами 100x200 мм., после чего из стенок в продольном и поперечном направлении относительно наплавки были вырезаны образцы на ударный изгиб. Всего для исследования было изготовлено порядка 60 образцов.

Геометрия образцов на ударный изгиб выбрана в соответствии с ГОСТ9454-78 с габаритами 5x10x55 с V-образным концентратором, который применяется для исследования металлов, функционирующих в особо ответственных конструкциях.

Испытания на ударный изгиб проводились на маятниковом копре МК-300. Образцы для испытаний предварительно охлаждали с учетом требований приведенных ранее стандартов с использованием разработанных криокамер. Для контроля температуры в процессе испытаний использовались датчики pt100 контактного типа с точностью измерения температуры $\pm 1^\circ\text{C}$.

Исследование микроструктур образцов проводили с использованием оптического микроскопа KYENCE-VHX 1000 при увеличениях x200, x500, x1000.

Известно, что одним из наиболее эффективных методов повышения хладостойкости и механических свойств является термическая обработка сплавов. В связи с этим часть изготовленных образцов подвергали термической обработке (ТО).

Для стали 09Г2С были выбраны следующие виды и режимы ТО: отжиг 930°C , нормализация 930°C и закалка 930°C с отпуском 550°C . Сталь 07Х25Н13 прошла аустенизацию при температуре 1100°C .

Оценка температуры вязко-хрупкого перехода производилась на основании фрактографических исследований изломов образцов. За температуру вязко-хрупкого перехода t_{50} , принималась температура, при которой в изломе наблюдается равное соотношение вязкой и хрупкой составляющей.

Результаты экспериментальных исследований. Обсуждение результатов эксперимента

Получены микроструктуры материала образцов в исходном состоянии. Результаты микроструктурных исследований приведены на рис. 1.

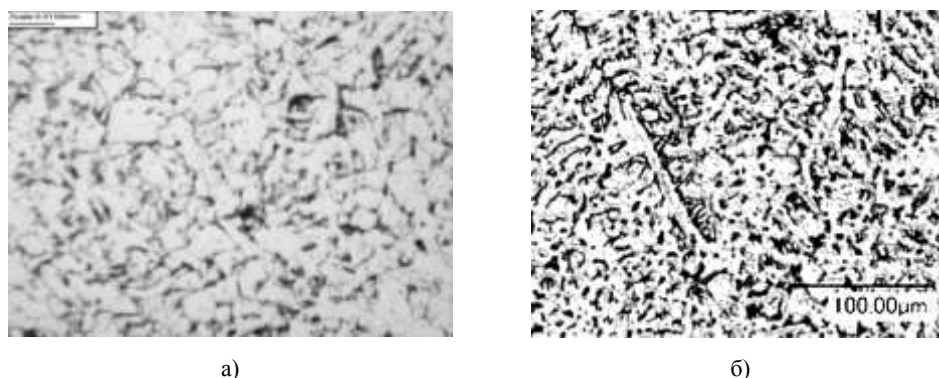


Рис. 1. Микроструктуры стали 09Г2С (а) и 07Х25Н13 (б) после наплавки (x1000)

При выбранных ранее режимах печати в структуре стали 09Г2С (рис. 1а) образуется относительно однородная структура с зернами феррита в среднем 10 – 15 мкм, наличие дефектов в виде пор не наблюдается. Анализ структуры стали 07Х25Н13 (рис. 1б), показал, что структура стали состоит из дендритов аустенита и заполняющей междендритное пространство σ -фазы.

На рис. 2 показаны микроструктуры сплавов после проведения термической обработки. Для стали 09Г2С с точки зрения в качестве наиболее благоприятной термической обработки выбрана нормализация, а для стали 07Х25Н13 - аустенизация.

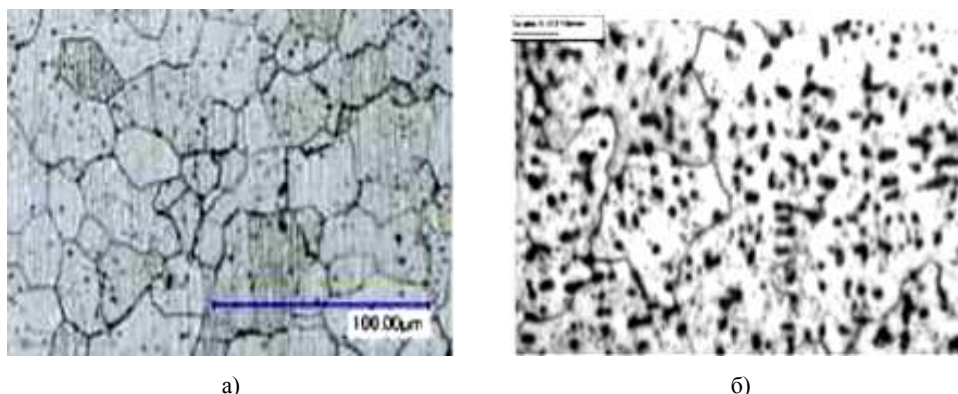


Рис. 2. Микроструктуры стали 09Г2С после нормализации 930°C (а) и 07Х25Н13 после аустенизации 1100°C (б) (x1000)

После термической обработки в образцах из стали 09Г2С зерна феррита приобрели более равновесную форму, а их размер увеличился. После отжига размер зерна вырос с 10 (7,6–11 мкм) до 8 (16 -23 мкм) балла, а после нормализации с 10 (7,6 – 11 мкм) до 9 (11 – 16 мкм.) балла. В микроструктуре после термической обработки не наблюдается перлита в связи с тем, что содержащийся в нем цементит после перекристаллизации распределился по границам феррита. После нормализации внутренние суммарные остаточные напряжения в образцах снизились с 2050 МПа до 650 МПа.

После проведения аустенизации в структуре стали 07Х25Н13 дендритов не наблюдается, что уменьшает анизотропию механических свойств.

По результатам испытаний получены зависимости ударной вязкости исследуемых сплавов при пониженной температуре. Данные зависимости показаны на рис. 3 и 4 для стали 09Г2С и стали 07Х25Н13 соответственно.

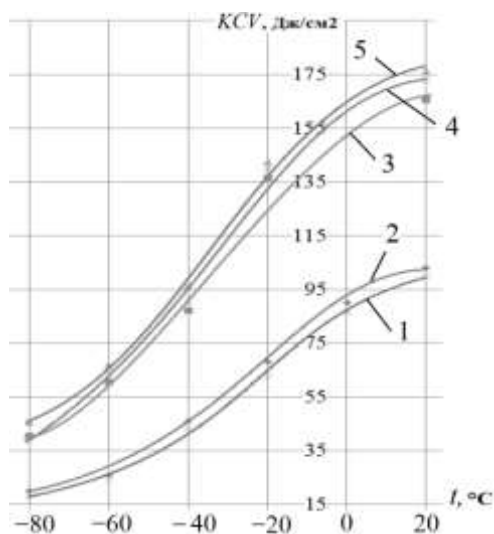


Рис. 3. Зависимость ударной вязкости стали 09Г2С при различной термической обработке (1 – образцы в поперечном направлении относительно наплавки, 2 – образцы в продольном направлении относительно наплавки и после 3 – отжиг 930°С, 4 – нормализация 930°С, 5 – закалка 930°С и отпуска 550°С)

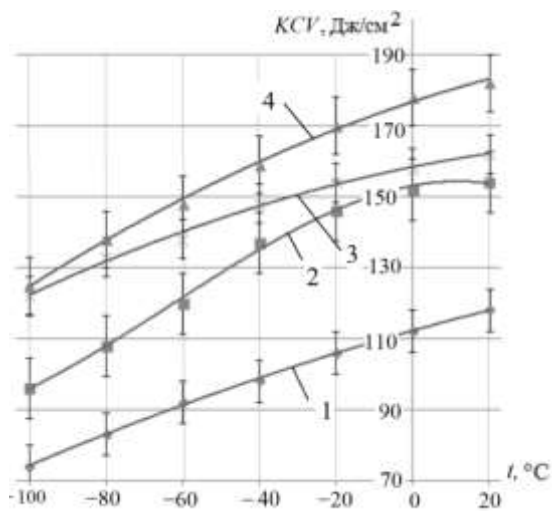


Рис. 4. Зависимость ударной вязкости стали 07Х25Н13 в исходном состоянии и после аустенизации (1- образцы в продольном направлении относительно наплавки, 2 – образцы в вырезанных в поперечном направлении относительно наплавки, 3- поперечные образцы, прошедшие аустенизацию 1100°С, 4- продольные образцы прошедшие аустенизацию 1100°С)

На основе полученных зависимостей ударной вязкости стали 09Г2С можно отметить, что исходная анизотропия ударной вязкости не превышает 8%. Ударная вязкость монотонно снижается при понижении температуры, достигая критически

низкого уровня (ниже 20 Дж/см²) при температуре 60°C. Термическая обработка позволяет значительно увеличить значения ударной вязкости во всем диапазоне температур. Наиболее эффективными видами термической обработки является закалка с высоким отпускком и нормализация, позволяющие добиться повышения ударной вязкости более чем в 1.7 раза. При этом анизотропия ударной вязкости после всех видов термической обработки не превышала 2%.

Полученные зависимости ударной вязкости сплава 07X25H13 показывают монотонное снижение ударной вязкости с понижением температуры. Однако даже при температуре -100°C уровень ударной вязкости остается на достаточно высоком уровне (выше 70 Дж/см²). Однако анизотропия ударной вязкости для сплава достаточно высокая во всем диапазоне температур и составляет порядка 30%. Термическая обработка за счет структурных изменений (рис. 2б) позволяет значительно повысить уровень ударной вязкости и значительно снизить анизотропия ударной вязкости до 10%.

На основании макроанализа изломов сплавов и последующих электронно-микроскопических исследований установлены температуры вязко-хрупкого перехода исследуемых сплавов. Результаты оценки приведены в таблице 1.

Таблица 1

Диапазон температур вязко-хрупкого перехода исследуемых сплавов

Материал	Вид ТО, режим ТО/ направление вырезки образцов	Диапазон температур вязко-хрупкого перехода, T ₅₀ , °C
Сталь 09Г2С	Продольные образцы без ТО	-34 ... -41
	Поперечные образцы без ТО	-32 ... -38
	Отжиг 930°C	-36 ... -44
	Нормализация 930°C	-39 ... -46
	Закалка 930°C, отпуск 550°	-41 ... -49
Сталь 07X25H13	Продольные образцы без ТО	Наблюдается только вязкая составляющая в изломе, вязко-хрупкий переход отсутствует
	Поперечные образцы без ТО	
	Продольные образцы после аустенизации 1100°C	
	Поперечные образцы после аустенизации 1100°C	

Анализ результатов по определению температур вязко-хрупкого перехода показывает, что для стали 07X25H13 вязко-хрупкого перехода не наблюдается как в исходном состоянии, так и после проведения термической обработки.

Для стали 09Г2С температура вязко-хрупкого перехода зависит от структурного состояния материала, т.е. термической обработки. Так, в исходном состоянии для исследуемого сплава диапазон температур вязко-хрупкого перехода находится в пределах от 32 до 41°C. Наименьшая температура вязко-хрупкого перехода наблюдается для сплава после закалки и высокого отпуска и не превышает 41°C.

Выводы по работе

1. Структурное состояние сплавов 09Г2С и 07X25H13 сильно зависят от вида и режима последующей термической обработки. Термическая обработка после наплавки позволяет значительно понизить анизотропию ударной вязкости исследуемых сплавов.
2. При понижении температуры наблюдается монотонное снижение ударной вязкости исследуемых материалов. Сплав 09Г2С в исходном состоянии не рекомендуется

эксплуатировать при температуре ниже -35°C в связи с высокой вероятностью его хрупкого разрушения и значительным снижением уровня ударной вязкости, особенно при температуре ниже -60°C . Сплав 07X25H13 сохраняет достаточно высокий уровень ударной вязкости во всем исследуемом диапазоне температур и не имеет температуры вязко-хрупкого перехода.

3. Рекомендованным видом термообработки для стали 09Г2С выступает закалка с высоким отпуском или нормализация. При этом виде термообработки эксплуатация сплава безопасна до температур порядка -40°C . Рекомендованным видом термообработки для стали 07X25H13 выступает аустенизация, значительно снижающая анизотропию свойств сплава (до 10%) и повышающая уровень ударной вязкости.

Благодарности

Исследование выполнено по гранту Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (кандидатов наук) МК-370.2021.4 на тему «Оценка хладостойкости и изучение механизмов разрушения металлов, полученных на основе 3D-печати для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в условиях Арктики и Крайнего Севера»

Список литературы

1. Malladi, Avinash and Sarma, S.B.S. 3D Metal Printing Technologies. The IUP Journal of Mechanical Engineering 10(1) (2017): 48-54.
2. Filippo Montevercchi, Giuseppe Venturini, Antonio Scippa, Gianni Campatelli. Finite Element Finite Element Modelling of Wire-arc-additive manufacturing Process. *Procedia CIRP* 55 (2016): 109–114. DOI:10.1016/j.procir.2016.08.024
3. S. Williams, Martina Filomeno, Addison Adrian, Ding Jialuo, G. Pardal, P. Colegrove. Wire+Arc Additive Manufacturing *Materials Science and Technology* 32(7) (2016): 641-647. DOI:10.1179/1743284715Y.0000000073
4. M.A. Jackson, A. Van Asten, J.D. Morrow, S. Min, F.E. Pfefferkorn. Energy consumption model for additive-subtractive manufacturing processes with case study *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 5(4) (2018): 459-466. DOI:10.1007/s40684-018-0049-y
5. Pinto-Lopera Jesús Emilio et al. Real-Time Measurement of Width and Height of Weld Beads in GMAW Processes *Sensors* 16(9) (2016): 1500. DOI:10.3390/s16091500
6. Johnnieew Zhong Li, Mohd Rizal Alkahari, Nor Ana Rosli. Review of Wire Arc Additive Manufacturing for 3D Metal Printing *International Journal of Automation Technology* 13(3) (2019): 346-353. DOI:10.20965/ijat.2019.p 0346
7. Горынин И. В. Конструкционные материалы – важный компонент надежности и экологической безопасности инфраструктуры Арктики / Арктика: экология и экономика. 2015. № 3 (19). С. 82–87.
8. Солнцев Ю. П., Ермаков Б. С., Слепцов О. И. Материалы для низких и криогенных температур: энциклопедический справочник. СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008. 768 с.: ил. ISBN 978-5-93808-157-4.
9. Карташев М. Ф., Пермяков Г. Л., Трушников Д. Н., Миндибаев М. Р. Исследование влияния деформационного упрочнения на механические свойства образцов из сплава АМг5, полученных способом многослойной наплавки / *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2019. Том. 17. №3. С. 38-45. DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-3-38-45
10. Kabaldin, Y.G., Shatagin, D.A., Anosov, M.S. et al. Diagnostics of 3D Printing on a CNC Machine by Machine Learning *Russian Engineering Research* 41 (2021): 320–324. DOI:10.3103/S1068798X21040109
11. Кабалдин Ю.Г и др. Исследование влияния режимов 3D-печати на структуру и хладостойкость стали 08Г2С / Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Рябов Д.А., Колчин П.В., Шатагин Д.А., Киселев А.В. // Вестник Магнитогорского государственного

технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. № 4. С. 64–70.
DOI:10.18503/1995-2732-2021-19-4-64-70

References

1. Malladi, Avinash and Sarma, S.B.S. 3D Metal Printing Technologies. The IUP Journal of Mechanical Engineering 10(1) (2017): 48-54.
2. Filippo Montevercchi, Giuseppe Venturini, Antonio Scippa, Gianni Campatelli. Finite Element Finite Element Modelling of Wire-arc-additive manufacturing Process. Procedia CIRP 55 (2016): 109–114. DOI:10.1016/j.procir.2016.08.024
3. S. Williams, Martina Filomeno, Addison Adrian, Ding Jialuo, G. Pardal, P. Colegrove. Wire+Arc Additive Manufacturing Materials Science and Technology 32(7) (2016): 641-647. DOI:10.1179/1743284715Y.0000000073
4. M.A. Jackson, A. Van Asten, J.D. Morrow, S. Min, F.E. Pfefferkorn. Energy consumption model for additive-subtractive manufacturing processes with case study International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology 5(4) (2018): 459-466. DOI:10.1007/s40684-018-0049-y
5. Pinto-Lopera Jesús Emilio et al. Real-Time Measurement of Width and Height of Weld Beads in GMAW Processes Sensors 16(9) (2016): 1500. DOI:10.3390/s16091500
6. Johnnieew Zhong Li, Mohd Rizal Alkahari, Nor Ana Rosli. Review of Wire Arc Additive Manufacturing for 3D Metal Printing International Journal of Automation Technology 13(3) (2019): 346-353. DOI:10.20965/ijat.2019.p.0346
7. Gorynin I.V. «Konstruktsionnyye materialy – vazhnyy komponent nadezhnosti i ekologicheskoy bezopasnosti infrastruktury Arktiki» (Structural materials are an important component of the reliability and environmental safety of the Arctic infrastructure) Arktika: ekologiya i ekonomika 3(19) (2015): 82–87.
8. Solntsev Yu. P., Ermakov B. S., Sleptsov O. I. Materialy dlya nizkikh i kriogennykh temperatur: entsiklopedicheskiy spravochnik. SPb.: KHIMIZDAT, 2008. 768 p.
9. Kartashev M. F., Permyakov G. L., Trushnikov D. N., Mindibaev M. R. «Issledovaniye vliyaniya deformatsionnogo uprochneniya na mekhanicheskiye svoystva obraztsov iz splava AMg5, poluchennykh sposobom mnogosloynoy naplavki» (Investigation of the influence of strain hardening on the mechanical properties of specimens from the AMg5 alloy obtained by the method of multilayer surfacing). Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova 17(3) (2019): 38-45. DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-3-38-45
10. Kabaldin, Y.G., Shatagin, D.A., Anosov, M.S. et al. Diagnostics of 3D Printing on a CNC Machine by Machine Learning Russian Engineering Research 41 (2021): 320–324. DOI:10.3103/S1068798X21040109
11. Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Ryabov D.A. et al. «Issledovaniye vliyaniya rezhimov 3D-pechati na strukturu i khladostoykost' stali 08G2S» (Study of the influence of 3D printing modes on the structure and cold resistance of steel 08Mn2Si) Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova 19(4) (2021): 64–70. DOI:10.18503/1995-2732-2021-19-4-64-70

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кабалдин Юрий Георгиевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроения», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: uru.40@mail.ru

Yuri G. Kabaldin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology and Equipment of Mechanical Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603950, e-mail: uru.40@mail.ru

Аносов Максим Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры «Технология и оборудование

Maksim S. Anosov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the

машиностроения», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: anosov-maksim@list.ru

Рябов Дмитрий Александрович, ассистент кафедры «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: ryabovdm1996@gmail.com

Шатагин Дмитрий Александрович, к.т.н., доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроения», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: dmitsanych@gmail.com

Хлыбов Александр Анатольевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: hlybov_52@mail.ru

Матвеев Юрий Иванович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатации судовых энергетических установок», Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: matveeveseu@mail.ru

Department of Technology and Equipment for Mechanical Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603950
e-mail: anosov-maksim@list.ru

Dmitry A. Ryabov, Assistant of the Department of Materials Science, Materials Technology and Heat Treatment of Metals, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603950
e-mail: ryabovdm1996@gmail.com

Dmitry A. Shatagin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment for Mechanical Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603950,
e-mail: dmitsanych@gmail.com

Alexander A. Khlybov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Materials Science, Materials Technology and Heat Treatment of Metals, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603950,
e-mail: hlybov_52@mail.ru

Yuri I. Matveev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Operation of Ship Power Plants, Volga State University of Water Transport, 603951,
e-mail: matveeveseu@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.02.2022; опубликована онлайн 21.03.2022.
Received 15.02.2022; published online 21.03.2022.