

УДК 620.17

DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-16-23

Оценка хладостойкости образцов из стали 09Г2С, полученных с использованием технологии 3D-печати электродуговой наплавкой на станке с ЧПУ*

Ю. Г. Кабалдин, доктор технических наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

А. А. Хлыбов, доктор технических наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Д. А. Шатагин, кандидат технических наук, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

М. С. Аносов, кандидат технических наук, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Д. А. Рябов, аспирант, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Приводятся результаты исследований образцов из стали 09Г2С при пониженных температурах, полученных с использованием технологии 3D-печати электродуговой наплавкой. Для сравнения приводятся данные исследований на образцах, полученных из проката.

Для достижения поставленной цели были изготовлены и испытаны образцы на ударный изгиб из стали 09Г2С. Образцы печатались с использованием технологии 3D-печати на станке с ЧПУ путем послойного нанесения наплавляемого материала из проволоки 09Г2С. Качество и стабильность структуры материала получаемых образцов обеспечивались за счет постоянной диагностики устойчивости динамической системы «источник питания – дуга – материал».

Основным диагностическим параметром, характеризующим степень устойчивости, был показатель фрактальной размерности аттрактора динамической системы.

Образцы для исследований вырезались в продольном и поперечном направлениях наплавки, аналогично изготавливались образцы из проката. Исследования полученных образцов проводились с использованием испытаний на ударный изгиб в широком диапазоне пониженных температур от -80 до $+20$ °С. Для выявления особенностей механизма разрушения и температуры вязкохрупкого перехода металлов проводились фрактграфические исследования изломов образцов.

В ходе исследований установлено, что температура вязкохрупкого перехода стали 09Г2С, полученной с использованием технологии 3D-печати электродуговой наплавкой, составляет порядка -40 °С, что значительно выше температуры вязкохрупкого перехода стали 09Г2С, полученной из листового проката с последующим отжигом -47 °С. Следует отметить, что образцы, вырезанные вдоль наплавки, имеют более высокие значения ударной вязкости и температуры вязкохрупкого перехода.

Для образцов, полученных электродуговой наплавкой, значения ударной вязкости не более чем на 20 % ниже, чем значения ударной вязкости образцов, полученных механической обработкой из листового проката во всем диапазоне исследуемых температур.

Приведенная технология электродуговой наплавки, управляемой компьютером, может быть использована как для изготовления сложных изделий, так и для ремонта. Используя сварочные материалы с низкой температурой вязкохрупкого перехода, в частности используя сталь 09Г2С, можно получить высокие эксплуатационные свойства изделия в короткие сроки даже в арктических условиях.

Ключевые слова: 3D-печать, электродуговая наплавка, ударная вязкость, хладостойкость, вязкохрупкий переход.

Введение

Освоение северных регионов Российской Федерации, Арктики, Антарктики входит в число приоритетных задач разви-

тия РФ. Эти регионы занимают исключительно важное место в обеспечении ведущих отраслей промышленности страны разнообразными видами ресурсов [1, 2]. Освоение этих регионов

© Кабалдин Ю. Г., Хлыбов А. А., Шатагин Д. А., Аносов М. С., Рябов Д. А., 2020

* Исследование выполнено по гранту РНФ №19-19-00332 «Разработка научно обоснованных подходов и аппаратно-программных средств мониторинга поврежденности конструкционных материалов на основе подходов искусственного интеллекта для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в арктических условиях».

требует разработки прогрессивных технологий, связанных с оперативным получением отдельных деталей из хладостойких материалов, а в дальнейшем механизмов и конструкций в условиях ограниченности ресурсов, прежде всего энергетических.

Наиболее востребованы в связи с этим стали технологии 3D-печати металлами, позволяющие не только получить изделия с необходимыми механическими свойствами, но и восстановить изношенные детали.

Несмотря на большое разнообразие различных методов 3D-печати металлами (селективное лазерное спекание, наплавка металлических порошков, электродуговая наплавка и т. д.) [3], многие из них не позволяют получить изделия с необходимыми эксплуатационными свойствами, в том числе изделия, обладающие хорошей хладостойкостью, для работы в условиях пониженных температур.

Наибольшую перспективность в связи с этим приобретает метод электродуговой наплавки [4], позволяющий в зависимости от режимов печати получить высокие эксплуатационные свойства изделия в короткие сроки даже в арктических условиях. Применение других методов вносит значительные ограничения в связи с энергоемкостью процесса и низкими эксплуатационными свойствами металлов.

Технологии электродугового аддитивного выращивания посвящены исследования Venturinia G., Montevecchi F., Williams S. W., Martina F., Addison A. C., Ding J. В России данное направление развивается в СПбПУ под руководством Поповича И. Н. и Панченко О. В. Широко известны работы доктора технических наук Алешина Николая Павловича; им изучено влияние режимов и параметров процессов аддитивных технологий на формирование дефектов материала, проведены исследования влияния анизотропии материалов, разработаны методические рекомендации по неразрушающему контролю качества формирования структурного состояния металлических материалов и изделий, полученных с применением технологии селективного лазерного сплавления. Также известен ряд исследований, направленных на изучение структуры и свойств различных по составу металлов, полученных различными методами 3D-печати [5–7].

Несмотря на наличие большого количества исследований по хладостойкости различных групп металлов [8–13], изучение хладостойкости металлов, полученных методами 3D-печати, является актуальной задачей, так как в литера-

туре примеры такого рода исследования отсутствуют. Кроме того, крайне важно формирование эффективных инструментов контроля металла деталей, способных сообщить о качестве и характеристиках изделий на всех этапах его жизненного цикла.

Цель исследования – оценка хладостойкости и выявление механизмов разрушения стали 09Г2С, полученной с использованием технологии 3D-печати, на основе сравнительных испытаний на ударный изгиб и фраттографических исследований.

Материалы и оборудование для исследования

Для изготовления конструкций и механизмов, работающих в условиях пониженных температур, широко используются низкоуглеродистые марганцевые стали, в частности сталь 09Г2С, выбранная в качестве объекта исследования.

Химический состав стали 09Г2С, %: С – 0,12; Si – 0,5 – 0,8; Mn – 1,3 – 1,7; P – 0,035; S – 0,04; Cr – 0,3; Ni – 0,3; Cu – 0,3, остальное Fe.

Для оценки хладостойкости и механизмов разрушения стали 09Г2С, полученной на основе 3D-печати с использованием технологии электродуговой наплавки, проводились испытания образцов на ударный изгиб по ГОСТ 9454 в широком диапазоне пониженных температур.

Изготовление образцов на ударный изгиб производилось на специально разработанном экспериментальном стенде с возможностью 3D-печати электродуговой наплавкой в среде защитного газа (CO₂) и последующей механической обработкой (рис. 1).

3D-печать металлических образцов из стали 09Г2С была реализована за счет переноса электродного материала коротким замыканием в сварочную ванну. В качестве электродного материала была использована проволока, химический состав которой соответствует стали 09Г2С.

Качество и стабильность структуры материала получаемых образцов обеспечивались за счет постоянной диагностики устойчивости динамической системы «источник питания – дуга – материал».

Основным диагностическим параметром, характеризующий степень устойчивости, был показатель фрактальной размерности аттрактора динамической системы. Реконструкция осуществлялась на основе полученного временного ряда сигнала изменения фактической силы тока в процессе наплавки с использованием теоремы Такенса и расчета корреляционного интеграла.

Использование показателя фрактальной размерности позволило оценивать степень хаотичности процессов тепломассопереноса и отбраковывать образцы, полученные при нестабильном горении дуги. При этом для предварительной обработки сигналов были использованы полосовые цифровые и Wavelet-фильтры. Использование Wavelet-фильтров позволило минимизировать влияние шумовой составляющей в сигналах и осуществлять декомпозицию на

периодическую и хаотическую составляющие на основе энтропийных показателей.

При изменении динамического состояния системы 3D-печати происходила перестройка аттрактора и изменение его фрактальной размерности. Так, при относительно устойчивой дуге фрактальная размерность аттрактора $Df = 3,1$ (рис. 2, а), а при переходе системы к хаотической динамике фрактальная размерность выросла до $Df = 3,8$ (рис. 2, б).

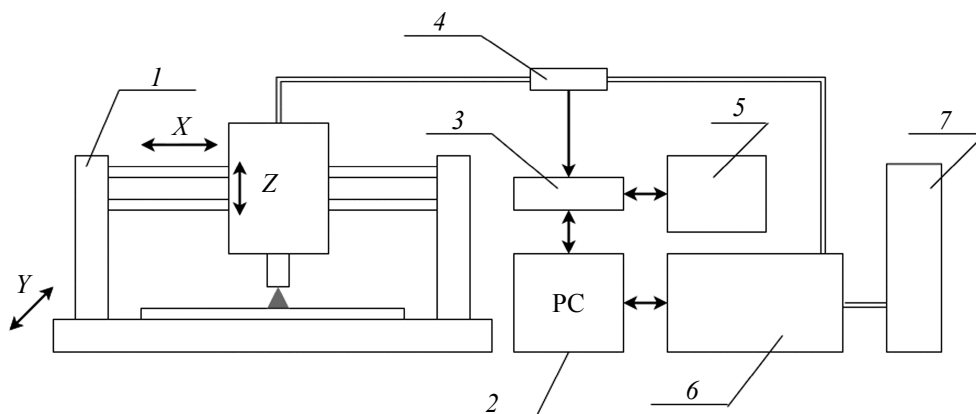


Рис. 1. Экспериментальный стенд по 3D-наплавке на базе станка с ЧПУ: 1 – 3-координатный станок с ЧПУ портального типа; 2 – ПК; 3 – АЦП/ЦАП; 4 – датчики силы тока и напряжения; 5 – система ЧПУ; 6 – сварочный полуавтомат; 7 – баллоны с защитным газом

Fig. 1. 3D-surfacing experimental bench based on CNC machine: 1 – 3-axis gantry type CNC machine; 2 – Personal computer; 3 – ADC/DAC; 4 – current and voltage sensors; 5 – CNC system; 6 – welding semiautomatic device; 7 – shielding gas cylinders

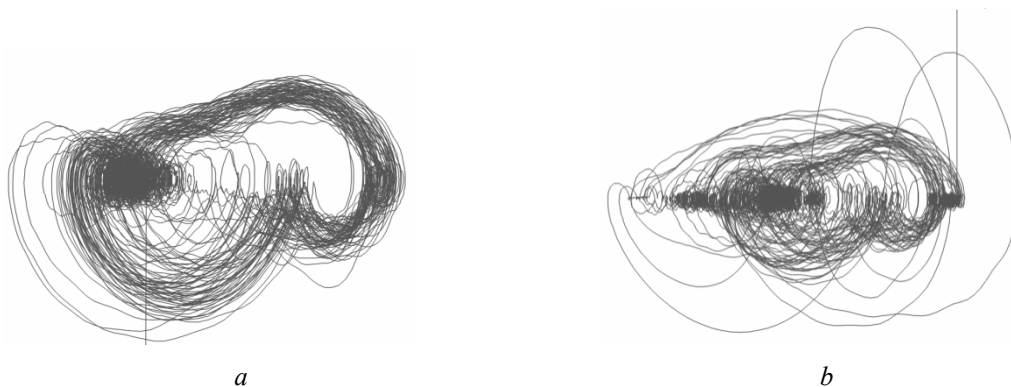


Рис. 2. Аттрактор динамической системы 3D-печати с электродуговой наплавкой на станке с ЧПУ: а – аттрактор устойчивой дуги; б – аттрактор при потере устойчивости

Fig. 2. Attractor of a dynamic 3D printing system by electric arc welding on a CNC machine: а - attractor of a stable arc; б - attractor in case of loss of stability

Исследования полученных заготовок включали в себя испытания на ударный изгиб с последующими фрактографическими исследованиями изломов образцов.

Исследования материалов на ударный изгиб проводились на образцах типа Шарпи ($10 \times 5 \times 55$ мм) с V-образным концентратором, которые часто используются при испытании

ответственных конструкций, в частности летательных аппаратов, транспортных средств.

Для сопоставления полученных результатов испытаний на ударный изгиб были использованы два класса образцов:

– образцы, полученные из листового проката с последующей термической обработкой [14, 15] (отжиг при 940 °С, охлаждение с печью);

– образцы, вырезанные из заготовки, полученной 3D-печатью с использованием электродуговой наплавки на станке с ЧПУ в продольном и поперечном направлении относительно направления печати.

Исследование микроструктуры проводилось на оптическом микроскопе KYENCE-VHX 1000. Травление полированной поверхности осуществлялось в 4%-м растворе HNO_3 . Фрактографический анализ проводился с применением растрового электронного микроскопа JSM-3U. Доля вязкой и хрупкой составляющих определялась согласно ГОСТ Р ИСО 148-1–2013.

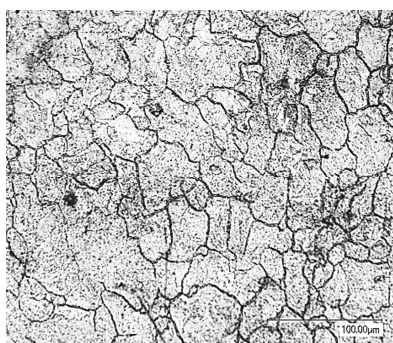
Испытания на ударный изгиб проводились на маятниковом копре МК-30А в диапазоне температур $-80 \dots +20$ °С. Охлаждение образцов до необходимой температуры осуществлялось в специально разработанной криокамере.

В соответствии с ГОСТ 9454–78 после выдержки в течение 15 минут образцы вынимались из камеры, устанавливались на копер и не-

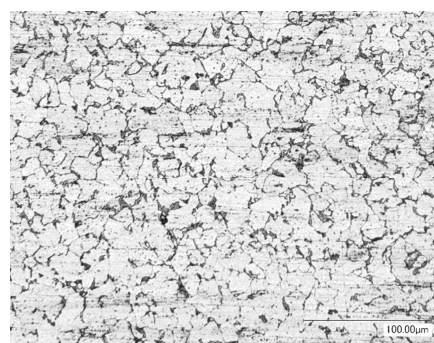
медленно испытывались. С момента извлечения образца из ванны проходило не более 4 секунд. Для выставления образца на копре относительно центра опор использовались упоры. Для регистрации температуры в процессе охлаждения образцов применялся датчик pt100 (контактного типа) ($-196 \dots +100$ °С (± 1 °С)).

Результаты исследования и их обсуждение

Полученная микроструктура стали 09Г2С из листового материала после отжига представлена на рис. 3, *a*. Структура стали в отожженном состоянии представляет собой равномерно распределенные ферритные зерна, размерами порядка 55 мкм. Микроструктура стали 09Г2С образцов, полученных 3D-печатью, представлена на рис. 3, *b*. Структура стали в данном случае схожа по структурным составляющим с микроструктурой металла образцов из листового проката, однако отличается величиной зерна: зерно примерно в 2,3 раза меньше (в среднем 24 мкм), а также наблюдается значительная разнорзернистость.



a



b

Рис. 3. Микроструктуры исследуемых образцов, $\times 1000$:

a – полученных из листового материала (с последующим отжигом); *b* – полученных электродуговой наплавкой

Fig. 3. Microstructures of the studied samples, $\times 1000$:

a - obtained from sheet material (followed by annealing); *b* - samples obtained by electric arc welding

Результаты испытаний на ударный изгиб отображены на рис. 4.

Анализ полученных зависимостей ударной вязкости от температуры испытания исследуемых классов образцов показывает, что характер изменения ударной вязкости образцов, полученных путем электродуговой наплавки и механической обработкой из проката, совпадает. Для образцов, полученных электродуговой наплавкой, значения ударной вязкости на 15...20 % ниже, чем значения ударной вязкости образцов, полученных механической обработкой из листового проката, во всем диапазоне исследуемых температур.

Результаты фрактографических исследований изломов образцов, полученных с исполь-

зованием технологии 3D-печати, показаны на рис. 5 и 6.

Как показал фрактографический анализ образцов (см. рис. 5 и 6), при температуре $+20$ °С в изломе присутствует только вязкая составляющая для всех классов образцов. Вязкохрупкий переход для исследуемых классов металлов проходит в диапазоне температур $0 \dots -60$ °С. Так, при температуре ниже -60 °С в изломе образцов присутствует только хрупкая составляющая.

По результатам анализа изломов, а также анализа изменений ударной вязкости при пониженных температурах получены температуры вязкохрупкого перехода T_{50} . Результаты представлены в таблице.

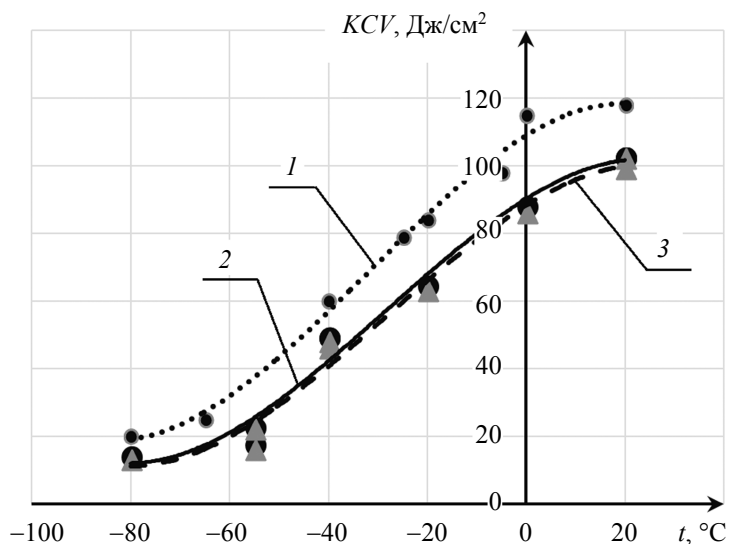


Рис. 4. Результаты испытаний на ударный изгиб образцов стали 09Г2С: 1 – полученных из листового проката с последующим отжигом; 2 – вырезанных вдоль направления наплавки; 3 – вырезанных поперек направления наплавки

Fig. 4. The results of tests for impact bending of steel samples 09G2S: 1 - obtained from sheet metal with subsequent annealing; 2 - cut along the direction of surfacing; 3 - cut across the direction of surfacing

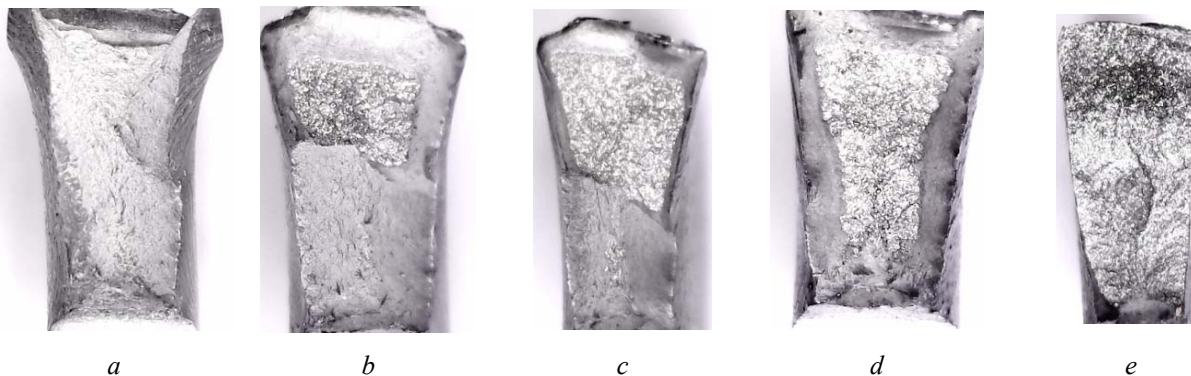


Рис. 5. Общий вид излома образцов, испытанных на ударный изгиб (вырезанных поперек направления наплавки) при температурах: +20 °C (a); 0 °C (b); -20 °C (c); -40 °C (d); -60 °C (e)

Fig. 5. General view of the fracture of samples tested for impact bending (cut across the direction of surfacing) at temperatures: 20 °C (a); 0 °C (b); -20 °C (c); -40 °C (d); -60 °C (e)

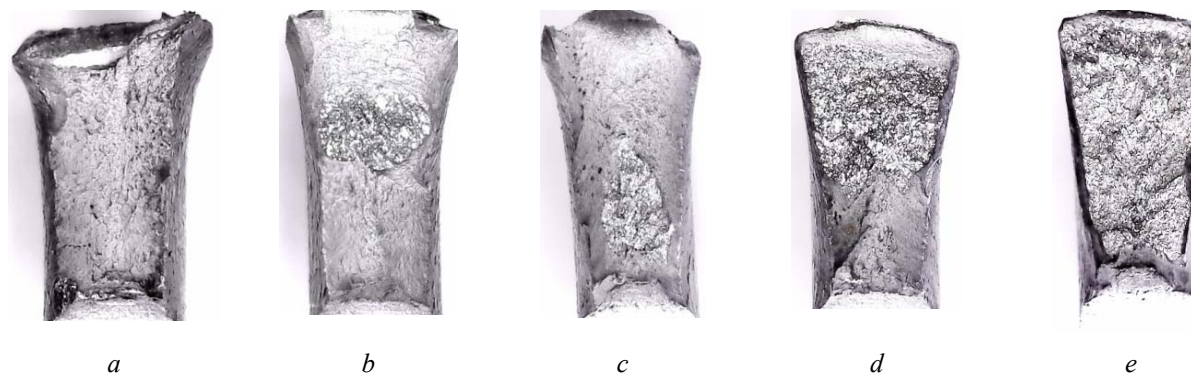


Рис. 6. Общий вид излома образцов, испытанных на ударный изгиб (вырезанных вдоль направления наплавки) при температурах: +20 °C (a); 0 °C (b); -20 °C (c); -40 °C (d); -60 °C (e)

Fig. 6. General view of the fracture of samples tested for impact bending (cut along the direction of surfacing) at temperatures: +20 °C (a); 0 °C (b); -20 °C (c); -40 °C (d); -60 °C (e)

Полученные температуры вязкохрупкого перехода стали 09Г2С

The obtained temperature of the viscous-brittle transition of steel 09G2S

Класс образцов	Температура $T_{50}, ^\circ\text{C}$
Образцы из листового материала (после отжига)	-47 ± 2
Образцы из заготовки после наплавки (вырезанные вдоль направления наплавки)	-40 ± 2
Образцы из заготовки после наплавки (вырезанные поперек направления наплавки)	-38 ± 2

Как видно из представленных результатов по оценке температуры вязкохрупкого перехода, по характеру излома образцов металла, образцы, полученные методом 3D-печати, обладают меньшей хладостойкостью по сравнению с образцами, полученными из листового материала и прошедшими термическую обработку (отжиг), однако температуры вязкохрупкого перехода при этом отличаются незначительно.

Выводы по работе

В ходе исследования установлено, что для образцов из стали 09Г2С, полученных электродуговой наплавкой, значения ударной вязкости на более чем на 20 % ниже, чем значения ударной вязкости образцов, полученных механической обработкой из листового проката, во всем диапазоне исследуемых температур.

Температуры вязкохрупкого перехода стали 09Г2С, полученной на основе 3D-печати, составляют $-40 \pm 2 ^\circ\text{C}$, что незначительно выше температуры вязкохрупкого перехода стали 09Г2С, полученной из листового проката с последующим отжигом ($-47 ^\circ\text{C}$). Полученные характеристики материала также являются следствием оптимального выбора режимов наплавки и постоянного контроля динамической устойчивости процесса 3D-печати.

Приведенная технология электродуговой наплавки, управляемой компьютером, может быть использована как для изготовления сложных изделий, так и для ремонта. Используя сварочные материалы с низкой температурой вязкохрупкого перехода, в частности, используя сталь 09Г2С, можно получить высокие эксплуатационные свойства изделия в короткие сроки даже в арктических условиях.

Библиографические ссылки

1. Лажнецов В. Н. Социально-экономическое пространство и территориальное развитие Севера

и Арктики России // Экономика региона. 2018. Т. 14, вып. 2. С. 353–365.

2. Экономическая безопасность Российской Арктики: особенности и проблемы обеспечения : монография / под науч. ред. В. С. Селина, Т. П. Скуфьиной, Е. П. Башмаковой, М. В. Ульченко. Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2018. 103 с.

3. Malladi, Avinash and Sarma. SBS, 3D Metal Printing Technologies. *The IUP Journal of Mechanical Engineering*, 2017, vol. X, no. 1, pp. 48-54.

4. Kabaldin Y.G., Kolchin P.V., Shatagin D.A. Digital Twin for 3D Printing on CNC Machines. *Russ. Engin. Res.*, 2019, no. 39, pp. 848-851. <https://doi.org/10.3103/S1068798X19100101>.

5. Анализ структуры и механических свойств сплава Co–Cr–Mo, полученного методом 3D-печати / Н. В. Казанцева, И. В. Ежов, Д. И. Давыдов, А. Г. Меркушев // Физика металлов и металловедение. 2019. № 120 (12). С. 1271–1278. <https://doi.org/10.1134/S0015323019120088>.

6. Исследование прочности изделий, полученных методом 3D-печати / А. В. Балашов, А. О. Черданцев, Е. А. Новиковский, С. В. Ананьин, С. В. Белоплов // Ползуновский вестник. 2016. № 2. С. 61–64.

7. Смирнова Е. А., Герман М. А., Фисенкова Д. В. Структура и свойства образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных при помощи 3D-технологии прямого нанесения металла // Сборник тезисов докладов XIV Междунар. молодежной науч. конф. «Гаринские чтения – 2019» (Москва, 28 марта 2019 г.) / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2019. С. 924.

8. Анализ хладостойкости металлов с различным типом кристаллического строения / Ю. Г. Кабалдин, А. А. Хлыбов, М. С. Аносов, Д. А. Шатагин, Д. А. Рябов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 3. С. 48–55. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-48-55.

9. Чернов В. М., Кардашев Б. К., Мороз К. А. Хладноломкость и разрушение металлов с разными кристаллическими решетками // Дислокационные механизмы. Журнал технической физики. 2016. № 7. С. 57–64.

10. Орыщенко А. С., Мальшевский В. А., Хлусова Е. И. Современные конструкционные стали для Арктики // Судостроение. 2013. № 3. С. 46–49.

11. 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.

12. Хладостойкость материалов и элементов конструкций: результаты и перспективы / В. П. Ларионов, В. Р. Кузьмин, О. И. Слепцов [и др.]. Новосибирск : Наука, 2005. 290 с.

13. Хлусова Е. И., Сыч О. В. Создание хладостойких конструкционных материалов для Арктики. История, опыт, современное состояние // Инновации. 2018. № 11 (241). С. 85–92.

14. Самохоцкий А. И., Парфеновская Н. Г. Технология термической обработки металлов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1976. 311 с.

15. Галимский А. И. Изучение возможностей термической обработки как фактора повышения хладостойкости конструкционных низколегированных сталей // Ползуновский альманах. 2014. № 2. С. 53–56.

References

1. Lazhentsev V.N. [Socio-economic space and territorial development of the North and the Arctic of Russia]. *Ekonomika regiona*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 353-365 (in Russ.).

2. Selina V.S., Skufina T.P., Bashmakovoi E.P., Ulchenko M.V. (ads.) [Economic security of the Russian Arctic: features and problems of support]. Apatity, KSC RAS Publ., 2018, 103 p. (in Russ.).

3. Malladi, Avinash and Sarma. SBS, 3D Metal Printing Technologies. *The IUP Journal of Mechanical Engineering*, 2017, vol. X, no. 1, pp. 48-54.

4. Kabaldin Y.G., Kolchin P.V., Shatagin D.A. Digital Twin for 3D Printing on CNC Machines. *Russ. Engin. Res.*, 2019, no. 39, pp. 848-851. <https://doi.org/10.3103/S1068798X19100101>.

5. Kazantseva N.V., Yezhov I.V., Davydov D.I., Merkushev A.G. [Analysis of the structure and mechanical properties of the Co – Cr – Mo alloy obtained by 3D printing]. *Fizika metallov i metallovedeniye*, 2019, no. 120, pp. 1271-1278 (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0015323019120088>.

6. Balachov A.V., Cherdancev A. O., Novikovskiy E.A., Ananen S.V., Beloplotov S.V. [The study of the strength of products obtained by 3D printing]. *Polzunovskij vestnik*, 2016, no. 2, pp. 61-64 (in Russ.).

7. Smirnova E.A., German M.A., Fisenkova D.V. *Struktura i svoystva obraztsov iz titanovogo splava TI-6AL-4V, poluchennykh pri pomoshchi 3D-tekhnologii pryamogo naneseniya metalla* [The structure and properties of samples of titanium alloy TI-6AL-4V, obtained using 3D technology of direct metal deposition]. *Sbornik tezisov dokladov XIV Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii "Gagarinskiye chteniya – 2019"*

(Moskva, 28 marta 2019 g.). [Proc. of the XIV International Youth Scientific Conference "Gagarin Readings - 2019" (Moscow, March 28, 2019)]. *Moskovskiy aviatcionnyy institut (natsional'nyy issledovatel'skiy universitet)* Publ., 2019, p. 924 (in Russ.).

8. Kabaldin Yu.G., Khlybov A.A., Anosov M.S., Shatagin D.A., Ryabov D.A. [Analysis of cold resistance of metals with various types of crystalline structure]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 48-55 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-48-55.

9. Chernov V.M., Kardashev B.K., Moroz K.A. [Cold brittleness and fracture of metals with different crystal lattices]. *Dislocation mechanisms: Journal of Technical Physics*, 2016, no. 7, pp. 57-64 (in Russ.).

10. Oryshchenko A.S., Malyshevskii V.A., Khlusova E.I. [Modern structural steels for the Arctic]. *Sudostroenie*, 2013, no. 3, pp. 46-49 (in Russ.).

11. Solntsev Yu.P., Ermakov B.S, Slepsov O.I. *Materialy dlya nizkikh i kriogennykh temperatur* [Materials for low and cryogenic temperatures]. SPb., Khimizdat Publ., 2008, 768 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-93808-157-4.

12. Larionov V.P., Kuz'min V.R., Slepsov O.I. *Khladostoikost' materialov i elementov konstruksii: rezul'taty i perspektivy* [Cold resistance of materials and structural elements: results and prospects]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005, 290 p. (in Russ.).

13. Khlusova E.I., Sych O.V. [Creation of cold-resistant structural materials for the Arctic. History, experience, current state]. *Innovatsii*, 2018, no. 11, pp. 85-92 (in Russ.).

14. Samokhotsky A.I., Parfenovskaya N.G. *Tekhnologiya termicheskoi obrabotki metallov* [Technology of heat treatment of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976, 311 p. (in Russ.).

15. Galimsky A.I. [Study of the possibilities of heat treatment as a factor in improving the cold resistance of structural low alloy steels]. *Polzunovskii al'manakh*, 2014, no. 2, pp. 53-56 (in Russ.).

Assessment of Cold Resistance of 09G2S Steel Obtained Using 3D Printing Technology by Electric Arc Surfacing at a CNC Machine

Yu.G. Kabaldin, DSc in Engineering, Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

A.A. Khlybov, DSc in Engineering, Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

D.A. Shatagin, PhD in Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

M.S. Anosov, PhD in Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

D.A. Ryabov, Post-graduate, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

The paper presents the results of studies of samples of steel 09G2S at low temperatures, obtained using 3D printing technology by electric arc welding. For comparison, research data on samples obtained from rolled metal are given.

To achieve this goal, samples for impact bending were made and tested from 09G2S steel. Samples were printed using 3D printing technology at a CNC machine by layer-by-layer deposition of deposited material from 09G2S wire.

The quality and stability of the obtained samples' material structure were ensured by continuous diagnostics of the stability of the dynamic system "power source - arc - material".

The main diagnostic parameter characterizing the degree of stability was the indicator of the fractal dimension of the attractor of the dynamic system.

Samples for research were cut in the longitudinal and transverse directions of surfacing, and samples of rolled metal were similarly made. Studies of the obtained samples were carried out using impact bending tests in a wide range of low temperatures from -80 to + 20 °C. To identify the fracture mechanism features and the temperature of the viscous-brittle transition of metals, fractographic studies of fractures of the samples were performed.

In the studies, it was found that the temperature of the viscous-brittle transition of 09G2S steel obtained using 3D printing technology by electric arc welding was about -40 °C. It is slightly higher than the temperature of the viscous-brittle transition of 09G2S steel obtained from sheet metal with subsequent annealing of -47 °C. It should be noted that the samples cut along the surfacing have higher values of impact strength and temperature of viscous-brittle transition.

For samples obtained by electric arc welding, the values of impact strength are not more than 20 % lower than the values of impact strength of samples obtained by machining from sheet metal over the entire range of the temperatures studied.

The described above technology of computer-controlled electric arc surfacing can be used to manufacture complex products and repairs. When using welding materials with a low temperature of visco-brittle transition, in particular, the steel 09G2S, it is possible to obtain the product's high performance in a short time, even in Arctic conditions.

Keywords: 3D printing, electric arc surfacing, impact strength, cold resistance, visco-brittle transition.

Получено 27.04.2020

Образец цитирования

Оценка хладостойкости образцов из стали 09Г2С, полученных с использованием технологии 3D-печати электродуговой наплавкой на станке с ЧПУ / Ю. Г. Кабалдин, А. А. Хлыбов, Д. А. Шатагин, М. С. Аносов, Д. А. Рябов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 2. С. 16–23. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-16-23.

For Citation

Yu.G. Kabaldin, A.A. Khlybov, D.A. Shatagin, M.S. Anosov, D.A. Ryabov. [Assessment of Cold Resistance of 09G2S Steel Obtained Using 3D Printing Technology by Electric Arc Surfacing at a CNC Machine]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 2, pp. 16-23 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-16-23.