

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

Иванов Ю. Ф., Громов В. Е., Юрьев А. Б., Миненко С. С., Чапайкин А. С., Литовченко И. Ю., Семин А. П.
Структурно-фазовые изменения наплавки быстрорежущей стали при отпуске и электронно-пучковой обработке

.....	5
<i>Козлова И. Р., Васильева Е. А., Маркова Ю. М.</i> Повышение прочности морских титановых сплавов за счет твердорастворного и структурного упрочнения	17
<i>Ганиев И. Н., Алиев Ф. А., Исмонов Р. Д., Сафаров А. М., Ходжаназаров Х. М.</i> Теплофизические свойства и термодинамические функции алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (алдрей), легированного таллием	26

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Сивакова А. О., Семенчук И. Е., Карпов А. В., Сычев А. Е. Термоэлектрические свойства сплава на основе системы Al–Mn–Si, полученного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, совмещенного с прессованием

Мазеева А. К., Ким А. Э., Волокитина Е. В., Назаров Д. В., Старицын М. В., Масайло Д. В. Магнитные свойства порошков сплавов системы Co–Ni–Al с близким к экваторному составом, полученных методом механического легирования

Бобырь В. В., Князюк Т. В., Мухамедзянова Л. В., Старицын М. В., Кузнецов П. А. Исследование влияния параметров прямого лазерного выращивания на структуру и свойства высокопрочной нержавеющей стали марки 08X14HДЛ

ПОЛИМЕРНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Жаров В. Е., Седакова Е. Б., Скотникова М. А., Ли С., Наумов А. Н. Исследование возможности создания триботехнически эффективного нанокompозита на основе полиэфирэфиркетона с дисперсным наполнителем низкой износостойкости

Андрианова К. А., Никитин В. С., Амиров Р. Р., Антипин И. С., Амирова Л. М. Углепластик с градиентом состава матрицы на основе бензоксазин-фталонитрильных композиций

Куршев Е. В., Лонский С. Л., Егоров Ю. А., Зеленина И. В. Исследование изменений микроструктуры и химического состава полиимидного углепластика после воздействия имитируемых эксплуатационных факторов

СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Мамадалиев Р. А., Плеханов В. И., Овсянников В. Е. Влияние многопроходной сварки на химический состав, структуру и свойства соединений из аустенитных сталей

Голиков Н. И., Сараев Ю. Н., Сидоров М. М. Исследования перспективных сварочных технологий, материалов и оборудования на основе натуральных климатических испытаний в условиях естественного холода

КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ

Вагапов Р. К., Ибатуллин К. А., Гайзуллин А. Д., Федотов Д. С. О коррозионном воздействии условий переменного смачивания жидкостью на поверхность трубных сталей газопроводов в присутствии CO₂

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

Ильин А. В., Лаврентьев А. А., Мизецкий А. В., Садкин К. Е. Об использовании локального критерия хрупкого разрушения для связи трещиностойкости высокопрочных сталей с результатами испытаний образцов с концентратором и структурными характеристиками материала

Виленский О. Ю., Осетров Д. Л., Повереннов Е. Ю. Эффективная методика оценки высоко- и низкотемпературной усталости элементов конструкций

ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ

Косарина Е. И., Осияненко Н. В., Демидов А. А., Смирнов А. В. Оценка пористости в отливках из сплава силумин методом рентгеновской компьютерной томографии

XX КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ (КМУС-2024)

Грибанова В. Б., Мельников П. В. Особенности систем легирования порошковых проволок для сварки высокопрочных судостроительных сталей в защитных газах

Осипович К. С., Семенчук В. М., Чумаевский А. В., Рубцов В. Е., Колубаев Е. А. Особенности организации структуры и свойств при получении биметаллических плоских и цилиндрических образцов системы медь – нержавеющая сталь методом проволоочной электронно-лучевой аддитивной технологии

Хасанова Л. М., Перрен А. А., Трясунов В. С. О связи физических и акустических характеристик полимерных композиционных материалов, применяемых в изделиях и конструкциях судостроения

Перечень статей, опубликованных в научно-техническом журнале «Вопросы материаловедения» в 2024 году

Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов

..... 212

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАПЛАВКИ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ ПРИ ОТПУСКЕ И ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ

Ю. Ф. ИВАНОВ¹, д-р физ.-мат. наук, В. Е. ГРОМОВ², д-р физ.-мат. наук,
А. Б. ЮРЬЕВ², д-р техн. наук, С. С. МИНЕНКО², А. С. ЧАПАЙКИН²,
И. Ю. ЛИТОВЧЕНКО³, д-р физ.-мат. наук, А. П. СЕМИН², канд. техн. наук

¹ ФГБУН «Институт сильноточной электроники СО РАН», 634055, Томск, пр. Академический, 2/3.
E-mail: yufi55@mail.ru

² ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», Новокузнецк,
654007, ул. Кирова, 42. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

³ ФГБОУ ВО «Институт физики прочности и материаловедения СО РАН»,
634055, Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: litovchenko@spti.tsu.ru

Поступила в редакцию 18.06.2024

После доработки 1.07.2024

Принята к публикации 5.07.2024

При использовании методов просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазового и рентгеноструктурного анализов проведены исследования структуры и фазового состава наплавки быстрорежущей стали Р2М9 на среднеуглеродистую сталь 30ХГСА после термической обработки, которая заключалась в трехкратном высокотемпературном отпуске с последующим облучением импульсными электронными пучками. Основной фазой в наплавленном металле в исходном состоянии и после термической обработки является твердый раствор на основе α -железа, в незначительном количестве (3–5 мас. %) присутствует γ -фаза. Параметр кристаллической решетки обеих фаз снижается после отпуска. Облучение наплавленного слоя электронными пучками сопровождается увеличением параметра кристаллической решетки α -фазы и его снижением для γ -фазы. Обсуждены причины наблюдаемых закономерностей. Установлено, что наплавленный слой характеризуется наличием карбидного каркаса, содержащего карбиды сложного состава MoC , Me_6C , Me_{23}C_6 , Me_7C_3 , который не разрушается после отпуска и электронно-пучковой обработки. Основной фазой, формирующей каркас, является карбид состава Me_6C , а после отпуска и электронно-пучковой обработки – MoC . Сформированная при наплавке мартенситная структура содержит наноразмерные включения второй фазы состава MoC , Mo_2C , Me_6C размером 20–45 нм, расположенные в объеме и по границам пластин мартенсита. Их объемная доля снижается до 19 мас. % после отпуска и дополнительного облучения электронными пучками.

Ключевые слова: наплавка, быстрорежущая сталь, электронная микроскопия, термическая обработка, импульсный электронный пучок, структура, фазы

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-5-16

ЛИТЕРАТУРА

1. Громов В. Е., Чапайкин А. С., Невский С. А. Структура, свойства и модели быстрорежущей стали после отпуска и электронно-пучковой обработки. – Новокузнецк: Полиграфист, 2024. – 171 с.
2. Ivanov Yu. F., Gromov V. E., Potekaev A. I., Guseva T. P., Chapaikin A. S., Vashchuk E. S. Structure and properties of R18U surfacing of high-speed steel after its high tempering // Russian Physics Journal. – 2023. – V. 66, N 7. – P. 731–739. DOI: 10.1007/s11182-023-02999-w
3. Rakhadilov B. K., Zhurerova L. G., Scheffler M., Khassenov A. K. Change in high temperature wear resistance of high speed steel by plasma nitriding // Bulletin of the Karaganda University. Physics Series. – 2018. – N 3 (91). – P. 59–65.
4. Rakhadilov B. K., Wieleba W., Kilyshkanov M. K., Kenesbekov A. B., Maulet M. Structure and phase composition of highspeed steels // Bulletin of the Karaganda University. Physics Series. – 2020. – N 2 (98). – P. 83–92.

5. Барчуков Д. А., Цыгвинцев А. В., Афанасьева Л. Е. Особенности формирования структуры и свойств быстрорежущей стали при импульсно-дуговой наплавке // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2019. – № 4 (4). – С. 16–21.
6. Мозговой И. В., Шнейдер Е. А. Наплавка быстрорежущей стали. – Омск: ОмГТУ, 2016. – 200 с.
7. Wu W., Chen W., Yang S., Lin Y., Zhang S., Cho T.-Y., Lee G.H., Kwon S.-Ch. Design of AlCrSiN multilayers and nanocomposite coating for HSS cutting tools // Appl. Surf. Sci. – 2015. – V. 351. – P. 803–810.
8. Cho I. S., Amanov A., Kim J. D. The effects of AlCrN coating, surface modification and their combination on the tribological properties of high speed steel under dry conditions // Tribol. Int. – 2015. – V. 81. – P. 61–72.
9. Kottfer D., Ferdinandy M., Kaczmarek L., Maňková I., Beňo J. Investigation of Ti and Cr based PVD coatings deposited onto HSS Co 5 twist drills // Appl. Surf. Sci. – 2013. – V. 282. – P. 770–776.
10. Gerth J., Wiklund U. The influence of metallic interlayers on the adhesion of PVD TiN coatings on high-speed steel // Wear. – 2008. – V. 264. – P. 885–892.
11. Chaus A. S., Rudnitskii F. I. Structure and Properties of Cast Rapidly Cooled High-Speed Steel R6M5 // Metal. Science and Heat Treatment. – 2003. – V. 45. – P. 157–162.
12. Нефедьев С. П., Емелюшин А. Н. Плазменное упрочнение поверхности. – Старый Оскол: Изд-во ТНТ, 2021. – 156 с.
13. Геллер Ю. А. Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1983. – 527 с.
14. Colaço R., Gordo E., Ruiz-Navas E. M., Otasevic M., Vilar R. A comparative study of the wear behaviour of sintered and laser surface melted AISI M42 high speed steel diluted with iron // Wear. – 2006. – V. 260. – P. 949–956.
15. Kaç S., Kusiński J. SEM and TEM microstructural investigation of high-speed tool steel after laser melting // Mater. Chem. Phys. – 2003. – V. 81. – P. 510–512.
16. Ivanov Yu. F., Gromov V. E., Potekaev A. I., Chapaikin A. S., Semin A. P., Guseva T. P. Electron microscopy of high-speed steel/30HGSA steel interface // Russian Physics Journal. – 2024. – V. 67, N 1. – P. 24–33.
17. Малушин Н. Н., Валуев Д. В. Обеспечение качества деталей металлургического оборудования на всех этапах их жизненного цикла путем применения плазменной наплавки теплостойкими сталями. – Томск: Изд-во НТЛ, 2013. – 358 с.
18. Малушин Н. Н., Валуев Д. В., Осетковский В. Л., Солодский С. А. Технологии наплавки деталей горно-металлургического комплекса теплостойкими сталями высокой твердости: – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – 212 с.
19. Нефедьев С. П., Емелюшин А. Н. Влияние азота на формирование структуры и свойств плазменных покрытий типа 10P6M5 // Вестник Югорского государственного университета. – 2021. – Вып. 3 (62). – С. 33–45.
20. Почетуха В. В., Бащенко Л. П., Гостевская А. Н., Будовских Е. А., Громов В. Е., Чапайкин А. С. Структура и свойства плазменных покрытий из быстрорежущей стали после высокотемпературного отпуска // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2023. – № 3 (45). – С. 30–38. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-30-38](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-30-38)
21. Gromov V. E., Kobzareva T. Yu., Ivanov Yu. F., Budovskikh E. A., Bashchenko L. P. Surface Modification of Ti Alloy by Electro-explosive Alloying and Electron-Beam Treatment // AIP Conference Proceedings. – 2016. – V. 1698. – N 030006.
22. Gromov V. E., Ivanov Yu. F., Glezer A. M., Kormyshev V. E., Konovalov S. V. Electron-Beam Modification of a Surface Layer Deposited on Low-Carbon Steel by Means of Arc Spraying // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2017. – V. 81, N 1. – P. 1353–1359.
23. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменной обработке / Под ред. Н. Н. Ковалея, Ю. Ф. Иванова. – Томск: НТЛ, 2016. – 298 с.
24. Egerton F. R. Physical Principles of Electron Microscopy. – Basel: Springer International Publishing, 2016. – 196 p.
25. Kumar C. S. S. R. Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials. – New York: Springer, 2014. – 717 p.
26. Carter C. B., Williams D. B. Transmission Electron Microscopy. – Berlin: Springer International Publishing, 2016. – 518 p.

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ МОРСКИХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ЗА СЧЕТ ТВЕРДОРАСТВОРНОГО И СТРУКТУРНОГО УПРОЧНЕНИЯ

И. Р. КОЗЛОВА, канд. техн. наук, Е. А. ВАСИЛЬЕВА, Ю. М. МАРКОВА

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49.
E-mail: mail@crism.ru

Поступила в редакцию 26.06.2024

После доработки 1.10.2024

Принята к публикации 1.10.2024

Исследованы пути повышения прочности опытного высоколегированного сплава титана, имеющего в структуре при комнатной температуре термически нестабильную β -фазу. Показано, что твердорастворное и структурное упрочнение приводит к изменению фазового и внутрискруктурного состояния исследуемого материала, что, в свою очередь, обеспечивает повышение прочностных характеристик. При этом в зависимости от режима отжига обеспечивается повышение условного предела текучести от 1000 до 1200 МПа без значительного снижения вязкопластических свойств.

Ключевые слова: морские титановые сплавы, распад метастабильных фаз, гетерогенизация структуры, механические свойства, упрочняющая термическая обработка, микроструктура

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-17-25

ЛИТЕРАТУРА

1. Чечулин Б. Б., Ушков С. С., Суздалев И. В., Гольдфайн В. Н., Хесин Ю. Д., Филин Ю. А., Федоренко З. К. Титановые сплавы в судостроении / Под ред. И. В. Горынина. – ЦНИИ «Румб», 1990. – 217 с.
2. Ильин А. А., Колачев Б. А., Полькин И. С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справочник. – М.: ВИЛС–МАТИ, 2009. – 520 с.
3. Горынин И. В., Ушков С. С., Хесин Ю. Д. Научные основы создания свариваемых титановых сплавов морского назначения // Вопросы материаловедения. – 1999. – № 3 (20). – С. 115–121.
4. Горынин И. В., Ушков С. С., Хатунцев А. Н., Лошакова Н. И. Титановые сплавы для морской техники. – СПб.: Политехника, 2007. – 387 с.
5. Глазунов С. Г., Моисеев В. Н. Конструкционные титановые сплавы. – М.: Металлургия, 1974. – 367 с.
6. Козлова И. Р. Взаимосвязь структуры и свойств высокопрочных морских титановых сплавов при повышенных температурах применительно к изделиям энергетического оборудования // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб.: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 2016. – 28 с.
7. Мусиенко А. Ю., Леонов В. П., Козлова И. Р., Паноцкий Д. А. Компьютерное моделирование реальной структуры титановых сплавов при исследовании процессов деформации и разрушения. Ч. 1: Постановка задачи и основные положения // Титан. – 2014. – № 3 (45). – С. 45–54.
8. Полькин И. С. Упрочняющая термическая обработка титановых сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 96 с.
9. Семенова Н. М. Электронно-микроскопическое исследование структуры титановых сплавов с метастабильной бета-фазой // Автореф. дис. ... канд. техн. наук, 1972. – 18 с.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОВОДНИКОВОГО СПЛАВА E-ALMGSI (АЛДРЕЙ), ЛЕГИРОВАННОГО ТАЛЛИЕМ

И. Н. ГАНИЕВ, д-р хим. наук, акад. НАН Таджикистана, Ф. А. АЛИЕВ, канд. техн. наук,
Р. Д. ИСМОНОВ, канд. техн. наук, А. М. САФАРОВ, д-р техн. наук,
Х. М. ХОДЖАНАЗАРОВ, канд. техн. наук

Поступила в редакцию 13.05.2024

После доработки 22.05.2024

Принята к публикации 17.07.2024

В настоящее время алюминий и его сплавы в ряде областей успешно вытесняют традиционно применяемые металлы и сплавы. Одним из перспективных направлений использования алюминия является электротехническая промышленность. Так, проводниковый алюминиевый сплав типа E-AlMgSi (алдрей – Aldrey) отличается высокой прочностью и хорошей пластичностью. Этот сплав при соответствующей термической обработке приобретает высокую электропроводность. Изготовленные из него провода используются почти исключительно для воздушных линий электропередачи. Представлены результаты исследования температурной зависимости теплоемкости, коэффициента теплоотдачи и термодинамических функций алюминиевого сплава E-AlMgSi (алдрей) с таллием. Исследования проведены в режиме «охлаждения». Показано, что с ростом температуры значения теплоемкости, коэффициента теплоотдачи, энтальпии и энтропии сплава E-AlMgSi (алдрей) с таллием увеличиваются, а значение энергии Гиббса уменьшается. При добавке таллия до 1 мас. % снижаются теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, энтальпия и энтропия исходного сплава и повышается энергия Гиббса.

Ключевые слова: алюминиевый сплав E-AlMgSi (алдрей), таллий, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, режим «охлаждения», энтальпия, энтропия, энергия Гиббса

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-26-36

ЛИТЕРАТУРА

1. Усов В. В., Займовский А. С. Проводниковые, реостатные и контактные материалы. Материалы и сплавы в электротехнике. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1957. – Т. 2. – 184 с.
2. Алюминиевые сплавы: свойства, обработка, применение / Под ред. Л. Х. Райтбарга. – М.: Металлургия, 1979. – 679 с.
3. Промышленные алюминиевые сплавы. Справочник / С. Г. Алиева, М. Б. Альтман, С. М. Амбарцумян и др. / Под ред. Ф. И. Квасова, И. Н. Фридляндера. – М.: Металлургия, 1984. – 528 с.
4. Белецкий В. М., Кривов Г. А. Алюминиевые сплавы. Состав, свойства, технология, применение / Под ред. И. Н. Фридляндера. – Киев: КОМИТЕХ, 2005. – 365 с.
5. Chlistovsky R. M., Heffernan P. J., DuQuesnay D. L. Corrosion-fatigue behaviour of 7075-T651 aluminum alloy subjected to periodic overloads // Internat. J. Fatigue. – 2007. – V. 29, N 9–11. – P. 1941–1949.
6. Луц А. Р., Суслина А. А. Алюминий и его сплавы. – Самара: Самарский гос. тех. ун-т, 2013. – 81 с.
7. Сафаров А. М., Самиев К. А. Тепловые и теплофизические свойства алюминиево-бериллиевых сплавов с редкоземельными металлами // Изв. Академии наук Республики Таджикистан. Отд. физ.-мат., геол., хим. и техн. наук. – 2007. – № 1. – С. 27–35.
8. Исмонов Р. Д. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций сплава АБ1 (Al + 1%Be), модифицированного галлием // Политехнический вестник. Сер. «Инженерные исследования». – 2021. – № 3 (53). – С. 31–34.
9. Ganiev I. N., Mulloeva N. M., Nizomov Z., Obidov F. U., Ibragimov N.F. Temperature dependence of the specific heat and thermodynamic functions of alloys of the Pb–Ca system // High Temperature. – 2014. – V. 52, Is. 1. – P. 138–140.
10. Худойбердизода С. У., Ганиев И. Н., Отаджонов С. Э., Эшов Б. Б., Якубов У. Ш. Влияние меди на теплоемкость и изменения термодинамических функций свинца // Теплофизика высоких температур. – 2021. – Т. 59, № 1. – С. 55–61.
11. Исмонов Р. Д., Ганиев И. Н., Одиназода Х. О., Сафаров А. М., Иброхимов Н. Ф. Удельная теплоемкость и изменение термодинамических функций алюминиевого сплава АБ1 (Al + 1%Be) // Политехнический вестник. Сер. «Инженерные исследования». – 2019. – № 1 (45). – С. 90–96.

12. Ганиев И. Н., Алиев Ф. А., Одиназода Х. О., Сафаров А. М., Джайлоев Дж. Х. Теплоемкость и термодинамические функции алюминиевого проводников сплава E-AlMgSi (алдрей), легированного галлием // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 219–227.
13. Исмонов Р. Д., Ганиев И. Н., Одиназода Х. О., Сафаров А. М., Алиев Ф. А. Влияние добавок индия на коррозионную устойчивость, теплоемкость и изменений термодинамических функции алюминиевого сплава АБ1 // Вестник Саратовского гос. тех. ун-та. – 2022. – № 3 (94). – С. 81–91.
14. Росточкин В. И. Исследование зависимости теплоемкости металлов от температуры // Физическое образование в вузах. – 2011. – Т. 17, № 3. – С. 54–65.
15. Киров С. А., Козлов А. В., Салецкий А. М., Харабадзе Д. Э. Измерение теплоемкости и теплоты плавления методом охлаждения. Учебное пособие – М.: ООП Физический факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, 2012. – 23 с.
16. Рогачев Н. М., Гусева С. И. Определение удельной теплоемкости твердых тел: Метод. указания к лаборатор. работе №1–23. – Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева, 2012. – 17 с.
17. Тарсин А. В., Костерин К. С. Определение теплоемкости металлов методом охлаждения. Лабораторные занятия – Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2014. – 98 с.
18. Менлиев Ш., Гуллыева А., Спиридонов А. Определение теплоемкости металлов методами нагрева и охлаждения // Сб. научн. трудов студентов. – Элиста, 2020. – С. 119–121.
19. Гусейнов Ф. Н., Сеидзаде А. Э., Юсибов Ю. А., Бабанлы М. Б. Термодинамические свойства соединения SnSb_2Te_4 // Неорганические материалы. – 2017. – Т. 53, № 4. – С. 347–350.
20. Бодряков В. Ю. О корреляции температурных зависимостей теплового расширения и теплоемкости вплоть до точки плавления тугоплавкого металла: молибден // Теплофизика высоких температур. – 2014. – Т. 52, № 6. – С. 863–868.
21. Мальцев М. В. Модификаторы структуры металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1964. – 238 с.
22. Алиев Ф. А., Ганиев И. Н., Сафаров А. М. Свойства алюминиевого сплава E-AlMgSi (алдрей) с элементами подгруппы галлия. – Душанбе: ТТУ им. М. С. Осими, 2023. – 152 с.
23. Исмонов Р. Д., Одиназода Х. О., Сафаров А. М. Алюминиевый сплав АБ1 с элементами подгруппы галлия. – Душанбе: ТТУ им. М. С. Осими, 2023. – 152 с.

УДК 621.762.4:537.322.11

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ AL–MN–SI, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА, СОВМЕЩЕННОГО С ПРЕССОВАНИЕМ

А. О. СИВАКОВА, И. Е. СЕМЕНЧУК, А. В. КАРПОВ, А. Е. СЫЧЕВ, канд. техн. наук
ФГБУН «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им. А. Г. Мерджанова РАН», 142432, Московская обл., Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 8.

E-mail: sivakovaalina@yandex.ru

Поступила в редакцию 4.07.2024

После доработки 16.07.2024

Принята к публикации 2.09.2024

Методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, совмещенного с прессованием, впервые получен термоэлектрический сплав, содержащий фазу $\text{Mn}_5(\text{Si}_{2,5}\text{Al}_{0,5})$. Микроструктура сплава представлена зернами размером до 10 мкм. Рентгенофазовый анализ показал наличие следующих фаз в синтезированном образце: $\text{Mn}_5(\text{Si}_{2,5}\text{Al}_{0,5})$, TiC и SiO_2 . Присутствие фаз TiC и SiO_2 связано с особенностями синтеза образца методом СВС-прессования. Проведено исследование термоэлектрических характеристик материала. Значение коэффициента Зеебека при комнатной температуре составляет около 8 мкВ/К и достигает

широкого максимума 9–10 мкВ/К при $T = 360$ К, а максимальная величина удельного электросопротивления $1,5 \cdot 10^{-2}$ Ом·см достигается при комнатной температуре.

Ключевые слова: СВС-прессование, формирование микроструктуры, интерметаллиды, термоэлектрический сплав, коэффициент Зеебека, электросопротивление

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-37-45

ЛИТЕРАТУРА

1. Skokov K. P., Gutfleisch O. Heavy rare earth free, free rare earth and rare earth free magnets – Vision and reality // *Scr. Mater.* – 2018. – V. 154. – P. 289–294. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.01.032>
2. Berkowitz A. E., Livingston J. D., Walter J. L. Properties of Mn–Al–C magnets prepared by spark erosion and other rapid solidification techniques // *J. Appl. Phys.* – 1984. – V. 55. – P. 2106–2108. <https://doi.org/10.1063/1.333579>
3. Chaturvedi A., Yaqub R., Baker I. Microstructure and magnetic properties of bulk nanocrystalline MnAl // *Metals.* – 2014. – V. 4. – P. 20–27. <https://doi.org/10.3390/met4010020>
4. Jian H., Skokov K. P., Gutfleisch O. Microstructure and magnetic properties of Mn–Al–C alloy powders prepared by ball milling // *J. Alloys Compd.* – 2015. – V. 622. – P. 524–528. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.10.138>
5. Bittner F., Freudenberger J., Schultz L., Woodcock T. G. The impact of dislocations on coercivity in L10–MnAl // *J. Alloys Compd.* – 2017. – V. 704. – P. 528–536. <https://doi.org/10.1063/1.5130064>
6. Thielsch J., Bittner F., Woodcock T. G. Magnetization reversal processes in hot-extruded τ -MnAl–C // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2017. – V. 426. – P. 25–31. DOI:10.1016/j.jmmm.2016.11.045
7. Bance S., Bittner F., Woodcock T. G., Schultz L., Schrefl T. Role of twin and anti-phase defects in MnAl permanent magnets // *Acta Mater.* – 2017. – V. 131. – P. 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.04.004>
8. Bittner F., Schultz L., Woodcock T. G. The role of the interface distribution in the decomposition of metastable L10–Mn₅₄Al₄₆ // *J. Alloys Compd.* – 2017. – V. 727. – P. 1095–1099. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.197>
9. Madugundo R., Hadjipanayis G. C. Anisotropic Mn–Al–(C) hot-deformed bulk magnets // *J. Appl. Phys.* – 2016. – V. 119. – P. 013904. <https://doi.org/10.1063/1.4939578>
10. Levashov E. A., Bogatov Y. V., Rogachev A. S., Pityulin A. N., Borovinskaya I. P., Merzhanov A. G. Specific features of structure formation of synthetic hard tool materials in the SHS compacting process // *J. Eng. Phys. and Thermophys.* – 1992. – V. 63. – P. 1091–1105. <https://doi.org/10.1007/BF00853505>
11. Development of an Al–Mn–Si-Based Alloy with an Improved Quasicrystalline-Forming Ability / B. Leskovar, Z. Samardžija, M. Koblar et al. // *JOM.* – 2020. – V. 72. – P. 1533–1539. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03702-6>
12. Friesa S. G., Jantzen T. Compilation of 'CALPHAD' formation enthalpy data. Binary intermetallic compounds in the COST 507 Gibbsian database // *Thermochimica Acta.* – 1998. – V. 314. – P. 23–33. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(97\)00478-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(97)00478-4)
13. Сивакова А. О., Лазарев П. А., Боярченко О. Д., Сычев А. Е., Сычев Г. А. Особенности формирования γ -фазы Al₉Mn₃Si в условиях высокотемпературного синтеза в системе Al–Mn–Si: горение, структуро- и фазообразование // *ФГВ.* – 2024. – № 5. DOI: 10.15372/FGV2023.9355
14. Shcherbakov V. A., Gryadunov A. N., Alymov M. I. Synthesis and Characteristics of the B₄C–ZrB₂ Composites // *Lett. Mater.* – 2017. – V. 7(4). – P. 398–401. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2017-4-398-40115>
15. Belov N. A., Eskin D. G., Aksenov A. A. Chapter 1: Alloys of the Al–Fe–Mn–Si System // *Multicomponent Phase Diagrams: Applications for Commercial Aluminum Alloys.* – Amsterdam; Boston: Elsevier Science. – 2005. – P. 1–46. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044537-3.X5000-8>
16. Карпов А. В., Сычев А. Е., Сивакова А. О. Устройство для измерения коэффициента Зеебека термоэлектрических материалов в диапазоне температур 300–800 К // *Измерительная техника.* – 2023. – № 8. – С. 67–72. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-8-67-72>
17. Karpov A. V., Morozov Y. G., Bunin V. A., Borovinskaya I. P. Effect of Ytria additions on the electrical conductivity of SHS nitride ceramics // *Inorganic Materials.* – 2002. – V. 38. – P. 631–634. <https://doi.org/10.1023/A:1015881922939>
18. Program for Thermodynamics Equilibrium Calculations "THERMO". <https://ism.ac.ru/thermo/>

19. Диаграммы состояния двойных металлических систем / Под ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996–2000.
20. Silva M. R., Brown P. J., Forsyth J. B. // J. Phys.: Cond. Matt. – 2002. – V. 14. – P. 8707. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/14/37/307>
21. Bie L., Chen X., Liu P., Zhang T., Xu X. Morphology Evolution of Mn₅Si₃ Phase and Effect of Mn content on Wear Resistance of Special Brass // Metals and Materials International. – 2020. – V. 26. – P. 431–443. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00243-0>
22. Isothermal section at 950°C, Figure 8 from Al–Mn–Si Ternary Phase Diagram Evaluation. – Springer Materials. https://materials.springer.com/msi/phase-diagram/docs/sm_msi_r_10_014597_01_full_LnkDia1
23. Коуров Н. И., Марченков В. В., Королев А. В., Сташкова Л. А., Емельянова С. М., Weber H. W. Особенности свойств полуметаллических ферромагнитных сплавов Гейслера: Fe₂MnAl, Fe₂MnSi и Co₂MnAl // Физика твердого тела. – 2015. – Т. 57, вып. 4. – С. 684–691. DOI: 10.31857/S0015323023600624
24. Березовский В. В., Базалева К. О., Калашников В. С. Зависимость удельного электросопротивления технически чистого титана от температуры после интенсивной пластической деформации // Труды ВИАМ. – 2015. – № 3. – С. 34–37. [Dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2015-0-3-5-5](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-3-5-5)
25. Гантмахер В. Ф., Электроны в неупорядоченных средах. – М.: Физматлит, 2005. – С. 232.
26. Mooij J. H. Electrical conduction in concentrated disordered transition metal alloys // Physica Status Solidi (a). – 1973. – V. 17, Is. 2. – P. 521–530. DOI:10.1002/pssa.2210170217

УДК 621.762.22:537.622

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОРОШКОВ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ CO–Ni–Al С БЛИЗКИМ К ЭКВИАТОМНОМУ СОСТАВОМ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МЕХАНИЧЕСКОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

А. К. МАЗЕЕВА¹, канд. техн. наук, А. Э. КИМ¹, Е. В. ВОЛОКИТИНА¹,
Д. В. НАЗАРОВ², канд. хим. наук, М. В. СТАРИЦЫН³, Д. В. МАСАЙЛО¹, канд. техн. наук

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
191251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: mazeeva_ak@spbstu.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Россия, Санкт-Петербург,
Университетская набережная, 7–9. E-mail: denis.nazarov@spbu.ru

³ НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,
ул. Шпалерная, 49. E-mail: npk3@crism.ru

Поступила в редакцию 27.03.2023

После доработки 22.05.2024

Принята к публикации 4.07.2024

Приведены результаты исследования структуры и магнитных характеристик порошков сплавов системы Co–Ni–Al составов Co₃₇Ni₃₆Al₂₇ и Co₃₂Ni₃₉Al₂₉, полученных методом механического легирования в планетарной мельнице. Изучено влияние технологических режимов механического легирования на элементный состав результирующих порошков, их намагниченность насыщения и коэрцитивную силу. Показана эффективность применения механического легирования для получения новых магнитотвердых сплавов на основе системы Co–Ni–Al.

Ключевые слова: порошковые материалы, механическое легирование, магнитные материалы, умные материалы, аддитивные технологии

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-46-58

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang C., Li X., Jiang L., Tang D., Xu H., Zhao P., Fu J., Zhou Q., Chen Y. 3D Printing of Functional Magnetic Materials: From Design to Applications // *Adv. Funct. Mater.* – 2021. – V. 31. <https://doi.org/10.1002/adfm.202102777>
2. Mazeeva A., Masaylo D., Razumov N., Konov G., Popovich A. 3D Printing Technologies for Fabrication of Magnetic Materials Based on Metal–Polymer Composites // *A Review, Materials (Basel)*. – 2023. – V. 16. <https://doi.org/10.3390/ma16216928>
3. Cao X., Xuan S., Sun S., Xu Z., Li J., Gong X. 3D Printing Magnetic Actuators for Biomimetic Applications // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2021. – V. 13. – P. 30127–30136. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c08252>
4. Qi S., Guo H., Fu J., Xie Y., Zhu M., Yu M. 3D printed shape-programmable magneto-active soft matter for biomimetic applications // *Compos. Sci. Technol.* – 2020. – V. 188. – P. 107973. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107973>
5. Huber C., Abert C., Bruckner F., Groenefeld M., Muthsam O., Schuschnigg S., Sirak K., Thanhoffer R., Teliban I., Vogler C., Windl R., Suess D. 3D print of polymer bonded rare-earth magnets, and 3D magnetic field scanning with an end-user 3D printer // *Appl. Phys. Lett.* – 2016. – V. 109. <https://doi.org/10.1063/1.4964856>
6. Shen A., Peng X., Bailey C. P., Dardona S., Ma A.W.K. 3D printing of polymer-bonded magnets from highly concentrated, plate-like particle suspensions // *Mater. Des.* – 2019. – V. 183. – P. 108133. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108133>
7. Shen A., Bailey C. P., Ma A. W. K., Dardona S. UV-assisted direct write of polymer-bonded magnets // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2018. – V. 462. – P. 220–225. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.03.073>
8. Huber C., Mitterramskogler G., Goertler M., Teliban I., Groenefeld M., Suess D. Additive manufactured polymer-bonded isotropic ndfeb magnets by stereolithography and their comparison to fused filament fabricated and selective laser sintered magnets, *Materials (Basel)*. – 2020. – V. 13. – P. 1–8. <https://doi.org/10.3390/MA13081916>
9. Urban N., Kuhl A., Glauche M., Franke J. Additive Manufacturing of Neodymium–Iron–Boron Permanent Magnets // *Proc. 8th Int. Electr. Drives Prod. Conf. EDPC 2018 – 2019*. – P. 2–6. <https://doi.org/10.1109/EDPC.2018.8658348>
10. Li L., Post B., Kunc V., Elliott A. M., Paranthaman M.P. Additive manufacturing of near-net-shape bonded magnets: Prospects and challenges // *Scr. Mater.* – 2017. – V. 135. – P. 100–104. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.12.035>
11. Поварова К. Б., Ломберг Б. С., Филин С. А., Казанская Н. К., Школьников Д. Ю., Беспалова М. Д. Структура и свойства ($\beta+\gamma$)-сплавов системы Ni–Al–Co // *Металлы*. – 1994. – V. 77–81
12. Kositsyna I. I., Zavalishin V. A. Study of Co–Ni–Al alloys with magnetically controlled shape memory effect // *Mater. Sci. Forum.* – 2010. – V. 635. – P. 75–80. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.635.75>
13. Valiullin A. I., Kositsin S. V., Kositsina I. I., Kataeva N. V., Zavalishin V. A. Study of ferromagnetic Co–Ni–Al alloys with thermoelastic L10 martensite, *Mater. Sci. Eng. A*. – 2006. – V. 438–440. – P. 1041–1044. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.01.102>
14. Tanaka Y., Oikawa K., Sutou Y., Omori T., Kainuma R., Ishida K. Martensitic transition and superelasticity of Co–Ni–Al ferromagnetic shape memory alloys with $\beta + \gamma$ two-phase structure // *Mater. Sci. Eng. A*. – 2006. – V. 438–440. – P. 1054–1060. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.05.021>
15. Morito H., Oikawa K., Fujita A., Fukamichi K., Kainuma R., Ishida K. Large magnetic-field-induced strain in Co–Ni–Al single-variant ferromagnetic shape memory alloy // *Scr. Mater.* – 2010. – V. 63. – P. 379–382. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.04.026>
16. Su J. J., Mo K. X., Zhou L. Effects of Minor Mn Replace of Al on Martensitic and Magnetic Transition in the Co₃₈Ni₃₄Al_{28-x}Mn_x Alloys // *J. Supercond. Nov. Magn.* – 2020. – V. 33. – P. 835–840. <https://doi.org/10.1007/s10948-019-05272-9>
17. Ju J., Lou S., Yan C., Yang L., Li T., Hao S., Wang X., Liu H. Microstructure, Magnetism and Magnetic Field Induced-Strain in Er-Doped Co–Ni–Al Polycrystalline Alloy // *J. Electron. Mater.* – 2017. – V. 46. – P. 2540–2547. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5339-6>
18. Hossain M. S., Ghosh T., Kanth, B. R. Mukhopadhyay P. K. Effect of Annealing on the Structural and Magnetic Properties of CoNiAl FSMA, *Cryst. Res. Technol.* – 2019. – V. 54. – P. 1–6. <https://doi.org/10.1002/crat.201800153>
19. Saito T. Magnetic properties of Co–Al–Ni melt-spun ribbon // *J. Appl. Phys.* – 2006. – V. 100. – P. 053916. <https://doi.org/10.1063/1.2345577>

20. Arputhavalli G. J., Agilan S., Saravanan P. Influence of sintering temperature on microstructure, magnetic properties of vacuum sintered Co–(Zn)–Ni–Al alloys // *Mater. Lett.* – 2018. – V. 233. – P. 177–180. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.08.152>
21. Сычев А. Е., Басурина М. Л., Боярченко О. Д., Лазарев П. А., Морозов Ю. Г., Сивакова А. О. Особенности структуро- и фазообразования в системе Ni–Al–Co в процессе СВС // *Неорганические материалы.* – 2023. – V. 59. – P. 733–739. <https://doi.org/10.31857/S0002337X23070151>
22. Mazeeva A. K., Kim A., Ozerskoi N. E., Shamshurin A. I., Razumov N. G., Nazarov D. V., Popovich A. A. Structure evolution of Ni₃₆Al₂₇Co₃₇ alloy in the process of mechanical alloying and plasma spheroidization // *Metals (Basel).* – 2021. – V. 11. <https://doi.org/10.3390/met11101557>
23. Mazeeva A. K., Kim A., Shamshurin A. I., Razumov N. G., Nazarov D. V., Borisov A. N., Popovich A. A. Effect of heat treatment on structure and magnetic properties of Ni₃₆Co₃₇Al₂₇ alloy produced by laser powder bed fusion // *J. Alloys Compd.* – 2023. – V. 938. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168461>
24. Kim A., Mazeeva A., Polozov I., Shamshurin A., Starikov K., Igoshin S., Ozerskoy N., Popovich A. Additive manufacturing of Ni₃₆Co₃₇Al₂₇ ferromagnetic shape memory material using mechanically alloyed plasma spheroidized powders // *30th Anniv. Int. Conf. Metall. Mater. Conf. Proc. "Met. 2021"*, 2021. – P. 958–963. <https://doi.org/10.37904/metal.2021.4241>
25. Ghasemi A., Zamani K., Tavoosi M., Gordani G.R. Enhanced Soft Magnetic Properties of CoNi–Based High Entropy Alloys // *J. Supercond. Nov. Magn.* – 2020. – V. 33. – P. 3189–3196. <https://doi.org/10.1007/s10948-020-05579-y>
26. Шелехов Е. В., Свиридова Т. А. Моделирование движения и разогрева шаров в планетарной мельнице. Влияние режимов обработки на продукты механоактивации смеси порошков Ni и Nb // *Материаловедение.* – 1999. – № 10. – С. 13–22

УДК 621.762.5:669.14.018.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ МАРКИ 08X14НДЛ

В. В. БОБЫРЬ, Т. В. КНЯЗЮК, канд. техн. наук, Л. В. МУХАМЕДЗЯНОВА, М. В. СТАРИЦЫН, П. А. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49. E-mail: mail@crism.ru

Поступила в редакцию 27.03.2024

После доработки 22.05.2024

Принята к публикации 4.07.2024

Аддитивной технологией прямого лазерного выращивания (ПЛВ) из порошка стали марки 08X14НДЛ изготовлена серия объемных образцов при различных технологических параметрах (мощность излучения, скорость сканирования и скорость подачи порошка). Проведены исследования макро- и микроструктуры, плотности и твердости образцов. Исследованы особенности структуры стали, изготовленной ПЛВ, по сравнению с литым металлом, идентифицированы неметаллические включения, установлен размер структурных оставляющих. Показано, что структуру, плотность и твердость стали можно варьировать, изменяя режимы ПЛВ, что является заделом для разработки промышленных аддитивных технологий.

Ключевые слова: аддитивные технологии, прямое лазерное выращивание, нержавеющие стали, 08X14НДЛ, пористость, микроструктура, мартенситные стали

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-59-68

ЛИТЕРАТУРА

1. Чашников Д. И., Володин В. И. Высокопрочные коррозионно-стойкие стали для гребных винтов // *Технология судостроения.* – 1985. – № 4. – С. 68–72.

2. ГОСТ 19200-80. Отливки из чугуна и стали: термины и определения дефектов. национальный стандарт Российской Федерации. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 12 с.
3. Цуканов В. В., Цыганко Л. К., Петров С. Н., Шандыба Г. А., Зиза А. И. Структурные превращения при термической обработке литейной коррозионно-стойкой стали мартенситного класса // *Металлообработка*. – 2016. – № 3 (93). – С. 42–48.
4. Shishkovsky I., Missemer F., Smurov I. Metal matrix composites with ternary intermetallic inclusions fabricated by laser direct energy deposition // *Composite Structures*. – 2018. – N 183. – P. 663–670.
5. Bobyr V., Kuznetsov P., Zhukov A., Shakirov I. Features of the formation of structure and geometry form during direct laser deposition of 321L stainless steel on solid of revolution using the LENS method // *Key Engineering Materials*. – 2021. – V. 887. – P. 309–318.
6. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. – М.: Техносфера, 2016. – 656 с.
7. Hofmeister W., Griffith M., Ensz M., Smugeresky J. Solidification in Direct Metal Deposition by LENS Processing // *JOM*. – 2001. – V. 53. – P. 30–34.
8. Dass, A., Moridi D. A. State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design // *Coatings*. – 2019. – V. 9 (7). – P. 418.
9. Turichin G. A., Klimova O. G., Zemlyakov E. V., Babkin K. D., Kolodyazhny D. Yu., Shamray F. A., Travyanov A. Ya., Petrovskiy P. V. Technological aspects of high speed direct laser deposition based on heterophase powder metallurgy // *Physics Procedia*. – 2015. – V. 78. – P. 397–406.
10. Turichin G. A., Somonov V. V., Babkin K. D., Zemlyakov E. V., Klimova O. G. High-Speed Direct Laser Deposition: Technology, Equipment and Materials // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – V. 125. – Art. 012009.
11. Туричин Г. А., Складар М. О., Бабкин К. Д., Климова-Корсмик О. Г., Земляков Е. В. Прямое лазерное выращивание – прорыв в изготовлении крупногабаритных изделий // *Аддитивные технологии*. – 2023. – № 2.
12. Aversa A., Marchese G., Bassini E. Directed Energy Deposition of AISI 316L Stainless Steel Powder: Effect of Process Parameters // *Metal*. – 2021. – N 11. – P. 932.
13. Исследование влияния параметров процесса лазерной наплавки порошка стали 316L на структуру и механические свойства образцов / И. С. Логинова, Д. П. Быковский, С. В. Adisa, А. Н. Солонин и др. // *Технология легких сплавов*. – 2016. – № 4. – С. 5–11.
14. Aboulkhair T., Maskery I., Tuck C., Ashcroft I., Everitt N. M. On the formation of AlSi10Mg single tracks and layers in selective laser melting: Microstructure and nano-mechanical properties // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2016. – V. 230. – P. 88–98.
15. Aversa A., Moshiri M., Librera E., Hadi M., Marchese G., Manfredi D., Lorusso M., Calignano F., Biamino S., Lombardi M., Pavese M. Single scan track analyses on aluminium based powders // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2018. – V. 255. – P. 17–25.
16. Patalas-Maliszewska Ju., Feldshtein E., Devojno O., Śliwa M., Kardapolava M., Lutsko N. Single Tracks as a Key Factor in Additive Manufacturing Technology – Analysis of Research Trends and Metal Deposition Behavior // *Materials*. – 2020. – V. 13 (5). – P. 1115.
17. Bosio F., Saboori A., Lacagnina A., Librera E., De Chirico M., Biamino S., Fino P., Lombardi M., Directed Energy Deposition of 316L Steel: Effect of Type of Powders and Gas Related Parameters // *Proceedings of the Euro PM 2018 Congress and Exhibition, 2018*. – P. 14–18.
18. Ramiro P., Ortiz M., Alberdi A., Lamikiz A. Strategy development for the manufacturing of multilayered structures of variable thickness of Ni-based alloy 718 by powder-fed directed energy deposition // *Metals*. – 2020. – N 10. – P. 1280.
19. Lippold J. C. Transformation and tempering behavior of 12Cr–1Mo–0.3V martensitic stainless steel weldments // *Journal of Nuclear Materials*. – 1981. – V. 104. – P. 1127–1131, [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(82\)90752-8](https://doi.org/10.1016/0022-3115(82)90752-8).
20. Горынин В. И., Оленин М. И. Пути повышения хладостойкости сталей и сварных соединений. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 342 с.
21. Оленин М. И., Каштанов А. Д., Романов О. Н., Махорин В. В. Влияние гомогенизирующего отжига на снижение содержания δ-феррита в высокопрочной высокохромистой стали мартенситного класса марки 07X15H5Д4Б,

- полученной методом селективного лазерного сплавления // Вопросы материаловедения. – 2021.– № 2 (106). – С. 47–53.
22. Pandey C., Mahapatra M. M., Kumar P., Saini N. Comparative study of autogenous tungsten inert gas welding and tungsten arc welding with filler wire for dissimilar P91 and P92 steel weld joint // Materials Science and Engineering. – 2018. – A 712. – P. 720–737.
23. Staritsyn M. V., Kuznetsov P. A., Petrov S. N., Mikhailov M. S. Composite structure as a strengthening factor of stainless austenitic chromium–nickel additive steel. The Physics of Metals and Metallography. – 2020. – V. 121, N 4. – P. 337–343.
24. Yin Yu., Tan Q., Bermingham M., Mo N., Zhang J. Z., Zhang M.-X. Laser additive manufacturing of steels // International Materials Reviews. – 2021.

УДК 621.891:678.74

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНОГО НАНОКОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА С ДИСПЕРСНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ НИЗКОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ

В. Е. ЖАРОВ¹, Е. Б. СЕДАКОВА^{2,3}, д-р техн. наук, М. А. СКОТНИКОВА², д-р техн. наук,
С. ЛИ⁴, канд. техн. наук, А. Н. НАУМОВ²

¹ ГНЦ РФ «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК), 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21В

² ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

³ ФГБУН «Институт проблем машиноведения Российской академии наук», 199178, Санкт-Петербург, Большой пр. Васильевского острова, 61. E-mail: elenasedakova2006@yandex.ru

⁴ Чэндуский авиационный политехнический институт, Чэнду, Китайская Народная Республика

Поступила в редакцию 17.06.2024

После доработки 9.07.2024

Принята к публикации 10.07.2024

Исследована возможность применения наноразмерных частиц меди в качестве наполнителя для полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) с целью создания триботехнически эффективного композита. На основе физической модели изнашивания построены расчетные концентрационные зависимости относительной интенсивности линейного изнашивания композита по отношению к матрице для четырех размеров дисперсного наполнителя из нано- и микроразмерного диапазона. В результате определены диапазоны эффективных концентраций наполнителя при введении в ПЭЭК наномеди. Для исследования причин повышения износостойкости нанокompозита при введении дисперсных частиц меди применен метод молекулярной динамики. Установлено, что в присутствии нанонаполнителя существенно повышается энергия межмолекулярных связей, выявлены различия в плотности полимерных молекул в области контакта до и после сдвига, а также различия в величинах энергий межмолекулярного взаимодействия между контактирующими поверхностями в зависимости от времени сдвига.

Ключевые слова: трение скольжения, износостойкость, триботехническая эффективность, физическая модель износа, нагруженность матрицы, полиэфирэфиркетон, нанонаполнитель, молекулярная динамика, энергия межмолекулярного взаимодействия

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-69-77

ЛИТЕРАТУРА

1. Omrani E, Menezes P. L., Rohatgi P. K. State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world. – J. Engineering Science and Technology. – 2016. – V. 12, N 9. – P. 717–736.

2. Наполнение полиэфирэфиркетонов (ПЭЭК) как способ получения композитов с высокими эксплуатационными свойствами / А. К. Микитаев, А. Х. Саламов, А. А. Беев и др. // Пластические массы. – 2017. – N 5–6. – С. 6–9.
3. Мышкин Н. К., Гуцев Д. М., Григорьев Ф. А. Характеристики нанокompозитов на основе ПЭЭК при трении по стали // Трение и износ. – 2021. – Т. 42, N. 3. – С. 350–357.
4. Антифрикционные и механические свойства термопластичных углеродных композитов на основе полиэфирэфиркетона / С. В. Панин, Н. Д. Ань, Л. А. Корниенко и др. // Трение и износ. – 2020. – Т. 41, N 4. – С. 427–435.
5. Ли С., Седакова Е. Б. Молекулярное моделирование кинетики фрикционного разрушения полимерных композитов на примере Ф4К20 // Трение и износ. – 2022. – Т. 43, N.6. – С. 612–620.
6. Thermal conductivity of poly (ether ether ketone) and its short-fiber composites / C. L. Choy, K. W. Kwok, W. P. Leung et al. // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. – 1994. – V. 32, N.8. – P. 1389–1397.
7. Cheng S. Z. D., Cao M. Y., Wunderlich B. Glass transition and melting behavior of poly (oxy-1, 4-phenyleneoxy-1, 4-phenylenecarbonyl-1, 4-phenylene) (PEEK) // Macromolecules. – 1986. – V. 19, N. 7. – P. 1868–1876.
8. Facile synthesis of copper/polydopamine functionalized grapheme oxide nanocomposites with enhanced tribological performance / H. Song, Z. Wang, J. Yang et al. // Chemical Engineering Journal. – 2017. – V. 324. – P. 51–62.
9. Facile synthesis of copper nanoparticles and nanowires on polyetheretherketone-matrix nanocomposites: Thermal conductivity, dynamic mechanical properties and wear resistance / S. Fan, S. Gao, C. Duan, et al. // Composite Science and Technology. – 2022. – V. 219. – P. 109224.
10. Добычин Н. М., Морозов А. В., Никулин А. В., Сачек Б. Я., Анисимов А. В. Планирование эксперимента при исследовании триботехнических характеристик фенольных углепластиков // Вопросы материаловедения. – 2009. – N 1 (61). – С. 186–193.
11. Седакова Е. Б., Козырев Ю. П. Влияние содержания дисперсного наполнителя на адгезию между наполнителем и матрицей в полимерных нанокompозитах триботехнического назначения // Вопросы материаловедения. – 2013. – N 3. – С. 70–75.
12. Берлин А. А., Вольфсон С. А., Ошмян В. Г., Ениколопов Н. С. Принципы создания композиционных полимерных материалов. – М.: Химия, 1990. – 240 с.
13. Бахарева В. Е., Рубин М. Б., Лобынцева И. В., Тризно А. В. Применение в народном хозяйстве подшипников скольжения из полимерных композиционных материалов. – Л.: ЛДНТП, 1991. – 19 с.
14. Луцкейкин Г. А. Моделирование и оптимизация полимерных материалов. – М.: Колос, 2009. – 192 с.
15. Engineering the mechanical properties of CNT/PEEK nanocomposites / B. Wang, K. Zhang, C. Zhou et al. // RSC advances. – 2019. – V. 9, N 23. – P. 12836–12845.
16. Influence of surface-modified glass fibers on interfacial properties of GF/PEEK composites using molecular dynamics / L. Pan, H. Guo, L. Zhong, et al. // Computational Materials Science. – 2021. – N 188. – P. 110216.
17. COMPASS II: extended coverage for polymer and drug-like molecule databases / H. Sun, Z. Jin, C. Yang, et al. // Journal of molecular modeling. – 2016. – V. 22, N 2. – P. 1–10.
18. Rasheva Z., Zhang G., Burkhart Th. A correlation between the tribological and mechanical properties of short carbon fiber reinforced PEEK materials with different fiber orientations // Tribology International. – 2010. – V. 43. – P. 1430–1437.
19. Ли Сяньшунь, Седакова Е. Б. Моделирование влияния наноразмерных наполнителей на механические свойства и износостойкость композита на основе полиэфирэфиркетона // Проблемы машиностроения и надежность машин. – 2023. – N 3. – С. 64–69.

УДК 678.067

УГЛЕПЛАСТИК С ГРАДИЕНТОМ СОСТАВА МАТРИЦЫ НА ОСНОВЕ БЕНЗОКСАЗИН-ФТАЛОНИТРИЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

К. А. АНДРИАНОВА¹, канд. техн. наук, В. С. НИКИТИН¹, Р. Р. АМИРОВ², д-р хим. наук,
И. С. АНТИПИН², д-р хим. наук, Л. М. АМИРОВА¹, д-р хим. наук

¹ ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ», 420111, Республика Татарстан, Казань, ул. Карла Маркса, 10. E-mail: KAAndrianova@kai.ru

² ФГАОУ ВО «Казанский федеральный университет», 420008, Республика Татарстан, Казань, ул. Кремлевская, 18

Поступила в редакцию 26.06.2023

После доработки 29.07.2024

Принята к публикации 16.09.2024

Разработана технология получения углепластика на основе бензоксазин-фталонитрильного связующего с градиентом состава матрицы методом порошкового напыления. Связующее в верхних слоях углепластика содержит преимущественно фталонитрил, в центре углепластиковой пластины – преимущественно бензоксазин. От поверхности к центру образца состав связующего плавно меняется, т. е. имеет место градиент состава матрицы. Для повышения ударостойкости в состав связующего введен высокотемпературный термопласт, концентрация которого также изменяется по толщине образца. По сравнению с углепластиком гомогенного состава с таким же содержанием компонентов в связующем градиентный углепластик обладает более высокой теплостойкостью и ударной прочностью без потери жесткости.

Ключевые слова: бензоксазин, фталонитрил, композиционный материал, градиент состава, углепластик, теплостойкость, механические свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-78-87

ЛИТЕРАТУРА

1. Bornosuz N. V., Korotkov R. F., Shutov V. V., Sirotn I. S., Gorbunova I. Y. Benzoxazine copolymers with mono- and difunctional epoxy active diluents with enhanced tackiness and reduced viscosity // *Journal of Composites Science*. – 2021. – V. 5, N 9. – С. 250.
2. Gu H., Gao C., Du A., Guo Y., Zhou H., Zhao T., Guo, Z. An overview of high-performance phthalonitrile resins: fabrication and electronic applications // *Journal of Materials Chemistry C*. – 2022. – V. 10, N 8. – P. 2925–2937.
3. Yakovlev M. V., Kuchevskaia M. E., Terekhov V. E., Morozov O. S., Babkin A. V., Kepman A. V., Avdeev V. V., Bulgakov B. Easy processable tris-phthalonitrile based resins and carbon fabric reinforced composites fabricated by vacuum infusion // *Materials Today Communications*. – 2022. – V. 33. – P. 104738.
4. Bulgakov B. A., Morozov O. S., Timoshkin I. A., Babkin A. V., Kepman A. V. Bisphthalonitrile-based thermosets as heat-resistant matrices for fiber reinforced plastics // *Polymer Science, Series C*. – 2021. – V. 63. – P. 64–101.
5. Курносков А. О., Вавилова М. И., Гуляев И. Н., Ахмадиева К. Р. Безрастворная технология изготовления препрега на основе высокотемпературного порошкового фталонитрильного связующего // *Вопросы материаловедения*. – 2021. – № 4 (108). – С. 165–178. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2021-108-4-165-178>.
6. Soudjrari S., Derradji M., Amri B., Djaber K., Mehelli O., Tazibet S., Khadraoui A. Novel vanillin-based benzoxazine containing phthalonitrile thermosetting system: Simple synthesis, autocatalytic polymerization and high thermomechanical properties // *High Performance Polymers*. – 2022. – V. 34, N 7. – P. 818–827
7. Brunovska Z., Ishida H. Thermal study on the copolymers of phthalonitrile and phenylnitrile-functional benzoxazines // *Journal of applied polymer science*. – 1999. – V. 73, N 14. – P. 2937–2949.
8. Chen L., Ren D., Chen S., Li K., Xu M., Liu X. Improved thermal stability and mechanical properties of benzoxazine-based composites with the enchantment of nitrile // *Polymer Testing*. – 2019. – V. 74. – P. 127–137.
9. Dayo A. Q., Wang A. R., Derradji M., Kiran S., Zegaoui A., Wang J., Liu W. B. Copolymerization of mono and difunctional benzoxazine monomers with bio-based phthalonitrile monomer: Curing behaviour, thermal, and mechanical properties // *Reactive and Functional Polymers*. – 2018. – V. 131. – P. 156–163.
10. Lv D., Dayo A. Q., Wang A. R., Kiran S., Xu Y. L., Song S., Gao B.-C. Curing behavior and properties of benzoxazine-co-self-promoted phthalonitrile polymers // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2018. – V. 135, N 31. – P. 46578.
11. Liu Y., Yin R., Yu X., Zhang K. Modification of Solventless-Synthesized Benzoxazine Resin by Phthalonitrile Group: An Effective Approach for Enhancing Thermal Stability of Polybenzoxazines // *Macromolecular Chemistry and Physics*. – 2019. – V. 220, N 1. – С. 1800291.

12. Андрианова К. А., Халиков, А. А., Беззаметнов, О. Н., Амирова, Л. М. Функционально-градиентный углепластик на основе эпоксидной матрицы, модифицированной термо-эластопластом // Вопросы материаловедения. – 2023. – № 3 (115). – С. 170–177.
13. Hassan E., Zekos I., Jansson P., Pecur T., Floreani C., Robert C., Stack M. M. Erosion mapping of through-thickness toughened powder epoxy gradient glass-fiber-reinforced polymer (GFRP) plates for tidal turbine blades // Lubricants. – 2021. – V. 9, N 3. – С. 22.
14. Ishida H. Chapter 1 // Handbook of Benzoxazines Resins. / H. Ishida, T. Agag, Eds. – Elsevier: Amsterdam, 2011. – P. 3–69.
15. Антипин И. С., Амирова Л. М., Андрианова К. А., Мадиярова Г. М., Шумилова Т. А., Казымова М. А., Амиров Р. Р. Безрастворный синтез бензоксазиновых мономеров различного строения и полимеры на их основе // Вестник технологического университета. – 2023. – Т. 6, № 9. – С. 17–25.
16. Аринина М. П., Ильин С. О., Макарова В. В., Горбунова И. Ю., Кербер М. Л., Куличихин В. Г. Совместимость и реологические свойства смесей эпоксидианового олигомера с ароматическими полиэфирами // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2015. – Т. 57, № 2. – С. 152–161.

УДК 678.067:620.181

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ МИКРОСТРУКТУРЫ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОЛИИМИДНОГО УГЛЕПЛАСТИКА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМИТИРУЕМЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ

Е. В. КУРШЕВ, С. Л. ЛОНСКИЙ, Ю. А. ЕГОРОВ, канд. техн. наук, И. В. ЗЕЛЕНИНА

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17. E-mail: admin@viam.ru

Поступила в редакцию 19.07.2024

После доработки 5.08.2024

Принята к публикации 5.08.2024

Проведены микроструктурные и ИК-спектроскопические исследования термостойкого углепластика марки ВКУ-61 на основе терморезистивного полиимидного связующего и равнопрочной углеродной ткани после воздействия лабораторно имитируемых эксплуатационных факторов при повышенных температуре и влажности. На основании анализа и систематизации полученных результатов исследований установлены общие закономерности и особенности структурных изменений в углепластике в условиях контролируемых внешних эксплуатационных факторов.

Ключевые слова: микроструктура, матрица, высокотемпературный углепластик, полиимидное связующее, термовлажностное воздействие, микродисперсные частицы, диффузия

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-88-102

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаптев А. Б., Павлов М. Р., Новиков А. А., Славин А. В. Современные тенденции развития испытаний материалов на стойкость к климатическим факторам (обзор). Часть 1. Испытания новых материалов // Труды ВИАМ. – 2021. – № 1 (95). – С. 114–122. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 20.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-114-122
2. Старцев В. О., Антипов В. В., Славин А. В., Горбовец М. А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. – 2023. – № 2 (71). Ст. 122–144. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 28.06.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144
3. Михайлин Ю.А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. – СПб.: Научные Основы и Технологии, 2011. – 416 с.
4. Yang S.-Y. Advanced polyimide materials: synthesis, characterization, and applications. – Elsevier, 2018. – 498 p.
5. Каблов Е. Н., Лаптев А. Б., Прокопенко А. Н., Гуляев А. И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие //

- Авиационные материалы и технологии. – 2021. – № 4. Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 14.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80
6. Валева И. О., Старцев В. О., Зеленина И. В. Термическое старение, деградация поверхности и влагоперенос в углепластике марки ВКУ-3ТР // Труды ВИАМ. – 2020. – № 6–7. – С. 118–128. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.01.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-118-128
 7. Chatterjee B., Bhowmik S. Evolution of material selection in commercial aviation industry – a review // Sustainable Engineering Products and Manufacturing Technologies. – 2019. – P. 199–219. DOI: 10.1016/B978-0-12-816564-5.00009-8
 8. Деев И.С., Никишин Е.Ф., Куршев Е.В., Лонский С.Л. Исследование структуры и состава образцов углепластика КМУ-4л после 12 лет экспозиции на внешней поверхности международной космической станции. 2. Исследование микроструктуры и состава // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 2 (82). – С. 76–85.
 9. Валева И. О. Влияние тепловлажностного воздействия на свойства термостойких полимерных композиционных материалов на основе фталонитрильной матрицы // Дис. ... канд. техн. наук. – М.: МАИ, 2018. – 130 с.
 10. Сальников В. Г., Старцев О. В., Лебедев М. П., Копырин М. М., Вампиров Ю. М. Влияние суточных и сезонных изменений относительной влажности и температуры на влагонасыщение углепластика в открытых климатических условиях // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2022. – № 5. – С. 2–10. DOI: 10.31044/1994-6260-2022-0-5-2-10
 11. Деев И. С., Куршев Е. В., Лонский С. Л. Влияние длительного климатического старения на микроструктуру поверхности эпоксидных углепластиков // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 3 (95). С. 157–169.
 12. Деев И. С., Куршев Е. В., Лонский С. Л., Комарова О. А. Влияние длительного климатического старения на микроструктуру и характер разрушения в объеме эпоксидных углепластиков в условиях силового воздействия (изгиба и сжатия) // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 4 (96). – С. 170–184.
 13. Деев И. С., Добрянская О. А., Куршев Е. В. Влияние морской воды на микроструктуру и механические свойства углепластика в напряженном состоянии // Материаловедение. – 2012. – № 11. – С. 37–41.
 14. Лаптев А. Б., Барботько С. Л., Николаев Е. В. Основные направления исследований сохранности свойств материалов под воздействием климатических и эксплуатационных факторов // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № S. – С. 547–561. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-547-561
 15. Каблов Е. Н., Старцев В. О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. – 2018. – № 2. – С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58
 16. Вода в полимерах / С. Роулэнд, И. Кунц мл., Ф. Стилинджер и др. – М.: Мир, 1984. – 555 с.
 17. Чалых А. Е. Диффузия в полимерных системах. – М.: Химия, 1987. – 312 с.
 18. Деев И. С., Кобец Л. П. Структурообразование в наполненных терморезактивных полимерах // Коллоидный журнал. – 1999. – Т. 61, № 5. – С. 650–660.
 19. Деев И. С., Кобец Л. П. Микроструктура эпоксидных матриц // Механика композитных материалов. – 1986. – № 1. – С. 3–8.
 20. Рыжонков Д. И., Левина В. В., Дзидзигури Э. Л. Наноматериалы: Учеб. пособие. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 365 с.
 21. Валуева М. И., Зеленина И. В., Начаркина А. В., Лонский С. Л. Влияние термовлажностного воздействия на структуру и свойства полиимидного углепластика // Вопросы материаловедения. – 2022. – № 2 (110). – С. 90–101.
 22. Musto P., Ragosta G., Mensitieri G., Lavorgna M. On the molecular mechanism of H₂O diffusion into polyimides: a vibration spectroscopy investigation // Macromolecules. – 2007. – V. 40. – Is. 26. – P. 9614–9627. DOI: 10.1021/ma071385+
 23. Sharma H. N., Kroonblawd M. P., Sun Y., Glascoe E. A. Role of filler and its heterostructure on moisture sorption mechanism in polyimide film // Scientific reports. – 2018. – V. 8. – P. 16889. DOI: 10.1038/s41598-018-35181-1

24. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 1 (34). – С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
25. Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 7–17.
26. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // *Тез. докл. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии*. – Екатеринбург: УрО РАН, 2016. – С. 25–26.

УДК 621.791.052:669.15–194.56

ВЛИЯНИЕ МНОГОПРОХОДНОЙ СВАРКИ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ, СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ ИЗ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

Р. А. МАМАДАЛИЕВ, В. И. ПЛЕХАНОВ, канд. техн. наук, В. Е. ОВСЯННИКОВ, д-р техн. наук
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38. E-mail:
mamadalievra@tyuiu.ru

Поступила в редакцию 17.04.2024

После доработки 20.05.2024

Принята к публикации 20.05.2024

Исследовано влияние многопроходной сварки несколькими электродами разных марок на химический состав и микроструктуру металла шва. Объектами изучения являлись образцы трубного сечения, изготовленные из коррозионно-стойкой стали марки 12X18H10T. В результате проведенных исследований были определены значения эффективной тепловой мощности источника нагрева, обеспечивающие равномерное распределение элементов в наплавленном металле, формирование аустенитной структуры с минимальным содержанием ферритной фазы, а также равномерное распределение микротвердости по сечению шва.

Ключевые слова: сварка, режимы, проходы, структура, химический состав, микротвердость, коррозия

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-103-112

ЛИТЕРАТУРА

1. Ульченко М. В. Российский арктический газовый комплекс: основные проблемы и перспективы развития. – Апатиты: ФИН КНЦ РАН, 2023.
2. Чупин А. Л., Шобекова Ш. У. Внешняя торговля и внешнеторговые перевозки Российской Федерации // *Colloquium-Journal*. – 2020. – № 9–7 (61). – Р. 64–68.
3. Тусупжанов А. Е., Ерболатулы Д., Квеглис Л. И. Структурно-фазовые состояния и напряжение течения при пластической деформации стали 12X18H10T // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. – 2019. – Т. 12, № 4. – С. 438–448. DOI: 10.17516/1999-494X-0150
4. Цай К.В., Рофман О.В., Отставнов М. А. Изменение фазового состава и прочностных свойств аустенитной стали 12X18H10T в результате деформации и постдеформационных отжигов // *Вестник НЯЦ РК*. – 2019. – № 1. – С. 72–78.
5. Механические свойства и микроструктура нержавеющей стали HAZ в результате сварки разнородных металлов после процессов термообработки / Р. Д. Рамдан и др. // *Серия конференций IOP: Материаловедение и инженерия*. – IOP Publishing, 2019. – Т. 553, № 1. – С. 012034.
6. Токовой О. К., Шабуров Д. В. Исследование неметаллической фазы в аустенитной нержавеющей стали // *Изв. Вузов: Черная металлургия*. – 2014. – Т. 57, № 12. – С. 20–24.
7. Петров В. П. Свариваемость сталей. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2000. – 66 с.
8. Петров В. Н. Сварка и резка нержавеющей сталей. – Л.: Судостроение, 1970. – 287 с.
9. Медовар Б. И. Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов. – М.: Машиностроение, 1966. – 430 с.
10. ГОСТ 10052–75. Electrodes покрытые металлические для ручной дуговой сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами. Типы. М.: Изд-во стандартов, 2004.

11. Куликов В. П. Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки. – Минск: Экоперспектива, 2003.
12. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1951.
13. Ковенский И. М., Кусков В. Н., Прохоров Н. Н. Структурные превращения в металлах и сплавах при электротермическом воздействии. – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2001. – 216 с.
14. Мамадалиев Р. А., Ишкина Е. Г., Медведев А. В., Берг В. И. Применение современных цифровых инструментов для прецизионного определения результатов микротвердости по исследуемой поверхности // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 8 (92). – С. 196–206.
15. Сварка в машиностроении. Справочник. Т. 2 / Под ред. Г. А. Николаева и др. – М.: Машиностроение, 1978. – 462 с.

УДК 621.791.016:620.171.32–974

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МАТЕРИАЛОВ И ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ НАТУРНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОГО ХОЛОДА

Н. И. ГОЛИКОВ, д-р техн. наук, Ю. Н. САРАЕВ, д-р техн. наук, М. М. СИДОРОВ, канд. техн. наук

*Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, 677980,
г. Якутск, ул. Октябрьская, 1. E-mail: n.i.golikov@mail.ru*

Поступила в редакцию 4.06.2024

После доработки 2.07.2024

Принята к публикации 24.07.2024

Исследованы особенности напряженного состояния, физико-механических и структурных свойств сварных соединений конструкционных сталей, выполненных в условиях низких климатических температур. Сварные пробы получены ручной дуговой сваркой с применением отечественных электродов УОНИ-13/Мороз, ХОБЭК-К-54, LB-52TRU. Исследования проводились в рамках натуральных климатических испытаний в условиях естественного холода сварочного оборудования и материалов. Показано, что при сварке в холодных условиях уровень растягивающих остаточных сварочных напряжений в среднем на 40–50 % выше, чем при сварке при комнатной температуре. Выявлены особенности структуры и механических свойств при сварке в условиях отрицательных температур. Разработаны методы климатических испытаний сварочных материалов и оборудования в условиях низких климатических температур.

Ключевые слова: сварные соединения, конструкционные стали, сварочные технологии, сварочные материалы, климатические испытания, свойства, структура

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-113-123

ЛИТЕРАТУРА

1. Ларионов В.П. Электродуговая сварка конструкций в северном исполнении. – Новосибирск: Наука, 1986. – 256 с.
2. Эксплуатация магистральных газопроводов в условиях Севера / А. В. Лыглаев, А. И. Левин, И. А. Корнев и др. // Газовая промышленность. – 2001. – № 8. – С. 37–39.
3. Копельман Л. А. Сопrotивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. – Л.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
4. Повышение прочности сварных металлоконструкций горнодобывающей и транспортной техники в условиях Севера / О. И. Слепцов и др. – Новосибирск: Наука, 2012. – 183 с.
5. Bozic Z., Schmauder S., Wolf H. The effect of residual stresses on fatigue crack propagation in welded stiffened panels // Engineering Failure Analysis. – 2018. – V. 84. – P. 346–357.
6. Ahmed F., Ali L., Iqbal J., Hasan F. Failure of pipe joints during hydrostatic testing // Engineering Failure Analysis. – 2008. – V. 15. – P. 766–773.

7. Гончаров Н. Г., Нестеров Г. В., Юшин А. А. Технология сварки кольцевых стыков магистральных трубопроводов из труб класса прочности K56 при низких температурах окружающей среды // Безопасность труда в промышленности. – 2018. – № 8. – С. 42–47. DOI: 10.24000/0409-2961-2018-8-42-47
8. Ларионов В. П., Апросимов В. С., Егоров Ю. И. Влияние роста дефекта на прочность трубопроводов, эксплуатируемых в условиях низких климатических температур // Прочность материалов и конструкций при низких температурах. – Киев, 1990. – С. 127–130.
9. Josepha A., Sanjai K. Raib, Jayakumara T., Murugan N. Evaluation of residual stresses in dissimilar weld joints // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2005. – N 82. – P. 700–705.
10. Сидоров М. М., Голиков Н. И., Тихонов Р. П. Определение напряженно-деформированного состояния магистральных газопроводов, проложенных в зоне вечной мерзлоты // Контроль. Диагностика. – 2020. – Т. 23, № 12 (270). – С. 58–63. DOI: 10.14489/td.2020.12.pp.058–063
11. Горелик С. С., Скаков Ю. А., Расторгуев Л. Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. – М.: МИСИС, 1994. – 328 с.
12. Голиков Н. И., Сидоров М. М., Сараев Ю. Н. Климатические испытания сварочного оборудования при отрицательных температурах // Сварочное производство. – 2018. – № 12. – С. 35–41.
13. Golikov N. I., Sidorov M. M., Saraev Y. N. Climatic tests of welding materials at negative temperatures // Welding International. – 2020. – Т. 34. – № 10–12. – С. 425–429. DOI: 10.1080/09507116.2021.1962067
14. Матюхин Г. В., Воробьев А. Ю., Игуменов А. А. Оценка влияния остаточных сварочных напряжений на предел выносливости различных зон сварных соединений ферритно-перлитных сталей // Сварка и диагностика. – 2015. – № 1. – С. 32–34.
15. Hensel J., Nitschke-Pagel T., Rebelo-Kornmeier J., Dilgera K. Experimental Investigation of Fatigue Crack Propagation in Residual Stress Fields // Procedia Engineering. – 2015. – V. 133. – P. 244–254
16. Ужик Г. В. Прочность и пластичность металлов при низких температурах. – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1957. – 192 с.
17. Moshayedi H., Sattari-Far I. The effect of welding residual stresses on brittle fracture in an internal surface cracked pipe // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2015. – V. 126–127. – P. 29–36.
18. Ларионов В. П., Павлов А. Р., Аммосов А. П. Особенности теплового баланса ванны при сварке в условиях низких климатических температур // Сварка и проблемы вязкохрупкого перехода: К 60-летию со дня рождения академика В. П. Ларионова / Сибирское отделение РАН, Институт физико-технических проблем Севера. – Новосибирск: СО РАН, 1998. – С. 351–355.
19. Сараев Ю. Н., Голиков Н. И., Сидоров М. М. Распределение остаточных напряжений при сварке в условиях низких климатических температур // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 11 (84). – С. 4–12.
20. Сливинский А. А., Жданов Л. А., Коротенко В. В. Теплофизические особенности импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом в защитных газах (обзор) // Автоматическая сварка. – 2015. № 6–7. – С. 32–38.
21. Лебедев В. А., Козырько О. А. Способы и устройства для управления кристаллизацией наплавленного металла при дуговой сварке (обзор и анализ) // Заготовительные производства в машиностроении. – 2015. – № 9. – С. 8–16.

УДК 620.193.4

О КОРРОЗИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ УСЛОВИЙ ПЕРЕМЕННОГО СМАЧИВАНИЯ ЖИДКОСТЬЮ НА ПОВЕРХНОСТЬ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ ГАЗОПРОВОДОВ В ПРИСУТСТВИИ CO₂

Р. К. ВАГАПОВ, д-р техн. наук, канд. хим. наук, К. А. ИБАТУЛЛИН, канд. хим. наук, А. Д. ГАЙЗУЛЛИН,
Д. С. ФЕДОТОВ

ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 142717, Московская обл., г. о. Ленинский, п. Развилка, ул. Газовиков, зд. 15,
стр. 1. E-mail: R_Vagapov@vniigaz.gazprom.ru

Поступила в редакцию 13.05.2024

После доработки 22.07.2024

Исследована коррозионная стойкость в углекислотных средах ряда конструкционных сталей, используемых для трубопроводов газовых месторождений. Агрессивные условия газовых объектов отличаются тем, что большая часть внутреннего пространства трубопроводов заполнена газовой фазой. Коррозионные воздействия на сталь, когда только небольшая часть газопровода заполнена жидкой фазой, ранее практически не были изучены. При проведении исследований был использован специально разработанный коррозионный стенд, на котором были воспроизведены условия воздействия наиболее агрессивных сред – переменное смачивание водой стенок газопровода. Коррозионная активность в таких условиях связана с разрушением пленок продуктов коррозии: в местах их растрескивания и отслоения формируются локальные коррозионные повреждения на стали. Изучено коррозионное поведение трубных сталей из разных газопроводов в условиях их переменного смачивания водой. Проведена сравнительная оценка стойкости в углекислотных средах трубных сталей 09Г2С и 13ХФА как в условиях переменного смачивания, так и при конденсации влаги, которые представляют основную опасность воздействия на газопроводы внутренней коррозии. Определено, что главным видом разрушения является локальная коррозия стальной поверхности труб. Оценено влияние микроструктуры сталей и содержания в них хрома на коррозионную стойкость в условиях транспортировки CO₂-содержащего газа по трубопроводам.

Ключевые слова: углекислотная коррозия, коррозионный испытательный стенд, микроструктура стали, локальная коррозия, сталь 09Г2С, сталь 13ХФА

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-124-136

ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние углекислоты в природном газе газоконденсатной залежи нижнемеловых отложений Юбилейного нефтегазоконденсатного месторождения на эксплуатацию УКПГ-НТС / И. И. Байдин, А. Н. Харитонов, А. В. Величкин и др. // Наука и техника в газовой промышленности. – 2018. – Т. 74, № 2. – С. 23–35.
2. Условия протекания углекислотной коррозии на объектах добычи Ачимовских отложений, методы контроля и прогнозирования / А. Ю. Корякин, В. Ф. Кобычев, И. В. Колинченко и др. // Газовая промышленность. – 2017. – Т. 761, № 12. – С. 84–89.
3. Вагапов Р. К. Стойкость сталей в эксплуатационных условиях газовых месторождений, содержащих в добываемых средах агрессивный CO₂ // Материаловедение. – 2021. – № 8. – С. 41–47. DOI: 10.31044/1684-579X-2021-0-8-41-47
4. Alamr A. H. Localized corrosion and mitigation approach of steel materials used in oil and gas pipelines – An overview // Engineering Failure Analysis. – 2020. – V. 116, Art. 104735. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104735
5. Development mechanism of internal local corrosion of X80 pipeline steel / Z. Tan, L. Yang, D. Zhang et al. // Journal of Materials Science & Technology. – 2020. – V. 49. – P. 186–201. DOI: 10.1016/j.jmst.2019.10.023
6. Pitting corrosion failure analysis of a wet gas pipeline / H. Mansoori, R. Mirzaee, F. Esmailzadeh et al. // Engineering Failure Analysis. – 2017. – V. 82. – P. 16–25. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.08.012
7. Амежнов А. В. Сравнительный анализ методов коррозионных испытаний сталей для нефтепромысловых трубопроводов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2019. – № 4. – С. 36–49.
8. Андреев Н. Н., Сивоконь И. С. Методология лабораторного тестирования ингибиторов углекислотной коррозии для нефтепромысловых трубопроводов // Практика противокоррозионной защиты. – 2014. – Т. 74 – № 4. – С. 36–43.
9. Применение инновационного испытательного стенда для исследования коррозионных процессов в условиях углекислотных сред газовых месторождений / Р. Р. Кантюков, Д. Н. Запевалов, Р. К. Вагапов и др. // Газовая промышленность. – 2023. – Т. 854, № 11. – С. 78–85.
10. Laboratory investigation on the condensation and corrosion rates of top of line corrosion in carbon steel: a case study from pipeline transporting wet gas in elevated temperature / Rozi F., Mohebbi H., Ismail M.C. et al. // Corrosion engineering, science and technology. – 2018. – V. 53, N 6. – P. 444–448. DOI: 10.1080/1478422X.2018.1499169
11. Vagapov R.K., Kanyukov R.R., Zapevalov D.N. Investigation of the corrosiveness of moisture condensation conditions at gas production facilities in the presence of CO₂ // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. – 2021. – N 3 (10). – P. 994–1010. DOI: 10.17675/2305-6894-2021-11-1-5

12. Вагапов Р. К. Анализ влияния агрессивных факторов и условий на состав коррозионных продуктов // Вопросы материаловедения. – 2022. – № 3 (111). – С. 85–97. DOI: 10.22349/1994-6716-2022-111-3-85-97
13. Mechanical properties of CO₂ corrosion product scales and their relationship to corrosion rates / Gao K., Yu F., Pang X. et al. // Corrosion Science. – 2008. – V. 50. – P. 2796–2803. DOI: 10.1016/j.corsci.2008.07.016
14. Internal localized corrosion of X100 pipeline steel under simulated flow conditions / Q. Zhang, J. Li, J. Liu et al. // Journal of Electroanalytical Chemistry. – 2023. – V. 945. – Art. 117680. DOI: 10.1016/j.exptchem.2023.111048
15. Scaling characteristics and growth of corrosion product films in turbulent flow solution containing saturated CO₂ / Z. F. Yin, W. Z. Zhao, Y. R. Feng et al. // Materials and Corrosion. – 2009. – V. 60, N 1. – P. 5–13. DOI: 10.1002/maco.200805040
16. Li J., Wang D., Xie F. Failure analysis of CO₂ corrosion of natural gas pipeline under flowing conditions // Engineering Failure Analysis. – 2022. – V. 137. – Art. 106265. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106265
17. Анализ динамики внедрения пластовой воды в газовую залежь в условиях сокращения добычи газа / Байдин И. И., Коваленко А. В., Гумерова Н. В. и др. // Известия вузов. Нефть и газ. – 2018. – № 6. – С. 41–44. DOI: 10.31660/0445-0108-2018-6-41-44
18. Flow line corrosion failure as a function of operating temperature and CO₂ partial pressure using real time field data / Okoro E., Kurah A. M., Sanni S. E. et al. // Engineering Failure Analysis. – 2019. – V. 102. – P. 160–169. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.04.037
19. Elgaddafi R., Ahmed R., Osisanya S. Modeling and experimental study on the effects of temperature on the corrosion of API carbon steel in CO₂-saturated environment // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – V. 196. – Art. 107816. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107816>
20. Study on the corrosion behaviours of API X65 steel in wet gas environment containing CO₂ / J. Li, Z. Liu, C. Du et al. // Corrosion engineering, science and technology. – 2017. – V. 52, N 4. – P. 317–323. <https://doi.org/10.1080/1478422X.2016.1278513>
21. Патент № 2772614 РФ. Способ коррозионных испытаний и установка для его осуществления / Кантюков Р. П., Запелов Д. Н., Вагапов Р. К., Ибатуллин К. А. Заявл. 26.07.2021, опубл. 23.05.2022.
22. Сравнение агрессивности сероводородных сред по отношению к сталям в паровой и водной фазах / Р. К. Вагапов, О. Г. Михалкина, В. А. Лопаткин и др. // Вопросы материаловедения. – 2023. – Т. 115. – № 3. – С. 188–201. DOI: 10.22349/1994-6716-2023-115-3-188-201
23. CO₂ corrosion resistance of carbon steel in relation with microstructure changes / N. Ochoa, C. Vega, N. Pebere et al. // Materials Chemistry and Physics. – 2015. – V. 156. – P. 198–205. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.02.047>
24. Induced-Pitting Behaviors of MnS Inclusions in Steel / S. Yang, M. Zhao, J. Feng et al. // High Temp. Mater. Proc. – 2018. – V. 37, N 9–10. – P. 1007–1016. <https://doi.org/10.1515/htmp-2017-0155>
25. Влияние неметаллических включений на коррозионную стойкость углеродистых и низколегированных сталей для нефтепромысловых трубопроводов / И. Г. Родионова, О. Н. Бакланова, А. В. Амежнов и др. // Сталь. – 2017. – № 10. – С. 41–48.
26. Исследование влияния микроструктуры стали 09Г2С на локальную коррозию газопроводов в процессе их эксплуатации / Р. К. Вагапов, В. А. Лопаткин, К. А. Ибатуллин и др. // Материаловедение. – 2024. – № 4. – С. 20–26. DOI: 10.31044/1684-579X-2024-0-4-20-26
27. Gupta K. K., Haratian S., Mishin O. V., Ambat R. CO₂ corrosion resistance of low-alloy steel tempered at different temperatures // Corrosion Science. – 2024. – V. 232, Art. 112027. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.112027>
28. Effect of Cr content on the corrosion performance of low-Cr alloy steel in a CO₂ environment / L. Xu, B. Wang, J. Zhu et al. // Applied Surface Science. – 2016. – V. 379. – P. 39–46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.04.049>
29. Choi Y.-S., Nešić S., Jung H.-G. Effect of alloying elements on the corrosion behavior of carbon steel in CO₂ environments // Corrosion. – 2018. – V. 74, N 5. – P. 566–576. <https://doi.org/10.5006/2705>
30. Неметаллические включения в низколегированной стали 13ХФА для нефтепроводных труб повышенной надежности / А. И. Степанов, И. Н. Ашихмина, С. В. Беликов и др. // Сталь. – 2014. – № 6. – С. 83–85.
31. Петрова В. Ф., Гусева А. А. Исследование влияния микроструктуры стали 13ХФА на ударную вязкость толстостенных бесшовных труб // Черные металлы. – 2020. – № 2. – С. 47–51.

32. Влияние структурных характеристик трубных сталей на показатели их коррозионной стойкости / А. В. Амежнов, И. Г. Родионова, И. А. Васечкина и др. // *Металлург.* – 2022. – № 11. – С. 25–33. DOI: 10.52351/00260827_2022_11_25
33. Gupta K.K., Haratian S., Mishin O.V., Ambat R. The impact of minor Cr additions in low alloy steel on corrosion behavior in simulated well environment // *Npj Mater. Degrad.* – 2023. – V. 7. – P. 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41529-023-00393-y>

УДК 669.14.018.295:539.421

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЛОКАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ ДЛЯ СВЯЗИ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ С КОНЦЕНТРАТОРОМ И СТРУКТУРНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ МАТЕРИАЛА

А. В. ИЛЬИН, д-р техн. наук, А. А. ЛАВРЕНТЬЕВ, А. В. МИЗЕЦКИЙ,
К. Е. САДКИН, канд. техн. наук

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49.
E-mail: mail@crism.ru

Поступила в редакцию 16.04.2024

После доработки 5.08.2024

Принята к публикации 11.10.2024

Для высокопрочных среднелегированных мартенситных и бейнитно-мартенситных сталей, находящихся в различном структурном состоянии, были определены критические значения J -интеграла и получена устойчивая их корреляция с результатами испытаний на растяжение образцов с кольцевой глубокой выточкой. Для обоснования этой корреляции использована предложенная в предшествующих работах формулировка локального критерия хрупкого разрушения в статистической постановке как энергетического условия распространения микротрещины через большеугловые границы зерен. Анализируется связь параметров, используемых в предложенном локальном критерии разрушения, со структурными характеристиками материала и прогнозная способность предложенной модели для определения температурных зависимостей трещиностойкости.

Ключевые слова: высокопрочная сталь, трещиностойкость, хрупкое разрушение, критерий разрушения, микроструктура, механические испытания

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-137-161

ЛИТЕРАТУРА

1. Голосиенко С. А., Ильин А. В., Лаврентьев А. А., Михайлов М. С., Мотовилина Г. Д., Петров С. Н., Садкин К. Е. Сопротивление хрупкому разрушению высокопрочной среднелегированной стали и его связь с параметрами структурного состояния // *Вопросы материаловедения.* – 2019. – № 3(99). – С. 128–147.
2. Ильин А. В., Лаврентьев А. А., Мизецкий А. В. О формулировке локального критерия хрупкого разрушения для прогнозирования трещиностойкости высокопрочной стали // *Вопросы материаловедения.* – 2020. – № 3(103). – С. 114–134.
3. Ильин А. В., Лаврентьев А. А., Мотовилина Г. Д., Забавичева Е. В., Петров С. Н. О корреляции статической трещиностойкости высокопрочной среднелегированной стали с параметрами структурного состояния и стандартными механическими свойствами // *Вопросы материаловедения.* – 2023. – № 1 (113). – С. 103 – 123.
4. Beremin F. M. A local criterion for cleavage fracture of nuclear pressure vessel steel // *Metal Transaction.* – 1983. – N 14. – P. 2277–2287.
5. Wallin K., Laukkanen A. Aspects of cleavage fracture initiation – relative influence of stress and strain // *Fatigue Fract Eng Mater & Struct.* – 2006. – V. 29(9). – P. 788–99.

6. Kroon M., Faleskog J. A probabilistic model for cleavage fracture with a length scale influence of material parameters and constraint // *Int. J. Fract.* – 2002. – N 118. – P. 99–118.
7. Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Швецова В. А. Прогнозирование трещиностойкости реакторных сталей в вероятностной постановке на основе локального подхода // *Проблемы прочности.* – 1999, № 1. – Сообщ. 1. – С. 5–20; № 2. – Сообщ. 2. – С. 5–22.
8. Копельман Л. А. Сопротивляемость сварных швов хрупкому разрушению. – Л.: Машиностроение, 1978.
9. Мешков Ю. Я. Физические основы разрушения металлических конструкций. – Киев: Наукова думка, 1981.
10. Chen J. H., Cao R. *Micromechanism of Cleavage Fracture of Metals.* – Elsevier, 2015. – 467 p.
11. Метод дифракции отраженных электронов в материаловедении / Под ред. А. Шварца, М. Кумара, Б. Адамса, Д. Филда. – М.: Техносфера, 2014. – С. 376–393.
12. Петров С. Н., Пташник А. В. Экспресс-метод определения границ бывшего аустенитного зерна в сталях бейнитно-мартенситного класса по локальным ориентировкам превращенной структуры // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2019. – № 5. – С. 5–12.
13. Pallaspuuro A. S., Kajjalainen A., Mehtonen S. Effect of microstructure on the impact toughness transition temperature of direct quenched steels // *Materials Science & Engineering A.* – 2018. – V. 712. – P. 671–680.
14. ГОСТ Р 59115.6–2021. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Методы определения характеристик трещиностойкости конструкционных материалов. – М., 2021.
15. Pineau A. Development of the local approach to fracture over the past 25 years: theory and application // *International Journal of Fracture*, 2006, March, 138(1), pp. 139–166. DOI: 10.1007/s10704-006-0035-1
16. Горынин И. В., Рыбин В. В., Малышевский В. А., Семичева Т. Г., Шерохина Л. Г. Превращение дислокационного мартенсита при отпуске вторичнотвердеющей стали // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1999. – № 3. – С. 13–19.
17. Аксаков И. С., Анисимов А. В., Антипов В. С. и др. *Материалы для судостроения и морской техники: Справ. Т. 1.* / Под ред. И. В. Горынина. – СПб.: НПО «Профессионал», 2009. – 776 с.
18. Горынин И. В., Рыбин В. В., Малышевский В. А. Основные аспекты создания и применения высокопрочной конструкционной стали // *Вопросы материаловедения.* – 1999. – № 3 (20). – С. 7–21.
19. Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А. *Физико-механическое моделирование процессов разрушения.* – СПб.: Политехника, 1993. – 391 с.
20. Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Гуленко А. Г., Костылев В. И., Швецова В. А. Дальнейшее развитие модели Прометей и метода Unified Curve. Часть 1. Развитие модели Прометей // *Вопросы материаловедения.* – 2016. – № 4 (88). – С. 120–150.
21. Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Швецова В. А., Юрченко Е. Ю. Радиационное и термическое охрупчивание корпусных реакторных сталей: связь механизмов охрупчивания и разрушения с характеристиками зарождения и распространения трещин. Часть 1. Стратегия, программа и методы экспериментальных и расчетных исследований // *Вопросы материаловедения.* – 2024. – № 14 (117). – С. 173–194.
22. Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Швецова В. А., Юрченко Е. Ю. Радиационное и термическое охрупчивание корпусных реакторных сталей: связь механизмов охрупчивания и разрушения с характеристиками зарождения и распространения трещин. Часть 2. Характеристики прочности и пластичности // *Вопросы материаловедения.* – 2024. – № 14 (117). – С. 195–209.
23. Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Швецова В. А., Юрченко Е. Ю. Радиационное и термическое охрупчивание корпусных реакторных сталей: связь механизмов охрупчивания и разрушения с характеристиками зарождения и распространения трещин. Часть 3. Моделирование хрупкого разрушения и анализ связи характеристик зарождения и распространения микротрещин с механизмом охрупчивания // *Вопросы материаловедения.* – 2024. – № 2 (118). – С. 166–186.
24. Lin T., Evans A. G., Ritchie R. O. A statistical model of brittle fracture by transgranular cleavage // *Journal of Mechanics and the Physics of Solids.* – 1986. – V. 25. – P. 477–497.

ЭФФЕКТИВНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЫСОКО- И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ УСТАЛОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

О. Ю. ВИЛЕНСКИЙ, канд. техн. наук, Д. Л. ОСЕТРОВ, канд. физ.-мат. наук,
Е. Ю. ПОВЕРЕННОВ, канд. физ.-мат. наук

АО «ОКБМ Африкантов», 603074, Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15.

E-mail: poverennov@okbm.nnov.ru

Поступила в редакцию 14.05.2024

После доработки 28.06.2024

Принята к публикации 16.08.2024

Для геометрически сложных конструкций атомных энергетических установок обоснование циклической прочности на основе современных подходов является трудоемким и ресурсоемким процессом. С практической точки зрения в нормативных документах по обоснованию прочности конструкций атомной энергетики предлагается довольно упрощенный подход. В настоящей работе численно обоснована неприменимость такого подхода для случая с неизотермическим циклическим нагружением. В связи с этим разработана новая эффективная методика оценки усталости конструкций в условиях изотермического или неизотермического циклических нагружений. На основе численных упругопластических расчетов классических задач деформирования цилиндрических стержней с глубокими кольцевыми надрезами различной остроты подтверждена эффективность разработанной методики.

Ключевые слова: усталость материала, упругопластический расчет, истинная диаграмма деформирования, эффект Баушингера, циклическая память материала, модель кинематического упрочнения, коэффициент концентрации напряжений, неизотермическое циклическое нагружение, жесткое и мягкое нагружение, ползучесть материала

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-162-173

ЛИТЕРАТУРА

1. ПНАЭ Г-7-002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Госатомнадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. ГОСТ Р 59115.10–2021. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Уточненный поверочный расчет на стадии проектирования. Росстандарт. – М.: ФГБУ РСТ, 2021.
3. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении. Справочник / Д. А. Гохфельд, Л. Б. Гецов, К. М. Кононов и др. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 408 с.
4. Chaboche J.-L., Lemaitre J. Mechanics of Solid Materials. Cambridge University Press. – 1990. – P. 556.
5. Бондарь В. С. Неупругость. Варианты теории. – М.: Физматлит, 2004. – 144 с.
6. Казаков Д. А., Капустин С. А., Коротких Ю. Г. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций. – Н. Новгород: Изд-во Нижегород. ун-та, 1994. – 225 с.
7. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
8. Вейвода С., Влк М., Филатов В. М. Расчет сосудов на циклическую прочность с учетом истории нагружения // Проблемы прочности. – № 3. – 1988. – С. 87–91.
9. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016611384, 01.02.2016. Программа расчета циклической и длительной циклической прочности ВТУ / Белокрылов П. Ю., Банкрутенко В. В., Виленский О. Ю., Татарский Ю. Н., Осетров Д. Л. – Заявка № 2015618387 от 14.09.2015.

ОЦЕНКА ПОРИСТОСТИ В ОТЛИВКАХ ИЗ СПЛАВА СИЛУМИН МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Поступила в редакцию 19.04.2024

После доработки 12.09.2024

Принята к публикации 12.09.2024

Представлена информация об исследовании эталонных образцов пористости алюминиевого литейного сплава силумин методом рентгеновской компьютерной томографии. Проведенные теоретические расчеты и эксперименты в перспективе ставят перед собой цель разработать рентгеновскую томографическую шкалу газовой пористости, которая была бы абсолютно адекватной результатам металлографии. В настоящее время широко используется рентгенографическая шкала пористости, по которой оператор визуально сравнивает эталонную рентгенограмму с рентгенограммой объекта контроля. Подобная оценка качества неразрушающего контроля субъективна и определяется опытом и физическим состоянием производящего контроль оператора, качеством рентгенографических изображений. Рентгеновская компьютерная томография эталонных образцов пористости, обеспечивая количественные показатели пористости, полностью исключает субъективный фактор.

Ключевые слова: алюминиевые литейные сплавы, шкала пористости, эталонные рентгенограммы, рентгеновская вычислительная томография, субъективная и объективная оценки пористости

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-174-184

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н., Белов Е. В., Трапезников А. В., Леонов А. А., Зайцев Д. В. Особенности упрочнения и кинетика старения литейного алюминиевого высокопрочного сплава на основе системы Al–Si–Cu–Mg // *Авиационные материалы и технологии*. – 2021. – № 2. Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 21.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34
2. Ночовная Н. А., Иванов В. И., Якимова С. А., Исламов Р. С. Интерметаллическое соединение Ti₂AlNb – перспективный материал для авиационной и космической техники. Часть 2. Кратковременная прочность и сопротивление ползучести Ti₂AlNb сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2024. – № 1, Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 20.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-14-32
3. Корнышева И. С., Волкова Е. Ф., Гончаренко Е. С., Мухина И. Ю. Перспективы применения магниевых и литейных алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 212–222.
4. Трапезников А. В., Иванов В. И., Прохорчук Е. А., Решетников Ю. В. Перспективные интерметаллидные Al₂Ti сплавы для изготовления деталей литейными методами (обзор) // *Труды ВИАМ*. – 2021. – № 5, Ст.03. URL: <http://www.viam-works> (дата обращения 18.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-23-38
5. Косарина Е. И., Михайлова Н. А., Демидов А. А., Крупнина О. А., Смирнов А. В., Осияненко Н. В. Цифровые технологии в рентгеновском неразрушающем контроле: учеб. пособие. – М: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. – 316 с.
6. Казанцев С. П., Фурман Е. Л. Дефекты в отливках при литье по выплавляемым моделям [электронный образовательный текстовый ресурс]. – Екатеринбург: Уральский Федеральный университет, 2019. – 110 с.
7. Левчук В. В., Трапезников А. В., Пентюхин С. И., Леонов А. А. Способы литья тонкостенной детали из алюминиевого сплава типа силумин (обзор) // *Труды ВИАМ*. – 2018. – № 6. Ст.04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 01.04.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-30-38
8. Дуюнова В. А., Молодцов С. В., Леонов А. А., Трапезников А. В. Применение методов компьютерного моделирования при изготовлении сложноконтурной отливки // *Труды ВИАМ*. – 2019. – № 11, Ст.01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 20.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-3-11
9. ГОСТ 1583–93. «Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия». – М.: ИПК «Изд-во стандартов», 1997. – 30 с. / <http://www.standarts.ru> (дата обращения 18.03.2024).
10. ISO 16371–1. Non-destructive testing – Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates – Part 1: Classification of systems / Reference number ISO 16371-1:2011(E). – 25 p.

11. Перечень типовых архивных документов, образующихся в научно-технической и производственной деятельности организаций, с указанием сроков хранения. Раздел 1: Научно-исследовательская деятельность [Приказ 142 от.28.12.21]. – Федеральное архивное агентство, 386 с.
12. Головинский П. А. Математические модели. Кн. 1: Теоретическая физика и анализ сложных систем. – М.: Научная и учебная литература, 2011. – С. 56–73
13. Сухарев А. Г. Минимаксные алгоритмы в теории численного анализа. – М.: Научная и учебная литература, 2010. – 281 с.
14. Косарина Е. И., Смирнов А. В., Суворов П. В., Демидов А. А. Цифровые эталонные изображения при оценке качества отливок из алюминиевых и магнитных материалов // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 2 (106). – С. 182–194. DOI: 10.22349/1994-6716-2-182-194
15. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа: уч. пособие. Изд. 2-е. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. – 488 с.
16. Большов Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 416 с.

УДК 621.791.042

ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК ДЛЯ СВАРКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

В. Б. ГРИБАНОВА, П. В. МЕЛЬНИКОВ, канд. тех. наук

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49.
E-mail: mail@crism.ru

Поступила в редакцию 6.08.2024

Основной тенденцией при разработке химических составов сварочных материалов для сварки высокопрочных сталей является применение сложных систем легирования и раскисления, сочетающих легирующие, микролегирующие, раскисляющие и модифицирующие элементы, которые невозможно ввести в проволоку сплошного сечения. Получение оптимального количества игольчатого феррита в микроструктуре металла шва, а также обеспечение высокого уровня механических свойств может быть достигнуто путем контролируемого введения титана или титана с бором. Для обеспечения наиболее высокого уровня прочности и пластичности при комплексном микролегировании порошковых проволок содержание титана должно составлять порядка 0,04%, бора – 0,003%.

Ключевые слова: порошковые сварочные проволоки, механизированная сварка в защитных газах, хладостойкость, высокопрочные стали, легирование сварных швов

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-185-190

ЛИТЕРАТУРА

1. Мельников П. В. Разработка порошковых проволок малого диаметра для сварки в защитном газе, обеспечивающих хладостойкость металла шва при температурах до минус 60°C // Дис. ... канд. техн. наук, СПб., 2011. – 137 с.
2. Будниченко М. А., Аввакумов Ю. В. Внедрение современных сварочных материалов в кораблестроении. Разработка высокопроизводительной технологии механизированной сварки конструкций из высокопрочной стали с использованием порошковой проволоки ПП-A22/9 (Св-03Х22Н9АМЗ) в смеси защитных газов // Морской вестник – 2018. – № 3 (67). – С. 51–56.
3. Мазур А. А., Маковецкая О. К., Пустовойт С. В., Бровченко Н. С. Порошковые проволоки на мировом и региональных рынках сварочных материалов (обзор) // Автоматическая сварка – 2015. – № 5–6. – С. 68–74.
4. Шлепаков В. Н., Котельчук А. С., Гаврилюк В. А. Современные порошковые проволоки для сварки низколегированных сталей повышенной и высокой прочности // Автоматическая сварка. – 2017. – № 11 (769). – С. 13–18.

5. Gribanova V.B., Melnikov P.V., Gezha V.V. Ways of import substitution of powder wires in welding production // Proceedings of XIII International Conference Navy and Shipbuilding Nowadays: Construction materials. Strength and structural mechanics. – IKP NP-PRINT, 2024. – P. 198–201.
6. Карасев М. В., Работинский Д. Н., Калинин М. М., Волобуев Ю. С., Потапов Н. Н., Скутин В.С., Виханский Н. И., Тропин В. В. Особенности технологии производства и применения сварочных порошковых проволок для сварки в защитных газах // Тяжелое машиностроение. – 2021. – № 1–2. – С. 18–26.
7. Грибанова В. Б., Мельников П. В., Грибков О. И., Лукьянова Н. А. Системы легирования современных порошковых проволок для механизированной сварки в защитных газах высокопрочных судостроительных сталей // Вопросы материаловедения. – 2023. – № 4 (116). – С. 179–186.
8. Кантор М. М., Судьин В. В., Боженков В. А., Солнцев К. А. Микроструктура и ударная вязкость игольчатого феррита в сварных соединениях низколегированной стали по результатам множественных испытаний на ударный изгиб // Неорганические материалы. – 2023. – № 4, Т. 59. – С. 451–467.
9. Нохрина О. И., Рожихина И. Д., Дмитриенко В. И., Платонов М. А. Легирование и модифицирование стали с использованием природных и техногенных материалов. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2013. – 320 с.
10. Лямин А. В., Мадрахимов Д. У. Влияние наличия бора на фазовое состояние и свойства наплавочных материалов // Молодой ученый. – 2021. – № 4 (346). – С. 24–26.
11. Потапов А. И., Семан А. Е. Технологические особенности легирования стали бором // Изв. вузов: Черная металлургия. – 2012. – № 9. – С. 68–69.
12. Архаров В. И. Теория микролегирования сплавов. – М: Машиностроение, 1975. – 61с.

УДК 621.762.275:621.791.92

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛОСКИХ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ СИСТЕМЫ МЕДЬ – НЕРЖАВЕЮЩАЯ СТАЛЬ МЕТОДОМ ПРОВОЛОЧНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

К. С. ОСИПОВИЧ, канд. физ.-мат. наук, В. М. СЕМЕНЧУК, А. В. ЧУМАЕВСКИЙ, д-р тех. наук, В. Е. РУБЦОВ, канд. физ.-мат. наук, Е. А. КОЛУБАЕВ, д-р тех. наук

ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН», 634055, Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: osipovich_k@ispms.ru

Поступила в редакцию 22.07.2024

Представлены результаты исследования организации структуры и свойств биметаллических образцов системы медь – нержавеющая сталь, полученных методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии. Выявлены особенности формирования соединения разнородных материалов. Обнаружены неоднородности распределения меди и стали на границе раздела с формированием локальных областей механической смеси за счет перемешивания компонентов в жидком состоянии. Форма медных частиц в области механической смеси является свободной, близкой к сферической. Однородная и бездефектная структура переходной зоны между компонентами образца обеспечивает достаточно высокий уровень механических свойств, находящийся между свойствами меди и стали, который соответствует уровню свойств аналогичных материалов в литом состоянии.

Ключевые слова: аддитивное производство, проволочная электронно-лучевая 3D-печать, медь, нержавеющая сталь, микроструктура, микросегрегация, структурно-фазовые закономерности

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-191-199

ЛИТЕРАТУРА

1. Multi-Material Wire Arc Additive Manufacturing of low and high alloyed aluminum alloys with in-situ material analysis / T. Hauser et al. // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – V. 69. – P. 378–390. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.08.005

2. Metal additive manufacturing in aerospace: A review / B. Blakey-Milner et al. // *Materials and Design*. – 2021. – V. 209, N 110008. DOI 10.1016/j.matdes.2021.110008
3. Emerging metallic systems for additive manufacturing: In-situ alloying and multi-metal processing in laser powder bed fusion / S. L. Sing et al. // *Progress in Materials Science*. – 2021. – V. 119, N 100795. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2021.100795
4. Additive manufacturing of metals / D. Herzog et al. // *Acta Mater.* – 2016. – V. 117. – P. 371–392. DOI 10.1016/j.actamat.2016.07.019
5. Effect of processing parameters on microstructure and tensile properties of austenitic stainless steel 304L made by directed energy deposition additive manufacturing / Z. Wang et al. // *Acta Mater.* – 2016. – V. 110. – P. 226–235. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.03.019
6. Characterization of gradient CuAl–B4C composites additively manufactured using a combination of wire-feed and powder-bed electron beam deposition methods / A.V. Filippov et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – V. 859, N 157824. DOI 10.1016/j.jallcom.2020.157824
7. Sliding wear behavior and electrochemical properties of binder jet additively manufactured 316SS /bronze composites in marine environment / L. Wang et al. // *Tribology International*. – 2021. – V. 156, N 106810. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106810
8. Investigation of copper/stainless steel multi-metallic materials fabricated by laser metal deposition / X. Zhang et al. // *Materials Science and Engineering A*. – 2021. – V. 811, N 141071. DOI: 10.1016/j.msea.2021.141071
9. Micro-, Meso- and Macrostructural Design of Bulk Metallic and Polymetallic Materials by Wire-Feed Electron-Beam Additive Manufacturing / E. A. Kolubaev et al. // *Physical Mesomechanics*. – 2022. – V. 25. – P. 479–491. DOI: 10.1134/S1029959922060017
10. Crystallographic texture and mechanical properties by electron beam freeform fabrication of copper/steel gradient composite materials / G. Chen et al. // *Vacuum*. – 2020. – V. 171, N 109009. DOI: 10.1016/j.vacuum.2019.109009
11. Characterization of AA7075/AA5356 gradient transition zone in an electron beam wire-feed additive manufactured sample / V. Utyaganova et al. // *Materials Characterization*. – 2021. – V. 172, N 110867. DOI: 10.1016/j.matchar.2020.110867
12. Microstructure evolution of copper/steel gradient deposition prepared using electron beam freeform / X. Shu et al. // *Materials Letters*. – V. 213. – P. 374–377. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.11.016
13. Stabilization of austenitic structure in transition zone of “austenitic stainless steel/NiCr alloy” joint fabricated by wire-feed electron beam melting / V. A. Moskvina et al. // *Materials Letters*. – V. 277, N 128321. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.128321
14. Microstructure and mechanical properties of Ti–52 at % Al alloy synthesized in-situ via dual-wires electron beam freeform fabrication / J. Xu et al. // *J. Materials Science and Engineering A*. – 2020. – V. 798, N 140232. DOI: 10.1016/j.msea.2020.140232
15. Li X. Developing Cu modified Ti6Al4V alloys with a combination of high strength and ductility by electron beam freeform fabrication // *Vacuum*. – 2021. – V. 194, N 110638. DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110638
16. Solidification behavior and microstructure of Ti–(37–52) at % Al alloys synthesized in situ via dual-wire electron beam freeform fabrication / J. Xu et al. // *Additive Manufacturing*. – 2021. – V. 46, N 102113. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102113
17. Microstructure and mechanical properties of electron beam freeform fabricated TiB₂/Al–Cu composite / S. Lei et al. // *Materials Letters*. – 2020. – V. 277, N 128273. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.128273
18. Interfacial characteristic and mechanical performance of maraging steel-copper functional bimetal produced by selective laser melting based hybrid manufacture / C. Tan et al. // *Materials & Design*. – 2018. – V. 155. – P. 77–85. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.05.064
19. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди / Под ред. С. В. Шухардина. – М.: Наука, 1979.
20. Hunt J. D. Cellular and Primary Dendrite Spacings // *Proceedings of Solidification and Casting of Metals*. – Sheffield, England, 1979. – P. 3–9.

О СВЯЗИ ФИЗИЧЕСКИХ И АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ИЗДЕЛИЯХ И КОНСТРУКЦИЯХ СУДОСТРОЕНИЯ

Л. М. ХАСАНОВА, А. А. ПЕРРЕН, В. С. ТРЯСУНОВ, канд. техн. наук
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015,
Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49. E-mail: npk11@crism.ru

Поступила в редакцию 18.08.2024

Рассматривается связь физических и акустических характеристик стеклопластиков, изготовленных с использованием различных армирующих материалов и методов формования. Отрабатывается скорректированная методика контроля и расчета коэффициентов связи скорости ультразвука с плотностью и модулями упругости на различных видах стеклопластиков и проводится сравнительная оценка полученных результатов.

Ключевые слова: ультразвук, стеклопластик, плотность, модуль упругости, акустические характеристики

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-200-207

ЛИТЕРАТУРА

1. ОСТ5.9102–87. Стеклопластики конструкционные для судостроения. Методы неразрушающего контроля. Дата введения 1989-01-01 / ЦНИИСТ, 1989. – 43 с.
2. Гершберг М. В., Илюшин С. В., Смирнов В.И. Неразрушающие методы контроля судостроительных стеклопластиков. – Л.: Судостроение, 1971.
3. Латифов В. А. Диагностика жесткости и прочности материалов. – Рига: Зинатне, 1968. – 272 с.
4. Гершберг М. В., Ланчин В. Ф., Ланчина Т. Н. Свойства судостроительных стеклопластиков и методы их контроля. Вып. 3. – Л.: Судостроение, 1974.
5. Ашкенази Е. К. Анизотропия древесины и древесных материалов. – М.: Лесная промышленность, 1978.
6. Перрен А. А. Контроль физико-механических свойств стеклопластиков акустическими методами // В мире неразрушающего контроля. – 2005. – Вып. 2 (28).
7. Перрен А. А., Баганик А. М. Контроль модулей упругости полимерных композиционных материалов резонансным методом // В мире неразрушающего контроля. – 2012. – Вып. 4 (58). – С. 13–16.
8. Дзенис В. В. Применение ультразвуковых преобразователей с точечным контактом для неразрушающего контроля. – Рига, 1987.

CONTENTS

METALS SCIENCE. METALLURGY

Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Yuriev A.B., Minenko S.S., Chapaikin A.S., Litovchenko I.Yu., Semin A.P. Structural-phase changes in high-speed steel surfacing during tempering and electron beam treatment 5

Kozlova I.R., Vasilieva E.A., Markova Yu.M. Increasing the strength of marine titanium alloys by solid solution and structural hardening 17

Ganiev I.N., Aliev F.A., Ismonov R.D., Safarov A.M., Khodzhanazarov H.M. Thermophysical properties and thermodynamic functions of aluminum conductor alloy E-AlMgSi (aldrey) doped with thallium..... 26

FUNCTIONAL MATERIALS

Sivakova A.O., Semenchuk I.E., Karpov A.V., Sychev A.E. Thermoelectric Properties of an alloy based on the Al–Mn–Si system, produced by SHS pressing..... 37

Mazeeva A.K., Kim A.E., Volokitina E.V., Nazarov D.V., Staritsyn M.V., Masailo D.V. Magnetic properties of alloy powders of the Co–Ni–Al system with a composition close to equiatomic, obtained by the mechanical alloying..... 46

Bobyry V.V., Knyazyuk T.V., Mukhamedzyanova L.V., Staritsyn M.V., Kuznetsov P.A. Study of the influence of direct laser deposition parameters on the structure and properties of high-strength 08KH14NDL stainless steel 59

POLYMER STRUCTURAL MATERIALS

Zharov V.E., Sedakova E.B., Skotnikova M.A., Li S., Naumov A.N. Study of the possibility of creating a tribotechnically effective nanocomposite based on polyetheretherketone with a dispersed filler of low wear resistance 69

Andrianova K.A., Nikitin V.S., Amirov R.R., Antipin I.S., Amirova L.M. Carbon fiber with a gradient of matrix composition based on benzoxazine-phthalonitrile compositions 78

Kurshev E.V., Lonsky S.L., Egorov Yu.A., Zelenina I.V. Microstructural and chemical composition changes in polyimide carbon-fiber-reinforced plastics in response to simulated operational factors..... 88

WELDING. WELDING MATERIALS AND TECHNOLOGIES

Mamadaliyev R.A., Plekhanov V.I., Ovsyannikov V.E. Effects of multipass welding on the chemical composition, structure and properties of austenitic steels compounds..... 103

Golikov N.I., Saraev Yu.N., Sidorov M.M. Research of prospective welding technologies, materials and equipment based on natural climatic tests in natural cold conditions..... 113

CORROSION AND PROTECTION OF METALS

Vagapov R.K., Ibatullin K.A., Gaizullin A.D., Fedotov D.S. On the corrosive impact of variable liquid wetting on the surface of pipe steel for gas lines in the presence of CO₂..... 124

STRUCTURAL INTEGRITY AND SERVICEABILITY OF MATERIALS

Ilyin A.V., Lavrentiev A.A., Mizetsky A.V., Sadkin K.E. Regarding the application of the local criterion for brittle fracture in order to relate the crack resistance of high-strength steels with the test results of samples with a concentrator and the microstructural characteristics of the material..... 137

Vilensky O.Yu., Osetrov D.L., Poverennov E.Yu. An effective method for evaluating high- and low-temperature fatigue of structural elements 162

TESTING, DIAGNOSTICS AND QUALITY CONTROL OF MATERIALS

Kosarina E.I., Osiyanenko N.V., Demidov A.A., Smirnov A.V. Evaluation of porosity in silumin alloy castings by X-ray tomograph 174

20th CONFERENCE OF YOUNG SCIENTISTS AND SPECIALISTS AT THE NATIONAL RESEARCH CENTER “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”

Gribanova V.B., Melnikov P.V. Features of alloying systems for flux cored wires for welding of high strength shipbuilding steel with shielding gas 185

Osipovich K.S., Semenchuk V.M., Chumaevsky A.V., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Characteristics of the structure and properties of bimetallic flat and cylindrical samples of the system copper – stainless steel manufactured by wire-feed electron beam additive technology 191

Khasanova L.M., Perren A.A., Tryasunov V.S. On the correlation between physical and acoustic characteristics of PCM used in shipbuilding products and structures 200

A list of articles published in the scientific and technical journal “Voprosy Materialovedeniya” in 2024 208

STRUCTURAL-PHASE CHANGES IN HIGH-SPEED STEEL SURFACING DURING TEMPERING AND ELECTRON BEAM TREATMENT

Yu.F. IVANOV¹, Dr Sc. (Phys-Math), V.E. GROMOV², Dr Sc. (Phys-Math), A.B. YURIEV², Dr Sc. (Eng), S.S. MINENKO², A.S. CHAPAIKIN², I.Yu. LITOVCHENKO³, Dr Sc. (Phys-Math), A.P. SEMIN², Cand Sc. (Eng)

¹ Institute of High Current Electronics SB RAS, 2/3 Akademicheskoy Ave., 634055 Tomsk, Russian Federation.
E-mail: yufi55@mail.ru

² Siberian State Industrial University, 42 Kirov St, 654007 Novokuznetsk, Russian Federation.
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

³ Institute of Physics of Strength and Materials Science SB RAS, 2/4 Akademicheskoy Ave., 634055 Tomsk, Russian Federation. E-mail: litovchenko@spti.tsu.ru

Received June 18, 2024

Revised July 1, 2024

Accepted July 5, 2024

Abstract—Studying the structure and phase composition of high-speed steel R2M9 surfacing of medium-carbon steel 30KhGSA, transmission and scanning electron microscopy, X-ray phase and X-ray structural analysis were used. Heat treatment included three-fold high-temperature tempering with subsequent irradiation with pulsed electron beams. The solid solution based on α -iron is the main phase in the initial state and after heat treatment; the γ -phase is present in a small amount (3–5 mas.%). The lattice parameter of both phases decreases after tempering. Irradiation of the deposited layer with electron beams is accompanied by an increase in the crystal lattice parameter of the α -phase and its decrease for the γ -phase. The paper discusses reasons of the observed patterns. It has been established that the deposited layer is characterized by the presence of a carbide frame containing carbides of complex composition MeC, Me₆C, Me₂₃C₆, Me₇C₃, which is not destroyed after tempering and electron beam treatment. Carbide of composition Me₆C is the main phase forming the frame, and MeC is formed after tempering and electron beam treatment. The martensitic structure formed during surfacing contains nanosized inclusions of the second phase of the composition MoC, Mo₂C, Me₆C with a size of 20–45 nm, located in the martensite plates' volume and along the boundaries. Their volume fraction decreases to 19 mas.% after tempering and additional irradiation with electron beams.

Keywords: surfacing, high-speed steel, electron microscopy, heat treatment, pulsed electron beam, structure, phases

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-5-16

ACKNOWLEDGMENTS

The work was supported by the Russian Science Foundation grant No 23-19-00186. URL: <https://rscf.ru/project/23-19-00186>

REFERENCES

1. Gromov, V.E., Chapaikin, A.S., Nevsky, S.A., *Struktura, svoystva i modeli bystrorezhushchei stali posle otpuska i elektronno-puchkovoi obrabotki* [Structure, properties and models of high-speed steel after tempering and electron beam processing], Novokuznetsk: Polygraphist, 2024.
2. Ivanov, Yu.F., Gromov, V.E., Potekaev, A.I., Guseva, T.P., Chapaikin, A.S., Vashchuk, E.S., Structure and properties of R18U high-speed steel surfacing after its high tempering, *Russian Physics Journal*, 2023, V. 66, No 7, pp. 731–739. DOI: 10.1007/s11182-023-02999-w
3. Rakhadilov, B.K., Zhurerova, L.G., Scheffler, M., Khassenov, A.K., Change in high temperature wear resistance of high speed steel by plasma nitriding, *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series*, 2018, No 3 (91), pp. 59–65.
4. Rakhadilov, B.K., Wieleba, W., Kilyshkanov, M.K., Kenesbekov, A.B., Maulet, M., Structure and phase composition of high-speed steels, *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series*, 2020, No 2 (98), pp. 83–92.

5. Barchukov, D.A., Tsygvintsev, A.V., Afanasieva, L.E., Osobennosti formirovaniya struktury i svoistv bystrorezhushchei stali pri impulsno-dugovoi naplavke [Features of the formation of the structure and properties of high-speed steel during impulse-arc surfacing], *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta: Ser. Tekhnicheskie nauki*, 2019, No 4 (4), pp. 16–21.
6. Mozgovoy, I.V., Shneider, E.A., *Naplavka bystrorezhushchei stali* [Surfacing of high-speed steel], Omsk: OmGTU, 2016.
7. Wu, W., Chen, W., Yang, S., Lin, Y., Zhang, S., Cho, T.-Y., Lee, G.H., Kwon, S.-Ch., Design of AlCrSiN multilayers and nanocomposite coating for HSS cutting tools, *Appl. Surf. Sci.*, 2015, V. 351, pp. 803–810.
8. Cho, I.S., Amanov, A., Kim, J.D., The effects of AlCrN coating, surface modification and their combination on the tribological properties of high speed steel under dry conditions, *Tribol. Int.*, 2015, V. 81, pp. 61–72.
9. Kottfer, D., Ferdinandy, M., Kaczmarek, L., Maňková, I., Beňo, J., Investigation of Ti and Cr based PVD coatings deposited onto HSS Co 5 twist drills, *Appl. Surf. Sci.*, 2013, V. 282, pp. 770–776.
10. Gerth, J., Wiklund, U., The influence of metallic interlayers on the adhesion of PVD TiN coatings on high-speed steel, *Wear*, 2008, V. 264, pp. 885–892.
11. Chaus, A.S., Rudnitsky, F.I., Structure and Properties of Cast Rapidly Cooled High-Speed Steel R6M5, *Metal Science and Heat Treatment*, 2003, V. 45, pp. 157–162.
12. Nefediev, S.P., Emeliushin, A.N., *Plazmennoe uprochnenie poverkhnosti* [Plasma surface hardening], Stary Oskol: TNT, 2021.
13. Geller, Yu.A., *Instrumentalnye stali* [Tool steels], Moscow: Metallurgiya, 1983.
14. Colaço, R., Gordo, E., Ruiz-Navas, E.M., Otasevic, M., Vilar, R., A comparative study of the wear behavior of sintered and laser surface melted AISI M42 high speed steel diluted with iron, *Wear*, 2006, V. 260, pp. 949–956.
15. Kaç, S., Kusiński, J., SEM and TEM microstructural investigation of high-speed tool steel after laser melting, *Mater. Chem. Phys.*, 2003, V. 81, pp. 510–512.
16. Ivanov, Yu.F., Gromov, V.E., Potekaev, A.I., Chapaikin, A.S., Semin, A.P., Guseva, T.P., Electron microscopy of high-speed steel/30HGSA steel interface, *Russian Physics Journal*, 2024, V. 67, No 1. pp. 24–33.
17. Malushin, N.N., Valuev, D.V., *Obespechenie kachestva detalei metallurgicheskogo oborudovaniya na vsekh etapakh ikh zhiznennogo tsikla putem primeneniya plazmennoi naplavki teplostoikimi staliami* [Ensuring the quality of metallurgical equipment parts at all stages of their life cycle through the use of plasma surfacing with heat-resistant steels], Tomsk: NTL, 2013.
18. Malushin, N.N., *Tekhnologii naplavki detalei gorno-metallurgicheskogo kompleksa teplostoikimi staliami vysokoi tverdosti* [Technologies for surfacing parts of the mining and metallurgical complex with heat-resistant steels of high hardness], Valuev, D.V., Osetkovsky, V.L., Solodsky, S.A. (Eds.), Tomsk: TPU, 2015.
19. Nefediev, S.P., Emelyushin, A.N., Vliyaniye azota na formirovaniye struktury i svoistv plazmennyykh pokryty tipa 10R6M5 [The influence of nitrogen on the formation of the structure and properties of plasma coatings of type 10P6M5], *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, Is. 3 (62), pp. 33–45.
20. Pochetukha, V.V., Baschenko, L.P., Gostevskaya, A.N., Budovskikh, E.A., Gromov, V.E., Chapaikin, A.S., Struktura i svoistva plazmennyykh pokryty iz bystrorezhushchei stali posle vysoko-temperaturnogo otpuska [Structure and properties of plasma coatings made of high-speed steel after high-temperature tempering], *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrialnogo universiteta*, 2023, No 3 (45), pp. 30–38. URL: [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-30-38](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-30-38)
21. Gromov, V.E., Kobzareva, T.Yu., Ivanov, Yu.F., Budovskikh, E.A., Bashchenko, L.P., Surface Modification of Ti Alloy by Electro-explosive Alloying and Electron-Beam Treatment, *AIP Conference Proceedings*, 2016, V. 1698, No 030006.
22. Gromov, V.E., Ivanov, Yu.F., Glezer, A.M., Kormyshev, V.E., Konovalov, S.V., Electron-Beam Modification of a Surface Layer Deposited on Low-Carbon Steel by Means of Arc Spraying, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2017, V. 81, No 1, pp. 1353–1359.
23. *Evolutsiya struktury poverkhnostnogo sloya stali, podvergnutoi elektronno-ionno-plazmennoi obrabotke* [Evolution of the structure of the surface layer of steel subjected to electron-ion-plasma treatment], Koval, N.N., Ivanov, Yu.F. (Eds.), Tomsk: NTL, 2016.
24. Egerton, F.R., *Physical Principles of Electron Microscopy*, Basel: Springer International Publishing, 2016.

25. Kumar, C.S.S.R., *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*, New York: Springer, 2014.
26. Carter, C.B., Williams, D.B., *Transmission Electron Microscopy*, Berlin: Springer International Publishing, 2016.

UDC 669.295:621.785.371:539.4

INCREASING THE STRENGTH OF MARINE TITANIUM ALLOYS BY SOLID SOLUTION AND STRUCTURAL HARDENING

I.R. KOZLOVA, Cand Sc. (Eng), E.A. VASILIEVA, Yu.M. MARKOVA

NRC "Kurchatov Institute" – CRISM "Prometey", 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg,
Russian Federation. E-mail: mail@crism.ru

Received June 26, 2024

Revised October 10, 2024

Accepted October 10, 2024

Abstract—The paper investigates ways of increasing the strength of the experimental high-alloy titanium alloy having a thermally unstable β -phase in the structure at room temperature. It is shown that solid solution and structural strengthening leads to a change in the phase and intrastructural state of the material under study, which, in turn, ensures an increase in strength characteristics. At the same time, depending on the annealing mode, an increase in the conditional yield strength from 1000 to 1200 MPa is ensured without a significant decrease of viscoplastic properties.

Keywords: marine titanium alloys, decomposition of metastable phases, structure heterogenization, mechanical properties, strengthening heat treatment, microstructure

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-17-25

REFERENCES

1. Chechulin, B.B., Ushkov, S.S., Suzdalev, I.V., Goldfain, V.N., Khesin, Yu.D., Filin, Yu.A., Fedorenko, Z.K., *Titanovye splavy v sudostroenii* [Titanium alloys in shipbuilding], Gorynin, I.V. (Ed.), TsNII "Rumb", 1990.
2. Ilyin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S., *Titanovye splavy. Sostav, struktura, svoystva* [Titanium alloys. Composition, structure, properties]: reference book, Moscow: VILS-MATI, 2009.
3. Gorynin, I.V., Ushkov, S.S., Khesin, Yu.D., *Nauchnye osnovy sozdaniya svarivaemykh titanovykh splavov morskogo naznacheniya* [The scientific basis for the creation of welded titanium alloys for marine use], *Voprosy Materialovedeniya*, 1999, No 3 (20), pp. 115–121.
4. Gorynin, I.V., Ushkov, S.S., Khatuntsev, A.N., Loshakova, N.I., *Titanovye splavy dlya morskoi tekhniki* [Titanium alloys for marine engineering], St Petersburg: Politekhnik, 2007.
5. Glazunov, S.G., Moiseev, V.N., *Konstruktivnye titanovye splavy* [Structural titanium alloys], Moscow: Metallurgiya, 1974.
6. Kozlova, I.R., *Vzaimosvyaz struktury i svoystv vysokoprochnykh morskikh titanovykh splavov pri povyshennykh temperaturakh primenitelno k izdeliyam energeticheskogo oborudovaniya* [The relationship between the structure and properties of high-strength marine titanium alloys at elevated temperatures in relation to power equipment products]: Thesis for the degree of Candidate of Sciences (Eng.), St Petersburg: CRISM Prometey, 2016.
7. Musienko, A.Yu., Leonov, V.P., Kozlova, I.R., Panotsky, D.A., *Kompyuternoe modelirovanie realnoi struktury titanovykh splavov pri issledovanii protsessov deformatsii i razrusheniya. Ch. 1: Postanovka zadachi i osnovnye polozheniya* [Computer modeling of the real structure of titanium alloys in the study of deformation and fracture processes. Part 1: Problem statement and main provisions], *Titan*, 2014, No 3 (45), pp. 45–54.
8. Polkin, I.S., *Uprochnyayushchaya termicheskaya obrabotka titanovykh splavov* [Hardening heat treatment of titanium alloys], Moscow: Metallurgiya, 1984.
9. Semenova, N.M., *Elektronno-mikroskopicheskoe issledovanie struktury titanovykh splavov s metastabilnoy beta-fazoy* [Electron microscopic study of the structure of titanium alloys with a metastable beta phase]: Thesis for the degree of Candidate of Sciences (Eng.), 1972.

THERMOPHYSICAL PROPERTIES AND THERMODYNAMIC FUNCTIONS OF ALUMINUM CONDUCTOR ALLOY E- AlMgSi (ALDREY) DOPED WITH THALLIUM

I.N. GANIEV, Dr Sc. (Chem), Academician of the National Academy of Sciences of Tajikistan, F.A. ALIEV, Cand. Sc. (Eng), R.D. ISMONOV, Cand. Sc. (Eng), A.M. SAFAROV, Dr Sc. (Eng), H.M. KHODZHANAZAROV, Cand. Sc. (Eng)

Tajik Technical University named after M.S. Osimi, 10 Academician Radzhabov Ave, 734042 Dushanbe, Republic of Tajikistan. E-mail: ganievisatullo48@gmail.com

Received May 13, 2024

Revised May 22, 2024

Accepted July 17, 2024

Abstract—At present, aluminum and its alloys are successfully replacing metals and alloys traditionally used in a number of areas. One of the promising areas of aluminum use is the electrical engineering industry. Thus, the conductive aluminum alloy of the E- AlMgSi (Aldrey) type is characterized by high strength and good ductility. With appropriate heat treatment, this alloy acquires high electrical conductivity. Wires made from it are used almost exclusively for overhead power lines. The article presents the results of a study of the temperature dependence of the heat capacity, heat transfer coefficient and thermodynamic functions of the aluminum alloy E- AlMgSi (Aldrey) with thallium. The studies were carried out in the “cooling” mode. It is shown that with increasing temperature, the values of the heat capacity, heat transfer coefficient, enthalpy and entropy of the E- AlMgSi (Aldrey) alloy with thallium increase, and the value of the Gibbs energy decreases. With the addition of thallium up to 1 wt. % decreases the heat capacity, heat transfer coefficient, enthalpy and entropy of the initial alloy and increases the Gibbs energy.

Keywords: aluminum alloy E- AlMgSi (Aldrey), thallium, heat capacity, heat transfer coefficient, “cooling” mode, enthalpy, entropy, Gibbs energy

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-26-36

REFERENCES

1. Usov, V.V., Zaimovsky, A.S., *Provodnikovye, reostatnye i kontaktnye materialy. Materialy i splavy v elektrotekhnike* [Conductor, rheostatic and contact materials. Materials and alloys in electrical engineering], Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1957, V. 2.
2. *Alyuminievye splavy: svoystva, obrabotka, primeneniye* [Aluminum alloys: properties, processing, application], Raitbarg, L.H. (Ed.), Moscow: Metallurgiya, 1979.
3. Alieva, S.G., Altman, M.B., Ambartsumyan, S.M., et al., *Promyshlennyye alyuminievye splavy* [Industrial aluminum alloys]: reference book, Kvasov, F.I., Fridlyander, I.N. (Eds.), Moscow: Metallurgiya, 1984.
4. Beletsky, V.M., Krivov, G.A., *Alyuminievye splavy (Sostav, svoystva, tekhnologiya, primeneniye)* [Aluminum alloys (Composition, properties, technology, application)], Fridlyander, I.N. (Ed.), Kiev: KOMITEKH, 2005.
5. Chlistovsky, R.M., Heffernan, P.J., DuQuesnay, D.L., Corrosion-fatigue behaviour of 7075-T651 aluminum alloy subjected to periodic overloads, *Internat. J. Fatigue*, 2007, V. 29, No 9–11, pp. 1941–1949.
6. Luk, A.R., Suslina, A.A., *Alyuminy i ego splavy* [Aluminum and its alloys], Samara: SGTU, 2013.
7. Safarov, A.M., Samiev, K.A., Teplovye i teplofizicheskie svoystva alyuminievo-berillievyykh splavov s redkozemelnyimi metallami [Thermal and thermophysical properties of aluminum-beryllium alloys with rare earth metals], *Izvestiya Akademii nauk Respubliki Tadjikistan*, 2007, No 1, pp. 27–35.
8. Ismonov, R.D., Temperaturnaya zavisimost teploemkosti i izmeneniye termodinamicheskikh funktsii splava AB1 (Al+1%Be), modifitsirovannogo galliem [The temperature dependence of the heat capacity and the change in the thermodynamic functions of the alloy AB1 (Al+1%Be) modified with gallium], *Politekhnicheskyy vestnik. Ser.: Inzhenernyye issledovaniya*, 2021, No 3 (53), pp. 31–34.
9. Ganiev, I.N., Mulloeva, N.M., Nizomov, Z., Obidov, F. U., Ibragimov, N.F., Temperature dependence of the specific heat and thermodynamic functions of alloys of the Pb–Ca system, *High Temperature*, 2014, V. 52, Is. 1, pp. 138–140.

10. Khudoyberdizoda, S.U., Ganiev, I.N., Otadzhonov, S.E., Eshov, B.B., Yakubov, U.Sh., Vliyanie medi na teployomkost i izmeneniya termodinamicheskikh funktsiy svintsa [The influence of copper on the heat capacity and changes in the thermodynamic functions of lead], *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2021, V. 59, No 1, pp. 55–61.
11. Ismonov, R.D., Ganiev, I.N., Odiazoda, H.O., Safarov, A.M., Ibrokhimov, N.F., Udelnaya teploemkost i izmenenie termodinamicheskikh funktsiy alyuminievogo splava AB1 (Al+1%Be) [Specific heat capacity and change in thermodynamic functions of aluminum alloy AB1 (Al+1%Be)], *Politekhichesky vestnik. Ser.: Inzhenernyye issledovaniya*, 2019, No 1 (45), pp. 90–96.
12. Ganiev, I.N., Aliev, F.A., Odiazoda, H.O., Safarov, A.M., Dzhailoev, Dzh.H., Teploemkost i termodinamicheskie funktsii alyuminievogo provodnikovogo splava E-AlMgSi (Aldrey), legirovannogo galliem [Heat capacity and thermodynamic functions of aluminum conductor alloy E-AlMgSi (Aldrey), doped with gallium], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeny. Materialy elektronnoy tekhniki*, 2019, V. 22, No 3, pp. 219–227.
13. Ismonov, R.D., Ganiev, I.N., Odiazoda, H.O., Safarov, A.M., Aliev, F.A., Vliyanie dobavok indiya na korroziionnyuyu ustoychivost, teploemkost i izmeneniya termodinamicheskikh funktsiy alyuminievogo splava AB1 [The effect of indium additives on corrosion resistance, heat capacity and changes in the thermodynamic functions of aluminum alloy AB1], *Vestnik Saratovskogo gos. tekhn. universiteta*, 2022, No 3 (94), pp. 81–91.
14. Rostokin, V.I., Issledovanie zavisimosti teploemkosti metallov ot temperatury [Investigation of the dependence of the heat capacity of metals on temperature], *Fizicheskoe obrazovanie v vuzakh*, 2011, V. 17, No 3, pp. 54–65.
15. Kirov, S.A., Kozlov, A.V., Saletsky, A.M., Kharabadze, D.E., *Izmerenie teploemkosti i teploty plavleniya metodom okhlazhdeniya* [Measurement of heat capacity and melting heat by the cooling method]: study guide, Moscow: Fizichesky fakultet MGU im. M.V. Lomonosova, 2012.
16. Rogachev, N.M., Guseva, S.I., *Opredelenie udelnoi teploemkosti tverdykh tel* [Determination of the specific heat capacity of solids]: Methodological recommendations for students on conducting laboratory work and practical classes No 1–23, Samara: Samarsky gosudarstvenny aerokosmichesky universitet imeni akademika S.P. Korolova, 2012.
17. Tarsin, A.V., Kosterin, K.S., *Opredelenie teploemkosti metallov metodom okhlazhdeniya* [Determination of the heat capacity of metals by the cooling method]: laboratory classes, Ukhta: Ukhtinsky gosudarstvenny tekhnichesky universitet, 2014.
18. Menliev, Sh., Gullyeva, A., Spiridonov, A., *Opredelenie teploemkosti metallov metodami nagreva i okhlazhdeniya* [Determination of the heat capacity of metals by heating and cooling methods]: collection of scientific papers of students, Elista, 2020, pp. 119–121.
19. Guseinov, F.N., Seidzade, A.E., Yusibov, Yu.A., Babanly, M.B., Termodinamicheskie svoystva soedineniya SnSb₂Te₄ [Thermodynamic properties of the compound SnSb₂Te₄], *Neorganicheskie materialy*, 2017, V. 53, No 4, pp. 347–350.
20. Bodryakov, V.Yu., O korrelyatsii temperaturnykh zavisimostei teplovogo rasshireniya i teploemkosti vplot do tochki plavleniya tugoplavkogo metalla: molibden [On the correlation of temperature dependences of thermal expansion and heat capacity up to the melting point of a refractory metal: molybdenum], *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2014, V. 52, No 6, pp. 863–868.
21. Maltsev, M.V., *Modifikatory struktury metallov i splavov* [Modifiers of the structure of metals and alloys], Moscow: Metallurgiya, 1964.
22. Aliev, F.A., Ganiev, I.N., Safarov, A.M., *Svoystva alyuminievogo splava E-AlMgSi (Aldrey) s elementami podgruppy galliya* [Properties of the aluminum alloy E-AlMgSi (Aldrey) with elements of the gallium subgroup], Dushanbe: TTU im. M.S. Osimi, 2023.
23. Ismonov, R.D., Odiazoda, H.O., Safarov, A.M., *Alyuminievyy splav AB1 s elementami podgruppy galliya* [Aluminum alloy AB1 with elements of the gallium subgroup], Dushanbe: TTU imeni M.S. Osimi, 2023.

UDC 621.762.4:537.322.11

THERMOELECTRIC PROPERTIES OF AN ALLOY BASED ON THE Al–Mn–Si SYSTEM, PRODUCED BY SHS PRESSING

Received July 4, 2024

Revised July 16, 2024

Accepted September 2, 2024

Abstract—A thermoelectric alloy containing the Mn₅ (Si_{2.5}Al_{0.5}) phase was obtained for the first time using self-propagating high-temperature synthesis combined with pressing. The microstructure of the alloy is represented by grains up to 10 μm in size. X-ray phase analysis showed the presence of the following phases in the synthesized sample: Mn₅ (Si_{2.5}Al_{0.5}), TiC and SiO₂. The presence of the TiC and SiO₂ phases is due to the specific features of the sample synthesis using the SHS pressing method. A study of the thermoelectric characteristics of the material was conducted. The value of the Seebeck coefficient (S) at room temperature is about 8 μV/K and reaches a wide maximum of 9–10 μV/K at T = 360 K, and the maximum value of specific electrical resistance of 1.5·10⁻² Ohm·cm is achieved at room temperature.

Keywords: SHS pressing, microstructure formation, intermetallics, thermoelectric alloy, Seebeck coefficient, electrical resistance

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-37-45

ACKNOWLEDGMENTS

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education within the framework of the State Assignment of ISMAN RAS, state registration number FFSZ-2022-0010 (122032900080-3).

REFERENCES

1. Skokov, K.P., Gutfleisch, O., Heavy rare earth free, free rare earth and rare earth free magnets – Vision and reality, *Scr. Mater.*, 2018, V. 154, pp. 289–294. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.01.032>
2. Berkowitz, A.E., Livingston, J.D., Walter, J.L., Properties of Mn-Al-C magnets prepared by spark erosion and other rapid solidification techniques, *J. Appl. Phys.*, 1984, V. 55, pp. 2106–2108. URL: <https://doi.org/10.1063/1.333579>
3. Chaturvedi, A., Yaqub, R., Baker, I., Microstructure and magnetic properties of bulk nanocrystalline MnAl, *Metals*, 2014, V. 4, pp. 20–27. URL: <https://doi.org/10.3390/met4010020>
4. Jian, H., Skokov, K.P., Gutfleisch, O., Microstructure and magnetic properties of Mn-Al-C alloy powders prepared by ball milling, *J. Alloys Compd.*, 2015, V. 622, pp. 524–528. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.10.138>
5. Bittner, F., Freudenberger, J., Schultz, L., Woodcock, T.G., The impact of dislocations on coercivity in L10-MnAl, *J. Alloys Compd.*, 2017, V. 704, pp. 528–536. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5130064>
6. Thielsch, J., Bittner, F., Woodcock T.G., Magnetization reversal processes in hot-extruded τ-MnAl-C, *J. Magn. Magn. Mater.*, 2017, V. 426, pp. 25–31. DOI:10.1016/j.jmmm.2016.11.045
7. Bance, S., Bittner, F., Woodcock, T.G., Schultz, L., Schrefl, T., Role of twin and anti-phase defects in MnAl permanent magnets., *Acta Mater.*, 2017, V. 131, pp. 48–56. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.04.004>
8. Bittner, F., Schultz, L., Woodcock, T.G., The role of the interface distribution in the decomposition of metastable L10-Mn₅Al₄₆, *J. Alloys Compd.*, 2017, V. 727, pp. 1095–1099. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.197>
9. Madugundo, R., Hadjipanayis, G.C., Anisotropic Mn-Al-(C) hot-deformed bulk magnets, *J. Appl. Phys.*, 2016, V. 119, p. 013904. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4939578>
10. Levashov, E.A., Bogatov, Y.V., Rogachev, A.S., Pityulin, A.N., Borovinskaya, I.P., Merzhanov, A.G., Specific features of structure formation of synthetic hard tool materials in the SHS compacting process, *J. Eng. Phys. and Thermophys.*, 1992, V. 63, pp. 1091–1105. URL: <https://doi.org/10.1007/BF00853505>
11. Leskovar, B., Samardžija, Z., Koblar, M., et al., Development of an Al-Mn-Si-Based Alloy with an Improved Quasicrystalline-Forming Ability, *JOM*, 2020, V. 72, pp. 1533–1539. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03702-6>
12. Friesa, S.G., Jantzen, T., Compilation of CALPHAD formation enthalpy data. Binary intermetallic compounds in the COST 507 Gibbsian database, *Thermochimica Acta*, 1998, V. 314, pp. 23–33. URL: [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(97\)00478-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(97)00478-4)

13. Sivakova, A.O., Lazarev, P.A., Boyarchenko, O.D., Sychev, A.E., Sychev, G.A., Osobennosti formirovaniya γ -fazy Al_9Mn_3Si v usloviyakh vysokotemperaturnogo sinteza v sisteme Al-Mn-Si: gorenie, strukturo- i fazoobrazovanie [Features of the formation of the Al_9Mn_3Si -phase under conditions of high-temperature synthesis in the Al-Mn-Si system: gorenie, structuro- and phase formation], *FGV*, 2024, No 5. DOI: 10.15372/FGV2023.9355
14. Shcherbakov, V.A., Gryadunov, A.N., Alymov, M.I., Synthesis and Characteristics of the B_4C-ZrB_2 Composites, *Lett. Mater.*, 2017, No 7 (4), pp. 398–401. URL: <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2017-4-398-40115>
15. Prince, A., *Materials Science International Team*, *Isothermal section at 950°C: Datasheet from MSI Eureka*, SpringerMaterials. URL: https://materials.springer.com/msi/phase-diagram/docs/sm_msi_r_10_014597_01_full_LnkDia1 (reference date 21/11/2024)
16. Belov, N.A., Eskin D.G., Aksenov, A.A., *Multicomponent Phase Diagrams: Applications for Commercial Aluminum Alloys*. P. 1. Alloys of the Al-Fe-Mn-Si System, Amsterdam; Boston: Elsevier Science, 2005, pp. 1–46. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044537-3.X5000-8>
17. Karpov, A.V., Sychev, A.E., Sivakova, A.O., Ustroistvo dlya izmereniya koeffitsienta Zeebeka termoelektricheskikh materialov v diapazone temperatur 300–800 K [Device for measuring the Seebeck coefficient of thermoelectric materials in the temperature range 300-800 K], *Izmeritel'naya tekhnika*, 2023, No 8, pp. 67–72. URL: <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-8-67-72> 2023
18. Karpov, A.V., Morozov, Y.G., Bunin, V.A., Borovinskaya, I.P., Effect of Ytria additions on the electrical conductivity of SHS nitride ceramics, *Inorganic Materials*, 2002, V. 38, pp. 631–634. URL: <https://doi.org/10.1023/A:1015881922939>
19. *Program for Thermodynamics Equilibrium Calculations "THERMO"*. URL: <https://ism.ac.ru/thermo/> (reference date 21/11/2024).
20. Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih sistem [Diagrams of the state of double metal systems], Lyakishev, N.P. (Ed.), Moscow: Mashinostroenie, 1996–2000.
21. Silva, M.R., Brown, P.J., Forsyth, J.B., Magnetic moments and magnetic site susceptibilities in Mn_5Si_3 , *J. Phys.: Cond. Matt.*, 2002, V. 14, p. 8707. URL: <https://doi.org/10.1088/0953-8984/14/37/307>
22. Bie, L., Chen, X., Liu, P., Zhang, T., Xu, X., Morphology Evolution of Mn_5Si_3 Phase and Effect of Mn content on Wear Resistance of Special Brass, *Metals and Materials International*, 2020, V. 26, pp. 431–443. URL: <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00243-0>
23. Kourov, N.I., Marchenkov, V.V., Korolev, A.V., Stashkova, L.A., Emelyanova, S.M., Weber, H.W., Osobennosti svoistv polumetallicheskih ferromagnitnykh splavov Gejslera: Fe_2MnAl , Fe_2MnSi i Co_2MnAl [Properties of semi-metallic ferromagnetic Geisler alloys: Fe_2MnAl , Fe_2MnSi and Co_2MnAl], *Fizika tverdogo tela*, 2015, V. 57, Is. 4, pp. 684–691. DOI: 10.31857/S0015323023600624
24. Berezovsky, V.V., Bazaleeva, K.O., Kalashnikov, V.S., Zavisimost udelnogo elek-trosoprotivleniya tekhnicheskii chistogo titana ot temperatury posle intensivnoi plasticheskoi deformatsii [Dependence of the electrical resistivity of technically pure titanium on temperature after intense plastic deformation], *Trudy VIAM*, 2015, No 3, pp. 34–37. URL: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-3-5-5>
25. Gantmaher, V.F., *Elektrony v neuporyadochennykh sredakh* [Electrons in disordered media], Moscow: FIZMAILIT, 2005.
26. Mooij, J.H., Electrical conduction in concentrated disordered transition metal alloys, *Physica Status Solidi (a)*, 1973, V. 17, Is. 2, pp. 521–530. DOI:10.1002/pssa.2210170217

UDC 621.762.22:537.622

MAGNETIC PROPERTIES OF ALLOY POWDERS OF THE Co-Ni-Al SYSTEM WITH A COMPOSITION CLOSE TO EQUIATOMIC, OBTAINED BY THE MECHANICAL ALLOYING

A.K. MAZEEVA¹, Cand Sc. (Eng), A.E. KIM¹, E.V. VOLOKITINA¹, D.V. NAZAROV², Cand Sc. (Chem), M.V. STARITSYN³, D.V. MASAILO¹, Cand Sc. (Eng)

¹ Peter the Great St Petersburg Polytechnic University, 29, Polytechnicheskaya St, 195251 St Petersburg, Russian Federation

² St Petersburg State University, 7/9 Universitetskaya Emb., 199034 St Petersburg, Russian Federation.
E-mail: denis.nazarov@spbu.ru

³ NRC "Kurchatov Institute" – CRISM "Prometey", 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: npk3@crism.ru

Received March 27, 2024

Revised May 22, 2024

Accepted July 4, 2024

Abstract—The article presents the results of the study of the structure and magnetic characteristics of powders of Co–Ni–Al alloys of the compositions $\text{Co}_{37}\text{Ni}_{36}\text{Al}_{27}$ and $\text{Co}_{32}\text{Ni}_{39}\text{Al}_{29}$ obtained by mechanical alloying in a planetary mill. The influence of alloying technological modes on the elemental composition of powders, their saturation magnetization and coercive force, is studied. The mechanical alloying efficiency for obtaining new hard magnetic alloys based on the Co–Ni–Al system is shown.

Keywords: powder materials, mechanical alloying, magnetic materials, smart materials, additive technologies

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-46-58

ACKNOWLEDGMENTS

The work was supported by the Russian Science Foundation, grant No 23-13-00305.

Magnetic characteristics were measured using the equipment of the Science Park of St Petersburg State University, in the resource center "Innovative technologies of composite nanomaterials"

REFERENCES

1. Zhang, C., Li, X., Jiang, L., Tang, D., Xu, H., Zhao, P., Fu, J., Zhou, Q., Chen, Y., 3D-Printing of Functional Magnetic Materials: From Design to Applications, *Adv. Funct. Mater.*, 2021, V. 31. URL: <https://doi.org/10.1002/adfm.202102777>
2. Mazeeva, A.K., Masaylo, D., Razumov, N., Konov, G., Popovich, A., 3D-Printing Technologies for Fabrication of Magnetic Materials Based on Metal–Polymer Composites: review, *Materials* (Basel), 2023, V. 16. URL: <https://doi.org/10.3390/ma16216928>
3. Cao, X., Xuan, S., Sun, S., Xu, Z., Li, J., Gong, X., 3D-Printing Magnetic Actuators for Biomimetic Applications, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 2021, V. 13, pp. 30127–30136. URL: <https://doi.org/10.1021/acsami.1c08252>
4. Qi, S., Guo, H., Fu, J., Xie, Y., Zhu, M., Yu, M., 3D-printed shape-programmable magneto-active soft matter for biomimetic applications, *Compos. Sci. Technol.*, 2020, V. 188, p. 107973. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107973>
5. Huber, C., Abert, C., Bruckner, F., Groenefeld, M., Muthsam, O., Schuschnigg, S., Sirak, K., Thanhoffer, R., Teliban, I., Vogler, C., Windl, R., Suess, D., 3D-print of polymer bonded rare-earth magnets, and 3D magnetic field scanning with an end-user 3D printer, *Appl. Phys. Lett.*, 2016, V. 109. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4964856>
6. Shen, A., Peng, X., Bailey, C.P., Dardona, S., Ma, A.W.K., 3D printing of polymer-bonded magnets from highly concentrated, plate-like particle suspensions, *Mater. Des.*, 2019, V. 183, p. 108133. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108133>
7. Shen, A., Bailey, C.P., Ma, A.W.K., Dardona, S., UV-assisted direct write of polymer-bonded magnets, *J. Magn. Mater.*, 2018, V. 462, pp. 220–225. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.03.073>
8. Huber, C., Mitteramskogler, G., Goertler, M., Teliban, I., Groenefeld, M., Suess, D., Additive manufactured polymer-bonded isotropic NdFeB magnets by stereolithography and their comparison to fused filament fabricated and selective laser sintered magnets, *Materials* (Basel), 2020, V. 13, pp. 1–8. URL: <https://doi.org/10.3390/MA13081916>
9. Urban, N., Kuhl, A., Glauche, M., Franke, J., Additive Manufacturing of Neodymium-Iron-Boron Permanent Magnets, 8th Int. Electr. Drives Prod. Conf. EDPC, 2018, *Proc.* 2019, pp. 2–6. <https://doi.org/10.1109/EDPC.2018.8658348>

10. Li, L., Post, B., Kunc, V., Elliott, A.M., Paranthaman, M.P., Additive manufacturing of near-net-shape bonded magnets: Prospects and challenges, *Scr. Mater.*, 2017, V. 135, pp. 100–104. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.12.035>
11. Povarova, K.B., Lomberg, B.S., Filin, S.A., Kazanskaya, N.K., Shkolnikov, D.Yu., Bespalova, M.D., Struktura i svoystva (β + γ)-splavov sistemy Ni–Al–Co [Structure and properties of (β + γ) alloys of the Ni–Al–Co system], *Metally*, 1994, pp. 77–81.
12. Kositsyna, I.I., Zavalishin, V.A., Study of Co-Ni-Al alloys with magnetically controlled shape memory effect, *Mater. Sci. Forum.*, 2010, V. 635, pp. 75–80. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.635.75>
13. Valiullin, A.I., Kositsin, S.V., Kositsina, I.I., Kataeva, N.V., Zavalishin, V.A., Study of ferromagnetic Co-Ni-Al alloys with thermoelastic L10 martensite, *Mater. Sci. Eng. A.*, 2006, V. 438, pp. 1041–1044. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.01.102>
14. Tanaka, Y., Oikawa, K., Sutou, Y., Omori, T., Kainuma, R., Ishida, K., Martensitic transition and superelasticity of Co-Ni-Al ferromagnetic shape memory alloys with $\beta + \gamma$ two-phase structure, *Mater. Sci. Eng. A.*, 2006, V. 438–440, pp. 1054–1060. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.05.021>
15. Morito, H., Oikawa, K., Fujita, A., Fukamichi, K., Kainuma, R., Ishida, K., Large magnetic-field-induced strain in Co-Ni-Al single-variant ferromagnetic shape memory alloy, *Scr. Mater.*, 2010, V. 63, pp. 379–382. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.04.026>
16. Su, J.J., Mo, K.X., Zhou, L., Effects of Minor Mn Replace of Al on Martensitic and Magnetic Transition in the Co₃₈Ni₃₄Al₂₈-xMnx Alloys, *J. Supercond. Nov. Magn.*, 2020, V. 33, pp. 835–840. URL: <https://doi.org/10.1007/s10948-019-05272-9>
17. Ju, J., Lou, S., Yan, C., Yang, L., Li, T., Hao, S., Wang, X., Liu, H., Microstructure, Magnetism and Magnetic Field Induced-Strain in Er-Doped Co-Ni-Al Polycrystalline Alloy, *J. Electron. Mater.*, 2017, V. 46, pp. 2540–2547. URL: <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5339-6>
18. Hossain, M.S., Ghosh, T., Kanth, B.R., Mukhopadhyay, P.K., Effect of Annealing on the Structural and Magnetic Properties of CoNiAl FSMA, *Cryst. Res. Technol.*, 2019, V. 54, pp. 1–6. URL: <https://doi.org/10.1002/crat.201800153>
19. Saito, T., Magnetic properties of Co–Al–Ni melt-spun ribbon, *J. Appl. Phys.*, 2006, V. 100 (5), pp. 053916–053916-5. URL: <https://doi.org/10.1063/1.2345577>
20. Arputhavalli, G.J., Agilan, S., Saravanan, P., Influence of sintering temperature on microstructure, magnetic properties of vacuum sintered Co (-Zn)-Ni-Al alloys, *Mater. Lett.*, 2018, V. 233, pp. 177–180. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.08.152>
21. Sychev, A.E., Basurina, M.L., Boyarchenko, O.D., Lazarev, P.A., Morozov, Yu.G., Sivakova, A.O., Osobennosti strukturo- i fazoobrazovaniya v sisteme Ni-Al-Co v protsesse SVS [Features of structure and phase formation in the Ni-Al-Co system during the SHS process], *Neorganicheskie Materialy*, 2023, V. 59, pp. 733–739. URL: <https://doi.org/10.31857/S0002337X23070151>
22. Mazeeva, A.K., Kim, A., Ozerskoi, N.E., Shamshurin, A.I., Razumov, N.G., Nazarov, D.V., Popovich, A.A., Structure evolution of Ni₃₆Al₂₇Co₃₇ alloy in the process of mechanical alloying and plasma spheroidization, *Metals (Basel)*, 2021, V. 11. URL: <https://doi.org/10.3390/met11101557>
23. Mazeeva, A.K., Kim, A., Shamshurin, A.I., Razumov, N.G., Nazarov, D. V., Borisov, A.N., Popovich, A.A., Effect of heat treatment on structure and magnetic properties of Ni₃₆Co₃₇Al₂₇ alloy produced by laser powder bed fusion, *J. Alloys Compd.*, 2023, V. 938. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168461>
24. Kim, A., Mazeeva, A., Polozov, I., Shamshurin, A., Starikov, K., Igoshin, S., Ozerskoy, N., Popovich, A., Additive manufacturing of Ni₃₆Co₃₇Al₂₇ ferromagnetic shape memory material using mechanically alloyed plasma spheroidized powders, *30th Anniv. Int. Conf. Metall. Mater. Conf. Proc.*, 2021, pp. 958–963. URL: <https://doi.org/10.37904/metal.2021.4241>
25. Ghasemi, A., Zamani, K., Tavoosi, M., Gordani, G.R., Enhanced Soft Magnetic Properties of CoNi-Based High Entropy Alloys, *J. Supercond. Nov. Magn.*, 2020, V. 33, pp. 3189–3196. URL: <https://doi.org/10.1007/s10948-020-05579-y>
26. Shelekhov, E.V., Sviridova, T.A., Modelirovanie dvizheniya i razogreva sharov v planetarnoi melnitse. Vliyanie rezhimov obrabotki na produkty mekhanoaktivatsii smesi poroshkov Ni i Nb [Simulation of the motion and heating of

balls in a planetary mill. The effect of processing modes on the products of mechanical activation of a mixture of Ni and Nb powders], *Materialovedenie*, 1999, No 10, pp. 13–22.

UDC 621.762.5:669.14.018.8

STUDY OF THE INFLUENCE OF DIRECT LASER DEPOSITION PARAMETERS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH 08Kh14NDL STAINLESS STEEL

V.V. BOBYR, T.V. KNYAZYUK, Cand Sc. (Eng), L.V. MUKHAMEDZYANOVA, M.V. STARITSYN,
P.A. KUZNETSOV, Dr Sc. (Eng)

NRC "Kurchatov Institute" – CRISM "Prometey", 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: mail@crism.ru

Received March 27, 2024

Revised May 22, 2024

Accepted July 4, 2024

Abstract—A series of samples were manufactured using the additive technology of direct laser deposition (DLD) from 08Kh14NDL steel powder at different process parameters (radiation power, scanning speed and powder feed rate). The macro- and microstructure, density and hardness of the samples were studied. The structural features of the steel manufactured by DLD were studied in comparison with casting, non-metallic inclusions were identified, and the size of the structural components was determined. It was shown that the structure, density and hardness of the steel can be varied by changing the DLD modes, which is promising for the development of industrial additive technologies.

Keywords: additive technologies, direct laser deposition, stainless steels, 08Kh14NDL, porosity, microstructure, martensitic steels

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-59-68

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out with the financial support of the world-class scientific and educational center "Russian Arctic: new materials, technologies and research methods", an internationally-recognized competency center M.V. Lomonosov Northern (Arctic) Federal University and the Russian Science Foundation in the direction of "Conducting research by world-class scientific laboratories" (project No 21-73-30019).

REFERENCES

1. Chashnikov, D.I., Volodin, V.I., Vysokoprochnye korrozionnostoikie stali dlya grebnykh vintov [High-strength corrosion-resistant steels for propellers], *Tekhnologiya sudostroeniya*, 1985, No 4, pp. 68–72.
2. National Standard of the Russian Federation GOST 19200-80: *Otlivki iz chuguna i stali terminy i opredeleniya defektov* [Iron and steel castings: terms and definitions of defects], Moscow: Izd-vo standartov, 1980.
3. Tsukanov, V.V., Tsyganko, L.K., Petrov, S.N., Shandyba, G.A., Ziza, A.I., Strukturnye prevrashcheniya pri termicheskoi obrabotke liteinoi korrozionnostoikoi stali martensitnogo klassa [Structural transformations during heat treatment of foundry corrosion-resistant martensitic steel], *Metalloobrabotka*, 2016, No 3 (93). pp. 42–48.
4. Shishkovsky, I., Missemer, F., Smurov, I., Metal matrix composites with ternary intermetallic inclusions fabricated by laser direct energy deposition, *Composite Structures*, 2018, V. 183, pp. 663–670.
5. Bobyr, V., Kuznetsov, P., Zhukov, A., Shakirov, I., Features of the formation of structure and geometry form during direct laser deposition of 321L stainless steel on solid of revolution using the LENS method, *Key Engineering Materials*, 2021, V. 887, pp. 309–318.
6. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*, New York: Springer Science, 2015.
7. Hofmeister, W., Griffith, M., Ensz, M., Smugeresky, J., Solidification in Direct Metal Deposition by LENS Processing, *JOM*, 2001, V. 53, pp. 30–34.
8. Dass, A., Moridi A., State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design, *Coatings*, 2019, V. 9, Is. 7, p. 418.

9. Turichin, G.A., Klimova, O.G., Zemliakov, E.V., Babkin, K.D., Kolodyazhny, D.Yu., Shamray, F.A., Travyanov, A.Ya., Petrovsky, P.V., Technological aspects of high speed direct laser deposition based on heterophase powder metallurgy, *Physics Procedia*, 2015, V. 78, pp. 397–406.
10. Turichin, G.A., Somonov, V.V., Babkin, K.D., Zemlyakov, E.V., Klimova, O.G., High-Speed Direct Laser Deposition: Technology, Equipment and Materials, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, V. 125, Art. 012009.
11. Turichin G.A., Sklyar M.O., Babkin K.D., Klimova-Korsmik O.G, Zemlyakov E.V., Pryamoe lazernoe vyrashchivanie – proryv v izgotovlenii krupnogabaritnykh izdely [Direct laser cultivation is a breakthrough in the manufacture of large-sized products], *Additivnye tekhnologii*, 2023, No 2.
12. Aversa, A., Marchese, G., Bassini, E., Directed Energy Deposition of AISI 316L Stainless Steel Powder: Effect of Process Parameters, *Metals*, 2021, V. 11, Is. 6, Art. 932. URL: <https://doi.org/10.3390/met11060932>
13. Loginova, I.S., Bykovsky, D.P., Adisa, S.B., Solonin, A.N., et al., Issledovanie vliyaniya parametrov protsessa lazernoi naplavki poroshka stali 316L na strukturu i mekhanicheskie svoystva obraztsov [Investigation of the effect of the parameters of the 316L steel powder laser surfacing process on the structure and mechanical properties of samples], *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2016, No 4, pp. 5–11.
14. Aboulkhair, T., Maskery, I., Tuck, Ch., Ashcroft, I., Everitt, N.M., On the formation of AlSi₁₀Mg single tracks and layers in selective laser melting: Microstructure and nano-mechanical properties, *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, V. 230, pp. 88–98.
15. Aversa, A., Moshiri, M., Librera, E., Hadi, M., Marchese, G., Manfredi, D., Lorusso, M., Calignano, F., Biamino, S., Lombardi, M., Pavese, M., Single scan track analyses on aluminium based powders, *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, V. 255, pp. 17–25.
16. Patalas-Maliszewska, J., Feldshtein, E., Devojno, O., Śliwa, M., Kardapolava, M., Lutsko, N., Single Tracks as a Key Factor in Additive Manufacturing Technology – Analysis of Research Trends and Metal Deposition Behavior, *Materials*, 2020, No 13 (5), p. 1115.
17. Bosio, F., Saboori, A., Lacagnina, A., Librera, E., De Chirico, M., Biamino, S., Fino, P., Lombardi, M., Directed Energy Deposition of 316L Steel: Effect of Type of Powders and Gas Related Parameters, *Proceedings of the Euro PM 2018 Congress and Exhibition*, 2018, pp. 14–18.
18. Ramiro, P., Ortiz, M., Alberdi, A., Lamikiz, A., Strategy development for the manufacturing of multilayered structures of variable thickness of Ni-based alloy 718 by powder-fed directed energy deposition, *Metals*, 2020, V. 10, p. 1280.
19. Lippold, J.C., Transformation and tempering behavior of 12Cr-1Mo-0.3V martensitic stainless steel weldments, *Journal of Nuclear Materials*, 1981, V. 104, pp. 1127–1131. ISSN 0022-3115. URL: [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(82\)90752-8](https://doi.org/10.1016/0022-3115(82)90752-8)
20. Gorynin, V.I., Olenin, M.I., *Puti povysheniya khladostoykosti staley i svarnykh soedineniy* [Ways to improve cold resistance of steels and welded joints], St Petersburg: Polytechnic University, 2017.
21. Olenin, M.I., Kashtanov, A.D., Romanov, O.N., Makhorin, V.V., Vliyanie gomogeniziruyushchego otzhiga na snizhenie soderzhaniya δ -ferrita v vysokoprochnoy vysokokhromistoy stali martensitnogo klassa marki 07Kh15N5D4B, poluchennoy metodom selektivnogo lazernogo splavleniya [Effect of homogenizing annealing on the reduction of δ -ferrite content in high-strength high-chromium martensitic steel grade 07Kh15N5D4B obtained by selective laser melting], *Voprosy Materialovedeniya*, 2021, No 2, pp. 47–53.
22. Pandey, C., Mahapatra, M.M., Kumar, P., Saini, N., Comparative study of autogenous tungsten inert gas welding and tungsten arc welding with filler wire for dissimilar P91 and P92 steel weld joint, *Materials Science and Engineering: A*, 2018, V. 712, pp. 720–737.
23. Staritsyn, M.V., Kuznetsov, P.A., Petrov, S.N., Mikhailov, M.S., Composite structure as a strengthening factor of stainless austenitic chromium-nickel additive steel, *The Physics of Metals and Metallography*, 2020, V. 121, No 4, pp. 337–343.
24. Yin, Y., Tan, Q., Bermingham, M., Mo, N., Zhang, M.-X., Zhang, J.Z., Laser additive manufacturing of steels, *International Materials Reviews*, 2021.

UDC 621.891:678.74

STUDY OF THE POSSIBILITY OF CREATING A TRIBOTECHNICALLY EFFECTIVE NANOCOMPOSITE BASED ON POLYETHERETHERKETONE WITH A DISPERSED FILLER OF LOW WEAR RESISTANCE

V.E. ZHAROV¹, E.B. SEDAKOVA^{2,3}, Dr Sc (Eng), M.A. SKOTNIKOVA², Dr Sc (Eng),
S. LI⁴, Ph.D. (Eng), A.N. NAUMOV²

¹ Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC),
21B Tikhoretsky Ave, 194064 St Petersburg, Russian Federation

² Peter the Great St Petersburg Polytechnic University, 29 Polytechnicheskaya St, 195251 St Petersburg, Russian Federation

³ Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, 61 Bolshoy Ave, Vasilievsky Island, 199178 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: elenasedakova2006@yandex.ru

⁴ Chengdu Aeronautic Polytechnic, Chengdu, China

Received June 17, 2024

Revised July 9, 2024

Accepted July 10, 2024

Abstract—The possibility of using nanosized copper particles as a filler for polyetheretherketone (PEEK) in order to create a tribotechnically effective composite has been investigated. Based on the physical wear model, the calculated concentration dependences of the relative intensity of linear wear of the composite with respect to the matrix have been constructed for four sizes of dispersed filler from the nano- and micro-sized range. As a result, the ranges of effective filler concentrations have been determined when introducing nanocopper into PEEK. The molecular dynamics method has been used to study the causes of increased wear resistance of the nanocomposite when introducing dispersed copper particles. It has been found that in the presence of a nanofiller, the energy of intermolecular bonds increases significantly, differences in the density of polymer molecules in the contact area before and after shear, as well as differences in the energies of intermolecular interaction between the contacting surfaces depending on the shear time have been revealed.

Keywords: sliding friction, wear resistance, tribotechnical efficiency, physical model of wear, matrix loading, polyetheretherketone (PEEK), nanofiller, molecular dynamics, energy of intermolecular interaction

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-69-77

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No 22-19-00178, <http://rscf.ru/project/22-19-00178/>

REFERENCES

1. Omrani, E., Menezes, P.L., Rohatgi, P.K., State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world, *J. Engineering Science and Technology*, 2016, V. 12, No 9, pp. 717–736.
2. Mikitaev, A.K., Salamov, A.H., Beev, A.A., Beeva, D.A., Napolnenie poliefirefirketonov (PEEK) kak sposob polucheniya kompozitov s vysokimi ekspluatatsionnymi svoystvami [Filing the polyetheretherketone (PEEK) as a way of composites of high performance], *Plasticheskie massy*, 2017, No 5–6, pp. 6–9.
3. Myshkin, N.K., Gutsev, D.M., Grigoriev, F.A., Zhang, G., Wang, W., Li, G., Kharakteristiki nanokompozitov na osnove PEEK pri trenii po stali [Performance of PEEK-based nanocomposites at dry friction against steel], *Trenie i iznos*, 2021, V. 42, No 3, pp. 225–229.
4. Panin, S.V., Kornienko, L.A., Alexenko, V.O., Buslovich, D.G., Nguen, D.A., Shilko, S.V., Antifriktsionnye i mekhanicheskie svoystva termoplastichnykh uglerodnykh kompozitov na osnove poliefirefirketona [Antifrication and mechanical properties of the thermoplastic matrix of polyetheretherketone-based composites], *Trenie i iznos*, 2020, V. 41, No 4, pp. 427–435.

5. Li, S., Sedakova, E.B., Molekulyarnoe modelirovanie kinetiki friktsionnogo razrusheniya polimernykh kompozitov na primere F4K20 [Molecular modeling of frictional fracture kinetics of polymer composites using F4K20 as an example], *Trenie i iznos*, 2022, V. 43, No 6, pp. 612–620.
6. Choy, C.L., Kwok, K.W., Leung, W.P., et al., Thermal conductivity of poly (ether ether ketone) and its short-fiber composites, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 1994, V. 32, No 8, pp. 1389–1397.
7. Cheng, S.Z.D., Cao, M.Y., Wunderlich, B., Glass transition and melting behavior of poly (oxy-1, 4-phenyleneoxy-1, 4-phenylenecarbonyl-1, 4-phenylene) (PEEK), *Macromolecules*, 1986, V. 19, No 7, pp. 1868–1876.
8. Song, H., Wang, Z., Yang, J., et al., Facile synthesis of copper/polydopamine functionalized grapheme oxide nanocomposites with enhanced tribological performance, *Chemical Engineering Journal*, 2017, V. 324, pp. 51–62.
9. Fan, S., Gao, S., Duan, C., et al., Facile synthesis of copper nanoparticles and nanowires on polyetheretherketone-matrix nanocomposites: Thermal conductivity, dynamic mechanical properties and wear resistance, *Composite Science and Technology*, 2022, V. 219, p. 109224.
10. Dobychnin, N.M., Morozov, A.V., Nikulin, A.V., Sachek, B.Ya., Anisimov, A.V., Planirovanie experimenta pri issledovanii tribotekhnicheskikh kharakteristik phenolnykh ugleplastikov [Experimental planning for the study of tribotechnical characteristics of phenolic carbon fiber plastics], *Voprosy Materialovedeniya*, 2009, No 1, pp. 186–193.
11. Sedakova, E.B., Kozyrev, Yu.P., Vliyanie soderzhaniya dispersnogo napolnitelya na adgeziyu mezhdu napolnitelem i matritsey v polimernykh nanocompozitakh tribotekhnicheskogo naznacheniya [The effect of the dispersed filler content on the adhesion between the filler and the matrix in tribotechnical polymer nanocomposites], *Voprosy Materialovedeniya*, 2013, No 13, pp. 70–75.
12. Berlin, A.A., Volfson, C.A., Oshmyan, V.G., Enikolopov, N.S., *Printsipy sozdaniya kompozitsionnykh polimernykh materialov* [Principles of creation of composite polymer materials], Moscow: Khimiya, 1990.
13. Bakhareva, V.E., Rubin, M.B., Lobyntseva, I.V., Trizno, A.V., *Primenenie v narodnom khozyastve podshipnikov skolzheniya iz polimernykh kompozitsionnykh materialov* [The use of sliding bearings made of polymer composite materials in the national economy], Leningrad: LDNTP, 1991.
14. Luscheikin, G.A., *Modelirovanie i optimizatsiya polimernykh materialov* [Modeling and optimization of polymer materials], Moscow: Kolos, 2009.
15. Wang, B., Zhang, K., Zhou, C., et al., Engineering the mechanical properties of CNT/PEEK nanocomposites, *RSC advances*, 2019, V. 9, No 23, pp. 12836–12845.
16. Pan, L., Guo, H., Zhong, L., et al., Influence of surface-modified glass fibers on interfacial properties of GF/PEEK composites using molecular dynamics, *Computational Materials Science*, 2021, No 188, p. 110216.
17. Sun, H., Jin, Z., Yang, C., et al., COMPASS II: extended coverage for polymer and drug-like molecule databases, *Journal of molecular modeling*, 2016, V. 22, No 2, pp. 1–10.
18. Rasheva, Z., Zhang, G., Burkhart, Th., A correlation between the tribological and mechanical properties of short carbon fiber reinforced PEEK materials with different fiber orientations, *Tribology International*, 2010, V. 43, pp. 1430–1437.
19. Li, S., Sedakova, E.B., Modelirovanie vliyaniya nanorazmernykh napolnitelei na mekhanicheskie svoystva i iznosostoikost kompozita na osnove poliefirefirketona [Modeling the influence of nanosized fillers on the mechanical properties and wear resistance of a composite based on polyether ether ketone], *Problemy mashinostroeniya i nadezhnost mashin*, 2023, V. 52, No 3, pp. 241–245.

UDC 678.067

CARBON FIBER WITH A GRADIENT OF MATRIX COMPOSITION BASED ON BENZOXAZINE-PHTHALONITRILE COMPOSITIONS

K.A. ANDRIANOVA¹, Cand Sc. (Eng), V.S. NIKITIN¹, R.R. AMIROV², Dr Sc. (Chem),

I.S. ANTIPIN², Dr Sc. (Chem), L.M. AMIROVA¹, Dr Sc. (Chem)

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev (KAI), 10 Karl Marx St, 420111 Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation.

E-mail: KAAndrianova@kai.ru

Received June 26, 2024

Revised July 29, 2024

Accepted September 16, 2024

Abstract—A technology for producing a gradient of a binder in carbon fiber reinforced plastic by powder spraying has been developed. The plastic based on benzoxazine-phthalonitrile binder has been obtained. The binder in the upper layers of the carbon fiber reinforced plastic contains mainly phthalonitrile, the binder in the center of the plate contains mainly benzoxazine. The binder composition changes smoothly from the surface to the center of the sample, i.e. there is a gradient of the matrix composition. To improve impact resistance, a high-temperature thermoplastic is introduced into the binder composition, the concentration of which also changes over the thickness of the sample. Compared with a homogeneous carbon fiber reinforced plastic with the same content of components in the binder, the gradient carbon fiber reinforced plastic has shown higher heat resistance and impact strength without loss of rigidity.

Keywords: benzoxazine, phthalonitrile, composite material, composition gradient, carbon fiber, heat resistance, mechanical properties

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-78-87

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No 23-23-00133, <https://rscf.ru/project/23-23-00133/>

REFERENCES

1. Bornosuz, N.V., Korotkov, R.F., Shutov, V.V., Sirotin, I.S., Gorbunova, I.Y., Benzoxazine copolymers with mono- and difunctional epoxy active diluents with enhanced tackiness and reduced viscosity, *Journal of Composites Science*, 2021, V. 5, No 9.
2. Gu, H., Gao, C., Du, A., Guo, Y., Zhou, H., Zhao, T., Guo, Z., An overview of high-performance phthalonitrile resins: fabrication and electronic applications, *Journal of Materials Chemistry C*, 2022, V. 10, No 8, pp. 2925–2937.
3. Yakovlev, M.V., Kuchevskaia, M.E., Terekhov, V.E., Morozov, O.S., Babkin, A.V., Kepman, A.V., Avdeev, V.V., Bulgakov, B., Easy processable tris-phthalonitrile based resins and carbon fabric reinforced composites fabricated by vacuum infusion, *Materials Today Communications*, 2022, V. 33.
4. Bulgakov, B.A., Morozov, O.S., Timoshkin, I.A., Babkin, A.V., Kepman, A.V., Bisphthalonitrile-based thermosets as heat-resistant matrices for fiber reinforced plastics, *Polymer Science, Series C.*, 2021, V. 63, pp. 64–101.
5. Kurnosov, A.O., Vavilova, M.I., Gulyaev, I.N., Akhmadieva, K.R., Bezrastvornaya tekhnologiya izgotovleniya preprega na osnove vysokotemperaturnogo poroshkovogo ftalonitrilnogo svyazuyushchego [Solvent-free prepreg manufacturing technology based on high-temperature powder phthalonitrile binder], *Voprosy Materialovedeniya*, 2021, No 4(108), pp. 165–178. URL: <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2021-108-4-165-178>
6. Soudjrari, S., Derradji, M., Amri, B., Djaber, K., Mehelli, O., Tazibet, S., Khadraoui, A., Novel vanillin-based benzoxazine containing phthalonitrile thermosetting system: Simple synthesis, autocatalytic polymerization and high thermomechanical properties, *High Performance Polymers*, 2022, V. 34, No 7, pp. 818–827.
7. Brunovska, Z., Ishida, H., Thermal study on the copolymers of phthalonitrile and phenylnitrile-functional benzoxazines, *Journal of applied polymer science*, 1999, V. 73, No 14, pp. 2937–2949.
8. Chen, L., Ren, D., Chen, S., Li, K., Xu, M., Liu, X., Improved thermal stability and mechanical properties of benzoxazine-based composites with the enchantment of nitrile, *Polymer Testing*, 2019, V. 74, pp. 127–137.
9. Dayo, A.Q., Wang, A.R., Derradji, M., Kiran, S., Zegaoui, A., Wang, J., Liu, W.B., Copolymerization of mono and difunctional benzoxazine monomers with bio-based phthalonitrile monomer: Curing behaviour, thermal, and mechanical properties, *Reactive and Functional Polymers*, 2018, V. 131, pp. 156–163.
10. Lv, D., Dayo, A.Q., Wang, A.R., Kiran, S., Xu, Y.L., Song, S., Gao, B.-C., Curing behavior and properties of benzoxazine-co-self-promoted phthalonitrile polymers, *Journal of Applied Polymer Science*, 2018, V. 135, No 31, Art. 46578. DOI:10.1002/app.46578

11. Liu, Y., Yin, R., Yu X., Zhang, K., Modification of Solventless-Synthesized Benzoxazine Resin by Phthalonitrile Group: An Effective Approach for Enhancing Thermal Stability of Polybenzoxazines, *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2019, V. 220, No 1.
12. Andrianova, K.A., Halikov, A.A., Bezzametnov, O.N., Amirova, L.M., Funktsionalno-gradientny ugleplastik na osnove epoksidnoi matritsy, modifitsirovannoi termoelastoplastom [Functionally graded carbon fiber based on an epoxy matrix modified with thermoplastic elastomer], *Voprosy Materialovedeniya*, 2023, No 3 (115), pp. 170–177.
13. Hassan, E., Zekos, I., Jansson, P., Pecur, T., Floreani, C., Robert, C., Stack, M.M., Erosion mapping of through-thickness toughened powder epoxy gradient glass-fiber-reinforced polymer (GFRP) plates for tidal turbine blades, *Lubricants*, 2021, V. 9, No 3.
14. *Handbook of Benzoxazines Resins*, Ishida, H., Agag, T. (Eds.) Elsevier: Amsterdam, 2011, Ch. 1, pp. 3–69.
15. Antipin, I.S., Amirova, L.M., Andrianova, K.A., Madiyarova, G.M., Shumilova, T.A., Kazymova, M.A., Amirov, R.R., Bezrastvorny sintez benzoksazinovykh monomerov razlichnogo stroeniya i polimery na ikh osnove [Solvent-free synthesis of benzoxazine monomers of various structures and polymers based on them], *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2023, V. 26, No 9, pp. 17–25.
16. Arinina, M.P., Ilyin, S.O., Makarova, V.V., Gorbunova, I.Yu., Kerber, M.L., Kulichikhin, V.G., Sovmestimost i reologicheskie svoistva smesei epoksidianovogo oligomera s aromatcheskimi poliefirami, *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Ser. A*, 2015, V. 57, No 2, pp. 152–161.

UDC 678.067:620.181

MICROSTRUCTURAL AND CHEMICAL COMPOSITION CHANGES IN POLYIMIDE CARBON-FIBER-REINFORCED PLASTICS IN RESPONSE TO SIMULATED OPERATIONAL FACTORS

E.V. KURSHEV, S.L. LONSKY, Yu.A. EGOROV, Cand Sc. (Eng), I.V. ZELENINA

National Research Center “Kurchatov Institute” – VIAM, 17 Radio St, 105005 Moscow, Russian Federation. E-mail: admin@viam.ru

Received July 19, 2024

Revised August 5, 2024

Accepted August 5, 2024

Abstract—Microstructural and FT-IR-spectroscopic investigation of heat-resistant carbon-fiber-reinforced plastic the VKU-61 brands on the basis of thermosetting polyimide binding and carbon full-strength fabrics after laboratory simulated and controlled operational factors – elevated temperature and humidity influences were performed. On the basis of the analysis and ordering of the received results, the general consistent patterns and features of structural changes in composite material in the conditions of controlled external factors were determined.

Keywords: composite microstructure, polymer composite, hydrothermal aging, water sorption

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-88-102

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out using equipment from the Climatic Testing Center of the NRC “Kurchatov Institute” – VIAM (All-Russian institute of aviation materials).

The work was carried out within the framework of the implementation of the integrated scientific direction 13 “Polymer composite materials” (“Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030”).

REFERENCES

1. Laptev, A.B., Pavlov, M.R., Novikov, A.A., Slavin, A.V., Sovremennyye tendentsii razvitiya ispytany materialov na stoikost k klimatcheskim faktoram. Ch. 1: Ispytaniya novykh materialov [Current trends in the development of materials testing for resistance to climatic factors. Part 1. Testing of new materials]: review, *Trudy VIAM*, 2021, No 1

- (95), pp. 114–122. URL: <http://www.viam-works.ru> (reference date 20.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-114-122
2. Startsev, V.O., Antipov, V.V., Slavin, A.V., Gorbovets, M.A., *Sovremennyye otechestvennyye polimernyye kompozitsionnyye materialy dlya aviastroeniya* [Modern domestic polymer composite materials for the aircraft industry]: review, *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii*, 2023, No 2 (71), pp. 122–144. DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144
 3. Mikhailin, Yu.A., *Teplo- i ognestoikost polimernykh materialov* [Heat, thermo and fire resistance of polymer materials], St Petersburg: Nauchnye Osnovy i Tekhnologii, 2011.
 4. Yang, S.-Y., *Advanced polyimide materials: synthesis, characterization, and applications*, Elsevier, 2018.
 5. Kablov, E.N., Laptev, A.B., Prokopenko, A.N., Gulyaev, A.I., *Relaksatsiya polimernykh kompozitsionnykh materialov pod dlitelnyim deistviem staticheskoi nagruzki i klimata. Ch. 1: Svyazuyushchie* [Relaxation of polymer composite materials under the prolonged action of static load and climate. Part 1: Binders]: review, *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii*, 2021, No 4 (65), pp. 70–80. DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80
 6. Valevin, E.O., Startsev, V.O., Zelenina, I.V., *Termicheskoe starenie, degradatsiya poverkhnosti i vlagoperenos v ugleplastike marki VKU-3TR* [Thermal aging, surface degradation and moisture transfer in VCU-3TR carbon fiber], *Trudy VIAM*, 2020, No 6–7, pp. 118–128. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-118-128
 7. Chatterjee, B., Bhowmik, S., *Evolution of material selection in commercial aviation industry: review*, *Sustainable Engineering Products and Manufacturing Technologies*, 2019, pp. 199–219. DOI: 10.1016/B978-0-12-816564-5.00009-8
 8. Deev, I.S., Nikishin, E.F., Kurshev, E.V., Lonsky, S.L., *Issledovanie struktury i sostava obraztsov ugleplastika KMU-4l posle 12 let ekspozitsii na vneshnei poverkhnosti mezhdunarodnoi kosmicheskoi stantsii. Ch. 2: Issledovanie mikrostruktury i sostava* [Investigation of the structure and composition of CMU-4L carbon fiber samples after 12 years of exposure on the outer surface of the international space station. Part 2: Investigation of microstructure and composition], *Voprosy Materialovedeniya*, 2015, No 2 (82), pp. 76–85.
 9. Valevin, E.O., *Vliyanie teplovlazhnostnogo vozdeistviya na svoystva termostoikikh polimernykh kompozitsionnykh materialov na osnove ftalonitrilnoi matritsy* [The effect of heat and humidity factors on the properties of heat-resistant polymer composite materials based on phthalonitrile matrix]: thesis for the degree of Candidate of Sciences (Eng.), Moscow: MAI, 2018.
 10. Salnikov, V.G., Startsev, O.V., Lebedev, M.P., Kopyrin, M.M., Vampirov, Yu.M., *Vliyanie sutochnykh i sezonnykh izmeneniy otноситelnoi vlazhnosti i temperatury na vlagonasyshchenie ugleplastika v otkrytykh klimaticheskikh usloviyakh* [The effect of daily and seasonal changes in relative humidity and temperature on the moisture saturation of carbon fiber in open climatic conditions], *Vse materialy. Entsiklopedichesky spravochnik*, 2022, No 5, pp. 2–10. DOI: 10.31044/1994-6260-2022-0-5-2-10
 11. Deev, I.S., Kurshev, E.V., Lonsky, S.L., *Vliyanie dlitel'nogo klimaticheskogo stareniya na mikrostrukturu poverkhnosti epoksidnykh ugleplastikov* [The effect of prolonged climatic aging on the microstructure of the surface of epoxy carbon plastics], *Voprosy Materialovedeniya*, 2018, No 3 (95), pp. 157–169.
 12. Deev, I.S., Kurshev, E.V., Lonsky, S.L., Komarova, O.A., *Vliyanie dlitel'nogo klimaticheskogo stareniya na mikrostrukturu i kharakter razrusheniya v obime epoksidnykh ugleplastikov v usloviyakh silovogo vozdeystviya (izgiba i szhatiya)* [The effect of prolonged climatic aging on the microstructure and nature of destruction in the volume of epoxy carbon fiber plastics under conditions of force (bending and compression)], *Voprosy Materialovedeniya*, 2018, No 4 (96), pp. 170–184.
 13. Deev, I.S., Dobryanskaya, O.A., Kurshev, E.V., *Vliyanie morskoi vody na mikrostrukturu i mekhanicheskie svoystva ugleplastika v napryazhennom sostoyanii* [The effect of seawater on the microstructure and mechanical properties of carbon fiber in a stressed state], *Materialovedenie*, 2012, No 11, pp. 37–41.
 14. Laptev, A.B., Barbotko, S.L., Nikolaev, E.V., *Osnovnyye napravleniya issledovaniy sokhranyaemosti svoystv materialov pod vozdeistviem klimaticheskikh i eksploatatsionnykh faktorov* [The main directions of research on the preservation of the properties of materials under the influence of climatic and operational factors], *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii*, 2017, No S, pp. 547–561. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-547-561
 15. Kablov, E.N., Startsev, V.O., *Sistemnyy analiz vliyaniya klimata na mekhanicheskie svoystva polimernykh kompozitsionnykh materialov po dannym otechestvennykh i zarubezhnykh istochnikov* [Systematic analysis of the

- influence of climate on the mechanical properties of polymer composite materials according to domestic and foreign sources]: review, *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2018, No 2, pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58
16. Roulend, S., Kunts, I., Jr., Stilindzher, F., et al., *Voda v polimerakh* [Water in polymers], Moscow: Mir, 1984.
17. Chalykh, A.E., *Diffuziya v polimernykh sistemakh* [Diffusion in polymer systems], Moscow: Khimiya, 1987.
18. Deev, I.S., Kobets, L.P., *Strukturoobrazovanie v napolnennykh termoreaktivnykh polimerakh* [Structure formation in filled thermosetting polymers], *Kolloidny zhurnal*, 1999, V. 61, No 5, pp. 650–660.
19. Deev, I.S., Kobets, L.P., *Mikrostruktura epoksidnykh matrits* [Microstructure of epoxy matrices], *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 1986, No 1, pp. 3–8.
20. Ryzhonkov, D.I., Lyovina, V.V., Dzidziguri, E.L., *Nanomaterialy* [Nanomaterials]: study guide, Moscow: BINOM, Laboratoriya znany, 2008.
21. Valueva, M.I., Zelenina, I.V., Nacharkina, A.V., Lonsky, S.L., *Vliyanie termovlazhnostnogo vozdeistviya na strukturu i svoystva poliimidnogo ugleplastika* [The effect of thermal moisture on the structure and properties of polyimide carbon fiber], *Voprosy Materialovedeniya*, 2022, No 2 (110), pp. 90–101.
22. Musto, P., Ragosta, G., Mensitieri, G., Lavorgna, M., *On the molecular mechanism of H₂O diffusion into polyimides: a vibration spectroscopy investigation*, *Macromolecules*, 2007, V. 40, Issue 26, pp. 9614–9627. DOI: 10.1021/ma071385+
23. Sharma, H.N., Kroonblawd, M.P., Sun, Y., Glascoe, E.A., *Role of filler and its heterostructure on moisture sorption mechanism in polyimide films*, *Scientific reports*, 2018, No 8, Art. 16889. DOI: 10.1038/s41598-018-35181-1
24. Kablov, E.N., *Innovatsionnye razrabotki VIAM GNTs RF po realizatsii "Strategicheskikh napravleniy razvitiya materialov i tekhnologiy ikh pererabotki na period do 2030 goda"* [Innovative developments of FSUE "VIAM", State Research Center of the Russian Federation on the implementation of "Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030"], *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2015, No 1 (34), pp 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33
25. Kablov, E.N., *Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tekhnologiy ikh pererabotki na period do 2030 goda* [Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030], *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2012, No S, pp 7–17.
26. Kablov, E.N., *Rol khimii v sozdanii materialov novogo pokoleniya dlya slozhnykh tekhnicheskikh sistem* [The role of chemistry in the creation of new generation materials for complex technical systems], *Tez. dokl. XX Mendeleevskogo syezda po obshchei i prikladnoi khimii*, Ekaterinburg: UrO RAN, 2016, pp. 25–26.

UDC 621.791.052:669.15–194.56

EFFECTS OF MULTIPASS WELDING ON THE CHEMICAL COMPOSITION, STRUCTURE AND PROPERTIES OF AUSTENITIC STEELS COMPOUNDS

R.A. MAMADALIEV, V.I. PLEKHANOV, Cand Sc. (Eng), V.E. OVSYANNIKOV, Dr Sc. (Eng)

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Industrial University of Tyumen", 38 Volodarsky St, 625000 Tyumen. E-mail: mamadalievra@tyuiu.ru

Received April 17, 2024

Revised May 20, 2024

Accepted May 20, 2024

Abstract—This article discusses the influence of multipass welding with several electrodes of different brands on the chemical composition and microstructure of the seam. The objects of study were samples of pipe section made of stainless steel grade 12X18H10T. As a result of the conducted research, the values of the effective thermal power of the heating source were established, ensuring a uniform distribution of elements in the deposited metal, an austenitic structure, a minimum content of the ferritic phase and a uniform distribution of microhardness over the seam section.

Keywords: welding, modes, pass, structure, chemical composition, microhardness, corrosion

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-103-112

REFERENCES

1. Ulchenko, M.V., Rossiisky arktichesky gazovy kompleks: osnovnye problemy i perspektivy razvitiya [The Russian Arctic gas complex: the main problems and prospects of development], Apatity: Cola branch of the RAN, 2023.
2. Chupin, A.L., Shobekova, Sh.U., Vneshnyaya trgovlya i vneshnetorgovye perevozki Rossiyskoy Federatsii [Foreign trade and foreign trade transportation of the Russian Federation], *Colloquium-Journal*, 2020, No 9–7 (61), pp. 64–68.
3. Tusupzhanov, A.E., Erbolatuly, D., Kveglis, L.I., Strukturno-fazovye sostoyaniya i napryazhenie techeniya pri plasticheskoi deformatsii stali 12Kh18N10T [Structural and phase states and flow stress during plastic deformation of steel 12Kh18N10T], *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Ser: Tekhnika i tekhnologii*, 2019, V. 12, No 4, pp. 438–448. DOI 10.17516/1999-494X-0150
4. Cay, K.V., Rofman, O.V., Otstavnov, M.A., Izmenenie fazovogo sostava i prochnostnykh svoystv austenitnoi stali 12Kh18N10T v rezultate deformatsii i postdeformatsionnykh otzhigov [Changes in the phase composition and strength properties of austenitic steel 12Kh18N10T as a result of deformation and post-deformation annealing], *Vestnik NYaC RK*, 2019, No 1, pp. 72–78.
5. Ramdan, R.D., et al., Mekhanicheskie svoystva i mikrostruktura nerzhaveyushchei stali HAZ v rezultate svarki raznorodnykh metallov posle protsessov termoobrabotki [Mechanical properties and microstructure of HAZ stainless steel as a result of welding of dissimilar metals after heat treatment processes], *Seriya konferentsy IOP: Materialovedenie i inzheneriya, IOP Publishing*, 2019, V. 553, No 1.
6. Tokovoi, O.K., Shaburov, D.V., Issledovanie nemetallicheskoj fazy v austenitnoi nerzhaveyushchei stali [Investigation of the non-metallic phase in austenitic stainless steel], *Izv. vuz. Chernaya metallurgiya*, 2014, V. 57, No 12, pp. 20–24.
7. Petrov, V.P., *Svarivaemost staley* [Weldability of steels], Barnaul: Izd-vo AltGTU, 2000.
8. Petrov, V.N., *Svarka i rezka nerzhaveyushchikh staley* [Welding and cutting of stainless steels], Leningrad: Sudostroenie, 1970.
9. Medovar, B.I., *Svarka zharoprochnykh austenitnykh staley i splavov* [Welding of heat-resistant austenitic steels and alloys], Moscow: Mashinostroenie, 1966.
10. National Standard GOST 10052-75: *Elektrody pokrytye metallicheskie dlya ruchnoi dugovoi svarki vysokolegirovannykh staley s osobymi svoystvami. Tipy* [Coated metal electrodes for manual arc welding of high-alloy steels with special properties. Types], Moscow: Izd-vo standartov, 2004.
11. Kulikov, V.P., *Tekhnologiya i oborudovanie svarki plavlaniem i termicheskoi rezki* [Technology and equipment of fusion welding and thermal cutting], Minsk: Ekoperspektiva, 2003.
12. Rykalin, H.H., *Raschety teplovykh protsessov pri svarke* [Calculations of thermal processes during welding], Moscow: Mashgiz, 1951.
13. Kovensky, I.M., Kuskov, V.N., Prokhorov, N.N., *Strukturnye prevrashcheniya v metallakh i splavakh pri elektrotermicheskom vozdeistvii* [Structural transformations in metals and alloys under electrothermal action], Tyumen: Neftegazovy universitet, 2001.
14. Mamadaliev, R.A., Ishkina, E.G., Medvedev, A.V., Berg, V.I., Primenenie sovremennykh tsifrovyykh instrumentov dlya pretsizionnogo opredeleniya rezultatov mikrotverdosti po issleduemoi poverkhnosti [The use of modern digital tools for precision determination of microhardness results on the surface under study], *Inzhenerny vestnik Dona*, 2022, No 8 (92), pp. 196–206.
15. *Svarka v mashinostroenii* [Welding in mechanical engineering]: reference book, Moscow: Mashinostroenie, 1978, V. 2.

UDC 621.791.016:620.171.32–974

RESEARCH OF PROSPECTIVE WELDING TECHNOLOGIES, MATERIALS AND EQUIPMENT BASED ON NATURAL CLIMATIC TESTS IN NATURAL COLD CONDITIONS

N.I. GOLIKOV, Dr Sc. (Eng), Yu.N. SARAEV, Dr Sc. (Eng), M.M. SIDOROV, Cand Sc. (Eng)

Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS,

1 Oktabrskaya St, 677980 Yakutsk, Russian Federation. E-mail: n.i.golikov@mail.ru

Received June 4, 2024

Revised July 2, 2024

Accepted July 24, 2024

Abstract—The character of the stress condition, physical-mechanical and structural properties of mild steel welded joints made in cold ambient conditions were studied. Welded samples were obtained by MMA using electrodes UONI-13/MOROZ, KHOBEX-K-54, LB-52TRU. The studies were conducted within the framework of full-scale climatic tests under natural cold conditions of welding equipment and materials. It is shown that when welded under cold conditions, the level of tensile residual welding stresses increases by an average of 40–50% compared to welding at room temperature. Welding in cold ambient conditions revealed features of structure and mechanical properties. Methods of climatic test of welding materials and equipment in cold ambient conditions have been developed.

Keywords: welds, structural steel, welding technologies, welding materials, climatic tests, properties, structure

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-113-123

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the state assignment No EGISU NIOKTR 1023031300029-4-2.3.1 (FRWS-2024-0034) and using the scientific equipment of the Center for Collective Use of the Federal Research Center of the Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

REFERENCES

1. Larionov, V.P., *Elektrodugovaya svarka konstruktsy v severnom ispolnenii* [Electric arc welding of structures in the northern version], Novosibirsk: Nauka, 1986.
2. Lyglayev, A.V., Levin, A.I., Kornev, I.A., et al., Eksploatatsiya magistralnykh gazoprovodov v usloviyakh Severa [Operation of main gas pipelines in the Northern conditions], *Gazovaya promyshlennost*, 2001, No 8, pp. 37–39.
3. Kopelman, L.A., *Soprotivlyaemost svarnykh uzlov khrupkomu razrusheniyu* [Resistance of welded joints to brittle fracture], Leningrad: Mashinostroenie, 1978.
4. Sleptsov, O.I., et al., Povyshenie prochnosti svarnykh metallokonstruktsy gornodobyvaiushhei i transportnoi tekhniki v usloviyakh Severa [Increasing the strength of welded metal structures of mining and transport equipment in the conditions of the North], Novosibirsk: Nauka, 2012.
5. Bozic, Z., Schmauder, S., Wolf, H., The effect of residual stresses on fatigue crack propagation in welded stiffened panels, *Engineering Failure Analysis*, 2018, V. 84, pp. 346–357.
6. Ahmed, F., Ali, L., Iqbal, J., Hasan, F., Failure of pipe joints during hydrostatic testing, *Engineering Failure Analysis*, 2008, V. 15, pp. 766–773.
7. Goncharov, N.G., Nesterov, G.V., Yushin, A.A., Tekhnologiya svarki koltsevykh stykov magistralnykh truboprovodov iz trub klassa prochnosti K56 pri nizkikh temperaturakh okruzhayushei sredy [Technology for welding annular joints of main pipelines from pipes of strength class K56 at low ambient temperatures], *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2018, No 8, pp. 42–47. DOI 10.24000/0409-2961-2018-8-42-47
8. Larionov, V.P., Aprosimo, V.S., Egorov, Yu.I., Vliyanie rosta defekta na prochnost truboprovodov, ekspluatiruemykh v usloviyakh nizkikh klimaticheskikh temperatur [The influence of defect growth on the strength of pipelines operated in cold climatic temperature conditions], *Prochnost materialov i konstruktsy pri nizkikh temperaturakh*, Kiev, 1990, pp. 127–130.
9. Josepha, A., Sanjai, K. R., Jayakumara, T., Murugan, N., Evaluation of residual stresses in dissimilar weld joints, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2005, V. 82, pp. 700–705.
10. Sidorov, M.M., Golikov, N.I., Tikhonov, R.P., Opredelenie napriazhenno-deformirovannogo sostoyaniya magistralnykh gazoprovodov, prolozhennykh v zone vechnoi merzloty [Evaluation of the stressed deformed state of main gas pipelines running in permanently frozen grounds], *Kontrol. Diagnostika*, 2020, V. 23, No 12 (270), pp. 58–63. DOI 10.14489/td.2020.12
11. Gorelik, S.S., Skakov, Yu.A., Rastorguev, L.N., Rentgenografichesky i elektronnooptichesky analiz [X-ray and electron optical analysis], Moscow: MISIS, 1994.

12. Golikov, N.I., Sidorov, M.M., Saraev, Yu.N., Klimaticheskie ispytaniya svarochnogo oborudovaniya pri otritsatelnykh temperaturakh [Climatic testing of welding equipment at negative temperatures], *Svarochnoe proizvodstvo*, 2018, No 12, pp. 35–41.
13. Golikov, N.I., Sidorov, M.M., Saraev, Y.N., Climatic tests of welding materials at negative temperatures, *Welding International*, 2020, V. 34, No 10–12, pp. 425–429. DOI: 10.1080/09507116.2021.1962067
14. Matokhin, G.V., Vorobiev, A.Yu., Igumenov, A.A., Otsenka vliyaniya ostatochnykh svarochnykh napriazheny na predel vynoslivosti razlichnykh zon svarnykh soedineny ferrito-perlitnykh staley [Assessment of the influence of residual welding stresses on the endurance limit of various zones of welded joints of ferrite-pearlite steels], *Svarka i diagnostika*, 2015, No 1, pp. 32–34.
15. Hensel, J., Nitschke-Pagel, T., Rebelo-Kornmeier, J., Dilgera, K., Experimental Investigation of Fatigue Crack Propagation in Residual Stress Fields, *Procedia Engineering*, 2015, V. 133, pp. 244–254.
16. Uzhik, G.V., Prochnost i plastichnost metallov pri nizkikh temperaturakh [Strength and ductility of metals at low temperatures], Moscow: Akad. nauk SSSR, 1957.
17. Moshayedi, H., Sattari-Far, I., The effect of welding residual stresses on brittle fracture in an internal surface cracked pipe, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2015, V. 126–127, pp. 29–36.
18. Larionov, V.P., Pavlov, A.R., Ammosov, A.P., Osobennosti teplovogo balansa vanny pri svarke v usloviyakh nizkikh klimaticheskikh temperatur [Features of the heat balance of the pool when welding at low climatic temperatures], *Svarka i problemy viazkokhrupkogo perehoda: K 60-letiyu so dnia rozhdeniya akademika V.P. Larionova*, Novosibirsk: SO RAN, 1998, pp. 351–355.
19. Saraev, Yu.N., Golikov, N.I., Sidorov, M.M., Raspredelenie ostatochnykh napriazheny pri svarke v usloviyakh nizkikh klimaticheskikh temperatur [Distribution of residual stresses during welding at low climatic temperatures], *Vestnik Brianskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2019, No 11 (84), pp. 4–12.
20. Slivinsky, A.A., Zhdanov, L.A., Korotenko, V.V., Teplofizicheskie osobennosti impulsno-dugovoi svarki neplavyashchimsya elektrodom v zashchitnykh gazakh [Thermophysical features of pulsed-arc welding with a non-consumable electrode in shielding gases]: review, *Avtomaticheskaya svarka*, 2015, No 6–7, pp. 32–38.
21. Lebedev, V.A., Kozyrko, O.A., Sposoby i ustroystva dlia upravleniya kristallizatsii naplavlennogo metalla pri dugovoi svarke [Methods and devices for controlling the crystallization of deposited metal during arc welding]: review and analysis, *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii*, 2015, No 9, pp. 8–16.

UDC 620.193.4

ON THE CORROSIVE IMPACT OF VARIABLE LIQUID WETTING ON THE SURFACE OF PIPE STEEL FOR GAS LINES IN THE PRESENCE OF CO₂

R.K. VAGAPOV, Dr Sc. (Eng), Cand Sc. (Chem), K.A. IBATULLIN, Cand Sc. (Chem), A.D. GAIZULLIN,
D.S. FEDOTOV

Gazprom VNIIGAZ, 15, bld. 1 Gazovikov St, Razvilka, Leninsky municip., Moscow region, 142717 Russian Federation. E-mail: R_Vagapov@vniigaz.gazprom.ru

Received May 13, 2024

Revised July 22, 2024

Accepted July 22, 2024

Abstract—The corrosion resistance in carbon dioxide environments of a number of structural steels used for pipelines of gas fields has been studied. The aggressive conditions of gas facilities are characterized by the fact that most of the internal space of pipelines is filled with the gas phase. Corrosion effects on steel, when only a small gas pipeline is filled with a liquid phase, have previously been practically unstudied. During the research, a corrosion stand specially designed for this purpose was used, on which some of the most aggressive conditions of alternating wetting of the gas pipeline wall with water were reproduced. The corrosive activity of such conditions is associated with the destruction of films of corrosion products. In places where they crack and peel, local corrosion damage forms on the steel. The corrosion behavior of pipe steels from different gas pipelines under conditions of variable wetting with water was studied.

A comparative assessment of the resistance of pipe steels 09Mn2Si and 13KhFA in carbon dioxide environments under conditions of variable wetting and moisture condensation, the main effects of internal corrosion, was carried out. It was determined that the main type of destruction is local corrosion of the steel surface of the pipes. The influence of the microstructure of steels and their chromium content on their corrosion resistance under conditions of transport of CO₂-containing gas through pipelines has been assessed.

Keywords: carbon dioxide corrosion, corrosion test stand, steel microstructure, local corrosion, 09Mn2Si steel, 13KhFA steel

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-124-136

REFERENCES

1. Baydin, I.I., Kharitonov, A.N., Velichkin, A.V., et al., Vliyanie uglekisloty v prirodnom gaze gazokondensatnoi zalezhi nizhnemelovykh otlozheny Yubileynogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniya na ekspluatatsiyu UKPG-NTS [Effect of carbon dioxide in the natural gas of the gas condensate reservoir of the Lower Cretaceous deposits of Yubileynoe oil and gas condensate field on the operation of the UKPG-NTS], *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti*, 2018, V. 74, No 2, pp. 23–35.
2. Koryakin, A.Yu., Kobychiev, V.F., Kolinchenko, I.V., Yusupov, A.D., Usloviya prottekaniya uglekislotnoi korrozii na ob'ektakh dobychi Achimovskikh otlozheny, metody kontrolya i prognozirovaniya [Conditions of the carbon dioxide corrosion on the production facilities of Achimovskie deposits, methods of monitoring and forecasting], *Gazovaya Promyshlennost*, 2017, V. 761, No 12, pp. 84–89.
3. Vagapov, R.K., Resistance of Steels under Operating Conditions of Gas Fields Containing Aggressive CO₂ in the Produced Media, *Inorganic Materials: Applied Research*, 2022, V. 13, No 1, pp. 240–245. DOI: 10.1134/S2075113322010397
4. Alamr, A.H., Localized corrosion and mitigation approach of steel materials used in oil and gas pipelines: An overview, *Engineering Failure Analysis*, 2020, V. 116, Art. 104735. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104735>
5. Tan, Z., Yang, L., Zhang, D., et al., Development mechanism of internal local corrosion of X80 pipeline steel, *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, V. 49, pp. 186–201. DOI: 10.1016/j.jmst.2019.10.023
6. Mansoori, H., Mirzaee, R., Esmaeilzadeh, F., et al., Pitting corrosion failure analysis of a wet gas pipeline, *Engineering Failure Analysis*, 2017, V. 82, pp. 16–25. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.08.012
7. Amezhnov, A. V., Sravnitelny analiz metodov korrozionnykh ispytany staley dlya neftepromyslovykh truboprovodov [The comparative analysis of corrosion testing methods of steels for oil-field pipelines], *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*, 2019, No 4, pp. 36–49.
8. Andreev, N.N., Sivokon, I.S., Metodologiya laboratornogo testirovaniya ingibitorov uglekislotnoi korrozii dlya neftepromyslovykh truboprovodov [Methodology of laboratory assessment of efficiency of carbon dioxide corrosion inhibitors in oilfield pipelines], *Praktika protivokorroziionnoi zashchity*, 2014, No 74 (4), pp. 36–43.
9. Kantyukov, R.R., Vagapov, R.K., Zapevalov, D.N., et al., Primenenie innovatsionnogo ispytatelnogo stenda dlya issledovaniya korrozionnykh protsessov v usloviyakh uglekislotnykh sred gazovykh mestorozhdeny [Application of innovative test stand to study corrosion processes under carbon dioxide environment of gas fields], *Gazovaya Promyshlennost*, 2023, V. 854, No 11, pp. 78–85.
10. Rozi, F., Mohebbi, H., Ismail, M.C., et al., Laboratory investigation on the condensation and corrosion rates of top of line corrosion in carbon steel: a case study from pipeline transporting wet gas in elevated temperature, *Corrosion engineering, science and technology*, 2018, No 6, V. 53, pp. 444–448. DOI: 10.1080/1478422X.2018.1499169
11. Vagapov, R.K., Kantyukov, R.R., Zapevalov, D.N., Investigation of the corrosiveness of moisture condensation conditions at gas production facilities in the presence of CO₂, *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 2021, No 3 (10), pp. 994–1010. DOI: 10.17675/2305-6894-2021-11-1-5
12. Vagapov, R.K., Analiz vliyaniya agressivnykh faktorov i uslovy na sostav korrozionnykh produktov [Analysis of the influence of aggressive factors and conditions on the composition of corrosive products], *Voprosy Materialovedeniya*, 2022, No 3 (111), pp. 85–97. DOI: 10.22349/1994-6716-2022-111-3-85-97
13. Gao, K.Yu.F., Pang, X., et al., Mechanical properties of CO₂ corrosion product scales and their relationship to corrosion rates, *Corrosion Science*, 2008, V. 50, pp. 2796–2803. DOI: 10.1016/j.corsci.2008.07.016

14. Zhang, Q., Li, J., Liu, J., et al., Internal localized corrosion of X100 pipeline steel under simulated flow conditions, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2023, V. 945, Art. 117680. DOI: 10.1016/j.exptchemflusci.2023.111048
15. Yin, Z.F., Zhao, W.Z., Feng, Y.R., et al., Scaling characteristics and growth of corrosion product films in turbulent flow solution containing saturated CO₂, *Materials and Corrosion*, 2009, No 1, V. 60, pp. 5–13. DOI: 10.1002/maco.200805040
16. Li, J., Wang, D., Xie, F., Failure analysis of CO₂ corrosion of natural gas pipeline under flowing conditions, *Engineering Failure Analysis*, 2022, V. 137, Art. 106265. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106265
17. Baydin, I.I., Kovalenko, A.V., Gumerova, N.V., et al., Analiz dinamiki vnedreniya plastovoi vody v gazovuyu zalezh v usloviyakh sokrashcheniya dobychi gaza [Analysis of the dynamics of reservoir water introduction in the gas reservoir on the decline of gas production], *Neft i gaz*, 2018, No 6, pp. 41–44. DOI: 10.31660/0445-0108-2018-6-41-44
18. Okoro, E., Kurah, A.M., Sanni, S.E., et al., Flow line corrosion failure as a function of operating temperature and CO₂ partial pressure using real time field data, *Engineering Failure Analysis*, 2019, V. 102, pp. 160–169. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.04.037
19. Elgaddafi, R., Ahmed, R., Osisanya, S., Modeling and experimental study on the effects of temperature on the corrosion of API carbon steel in CO₂-saturated environment, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, V. 196, Art. 107816. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107816>
20. Li, J., Liu, Z., Du, C., et al., Study on the corrosion behaviours of API X65 steel in wet gas environment containing CO₂, *Corrosion engineering, science and technology*, 2017, No 4, V. 52, pp. 317–323. URL: <https://doi.org/10.1080/1478422X.2016.1278513>
21. Kantyukov, R.R., Zapevalov, D.N., Vagapov, R.K., Ibatullin, K.A., Patent RF No 2772614: *Sposob korrozionnykh ispytany i ustanovka dlya ego osushchestvleniya* [Corrosion testing method and installation for its implementation], Applied 26.07.2021, Publ. 23.05.2022.
22. Vagapov, R.K., Mikhalkina, O.G., Lopatkin, V.N., et al., Comparison of the aggressiveness of hydrogen sulfide media to steel in the vapor and water phases, *Voprosy Materialovedeniya*, 2023, No 3, V. 115, pp. 188–201. DOI: 10.22349/1994-6716-2023-115-3-188-201
23. Ochoa, N., Vega, C., Pebere, N., et al., CO₂ corrosion resistance of carbon steel in relation with microstructure changes, *Materials Chemistry and Physics*, 2015, V. 156, pp. 198–205. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.02.047>
24. Yang, S., Zhao, M., Feng, J., et al., Induced-Pitting Behaviors of MnS Inclusions in Steel, *High Temp. Mater. Proc.*, 2018, No 9–10, V. 37, pp. 1007–1016. URL: <https://doi.org/10.1515/htmp-2017-0155>
25. Rodionova, I.G., Baklanova, O.N., Amezhnov, A.V., et al., Vliyanie nemetallicheskiy vklyucheny na korrozionnyu stojkost uglerodistykh i nizkolegirovannykh stali dlya neftepromyslovykh truboprovodov [The influence of non-metallic inclusions on the corrosion resistance of carbon and low-alloy steels for oil field pipelines], *Stal*, 2017, No 10, pp. 41–48.
26. Vagapov, R.K., Lopatkin, V.N., Ibatullin, K.A., et al., Issledovanie vliyaniya mikrostruktury stali 09G2S na lokalnyu korroziyu gazoprovodov v protsesse ikh ekspluatatsii [Effect investigation of microstructure of steel 09G2S on local corrosion of gas pipelines during their operation], *Materialovedenie*, 2024, No 4, pp. 20–26. DOI: 10.31044/1684-579X-2024-0-4-20-26
27. Gupta, K.K., Kharatian, S., Mishin, O.V., Ambat, R., CO₂ corrosion resistance of low-alloy steel tempered at different temperatures, *Corrosion Science*, 2024, V. 232, Art. 112027. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.112027>
28. Xu, L., Wang, B., Zhu, J., et al., Effect of Cr content on the corrosion performance of low-Cr alloy steel in a CO₂ environment, *Applied Surface Science*, 2016, V. 379, pp. 39–46. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.04.049>
29. Choi, Y.-S., Nešić, S., Jung, H.-G., Effect of alloying elements on the corrosion behavior of carbon steel in CO₂ environments, *Corrosion*, 2018, No 5, V. 74, pp. 566–576. URL: <https://doi.org/10.5006/2705>
30. Stepanov, A.I., Ashikhmina, I.N., Belikov, S.V., et al., Nemetallicheskie vklyucheniya v nizkolegirovannoi stali 13KhFA dlya nefteprovodnykh trub povyshennoi nadezhnosti [Non-metallic inclusions in low-alloy steel 13KhFA for oil pipeline pipes of increased reliability], *Stal*, 2014, No 6, pp. 83–85.

31. Petrova, V.F., Guseva, A.A., Issledovanie vliyaniya mikrostruktury stali 13HFA na udarnuyu vyazkost tolstostennykh besshovnykh trub [Investigation of the effect of the microstructure of 13XFA steel on the impact strength of thick-walled seamless pipes], *Chernye metally*, 2020, No 2, pp. 47–51.
32. Amezhnov, A.V., Rodionova, I.G., Vasechkina, I.A., et al., Vliyanie strukturnykh kharakteristik trubnykh stali na pokazateli ikh korrozionnoi stoikosti [Influence of pipe steel structural characteristics on their corrosion resistance], *Metallurg*, 2022, No 11, pp. 25–33. DOI: 10.52351/00260827_2022_11_25
33. Gupta, K.K., Kharatian, S., Mishin, O.V., Ambat, R., The impact of minor Cr additions in low alloy steel on corrosion behavior in simulated well environment, *npj Materials Degradation*, 2023, V. 7, pp. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1038/s41529-023-00393-y>

UDC 669.14.018.295:539.421

REGARDING THE APPLICATION OF THE LOCAL CRITERION FOR BRITTLE FRACTURE IN ORDER TO RELATE THE CRACK RESISTANCE OF HIGH-STRENGTH STEELS WITH THE TEST RESULTS OF SAMPLES WITH A CONCENTRATOR AND THE MICROSTRUCTURAL CHARACTERISTICS OF THE MATERIAL

A.V. ILYIN, Dr Sc. (Eng), A.A. LAVRENTIEV, A.V. MIZETSKY, K.E. SADKIN, Cand Sc. (Eng)

NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: mail@crism.ru

Received April 16, 2024

Revised August 5, 2024

Accepted October 11, 2024

Abstract—This work is devoted to the research of high-strength medium-alloy martensitic and bainite-martensitic steels in various structural states. The critical values of the J-integral were determined and their stable correlation with the results of tensile test of cylindrical samples with the circumferential deep grooves was obtained. To confirm this correlation, the statistical formulation of the local criterion for brittle fracture proposed in previous works was used as an energy condition for the propagation of microcracks crossing through grain boundaries with large-angle misorientation of the crystal lattice. The analysis of the relationship between parameters used in the proposed local criterion and the structural characteristics of the material was performed. The predictive ability of the proposed model to determine the temperature dependence of fracture toughness was also analyzed.

Keywords: high-strength steel, fracture toughness, brittle fracture, fracture criterion, microstructure, mechanical tests

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-137-161

ACKNOWLEDGMENTS

Experimental studies were carried out on the equipment of the Core shared research facilities “Composition, structure and properties of structural and functional materials” of the NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey” with the financial support of the state represented by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under agreement No 13.TsKP.21.0014 (075-11-2021-068). The unique identifier is RF 2296.61321X0014.

REFERENCES

1. Golosienko, S.A., Ilyin, A.V., Lavrentiev, A.A., Mikhailov, M.S., Motovilina, G.D., Petrov, S.N., Sadkin K.E., Soprotivlenie khрупкому razrusheniyu vysokoprochnoy srednelegirovannoy stali i ego svyaz s parametrami strukturnogo sostoyaniya [Resistance to brittle fracture of high-strength medium-alloy steel and its relation to the parameters of the structural state], *Voprosy Materialovedeniya*, 2019, No 3 (99), pp. 128–147.
2. Ilyin, A.V., Lavrentiev, A.A., Mizetsky, A.V., O formulirovke localnogo kriteriya khрупkogo razrusheniya dlya prognozirovaniya treschinostoikosti vysokoprochnoi stali [On the formulation of a local brittle fracture criterion for predicting the crack resistance of high-strength steel], *Voprosy Materialovedeniya*, 2020, No 3 (103), pp. 114–134.

3. Ilyin, A.V., Lavrentev, A.A., Motovilina, G.D., Zabavicheva, E.V., Petrov, S.N., O korrel'atsii staticheskoy treshinostoikosti vysokoprochnoy srednelegirovannoy stali s parametrami strukturnogo sostoyania i standartnymi mekhanicheskimi svoystvami [On the correlation of static crack resistance of high-strength medium-alloy steel with structural state parameters and standard mechanical properties], *Voprosy Materialovedeniya*, 2023, No 1 (113), pp. 103–123.
4. Beremin, F.M., A local criterion for cleavage fracture of nuclear pressure vessel steel, *Metal Transaction*, 1983, V. 14, pp. 2277–2287.
5. Wallin, K., Laukkanen, A., Aspects of cleavage fracture initiation – relative influence of stress and strain, *Fatigue Fract Eng Mater & Struct.*, 2006, V. 29 (9), pp. 788–799.
6. Kroon, M., Faleskog, J., A probabilistic model for cleavage fracture with a length scale influence of material parameters and constraint, *Int. J. Fract.*, 2002, No 118, pp. 99–118.
7. Margolin, B.Z., Gulenko, A.G., Shvetsova, V.A., Prognozirovanie treshinostoikosti reaktornykh staley v veroyatnostnoy postanovke na osnove lokalnogo podkhoda [Predicting the crack resistance of reactor steels in a probabilistic formulation based on a local approach], *Problemy prochnosti*, 1999, P. 1–2, No 1–2, pp. 5–22.
8. Kopelman, L.A., *Soprotivlyaemost svarnykh shvov khрупkomu razrusheniyu* [Resistance of welds to brittle fracture], Leningrad: Mashinostroenie, 1978.
9. Meshkov, Yu.Ya., *Fizicheskie osnovy razrusheniya metallicheskih konstruktsiy* [Physical principles of failure of metallic structures], Kiev: Naukova dumka, 1981.
10. Chen, J.H., Cao, R., *Micromechanism of Cleavage Fracture of Metals*, Elsevier, 2015.
11. *Metod difraktsii otrazhennykh elektronov v materialovedenii* [The method of diffraction of reflected electrons in materials science], Schwartz, A., Kumar, M., Adams, B., Fild, D. (Eds.), Moscow: Teknosfera, 2014, pp. 376–393.
12. Petrov, S.N., Ptashnik, A.V., Ekspress-metod opredeleniya granits byvshego austenitnogo zerna v stalyakh beinito-martensitnogo klassa po lokalnym orientirovkam prevraschennoy struktury [Express method for determining the boundaries of the former austenitic grain in steels of the bainite-martensitic class by local orientations of the transformed microstructure], *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2019, No 5, pp. 5–12.
13. Pallaspuuro, A.S., Kaijalainen, A., Mekhtonen, S., Effect of microstructure on the impact toughness transition temperature of direct-quenched steels, *Materials Science & Engineering A*, 2018, V. 712, pp. 671–680.
14. GOST R 59115.6-2021: *Obosnovanie prochnosti oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok. Metody opredeleniya kharakteristik treschinostoikosti konstruktsionnykh materialov* [Substantiation of the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants. Methods for determining the characteristics of crack resistance of structural materials], Moscow: Izd-vo standartov, 2021.
15. Pineau, A., Development of the local approach to fracture over the past 25 years: theory and applications, *International Journal of Fracture*, 2006, March, 138(1), pp. 139–166. DOI: 10.1007/s10704-006-0035-1
16. Gorynin, I.V., Rybin, V.V., Malyshevsky, V.A., Semicheva, T.G., Sherochina, L.G., Prevrashchenie dislokatsionnogo martensita pri otpuske vtorichnotverdeyushey stali [Transformation of dislocation martensite during tempering of secondary hardening steel], *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1999, No 3, pp. 13–19.
17. Aksakov, I.S., Anisimov, A.V., Antipov, V.S., et al., *Materialy dlya sudostroeniya i morskoy tekhniki* [Materials for shipbuilding and marine engineering]: reference book, Gorynin, I.V. (Ed.), St Petersburg: Professional, 2009, V. 1.
18. Gorynin, I.V., Rybin, V.V., Malyshevsky, V.A., Osnovnye aspekty sozdaniya i primeneniya vysokoprochnoy konstruktsionnoy stali [The main aspects of the creation and utilization of high-strength structural steel], *Voprosy Materialovedeniya*, 1999, No 3 (20), pp. 7–21.
19. Karzov, G.P., Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., *Fiziko-mekhanicheskoe modelirovanie protsessov razrusheniya* [Physical and mechanical modeling of fracture processes], St Petersburg: Politeknika, 1993.
20. Margolin, B.Z., Fomenko, V.N., Gulenko A.G., Kostylev, V.I., Shvetsova, V.A., Dalneyshee razvitie modeli Prometei i metoda Unified Curve. Ch. 1: Razvitie modeli Prometei [Further development of the Prometheus model and the Unified Curve method. Part 1: Development of the Prometheus model], *Voprosy Materialovedeniya*, 2016, No 4 (88), pp. 120–150.
21. Margolin, B.Z., Fomenko, V.N., Shvetsova, V.A., Yurchenko, E.Yu., Radiatsionnoe i termicheskoe okhrupchivanie korpusnykh reaktornykh staley: svyaz mekhanizmov okhrupchivaniya i razrusheniya s kharakteristikami zarozhdeniya i rasprostraneniya treshchin. Ch. 1: Strategiya, programma i metody eksperimentalnykh i raschetnykh issledovaniy

- [Radiation and thermal embrittlement of reactor vessel steels: the relationship of embrittlement and fracture mechanisms with the characteristics of crack generation and propagation. Part 1: Strategy, program and methods of experimental and computational research], *Voprosy Materialovedeniya*, 2024, No 14 (117), pp. 173–194.
22. Margolin, B.Z., Fomenko, V.N., Shvetsova, V.A., Yurchenko, E.Yu., Radiatsionnoe i termicheskoe okhrupchivanie korpusnykh reaktornykh stali: svyaz mekhanizmov okhrupchivaniya i razrusheniya s kharakteristikami zarozhdeniya i rasprostraneniya treshchin. Ch. 2: Kharakteristiki prochnosti i plastichnosti [Radiation and thermal embrittlement of reactor vessel steels: the relationship of embrittlement and fracture mechanisms with the characteristics of crack generation and propagation. Part 2: Characteristics of strength and plasticity], *Voprosy Materialovedeniya*, 2024, No 14 (117), pp. 195–209.
23. Margolin, B.Z., Fomenko, V.N., Shvetsova, V.A., Yurchenko, E.Yu., Radiatsionnoe i termicheskoe okhrupchivanie korpusnykh reaktornykh stali: svyaz mekhanizmov okhrupchivaniya i razrusheniya s kharakteristikami zarozhdeniya i rasprostraneniya treshchin. Ch. 3: Modelirovanie khрупkogo razrusheniya i analiz svyazi kharakteristik zarozhdeniya i rasprostraneniya mikrotreshchin s mekhanizmom okhrupchivaniya [Radiation and thermal embrittlement of reactor vessel steels: the relationship of embrittlement and fracture mechanisms with the characteristics of crack generation and propagation. Part 3: Modeling of brittle fracture and analysis of the relationship between the characteristics of the origin and propagation of microcracks with the embrittlement mechanism], *Voprosy Materialovedeniya*, 2024, No 2 (118), pp. 166–186.
24. Lin, T., Evans, A.G., Ritchie, R.O., A statistical model of brittle fracture by transgranular cleavage, *Journal of Mechanics and the Physics of Solids*, 1986, No 25, pp. 477–497.

UDC 539.43:620.178.3

AN EFFECTIVE METHOD FOR EVALUATING HIGH- AND LOW-TEMPERATURE FATIGUE OF STRUCTURAL ELEMENTS

O.Yu. VILENSKY, Cand Sc. (Eng), D.L. OSETROV, Cand. Sc. (Phys-Math),
E.Yu. POVERENNOV, Cand. Sc. (Phys-Math)

*OKBM Afrikantov, 15 Burnakovsky proezd, 603074 Nizhny Novgorod, Russian Federation. E-mail:
poverennov@okbm.nnov.ru*

Received May 14, 2024

Revised June 28, 2024

Accepted August 16, 2024

Abstract—For geometrically complex designs of nuclear power plants, the justification of cyclic strength based on modern approaches is a time-consuming and resource-intensive process. From a practical point of view, the regulatory documents on the justification of the strength of nuclear power structures suggest the most simplified approach. The article numerically substantiates the inapplicability of such an approach for the case of non-isothermal cyclic loading. In this regard, a new effective methodology has been developed for assessing the fatigue of structures under isothermal or non-isothermal cyclic loads. Based on numerical elastic-plastic calculations of classical problems of deformation of cylindrical rods with deep annular incisions of various sharpness, the effectiveness of the developed technique has been confirmed.

Keywords: material fatigue, elastoplastic calculation, true stress-strain diagram, Bauschinger effect, cyclic memory of material, kinematic hardening model, stress concentration coefficient, non-isothermal cyclic loading, hard and soft loading, material creep

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-162-173

REFERENCES

1. PNAE G-7-002-86: *Normy rascheta na prochnost oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok* [Standards for calculating the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants], Gosatomnadzor SSSR, Moscow: Energoatomizdat, 1989.

2. State Standart GOST R 59115.10-2021: *Obosnovanie prochnosti oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok. Utochnenny poverochny raschet na stadii proektirovaniya* [Justification of the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants. Refined verification calculation at the design stage], Rosstandart, Moscow: RST, 2021.
3. Gokhfeld, D.A., Getsov, L.B., Kononov, K.M., et al., *Mekhanicheskie svoistva staley i splavov pri nestatsionarnom nagruzhении* [Mechanical properties of steels and alloys under unsteady loading]: reference book, Yekaterinburg: UrO RAN, 1996, p. 408.
4. Chaboche, J.-L., Lemaitre, J., *Mechanics of Solid Materials*, Cambridge University Press, 1990, p. 556.
5. Bondar, V.S., *Neuprugost. Varianty teorii* [Inelasticity. Variants of the theory], Moscow: FIZMATLIT, 2004, p. 144.
6. Kazakov, D.A., Kapustin, S.A., Korotkikh, Yu.G., *Modelirovanie protsessov deformirovaniya i razrusheniya materialov i konstruksiy* [Modeling of processes of deformation and destruction of materials and structures], N. Novgorod: Nizhegorodsky University, 1994.
7. Malinin, N.N., *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti* [Applied theory of plasticity and creep], Moscow: Mashinostroenie, 1975.
8. Veyvoda S., Vlk, M., Filatov, V.M., *Raschet sosudov na tsiklicheskyu prochnost s uchetom istorii nagruzheniya* [Calculation of vessels for cyclic strength taking into account loading history], *Problemy prochnosti*, 1988, No 3, pp. 87–91.
9. Belokrylov, P.Yu., Bankrutenko, V.V., Vilensky, O.Yu., Tatarsky, Yu.N., Osetrov, D.L., *Programma rascheta tsiklicheskoj i dlitelnoj tsiklicheskoj prochnosti VTU* [Program for calculating cyclic and long-term cyclic strength VTU]: Svidetelstvo o registratsii programmy dlya EVM RU 2016611384, 01.02.2016, Appl. No 2015618387 dated 14.09.2015.

UDC 669.715:621.74:620.179.152.1

EVALUATION OF POROSITY IN SILUMIN ALLOY CASTINGS BY X-RAY TOMOGRAPHY

E.I. KOSARINA, Dr Sc. (Eng), N.V. OSIYANENKO, A.A. DEMIDOV, A.V. SMIRNOV

National Research Center “Kurchatov Institute” – VIAM, 17 Radio St, 105005 Moscow, Russian Federation.

E-mail: admin@viam.ru

Received April 19, 2024

Revised September 12, 2024

Accepted September 12, 2024

Abstract—The article presents information on the study of porosity of control samples cast from silumin alloy using X-ray computed tomography (CT). The theoretical calculations and experiments had a goal: to develop an X-ray tomographic scale of gas porosity that would be absolutely adequate to the results of metallography. Currently, a radiographic porosity scale is widely used by the operator who compares the sample radiograph with a radiograph of the test object. Such an assessment of the quality of non-destructive testing is subjective, and it is determined by the experience, physical health of the operator performing the control, and the quality of radiographic images. X-ray tomography of reference porosity samples provides quantitative indicators of porosity and completely eliminates the subjective factor.

Keywords: aluminum casting alloys, porosity scale, reference radiographs, X-ray computed tomography, subjective and objective assessment of porosity

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-174-184

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out using equipment from the Climatic Testing Center of the National Research Center “Kurchatov Institute” – VIAM.

REFERENCES

1. Kablov, E.N., Belov, E.V., Trapeznikov, A.V., Leonov, A.A., Zaitsev, D.V., Osobennosti uprochneniya i kinetika stareniya liteinogo aluminievogo vysokoprochnogo splava na osnove sistemy Al–Si–Cu–Mg [Features of hardening and kinetics of aging of cast aluminum high–strength alloy based on the Al–Si–Cu–Mg system], *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2021, No 2, Art. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (reference date 21.03.2024). DOI:10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34
2. Nochovnaya, N.A., Ivanov, V.I., Yakimova, S.A., Islamov, R.S., Intermetallicheskoe soedinenie Ti_2AlNb – perspektivny material dlya aviatsionnoi i kosmicheskoi tekhniki. Ch. 2: Kratkovremennaya prochnost i soprotivlenie polzuchesti Ti_2AlNb splavov [The intermetallic compound Ti_2AlNb is a promising material for aviation and space technology. Part 2: Short-term strength and creep resistance of Ti_2AlNb alloys], *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2024, No 1, Art. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (reference date 20.03.2024). DOI:10.18577/2713-0193-2024-0-1-14-32
3. Kornysheva, I.S., Volkova, E.F., Goncharenko, E.S, Mukhina, I.Yu., Perspektivy primeneniya magnievykh i liteinykh alyuminievykh splavov [Prospects for the use of magnesium and cast aluminum alloys], *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2012, No 5, pp. 212–222.
4. Trapeznikov, A.V., Ivanov V.I., Prokhorchuk, E.A., Reshetnikov, Yu.V., Perspektivnye intermetallidnye Al_2Ti splavy dlya izgotovleniya detalei liteinyimi metodami [Promising intermetallic Al_2Ti alloys for the manufacture of parts by casting methods]: review, *Trudy VIAM*, 2021, No 5, Art. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (reference date 18.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-23-38
5. Kosarina, E.I., Mikhailova, N.A., Demidov, A.A., Krupnina, O.A., Smirnov, A.V., Osiyanenko, N.V., *Tsifrovye tekhnologii v rentgenovskom nerazrushayushchem kontrole* [Digital technologies in X-ray non-destructive testing]: study guide, Moscow: VIAM, 2023.
6. Kazantsev, S.P., Furman, E.L., *Defekty v otlivkakh pri litie po vyplavlyaemym modelyam* [Defects in castings]: electronic educational text resource, Ekaterinburg: Uralsky Federalny universitet, 2019.
7. Levchuk, V.V., Trapeznikov, A.V., Pentyukhin, S.I., Leonov, A.A., *Sposoby litiya tonkostennoi detali iz alyuminievogo splava tipa silumin* [Methods of casting thin-walled aluminum alloy parts of the silumin type]: review, *Trudy VIAM*, 2018, No 6, Art. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (reference date 01.04.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-30-38
8. Duyunova, V.A., Molodtsov, S.V., Leonov, A.A., Trapeznikov, A.V., Primenenie metodov kompyuternogo modelirovaniya pri izgotovlenii slozhnokonturnoi otlivki [Application of computer modeling methods in the manufacture of complex-contoured castings], *Trudy VIAM*, 2019, No 11, Art. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (reference date 20.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-3-11
9. GOST 1583–93: *Splavy alyuminievykh liteinykh. Tekhnicheskie usloviya* [Aluminum casting alloys. Technical conditions], Moscow: IPK izd-vo standartov, 1997. URL: <http://www.standarts.ru> (reference date 18.03.2024).
10. ISO 16371-1: *Non-destructive testing – Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates. Part 1: Classification of systems*, 2011.
11. *Perechen tipovykh arkhivnykh dokumentov, obrazuyushchikhsya v nauchno-tekhnicheskoi i proizvodstvennoi deyatel'nosti organizatsy, s ukazaniem srokov khraneniya. Razdel 1: Nauchno-issledovatel'skaya deyatel'nost* [A list of standard archival documents generated in scientific, technical and industrial activities of organizations, indicating the shelf life. Section 1: Research activities], Federalnoe arkhivnoe agentstvo, Order No 142 from 28.12.21.
12. Golovinsky, P.A., *Matematicheskie modeli. Kniga 1: Teoreticheskaya fizika i analiz slozhnykh sistem* [Mathematical models. Book 1: Theoretical physics and analysis of complex systems], Moscow: Nauchnaya i uchebnaya literatura, 2011, pp. 56–73.
13. Sukharev, A.G., *Minimaksnyye algoritmy v teorii chislennogo analiza* [Minimax algorithms in the theory of numerical analysis], Moscow: Nauchnaya i uchebnaya literatura, 2010.
14. Kosarina, E.I., Smirnov, A.V., Suvorov, P.V., Demidov, A.A., Tsifrovye etalonnye izobrazheniya pri otsenke kachestva otlivok iz alyuminievykh i magnitnykh materialov [Digital reference images for evaluating the quality of castings made of aluminum and magnetic materials], *Voprosy Materialovedeniya*, 2021, No 2 (106), pp. 182–194. DOI: 10.22349/1994-6716-2-182-194
15. Moiseev, N.N., *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical problems of system analysis]: study guide, Moscow: Knizhny dom “LIBROKOM”, 2012.

UDC 621.791.042

FEATURES OF ALLOYING SYSTEMS FOR FLUX CORED WIRES FOR WELDING OF HIGH STRENGTH SHIPBUILDING STEEL WITH SHIELDING GAS

V.B. GRIBANOVA, P.V. MELNIKOV, Cand Sc. (Eng)

NRC "Kurchatov Institute" – CRISM "Prometey", 49 Shpalernaya St, 191015, St Petersburg, Russian Federation. E-mail: mail@crism.ru

Received August 6, 2024

Abstract—The usage of special complex alloying and deoxidizing systems, combining various alloying components, micro-alloying components, deoxidizing and modifying elements that cannot be added into metal cored wires is the main aspect in the development of chemical compositions of welding consumables for high-strength steel welding. The optimal amount of acicular ferrite in the microstructure of the weld metal, as well as its high mechanical properties can be achieved by controlled introduction of titanium or titanium with boron. To ensure the best strength and ductility characteristics during complex micro-alloying of flux-cored wires, the titanium content should be about 0.04%, and boron – 0.003%

Keywords: flux-cored welding wires, mechanized gas-shielded welding (GMTA), cold resistance, high-strength steels, welding alloys

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-185-190

REFERENCES

1. Melnikov, P.V., *Razrabotka poroshkovykh provolok malogo diametra dlya svarki v zashchitnom gaze, obespechivayushchikh khladostoikost metalla shva pri temperaturakh do minus 60°C* [Development of small-diameter flux-cored wires for gas-shielded welding, ensuring cold resistance of the weld metal at temperatures down to minus 60°C]: thesis for the degree of Candidate of Sciences (Eng), St Petersburg, 2011.
2. Budnichenko, M.A., Avvakumov, Yu.V., Vnedrenie sovremennykh svarochnykh materialov v korablestroenii. Razrabotka vysokoproizvoditelnoi tekhnologii mekhanizirovannoi svarki konstruktsey iz vysokoprochnoy stali s ispolzovaniem poroshkovoy provoloki PP-A22/9 (Sv-03Kh22N9AM3) v smesi zashchitnykh gazov [Introduction of modern welding materials in shipbuilding [The introduction of modern welding materials in shipbuilding. Development of high-performance technology for mechanized welding of high-strength steel structures using PP-A22/9 (Sv-03Kh22N9AM3) powder wire in a mixture of protective gases], *Morskoy vestnik*, 2018, No 3 (67), pp. 51–56.
3. Mazur, A.A., Makovetskaya, O.K., Pustovoyt, S.V., Brovchenko, N.S., Poroshkovye provoloki na mirovom i regionalnykh ryunkakh svarochnykh materialov [Powder wires in the global and regional welding materials markets]: review, *Avtomaticheskaya svarka*, 2015, No 5–6, pp. 68–74.
4. Shlepakov, V.N., Kotelchuk, A.S., Gavrilyuk, V.A., Sovremennye poroshkovye provoloki dlya svarki nizkolegirovannykh staley povyshennoi i vysokoi prochnosti [Modern powder wires for welding low-alloy steels of increased and high strength], *Avtomaticheskaya svarka*, 2017, No 11 (769), pp. 13–18.
5. Gribanova, V.B., Melnikov, P.V., Gezha, V.V., Ways of import substitution of flux cored wires in welding production, *Proceedings of XIII International Conference NAVY AND SHIPBUILDING NOWADAYS NSN'2024*, St Petersburg: NP-PRINT, 2024, pp. 198–201.
6. Karasev, M.V., Rabotinsky, D.N., Kalinin, M.M., Volobuev, Yu.S., Potapov, N.N., Skutin, V.S., Vikhansky, N.I., Tropin, V.V., Osobennosti tekhnologii proizvodstva i primeneniya svarochnykh poroshkovykh provolok dlya svarki v zashchitnykh gazakh [Features of the production technology and application of welding powder wires for welding in protective gases], *Tyazheloe mashinostroenie*, 2021, No 1–2, pp. 18–26.
7. Gribanova, V.B., Melnikov, P.V., Gribkov O.I., Lukyanova N.A. Sistemy legirovaniya sovremennykh poroshkovykh provolok dlya mekhanizirovannoi svarki v zashchitnykh gazakh vysokoprochnykh sudostroitelnykh staley [Alloying

- systems of modern powder wires for mechanized welding in protective gases of high-strength shipbuilding steels], *Voprosy Materialovedeniya*, 2023, No 4 (116), pp. 179–186.
8. Kantor, M.M., Sudin, V.V., Bozhenov, V.A., Solntsev, K.A., Mikrostruktura i udarnaya vyazkost igolchatogo ferrita v svarnykh soedineniyakh nizkolegirovannoi stali po rezultatam mnozhestvennykh ispytany na udarny izgib [Microstructure and impact strength of needle ferrite in welded joints of low-alloy steel as a result of multiple impact bending tests], *Neorganicheskie materialy*, 2023, No 4, V. 59, pp. 451–467.
 9. Nokhrina, O.I., Rozhikhina, I.D., Dmitrienko, V.I., Platonov, M.A., *Legirovanie i modifitsirovanie stali s ispolzovaniem prirodnnykh i tekhnogennykh materialov* [Alloying and modification of steel using natural and man-made materials]: Monograph, Tomsk: Izdatelstvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2013.
 10. Lyamin, A.V., Madrakhimov, D.U., Vliyanie nalichiya bora na fazovoe sostoyanie i svoystva naplavochnykh materialov [The effect of the presence of boron on the phase state and properties of surfacing materials], *Molodoi ucheny*, 2021, No 4 (346), pp. 24–26.
 11. Potapov, A.I., Seman, A.E., Tekhnologicheskie osobennosti legirovaniya stali borom [Technological features of boron steel alloying], *Izv. vuzov: Chernaya metallurgiya*, 2012, No. 9, pp. 68–69.
 12. Arkharov, V.I., *Teoriya mikrolegirovaniya splavov* [Theory of microalloying], Moscow: Mashinostroenie, 1975.

UDC 621.762.275:621.791.92

CHARACTERISTICS OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF BIMETALLIC FLAT AND CYLINDRICAL SAMPLES OF THE SYSTEM COPPER – STAINLESS STEEL MANUFACTURED BY WIRE-FEED ELECTRON BEAM ADDITIVE TECHNOLOGY

K.S. OSIPOVICH, Cand Sc. (Phys-Math), V.M. SEMENCHUK, A.V. CHUMAEVSKY, Dr Sc. (Eng),
V.E. RUBTSOV, Cand Sc. (Phys-Math), E.A. KOLUBAEV, Dr Sc. (Eng)

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

Received July 22, 2024

Abstract—The paper presents the results of the study of the structural organization and properties of bimetallic specimens of the system copper – stainless steel obtained by the wire-feed electron beam additive technology. Peculiarities of the formation of heterogeneous material joints are revealed. Inhomogeneities of copper and steel distribution at the interface with formation of local areas of mechanical mixture due to interdiffusion of components in liquid state have been found. The shape of the copper particles in the area of mechanical mixing is free, close to spherical. The homogeneous and defect-free structure of the transition zone between the components of the specimen contributes to its sufficiently high mechanical properties, which are intermediate between the properties of copper and steel, corresponding to the properties of similar materials in the cast state.

Keyword: additive technology, wire-feed electron beam technology, copper, stainless steel, microstructure, microsegregation, structure-phase regularities

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-191-199

ACKNOWLEDGMENTS

The study was carried out with financial support from the Russian Science Foundation No 22-19-00578.

REFERENCES

1. Hauser T., et al., Multi-Material Wire Arc Additive Manufacturing of low and high alloyed aluminum alloys with in-situ material analysis, *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, V. 69, pp. 378–390. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.08.005
2. Blakey-Milner, B., Gradl, P.R., Snedden, G., Brooks, M., et al., Metal additive manufacturing in aerospace: A review, *Materials and Design*, 2021, V. 209, No 110008. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.110008

3. Sing, S.L., Huang, S., Goh, G.D., et al., Emerging metallic systems for additive manufacturing: In-situ alloying and multi-metal processing in laser powder bed fusion, *Progress in Materials Science*, 2021, V. 119, No 100795. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2021.100795
4. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C., Additive manufacturing of metals, *Acta Mater.*, 2016, V. 117, pp. 371–392. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.019
5. Wang, Z., Palmer, T.A., Beese, A.M., Effect of processing parameters on microstructure and tensile properties of austenitic stainless steel 304L made by directed energy deposition additive manufacturing, *Acta Mater.*, 2016, V. 110, pp. 226–235. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.03.019
6. Filippov, A.V., Khoroshko, E.S., et al., Characterization of gradient CuAl–B4C composites additively manufactured using a combination of wire-feed and powder-bed electron beam deposition methods, *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, V. 859, No 157824. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157824
7. Wang, L., Tieu, K., Lu, Sh., et al., Sliding wear behavior and electrochemical properties of binder jet additively manufactured 316SS / bronze composites in marine environment, *Tribology International*, 2021, V. 156, No 106810. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106810
8. Zhang, X., Zhang, X., Pan, T., Flood, A., Chen, Y., Zhang, Y., Liou, F., Investigation of copper/stainless steel multi-metallic materials fabricated by laser metal deposition, *Materials Science and Engineering A*, 2021, V. 811, No 141071. DOI: 10.1016/j.msea.2021.141071
9. Kolubaev, E.A., Rubtsov, V.E., Chumaevsky, A.V., Astafurova, E.G., Micro-, Meso- and Macrostructural Design of Bulk Metallic and Polymetallic Materials by Wire-Feed Electron-Beam Additive Manufacturing, *Physical Mesomechanics*, 2022, V. 25, pp. 479–491. DOI: 10.1134/S1029959922060017
10. Chen, G., Shu, X., Liu, J., Zhang, B., Feng, J., Crystallographic texture and mechanical properties by electron beam freeform fabrication of copper/steel gradient composite materials, *Vacuum*, 2020, V. 171, No 109009. DOI: 10.1016/j.vacuum.2019.109009
11. Utyaganova, V., et al., Characterization of AA7075/AA5356 gradient transition zone in an electron beam wire-feed additive manufactured sample, *Materials Characterization*, 2021, V. 172, No 110867. DOI: 10.1016/j.matchar.2020.110867
12. Shu, X., et al. Microstructure evolution of copper/steel gradient deposition prepared using electron beam freeform, *Materials Letters*, V. 213, pp. 374–377. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.11.016
13. Moskvina, V.A., et al., Stabilization of austenitic structure in transition zone of “austenitic stainless steel/NiCr alloy” joint fabricated by wire-feed electron beam melting, *Materials Letters*, V. 277, No 128321. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.128321
14. Xu, J., Zhou, Q., Kong, J., Peng, Y., Guo, S., Zhu, J., Fan, J., Microstructure and mechanical properties of Ti-52 at % Al alloy synthesized in-situ via dual-wires electron beam freeform fabrication, *J. Materials Science and Engineering A*, 2020, V. 798, No 140232. DOI: 10.1016/j.msea.2020.140232
15. Li, X., et al., Developing Cu modified Ti6Al4V alloys with a combination of high strength and ductility by electron beam freeform fabrication, *Vacuum*, 2021, V. 194, No 110638. DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110638
16. Xu, J., et al., Solidification behavior and microstructure of Ti-(37–52) at % Al alloys synthesized in situ via dual-wire electron beam freeform fabrication, *Additive Manufacturing*, 2021, V. 46, No 102113. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102113
17. Lei, S., et al., Microstructure and mechanical properties of electron beam freeform fabricated TiB2/Al-Cu composite, *Materials Letters*, 2020, V. 277, No 128273. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.128273
18. Tan, C., Zhou, K., Ma, W., Min, L., Interfacial characteristic and mechanical performance of maraging steel-copper functional bimetal produced by selective laser melting based hybrid manufacture, *Materials & Design*, 2018, V. 155, pp. 77–85. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.05.064
19. *Dvoynye i mnogokomponentnye sistemy na osnove medi* [Dual and multicomponent copper-based systems], Shukhardina, S.V. (Ed.), Nauka, 1979.
20. Hunt, J.D., *Cellular and Primary Dendrite Spacings, Solidification and Casting of Metals*, Sheffield, England, 1979, pp. 3–9.

ON THE CORRELATION BETWEEN PHYSICAL AND ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF PCM USED IN SHIPBUILDING PRODUCTS AND STRUCTURES

L.M. KHASANOVA, A.A. PERREN, V.S. TRYASUNOV, Cand Sc. (Eng)

NRC "Kurchatov Institute" – CRISM "Prometey", 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: mail@crism.ru

Received August 8, 2024

Abstract—The paper considers the correlation of the physical and acoustic characteristics of fiberglass manufactured using various reinforcing materials and molding methods. An adjusted technique for monitoring and calculating the correlation coefficients of ultrasound velocity with density and elasticity modules on various types of fiberglass is being worked out.

Keywords: ultrasound, fiberglass, density, elasticity modulus, acoustic characteristics

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-200-207

REFERENCES

1. OST5.9102-87: *Stekloplastiki konstruksionnye dlya sudostroeniya. Metody nerazrushayushchego kontrolya* [Fiberglass construction materials for shipbuilding. Non-destructive testing methods], Application 01/01/1989, TsNIITS, 1989.
2. Gershberg, M.V., Ilyushin, S.V., Smirnov, V.I., *Nerazrushayushchie metody kontrolya sudostroitelnykh stekloplastikov* [Non-destructive testing methods for shipbuilding fiberglass], Leningrad: Sudostroenie, 1971.
3. Latishenko, V.A., *Diagnostika zhestkosti i prochnosti materialov* [Diagnostics of stiffness and strength of materials], Riga: Zinatne, 1968.
4. Gershberg, M.V., Lanchin, V.F., Lanchina, T.N., *Svoistva sudostroitelnykh stekloplastikov i metody ikh kontrolya* [Properties of shipbuilding fiberglass and methods of their control], Sudostroenie, 1974, No 3.
5. Ashkenazi, E.K., *Anizotropiya drevesiny i drevesnykh materialov* [Anisotropy of wood and wood materials], Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1978.
6. Perren, A.A., Kontrol fiziko-mekhanicheskikh svoistv stekloplastikov akusticheskimi metodami [Control of physical and mechanical properties of fiberglass by acoustic methods], *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2005, No 2 (28).
7. Perren, A.A., Baganik, A.M., Kontrol modulei uprugosti polimernykh kompozitsionnykh materialov rezonansnym metodom [Control of elastic modulus of polymer composite materials by the resonance method], *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2012, No 4 (58), pp. 13–16.
8. Dzenis, V.V., *Primeneniya ultrazvukovykh preobrazovatelei s tochechnym kontaktom dlya nerazrushayushchego kontrolya* [Applications of ultrasonic transducers with point contact for non-destructive testing], Riga, 1987.