

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

- Мотовилина Г. Д., Коротовская С. В., Хлусова Е. И., Голубева М. В., Забавичева Е. В.* Структура и свойства листового проката различной толщины высокопрочной мартенситной стали после закалки и отпуска 5
- Куртева К. Ю., Мотовилина Г. Д., Пазилова У. А., Хлусова Е. И., Яковлева Е. А.* Исследование влияния режимов термической обработки на формирование слоя α -фазы с измененной структурой на поверхности листового проката низкоуглеродистой хромоникельмолибденовой стали 15
- Поспелов И. Д., Матвеева Д. В.* Исследование микроструктуры и твердости горячекатаной конструкционной хромистой стали после различных видов сфероидизирующего отжига 26
- Царева И. Н., Кривина Л. А., Бердник О. Б., Разов Е. Н., Москвичев А. А.* Исследование микроструктуры жаропрочного монокристаллического сплава после высокотемпературной эксплуатации 35
- Иголкин А. И., Лебедева Н. В., Петров С. Н.* Оценка качества металла строительных балок XIX века 43

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Гангало А. Н., Мирошниченко С. В.* Исследование влияния геометрии рабочего канала на гидростатическое давление в процессе равноканального углового прессования 50
- Ким А. Э., Мазеева А. К., Разумов Н. Г., Волокитина Е. В., Попович А. А.* Высокоэнтропийный магнитный сплав $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{20}\text{Al}_3\text{Ni}_2\text{Si}$, полученный методом механического легирования и искрового плазменного спекания 62
- Нестерова Е. Д., Бобкова Т. И., Мухамедзянова Л. В., Хроменков М. В., Сердюк Н. А.* Формирование композиционных порошков мультикомпонентных сплавов системы AlxNiCoFeCr методом механохимического синтеза 75
- Леонов В. П., Чудаков Е. В., Малинкина Ю. Ю., Гаранина И. М., Другачук С. Д., Маркова Ю. М., Карягин Д. А., Смирнов М. О.* Применение метода горячего изостатического прессования для повышения свойств титанового псевдо- α -сплава 86

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Сидорова С. А., Хрусталева А. Н., Лосев А. В., Рашутин Н. А.* Исследование физико-механических свойств наполненной оксидом алюминия нити для FDM-печати на основе полиэтилентерефталатгликоля 99
- Злобина И. В., Бекренев Н. В., Кондратов Д. В., Анисимов А. В.* Исследование влияния наполнителя на кинетику нагрева отвержденных полимерных композиционных материалов в СВЧ электромагнитном поле 110
- Проценко А. Е., Люхо И. А., Холодов А. С., Петров В. В.* Стеклопластики на основе наполнителей, восстановленных в среде пиридина при нормальном давлении 119
- Малецкий А. В., Исаев Р. Ш., Беличко Д. Р., Волкова Г. К.* Влияние нейтронного облучения на агрегатно- и дисперсно-упрочненную структуру ZTA композитной керамики 130

СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Леонов В. П., Сахаров И. Ю., Кузнецов С. В., Нестеров Д. М.* Расчетные исследования остаточных и временных сварочных напряжений в стыковом многопроходном сварном соединении из титанового псевдо- β -сплава 153
- Затоковенко Н. И., Панихидин Е. А., Ледянкин В. Н.* Влияние температуры и продолжительности послесварочного отпуска на свойства металла шва нефтехимического оборудования из стали с содержанием 2,25%Cr и 1,0%Mo 172

КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ

- Добротворская А. Н., Добротворский М. А., Зайцев Д. А.* Высокотемпературная водородная коррозия стали. Обзор 180

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

Васильев Н. В., Тимофеев М. Н., Шалыгин А. С., Хомич И. А., Петров В. А., Гуцев Д. Ф., Шитов В. В. Прогнозирование параметров трещиностойкости металла разнородных сварных соединений трубопроводов Ду800 ГЦТ и ГЦН РУ ВВЭР-1000 для обоснования применимости концепции «течь перед разрушением» 201

Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов 218

УДК 669.14.018.295:621.771.237:621.785.6

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЛИСТОВОГО ПРОКАТА РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ ВЫСОКОПРОЧНОЙ МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ И ОТПУСКА

Г. Д. МОТОВИЛИНА, канд. техн. наук, С. В. КОРОТОВСКАЯ, канд. техн. наук,
Е. И. ХЛУСОВА, д-р техн. наук, М. В. ГОЛУБЕВА, канд. техн. наук, Е. В. ЗАБАВИЧЕВА

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

Поступила в редакцию 20.01.2025

После доработки 19.03.2025

Принята к публикации 21.03.2025

Выполнен комплекс исследований влияния режимов отпуска на структурные изменения листового проката различной толщины из высокопрочной низкоуглеродистой стали мартенситного класса. Показано, что определяющее влияние на уровень работы удара стали с мартенситной структурой оказывает формирование карбидной фазы в реечном мартенсите и мартенсите самоотпуска.

Ключевые слова: высокопрочная сталь, закалка с печного нагрева, высокий отпуск, листовой прокат, структура, реечный мартенсит, мартенсит самоотпуска, специальные карбиды, вторичное твердение, работа удара

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-05-14

ЛИТЕРАТУРА

1. Горынин И. В., Рыбин В. В., Малышевский В. А., Семичева Т. Г., Шерохина Л. Г. Превращения дислокационного мартенсита при отпуске вторичнотвердеющей стали // МиТОМ. – 1999. – № 9. – С. 13–32.
2. Крошкин А. А., Малышевский В. А., Рыбин В. В., Шерохина Л. Г. Исследование тонкой структуры высокопрочной низкоуглеродистой вторично-твердеющей стали // Вопросы судостроения. Серия Металловедение. Металлургия. – 1983. – Вып. 37. – С. 3–10.
3. Влияние дислокаций на механизм вторичного твердения / В. В. Рыбин, Г. Н. Белозерский, В. А. Малышевский и др. // ФММ. – 1982. – Т. 54, вып.5. – С. 990–999.
4. Горынин И. В., Рыбин В. В., Малышевский В. А., Семичева Т. Г. Теоретические и экспериментальные основы создания вторичнотвердеющих свариваемых конструкционных сталей // МиТОМ. – 1999. – № 9. – С. 7–13.
5. Рыбин В. В., Малышевский В. А., Семичева Т. Г. Развитие теории вторичного твердения при создании высокопрочных корпусных марок стали // Вопросы материаловедения. – № 2(42). – 2005.
6. Новиков И. И. Теория термической обработки. – М.: Металлургия, 1978. – 392 с.
7. Яковлева И. Л., Терещенко Н. А., Урцев Н. В. Наблюдение мартенситно-аустенитной составляющей в структуре низкоуглеродистой низколегированной трубной стали // ФММ. – 2020. – Т. 121, № 4. – С. 396–402.
8. Физическое материаловедение. Т. 1: Физика твердого тела. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 764 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЯ α -ФАЗЫ С ИЗМЕНЕННОЙ СТРУКТУРОЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ ХРОМОНИКЕЛЬМОЛИБДЕНОВОЙ СТАЛИ

К. Ю. КУРТЕВА, Г. Д. МОТОВИЛИНА, канд. техн. наук, У. А. ПАЗИЛОВА, канд. техн. наук,
Е. И. ХЛУСОВА, д-р техн. наук, Е. А. ЯКОВЛЕВА, канд. техн. наук

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,
ул. Шпалерная, 49. E-mail: nrk3@crism.ru

Поступила в редакцию 29.10.2024

После доработки 4.02.2025

Принята к публикации 21.03.2025

Для исследования влияния термической обработки на образование на поверхности листового проката из высокопрочной низкоуглеродистой хромоникельмолибденовой бейнитно-мартенситной судостроительной стали слоя α -фазы с измененной структурой, представляющей зерна полиэдрической формы разного размера, проведены металлографические исследования и измерения твердости от поверхности к середине проката толщиной 10 мм после варьирования режимов закалки и отпуска. Деформационную способность листового проката оценивали по результатам испытаний на изгиб на угол 180°. Показано, что определяющее влияние на образование такого слоя оказывает длительность высокого отпуска. По результатам исследований предложен режим термической обработки листового проката толщиной менее 16 мм, обеспечивающий образование слоя α -фазы с измененной структурой наименьшей глубины без значительных изменений твердости.

Ключевые слова: низкоуглеродистая хромоникельмолибденовая сталь, бейнит, мартенсит, отпуск, поверхность листового проката, слой α -фазы с измененной структурой, деформационная способность, изгиб

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-15-25

ЛИТЕРАТУРА

1. Kuwata K., Takemoto Y., Okayasu M., Bian J., Senuma T. Decarburizing Behavior and Its Effect on Mechanical Properties of Ultrahigh Strength Steel Sheets // *ISIJ International*. – 2021. – V. 61, N 4. – P. 1300–1308. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-416>
2. Yu H., Lu J. Temperature Dependence and Formation Mechanism of Surface Decarburization Behavior in 35CrMo Steel // *Steel Research International*. – May 2019. DOI: 10.1002/srin.201900188
3. Roumina R., Bruhis M., Masse J. P., Zurob H.S., Jain M., Bouaziz O., Embury J. D. Bending properties of functionally graded 300M steels // *Materials Science & Engineering*. – 2016. – A 653. – P. 63–70.
4. Голубева М.В., Мотовилина Г.Д., Святышева Е.В., Сыч О.В. Особенности формирования структуры в стали марки 09ХГН2МД после термоулучшения // Материалы XVIII Международной научно-технической школы-семинара «Уральская школа молодых металлургов» / Под ред. А. А. Попова, 2017. – С. 138–142.
5. Голубева М. В., Сыч О. В., Хлусова Е. И., Мотовилина Г. Д., Святышева Е. В., Рогожкин С. В., Лукьянчук А. А. Изменение структуры высокопрочной экономнолегированной стали марки 09ХГН2МД при отпуске // *Вопросы материаловедения*. – 2018. – № 1 (39). – С. 15–26.
6. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1986. – С. 54.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И ТВЕРДОСТИ ГОРЯЧЕКАТАНОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ ХРОМИСТОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ СФЕРОИДИЗИРУЮЩЕГО ОТЖИГА

И. Д. ПОСПЕЛОВ, канд. техн. наук, Д. В. МАТВЕЕВА

ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет», 162602, Вологодская обл.,
г. Череповец, пр. Луначарского, 5. E-mail: idpospelov@chsu.ru.

Поступила в редакцию 8.11.2024

После доработки 16.01.2025

Принята к публикации 31.01.2025

Представлено сравнительное исследование изменения твердости и микроструктуры горячекатаной конструкционной хромистой стали 35Х после изотермического и циклического отжига. По результатам проведения эксперимента представлены температурные режимы таких отжигов для получения дополнительных требований к твердости и глубине обезуглероженного слоя по ГОСТ 4543–2016. Показано преимущество циклического отжига с выдержками выше критической точки A_{c3} в плане температурно-скоростных условий охлаждения заключительного цикла для образования однородной структуры зернистого перлита и сфероидизации карбидной фазы по всей площади исследуемых образцов.

Ключевые слова: конструкционная горячекатаная сталь 35Х, твердость по Бринеллю, изотермический отжиг, циклический отжиг, микроструктура, карбидная фаза, сфероидизация

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-26-34

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 4543–2016.Metalloprodukcija iz konstrukcionnoj legirovannoj stali. Tekhnicheskie uslovija.
2. Xie H., Du L., Hu J., Misra R. Microstructure and mechanical properties of a novel 1000 MPa grade TMCP low carbon microalloyed steel with combination of high strength and excellent toughness // Materials science and engineering. – 2014. – V. 612. – P. 123–130.
3. Bandyopadhyay P. S., Ghosh S. K., Kundu S., Chatterjee S. Evolution of microstructure and mechanical properties of thermomechanically processed ultrahigh-strength steel // Metallurgical and materials transactions. – 2011. – V. 42. – P. 2742–2752.
4. Kaijalainen A., Hannula J., Somani M., Kömi J. Influence of chromium content on the mechanical properties and HAZ simulations of low-carbon bainitic steels // Proceedings 28th International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Tanger Ltd. Publ. – 2019. – P. 520–525.
5. Zhou J., Yu Z., Chen J., Wu S., Wu K., Pan L. The Performance of niobium-microalloying ultra-high-strength bridge cable steel during hot rolling // Materials. – 2024. – V. 17 (6). – P. 1259.
6. Матросов М. Ю., Эфрон Л. И., Кичкина А. А., Лясоцкий И. В. Исследование микроструктуры микролегированной ниобием трубной стали после различных режимов контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2008. – № 3. – С. 44–49.
7. Javaheri V., Khodaie N., Kaijalainen A., Porter D. Effect of niobium and phase transformation temperature on the microstructure and texture of a novel 0.40% C thermomechanically processed steel // Materials Characterization. – 2018. – V. 142. – P. 295–308.
8. Rancel L., Gómez M., Medina S. F. Influence of microalloying elements (Nb, V, Ti) on yield strength in bainitic steels // Steel research international. – 2008. – V. 79. – P. 947–953.
9. Xia T., Ma Y., Zhang Y., Li J., Xu H. Effect of Mo and Cr on the microstructure and properties of low-alloy wear-resistant steels // Materials. – 2024. – V. 17 (10). – P. 2408.
10. Rodriguez-Galeano K. F., Nutter J., Azakli Y., Slater C., Rainforth W. M. Influence of Cr and Cr+Nb on the interphase precipitation and mechanical properties of V–Mo microalloyed steels // Materials Science and Engineering: A. – 2024. – V. 893. – P. 146140.

11. Гарбер Э. А., Поспелов И. Д., Кожевникова И. А. Влияние фактического химического состава и упругих свойств полосы и валков на точность расчетов энергосиловых параметров широкополосных станов горячей прокатки // Производство проката. – 2011. – № 8. – С. 2–7.
12. Бернштейн М. Л. Структура деформированных металлов. – М.: Металлургия, 1977. – 431 с.
13. Рудской А. И., Лунев В. А. Теория и технология прокатного производства. – СПб.: Наука, 2005. – 377 с.
14. Zhu S., Zhen X., Wang G., Ma C., Cao C. Effect of SCM435 initial microstructure and annealing process on spheroidization grade and properties // Vibroengineering PROCEDIA. – 2023. – V. 48. – P. 61–66.
15. Inam A., Brydson R., Edmonds D. V. Effect of starting microstructure upon the nucleation sites and distribution of graphite particles during a graphitising anneal of an experimental medium-carbon machining steel // Materials Characterization. – 2015. – V. 106. – P. 86–92.
16. Rounaghi S. A., Kiani-Rashid A. R. Study on graphitization acceleration during annealing of martensitic hypereutectoid steel // Phase Transitions. – 2011. – V. 84 (11–12). – P. 981–991.
17. Поспелов И. Д., Матвеева Д. В. Влияние изотермического отжига перед холодной прокаткой на механические свойства заэвтектоидной стали для высокопрочных холоднокатаных лент // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2024. – № 10. – С. 26–31.
18. Pospelov I. D., Matveeva D. V. Research of the mechanical properties of steel U10A for the production of high-strength cold-rolled strips after cyclic annealing and plastic deformation. Basic Problems of Material Science. – 2024. – V. 21 (2). – P. 247–253.
19. Gauvin M., Dutta A., Lorenz U., Duprez L., Waterschoot T. Micro- to nanoscale microstructural differences induced by intercritical annealing in a hot-rolled medium manganese steel // Steel research international. – 2023. – V. 94 (11). – P. 2300032.
20. Wang Y., Ding R., Franke C., Li T., Rong X., Wen P., Yang Z., Chen H. Flash annealing of a chemically heterogeneous medium Mn steel // Scripta Materialia. – 2024. – V. 242. – P. 115923.
21. Rivolta B., Gerosa R., Panzeri D., Piazza L., Angelini L., Alfonso M., Bolognani N., Panzeri A., Parimbelli A., Sala C. Spheroidizing annealing of thermomechanically hot-rolled steel rods: influence of the prior microstructure on the mechanical characteristic and phase transformations // Ironmaking & steelmaking. – 2022. – V. 49 (7). – P. 716–725.
22. Wang Hs., Yuan G., Lan Mf. Microstructure and mechanical properties of a novel hot-rolled 4% Mn steel processed by intercritical annealing // Journal of materials science. – 2018. – V. 53 (17). – P. 12570–12582.
23. Zhang Y., Wang J., Xie Z. Microstructural Characteristics and tensile behavior of a hot-rolled medium-Mn steel (0.25C–8.5Mn–0.5Si–2.5Al) processed by intercritical annealing treatment // Journal of materials engineering and performance. – 2020. – V. 29. – P. 2623–2634.

УДК 669.245.018.44:621.785.78

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ЖАРОПРОЧНОГО МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА ПОСЛЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

И. Н. ЦАРЕВА¹, канд. физ.-мат. наук, Л. А. КРИВИНА¹, канд. техн. наук,
О. Б. БЕРДНИК², канд. техн. наук, Е. Н. РАЗОВ¹, А. А. МОСКВИЧЕВ¹, канд. техн. наук

¹ФГБУН «Институт проблем машиностроения РАН (ИПМ РАН)» – филиал ФГБУН
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. Гапонова-Грехова
РАН» (ФИЦ ИПФ РАН), 603024, Нижний Новгород, ул. Белинского, 85.

E-mail: krivina.lydmila@mail.ru

²ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева
(НГТУ)», 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24

Поступила в редакцию 16.12.2024

После доработки 17.02.2025

Принята к публикации 11.03.2025

Исследована микроструктура материала рабочей лопатки 1-й ступени газовой турбины SGT-400 Siemens, изготовленной из жаропрочного монокристаллического сплава, в постэксплуатационном состоянии (после отработки назначенного ресурса ~25 000 ч). Методами электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии изучено структурно-фазовое состояние жаропрочного монокристаллического никелевого сплава после натурной эксплуатации в условиях длительного воздействия высокотемпературного газового потока и рабочих нагрузок. Изучены закономерности процесса высокотемпературного старения, проявляющиеся в появлении крупной пористости, выделении пластинчатой γ' -фазы и локальном сращивании ячеек γ' -фазы в осях дендритов. Методом микроиндентирования проведены исследования микротвердости в разных зонах и структурных составляющих материала замковой и перовой частей лопатки.

Ключевые слова: жаропрочный монокристаллический сплав, постэксплуатационное состояние, микроструктура, дендритное строение, интерметаллидная фаза, микротвердость, высокотемпературное старение

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-35-42

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н., Петрушин Н. В., Светлов И. Л. Литейные жаропрочные никелевые сплавы для перспективных авиационных ГТД // Технология легких сплавов. – 2007. – № 2. – С. 17–23.
2. Бондаренко Ю. А., Базылева О. А., Ечин А. Б., Сурова В. А., Нарский А. Р. Высокоградиентная направленная кристаллизация деталей из сплава ВКНА-1В // Литейное производство. – 2012. – № 6. – С. 3–15.
3. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). – М.: МИСИС, 2001. – 632 с.
4. Булахтина М. А. Особенности структурных изменений в литейных сплавах на основе Ni3Al при термической обработке, постоянных и циклических нагружениях при высоких температурах // Дис. ... канд. техн. наук. – М., 2022. – 112 с.
5. Каблов Е. Н., Орлов М. Р., Оспенникова О. Г. Механизмы образования пористости в монокристаллических лопатках турбины и кинетика ее устранения при горячем изостатической прессовании // Юбилейный научно-технический сборник: «80 лет. Авиационные материалы и технологии», 2012. – С. 20–43.
6. Петрушин Н. В., Бронфин М. Б., Каблов Е. Н., Хацинская И. М., Чабина Е. Б., Рощина И. Н., Тимофеева О. Б. Особенности структурно-фазовых превращений при термической обработке высокорениевых жаропрочных сплавов // Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С. Т. Кишкина. – М.: Наука, 2006. – С. 142–154.
7. Логунов А. В. Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин. – Рыбинск: ИД «Газотурбинные технологии», 2017. – 855 с.
8. Морозова Г. И., Тимофеева О. Б., Петрушин Н. В. Особенности структуры и фазового состава высокорениевого жаропрочного сплава // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2009. – № 2 (644). – С. 10–16.

УДК 669.141.2:624.014.2:624.072.2

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МЕТАЛЛА СТРОИТЕЛЬНЫХ БАЛОК XIX ВЕКА

А. И. ИГОЛКИН¹, канд. техн. наук, Н. В. ЛЕБЕДЕВА², канд. техн. наук, С. Н. ПЕТРОВ², д-р техн. наук

¹ПК ЦНТУ «Прометей», 191144, Санкт-Петербург, пр. Бакунина 29, лит. А, пом. 2н,

²НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49. E-mail: mail@crism.ru

Исследованы структура и свойства металла строительных балок в зданиях постройки XIX века: двутавра как несущего элемента кирпичного свода Монье и рельса как основания балкона. Металл двутавра представлен умеренно загрязненной примесями малоуглеродистой сталью, близкой к современной стали Ст2пс в нормализованном состоянии. Однако в отличие от современных аналогов, металл двутавра вследствие выраженной зональной ликвации по углероду склонен к хладноломкости. Металл рельса произведен в Англии из нелегированного (пудлингового) железа, содержит многочисленные неметаллические включения, обогащенные фосфором, и характеризуется хрупкостью.

Ключевые слова: сталь, железо, XIX век, строительные балки, здания, своды, балкон, двутавр, рельс, свойства, структура, хладноломкость, хрупкость

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-43-49

ЛИТЕРАТУРА

1. Ишкин Е. С., Летаев В. Р., Смышляев С. А., Драгунов П. С. Особенности обследования несущих конструкций зданий дореволюционной постройки // НАУ. Архитектура. – 2015. – № 7. – С. 37–39.
2. Иванова Е. Г., Страхов Д. А., Синяков Л. Н., Зимин С. С. Совместная работа стальных балок перекрытия и сводов // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2018. – № 10 (73). – С. 7–15.
3. Енкина У. С., Тукция А. Л., Голых О. В. Оценка несущей способности металлических балок в составе кирпичных сводов // Молодой ученый. – 2020. – № 50 (340). – С. 79–81.
4. Бедов А. И., Габитов А. И., Домарова Е. В., Салов А. С. Напряженно-деформированное состояние сводов из каменной кладки, опирающихся на стальные балки в перекрытиях // Строительные материалы. – 2023. – № 5. – С. 58–65.
5. Минасян Г. А. Прочность и несущая способность кирпичных сводов Монье // Вестник НИЦ «Строительство». – 2020. – № 2 (25). – С. 89–95.
6. Сегедова Л. Н., Москаленко А. И. Конструктивные решения балконов в жилых домах XIX–XX веков // Строительство и архитектура. Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4.
7. Русские ученые-металловеды: жизнь, деятельность и избранные труды / Под ред. Д. М. Нахимова и А. Г. Рахштадта. – М.: Машгиз, 1951. – 504 с.
8. Русский нормальный метрический сортамент фасонного железа: Угловое, тавровое, двутавровое, корытное и зетовое // Постоянная совещательная контора железозаводчиков. – Санкт-Петербург: Техн. автолитогр. инж. Доброумова и Де-Кельш, 1899. – 39 л.
9. Родионов Д. П., Счастливцев В. М., Филиппов Ю. И. Структура и механические свойства уральского сварочного железа // Физика металлов и металловедение. – 2004. – Т. 97, № 1. – С. 89–95.
10. Lesiuk G., Szata M., Bocian M. The mechanical properties and microstructural degradation effects in an old low carbon steels after 100-years operating time // Arch. Civ. Mech. Eng. – 2015. – V. 15. – P. 786–797.
11. Kossakowski P. G. Mechanical properties of bridge steel from the late 19th century // Appl. Sci. – 2021. – N 2 (11). – 478 p.
12. Paglia C., Antonietti C., Mosca C. The deterioration of 100 years old coated steel bridge // 5th International conference on materials science and engineering sciences, Corea, March 2021.
13. Lesiuk G., Coreia J., Smolnicki M. et al. Fatigue crack growth rate of the long term operated puddle iron from the Eiffel bridge // Metals. – 2019. – N 9 (53).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ РАБОЧЕГО КАНАЛА НА ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ В ПРОЦЕССЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ

А. Н. ГАНГАЛО, канд. техн. наук, С. В. МИРОШНИЧЕНКО

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина», 283114, Донецк, ДНР, Россия, ул. Розы Люксембург, 72. E-mail: al-gangalo@yandex.ru, svmiro@mail.ru

Поступила в редакцию 9.01.2025

После доработки 28.02.2025

Принята к публикации 5.03.2025

Методом конечных элементов исследовано влияние угловых параметров канала матрицы в процессе равноканального углового прессования на распределение гидростатического давления в очаге деформации. Угол пересечения каналов исследовали в интервале 90–120°, внешнее закругление в зоне пересечения каналов рассмотрено в интервале (0,05–1) ширины канала. Задача решена в допущении плоского деформированного состояния с использованием модели идеального жесткопластического тела в условиях трения по закону Амонта – Кулона с коэффициентом, равным 0,1. Выполнено сравнение результатов моделирования уровня гидростатического давления на оси очага деформации с аналитическим решением. Оценена зависимость распределения гидростатического давления на входной и выходной границах очага деформации от угловых характеристик канала, а также его неоднородность по очагу.

Ключевые слова: равноканальное угловое прессование, гидростатическое давление, метод конечных элементов, угловые параметры канала, поля напряжений, очаг деформации, неоднородность

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-50-61

ЛИТЕРАТУРА

1. Процессы пластического структурообразования / В. М. Сегал, В. И. Резников, В. И. Копылов и др. – Минск: Навука і тэхніка, 1994. – 232 с.
2. Edalati K., Bachmaier A., Beloshenko V. A., Beygelzimer Y. et al. Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances // *Materials Research Letters*. – 2022. – V. 10, N 4. – P. 163–256. DOI: 10.1080/21663831.2022.2029779
3. Валиев Р. З., Жилыев А. П., Лэнгдон Т. Дж. Объемные наноструктурные материалы: фундаментальные основы и применения. – СПб.: Эко-Вектор, 2017. – 479 с.
4. Yilmaz T. A., Totik Y., Senoz G. M. L., Bostan B. Microstructure evolution and wear properties of ECAP treated Al-Zn-Mg alloy: effect of route, temperature and number of passes // *Mater. Today Commun.* – 2022. – V. 33. – P. 104628. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.104628
5. Effect of ECAP die angle on the strain homogeneity, microstructural evolution, crystallographic texture and mechanical properties of pure magnesium: numerical simulation and experimental approach / A. I. Alateyah, M. M. Z. Ahmed, M. O. Alawad et. al. // *J. Mater. Res. Technol.* – 2022. – V. 17. – P. 1491–1511.
6. Объемные наноструктурные материалы с многофункциональными свойствами / И. Н. Сабинов, Н. А. Еникеев, М. Ю. Мурашкин и др. – СПб.: Эко-Вектор, 2018. – 135 с.
7. Утяшев Ф. З., Рааб Г. И., Валитов В. А. Деформационное наноструктурирование металлов и сплавов: монография. – СПб.: Научные технологии, 2020. – 185 с.
8. Sabbaghian M., Mahmudi R., Shin K. S. A comparative study on the microstructural features and mechanical properties of an Mg-Zn alloy processed by ECAP and SSE // *Mater. Sci. Eng.* – V. 845, June. – 2022. – Art. 143218. DOI: 10.1016/j.msea.2022.143218
9. Patil Basavaraj V., Chakkingal U., Prasanna Kumar T.S. Study of channel angle influence on material flow and strain inhomogeneity in equal channel angular pressing using 3D finite element simulation // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – V. 209. – P. 89–95.

10. Kim J. K., Kim W. J. Analysis of deformation behavior in 3D during equal channel angular extrusion // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2006. – V. 176. – P. 260–267.
11. Luis-Perez C. J., Gonzales P., Garces Y. Equal channel angular extrusion in a commercial Al-Mn alloy // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – V. 143–144. – P. 506–511.
12. Analysis of the billet deformation behavior in equal channel angular extrusion / J. R. Bowen, A. Gholinia, S. M. Roberts et al. // *Materials Science and Engineering A*. – 2000. – V. 287. – P. 87–99.
13. Kim H. S. Evaluation of strain rate during equal-channel angular pressing // *Journal of Materials and Research*. – 2002. – V. 17. – P. 172–178.
14. Спусканюк В. З., Гангало А. Н., Давиденко А. А. Влияние условий равноканального углового прессования на скорость деформации заготовок // *ФТВД*. – 2010. – Т. 20, № 4. – С. 135–147.
15. Finite element analysis of the plastic deformation zone and working load in equal channel angular extrusion / S. Li, M. A. M. Bourke, I. J. Beyerlein et al. // *Materials Science and Engineering A*. – 2004. – V. 382. – P. 217–236.
16. Nagasekhar A. V., Tick-Hon Y., Li S., Seow H. P. Stress and strain histories in equal channel angular extrusion/pressing // *Materials Science and Engineering A*. – 2006. – V. 423. – P. 143–147.
17. Nagasekhar A. V., Tick-Hon Y., Li S., Seow H. P. Deformation behavior and strain homogeneity in equal channel angular extrusion/pressing // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2007. – V. 192–193. – P. 449–452.
18. Yang F., Saran A., Okazaki K. Finite element simulation of equal channel angular extrusion // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – V. 166. – P. 71–78.
19. Deformation mechanism finite element analysis and die geometry optimization of magnesium alloys by equal channel angular processing / Z. Zou, S. Xu, R. Gao, X. Xue et al. // *Int. Journal of Simul. Multidisci. Des. Optim.* – 2023. – N 14, 15. – P. 2–7. URL: <https://doi.org/10.1051/smdo/2023013>
20. Xu S., Zhao G., Ren G., Ma X. Numerical simulation and experimental investigation of pure copper deformation behavior for equal channel angular pressing/extrusion processes // *Computation material science*. – 2008. – V. 44. – P. 251–259.
21. Singh N., Agrawal M. K., Verma S. K., Tiwari A. K. Impact design of die parameters on severe plastic deformation during equal channel angular pressing: An overview // *E3S Web of Conferences (ICMPC)*. – 2023. – V. 430, Art. 01255. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343001255>
22. Singh N., Agrawal M. K., Verma S. K., Tiwari A. K. A Review on effect of stress and strain distribution on the AA5083 with respect to different channel angle of ECAP // *International Research Journal on Advanced Science Hub*. – 2022. – V. 04, Is. 3. – pp. 57–66. URL: <https://rspsciencehub.com/index.php/journal/article/view/577/482> (дата обращения 06/05/2025)
23. Kim H. S., Seo M. H., Hong S. I. Plastic deformation analysis of metals during equal channel angular extrusion // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2001. – V. 113. – P. 622–626. URL: <http://dx.doi.org/10.47392/irjash.2022.013>
24. Рааб Г. И. Развитие методов интенсивной пластической деформации для получения длинномерных наноструктурных полуфабрикатов // *Физика и техника высоких давлений*. – 2007. – Т. 17, № 3. – С. 89–97.
25. Segal V. M. Slip line solutions, deformation mode and loading history during equal channel angular extrusion // *Materials Science and Engineering A*. – 2003. – V. 345. – P. 36–46.
26. Nakashima K., Horita Z., Nemoto M., Langdon T. G. Influence of channel angle on the development of ultrafine grains in equal channel angular pressing // *Acta Mater.* – 1998. – V. 46. – P. 1589.
27. Dalla Torre F. H., Pereloma E. V., Davies C. H. J. Strain hardening behavior and deformation kinetics of Cu deformed by equal channel angular extrusion from 1 to 16 passes // *Acta Materialia*. – 2006. – V. 54. – P. 1135–1146.
28. Грудев А. П., Зильберг Ю. В., Тилик В. Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением: Справ. изд. – М.: Металлургия, 1982. – С. 312.
29. Alkorta J., Sevillano J. G. A comparison of FEM and upper-bound type analysis of equal-channel angular pressing (ECAP) // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – V. 141. – P. 313–318.

30. Eivani A. R., Taheri A. K. An upper bound solution of ECAE process with outer curved corner // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – V. 182. – P. 555–563.

31. Altan B. S., Purcek G., Miskioglu I. An upper-bound analysis for equal-channel angular extrusion // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – V. 168, Is. I. – P. 137–146.

УДК 621.762.22:537.622

ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЙ МАГНИТНЫЙ СПЛАВ $\text{Fe}_x\text{Co}_6\text{Al}_3\text{Ni}_2\text{Si}$, ПОЛУЧЕННЫЙ МЕТОДОМ МЕХАНИЧЕСКОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ

А. Э. КИМ, А. К. МАЗЕЕВА, канд. техн. наук, Н. Г. РАЗУМОВ, д-р техн. наук, Е. В. ВОЛОКИТИНА,
А. А. ПОПОВИЧ, д-р техн. наук

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: artem_7.kim@mail.ru

Поступила в редакцию 5.11.2024

После доработки 2.12.2024

Принята к публикации 2.12.2024

Методом механического легирования получен высокоэнтروпийный сплав $\text{Fe}_x\text{Co}_6\text{Al}_3\text{Ni}_2\text{Si}$ ($x = 5; 6; 8$). Исследована микроструктура, фазовый и гранулометрический составы получаемых порошков. Определена необходимая удельная доза энергии для образования однородного твердого раствора ($D = 30 \text{ Вт} \cdot \text{ч/г}$). С использованием метода CALPHAD построена фазовая диаграмма для многокомпонентной системы $\text{Fe}_x\text{Co}_6\text{Al}_3\text{Ni}_2\text{Si}$. Намагниченность насыщения и коэрцитивная сила порошка сплава $\text{Fe}_8\text{Co}_6\text{Al}_3\text{Ni}_2\text{Si}$ после механического легирования составляли 154 эме/г и 53 Э соответственно. Из порошка сплава $\text{Fe}_8\text{Co}_6\text{Al}_3\text{Ni}_2\text{Si}$ в установке искрового плазменного спекания были получены компактные образцы, которые отжигали при температурах 900, 950 и 1000°C. После отжига изучали микроструктуру и фазовый состав образцов. Испытания магнитных свойств образцов показали, что намагниченность насыщения образцов составила от 159 до 168 эме/г, коэрцитивная сила – от 8,9 до 29,2 Э, прочность на сжатие образцов – от 2190 до 2680 МПа, а микротвердость – от 681 до 811 HV.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав, механическое легирование, искровое плазменное спекание, CALPHAD

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-62-74

ЛИТЕРАТУРА

1. Малая Е. В., Решенкин А. С., Гончаров Р. А., Воробьев С. С. Свойства порошковых композиционных магнитомягких материалов электротехнического назначения // Заготовительные производства в машиностроении. – 2015. – № 5. – С. 45–48.

2. Семин А. П., Громов В. Е., Иванов Ю. Ф., Панин С. В., Колубаев Е. А., Литовченко И. Ю., Боровский С. В. Структура и свойства ленты магнитомягкого сплава Fe-Co-Ni-Si-B , изготовленной методом спиннингования // Физическая мезомеханика. – 2024. – Т. 27, № 5. – С. 63–70.

3. Sai Ram B., Paul A.K., Kulkarni S.V. Soft magnetic materials and their applications in transformers // J. Magn. Magn. Mater. – 2021. – V. 537, N 1. – P. 168210. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168210>

4. Чехунова А. М. Влияние термической обработки на магнитные и механические свойства стали 10ХСНД // Евразийский союз ученых. – 2015. – № 12–5 (21). – С. 116–119.

5. Weir G., Leveneur J., Long N. Magnetic susceptibility of soft magnetic composite materials // J. Magn. Magn. Mater. – 2022. – V. 551, N 1. – P. 169103. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169103>

6. Ferraris L., Franchini F., Pošković E., Actis Grande M., Bidulský R. Effect of the Temperature on the Magnetic and Energetic Properties of Soft Magnetic Composite Materials // Energies. – 2021. – V. 14, N 15. – P. 4400. DOI: 10.3390/en14154400

7. Talaat A., Suraj M. V., Byerly K., Wang A., Wang Y., Lee J. K., Ohodnicki P. R. Review on soft magnetic metal and inorganic oxide nanocomposites for power applications // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – V. 870. – P. 159500. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.159500
8. Zeraati M., Feizabad M., Khayati G. An investigation of the magnetic, mechanical, and kinetic characteristics of CuCrFeTiNi high entropy alloy by mechanical alloying and spark plasma sintering // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2023. – V. 958. – P. 170347. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.170347
9. Lin M., Zhao R., Liao Y., Li Y., Zhang X. Determining magnetic properties of high entropy alloys by molar volume difference predicted by machine learning // *AIP Advances*. – 2024. – V. 14, N 4. – P. 045204–045204-6. DOI: 10.1063/5.0165470
10. Tsai M.-H. Physical Properties of High Entropy Alloys // *Entropy*. – 2013. – V. 15, N 12. – P. 5338–5345. DOI: 10.3390/e15125338
11. Kitagawa J., Shintakuin D. Magnetic Properties of High-Entropy Alloy FeCoNiTi // *Materials Science and Engineering A*. – 2024. – V. 9 (35). – P. 37197–37204. DOI: 10.1021/acsomega.4c04556
12. Zhao R.-F., Ren B., Zhang G.-P., Liu Z.-X., Cai B., Zhang J. CoCrxCuFeMnNi high-entropy alloy powders with superior soft magnetic properties // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2019. – V. 491. – P. 165574.
13. Zhu J., Lv M., Liu C., Tan X., Xu H. Effect of neodymium and yttrium addition on microstructure and DC soft magnetic property of dual-phase FeCoNi(CuAl)_{0.8} high-entropy alloy // *J. Rare Earths*. – 2023. – V. 41, N 10. – P. 1562–1567.
14. 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. – P. 168461.
15. Xiaohua Tan X., Chen L., Lv M., Peng W., Xu H. Tailoring Mechanical and Magnetic Properties in Dual-Phase FeCoNi(CuAl)_{0.8} High-Entropy Alloy // *Materials*. – 2023. – V. 16 (22). – P. 7222. DOI: 10.3390/ma16227222
16. Setia Budi S., Sukro Muhab S., Purwanto A., Kurniawan B., Manaf A. Effect of the Electrodeposition Potential on the Magnetic Properties of FeCoNi Films // *Materials Science-Poland*. – 2019. – V. 37 (3). – P. 389–394. DOI: 10.2478/msp-2019-0044
17. Ouyang G., Chen X., Liang Y. F., Macziewski C., Cui J. Review of Fe-6.5 wt% Si high silicon steel—A promising soft magnetic material for sub-kHz application // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2019. – V. 481. – 1 July. – P. 234–250. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.02.089
18. Xiaohua Tan X., Li J., Zhang S., Xu H. Enhanced DC and AC Soft Magnetic Properties of Fe-Co-Ni-Al-Si High-Entropy Alloys via Texture and Iron Segregation // *J. Mater. Sci. Technol.* – 2024. – V. 14 (10). – P. 1113. DOI: 10.3390/met14101113
19. Feuerbacher M., Lienig T., Thomas C. A single-phase bcc high-entropy alloy in the refractory Zr-Nb-Ti-V-Hf system // *Scripta Materialia*. – 2018. – V. 152. – P. 40–43. DOI:10.1016/j.scriptamat.2018.04.009
20. Yang T., Zhao Y. L., Tong Y., Jiao Z. B., Wei J., Cai J. X., Han X. D., Chen D., Hu A., Kai J. J. Multicomponent intermetallic nanoparticles and superb mechanical behaviors of complex alloys // *Science*. – 2018. – V. 362. – P. 933–937. DOI:10.1126/science.aas8815
21. Zhao Y. J., Qiao J. W., Ma S. G., Gao M. C., Yang H. J., Chen M. W., Zhang Y. A hexagonal close-packed high-entropy alloy: the effect of entropy // *Materials & Design*. – 2016. – V. 96. – P. 10–15. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.01.149
22. Liliensten L., Couzinié J. P., Perrière L., Bourgon J., Emery N., Guillot I. New structure in refractory high-entropy alloys // *Materials Letters*. – 2014. – V. 132. – P. 123–125. DOI: 10.1016/j.matlet.2014.06.064
23. Lu L., Chen X., Huang X., Lu K. Revealing the maximum strength in nanotwinned copper // *Science*. – 2009. – V. 323. – P. 607–610. DOI: 10.1126/science.1167641

24. Gao M. C., Zhang B., Guo S. M., Qiao J. W., Hawk J. A. High-entropy alloys in hexagonal close-packed structure // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2016. – V. 47. – P. 3322–3332. DOI: 10.1007/s11661-015-3091-1
25. Chen C., Zhang H., Fan Y., Zhang W., Ran Wei R., Tan Wang T., Tao Zhang T., Li F. A novel ultrafine-grained high entropy alloy with excellent combination of mechanical and soft magnetic properties // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2020. – V. 502. – P. 166513. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.166513
26. Li Z., Tasan C. C., Pradeep K. G., Raabe D. A trip-assisted dual-phase high-entropy alloy: grain size and phase fraction effects on deformation behavior // *Acta Materialia*. – 2017. – V. 131. – P. 323–335. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.03.069
27. Streletsky A. N. Measurements and calculation of main parameters of powder mechanical treatment in different mills // *Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Application of Mechanical Alloying*. – 1993. – P. 51–58
28. Takacs L., McHenry J. S. Temperature of the milling balls in shaker and planetary mills // *Journal of Materials Science*. – 2006. – V. 41. – P. 5246–5249.
29. Kim A., Makhmutov T., Razumov N., Silin A., Popovich A., Zhu J.-N., Popovich V. Synthesis of NiTi alloy powders for powder-based additive manufacturing // *Materials Today: Proceedings 2020 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment*. – 2020. – V. 30. – P. 679–682. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.521

УДК 621.762.22

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ МУЛЬТИКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ $\text{Al}_x\text{NiCoFeCr}$ МЕТОДОМ МЕХАНОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

Е. Д. НЕСТЕРОВА, Т. И. БОБКОВА, канд. техн. наук, Л. В. МУХАМЕДЗЯНОВА,
М. В. ХРОМЕНКОВ, Н. А. СЕРДЮК, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 27.04.2024

После доработки 15.01.2025

Принята к публикации 13.02.2025

Изучен механизм образования композиционных порошков методом механохимического синтеза системы $\text{Al}_x\text{NiCoFeCr}$ при $1,6 \leq x \leq 60$ ат. %, пригодных для формирования покрытий методом микроплазменного напыления. Исследован фазовый состав всех композиций. Проведен анализ гранулометрического состава, однородности распределения элементов в синтезированных конгломератах и измерены показатели микротвердости порошков по Виккерсу. Для эквиатомной системы показатели микротвердости составили 6–9 ГПа с разбросом значений до 16%, морфология частиц округлая, диаметр от 6 до 63 мкм. Установлено, что для микроплазменного напыления целесообразно использовать порошки с содержанием алюминия $20 \leq x \leq 60$ ат. %.

Ключевые слова: высокоэнтروпийные сплавы, многокомпонентные системы, композиционный порошок, морфология, гранулометрический состав, микротвердость

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-75-85

ЛИТЕРАТУРА

1. Аввакумов Е. Г., Гусев А. А. Механические методы активации в переработке природного и техногенного сырья. – Новосибирск: ИХТТМ СО РАН, 2009. – 155 с.
2. Takacs L. The historical development of mechanochemistry // *Chemical Society Reviews* – 2013. – V. 42, Is. 18. – P. 7649–7659.
3. Лапшин О. В., Болдырева Е. В., Болдырев В. В. Роль смешения и диспергирования в механохимическом синтезе (обзор) // *Журнал неорганической химии*. – 2021. – Т. 66, № 3. – С. 402–424.

4. Ловшенко Ф. Г., Ловшенко Г. Ф. Композиционные наноструктурные механически легированные порошки для газотермических покрытий // Могилев: Белорус.-Рос. ун-т. – 2013. – 30 с.
5. Ремпель А. А., Валеева А. А. Материалы и методы нанотехнологий: Учебное пособие. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета. – 2015. – С. 39.
6. Chicardi E., Gallego-Parra S., Salvo C., Sepúlveda R. Efficient single-step mechanosynthesis route of nanostructured $\text{Hf}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{V}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Co}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$ High Entropy Carbonitride Powder // *Ceramics International*. – 2024. – V. 50. – Is. 14. – P. 26059–26064.
7. Martinez-Garcia A., Estrada-Guel I., Reguera E., Amaro-Hernandez R., González S., Garay-Reyes C. G., Martínez-Sánchez R. Design and mechanosynthesis of Low-Weight High-Entropy Alloys with hydrogen storage potential properties // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2024. – V. 50, Part D. – P. 670–684.
8. Rafai H., Smili B., Sakher E., Sakmeche M., Chadli S., Tigrine R., Pesci R., Bououdin M., Bellucci S. Temperature-dependent structural and magnetic properties of mechanically alloyed $\text{Ni}_{80}\text{Co}_{17}\text{Mo}_3$ powder mixture // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2024. – V. 999. – P. 174981.
9. Murty B. S., Yeh J. W., Ranganathan S. High Entropy Alloys. – Butterworth-Heinemann Ltd (Verlag), 2014. – P. 204.
10. Cantor B. Multicomponent and High Entropy Alloys // *Entropy*. – 2014. – V. 16. – P. 4749–4768.
11. Ruiz-Esparza-Rodriguez M. A., Garay-Reyes C. G., Mendoza-Duarte J. M., Estrada-Guel I., Hernandez-Rivera J. L., Cruz-Rivera J. J., Gutierrez-Castaneda E., Gonzalez S., Garay-Tapia A. M., Martinez Sanchez R. Evaluation of High-Frequency Induction Heat Sintering and Conventional Sintering in Alx-CoCrFeMnNi High-Entropy Alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – V. 910. – P. 164780.
12. Cantor B. Multicomponent high-entropy Cantor alloys // *Progress in Materials Science*. – 2021. – Vol. 120. – P. 100754.
13. Munitz A., Salhov S., Hayun S., Frage N. Heat treatment impacts the microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2016. – V. 683. – P. 221–230.
14. Savinov R., Su Yu., Wang J., Wang Ya., Shi J. Study of microstructure and properties of in-situ alloyed AlCoCrFeNi(Y) high-entropy alloy by laser directed energy deposition method // *Manufacturing Letters*. – 2022. – V. 33. – P. 678–685.
15. Горбань В.Ф., Крапивка Н.А., Фирсов С.А. Высокоэнтропийные сплавы – электронная концепция – фазовый состав – параметр решетки – свойства // *ФММ*. – 2017. – Т. 118, № 10. – С. 1017–1029.
16. Debski A., Debski R., Gasior W. New features of Entall database: comparison of experimental and model formation enthalpies // *Archives of Metallurgy and Materials*. – 2014. – V. 59. – N 4. – P. 1337–1343.
17. Шолкин С. Е. Микроплазменное напыление функциональных наноструктурированных покрытий на основе Al_2O_3 // *Новые материалы и технологии производства*. – 2010. – № 6 (60). – С. 39.
18. Коробов Ю. С., Панов В. И., Разиков Н. М. Анализ свойств газотермических покрытий: Учебн. пособие. Ч. 1: Основные методы и материалы газотермического напыления. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 80 с.

УДК 669.295:621.762.4

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СВОЙСТВ ТИТАНОВОГО ПСЕВДО- α -СПЛАВА

В. П. ЛЕОНОВ¹, д-р техн. наук, Е. В. ЧУДАКОВ¹, канд. техн. наук,
Ю. Ю. МАЛИНКИНА¹, канд. техн. наук, И. М. ГАРАНИНА¹, С. Д. ДРУГАЧУК¹,
Ю. М. МАРКОВА¹, Д. А. КАРЯГИН², М. О. СМИРНОВ², канд. техн. наук

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49. E-mail: mail@crism.ru

²АО «Ступинская металлургическая компания», 142800, Московская обл., г. Ступино, ул. Пристанционная, вл. 2. E-mail: info@cmk-group.ru

Поступила в редакцию 16.12.2024

После доработки 6.03.2025

Принята к публикации 14.03.2025

Приведены результаты исследования механических и эксплуатационных свойств металла опытной модели из титанового псевдо- α -сплава ПТ-3В, полученной с помощью горячего изостатического прессования (ГИП-технологии). Механические свойства, а также характеристики работоспособности опытной модели полностью соответствуют требованиям нормативной документации, предъявляемым к деформированным полуфабрикатам аналогичных сечений. Проведенные микроструктурные исследования в различных участках сечения демонстрируют, в отличие от свойств деформированного полуфабриката, изотропность компактированной детали.

Ключевые слова: титановый псевдо- α -сплав, компактированный материал, горячее изостатическое прессование, механические и эксплуатационные свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-86-98

ЛИТЕРАТУРА

1. Металлургия гранул. Выпуск первый / Под ред. акад. А. Ф. Белова. – М.: ВИЛС, 1983. – 455 с.
2. Samarov V., Seliverstov D., Raison G., Goloveshkin V. Physical Principles of Shape and Densification Control during HIP // Proceedings of the 2011 International Conference on Hot Isostatic Pressing, Kobe, Japan, 2011.
3. Александров А. В., Кузнецов С. Ю., Демченков Г. Г., Афонин Е. А. Перспективы дальнейшего развития и совершенствования гранульной металлургии // Титан. – 2015. – № 3 – С. 39–41
4. Борзцовская К. М., Кузин В. Ф., Рябова Р. М. Исследование свойств компактов из гранул высокопрочных титановых сплавов BT22 и BT23 // Труды ВИАМ – С. 434–438.
5. Samarov V., Haykin R., Nepomnyatschy V., Koshelev V., Khomyakov E., Out-gassing of powders before HIP: problems and solutions // Proceedings of the International Conference HIP 2002, VILS, Moscow, May 20–22, 2002
6. Гарибов Г. С., Гриц Н. М., Добаткин В. И. Металлургия гранул жаропрочных никелевых сплавов // Технология легких сплавов. – 2015. – № 2. – С. 34–39.
7. Zhang G. Q. Research and Development of High Temperature Structural Materials for Aero-Engine Application // Acta Metallurgica sinica. – 2005. – V. 18, N 4. – P. 443–452.
8. Леонов В. П., Малинкина Ю. Ю., Чудаков Е. В., Другачук С. Д., Хачатурян И. М. Сравнительный анализ технологических свойств и микроструктуры титановых порошков различных классов // Вопросы материаловедения. – 2024. – № 1 (117). – С. 1–13.
9. Орыщенко А. С., Леонов В. П., Малинкина Ю. Ю., Хачатурян И. М., Иксанов М. В., Петров С. Н., Карягин Д. А. Структура и свойства псевдо- α -титанового сплава, полученного методом горячего изостатического прессования // Титан. – 2023. – № 1 (77). – С. 29–37.
10. ГОСТ 1497–2023. Металлы. Методы испытаний на растяжение.
11. ГОСТ 9454–78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.
12. ГОСТ 25.502–79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.
13. ГОСТ 10145–81. Метод испытания на длительную прочность.
14. ГОСТ 25.506–85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении
15. ГОСТ 3248–81. Металлы. Метод испытания на ползучесть

16. ГОСТ 9450–76 (СТ СЭВ 1195–78). Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.
17. ТУ 1-5-357–95. Листы и плиты из титановых сплавов марок ПТ-3В и 40. Технические условия.
18. Орыщенко А. С., Полькин И. С., Леонов В. П., Михайлов В. И. Особенности применения титановой сварочной проволоки при изготовлении конструкций морской техники // Технология легких сплавов. – 2021. – № 2. – С. 59–62.

УДК 678.073:621.763

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАПОЛНЕННОЙ ОКСИДОМ АЛЮМИНИЯ НИТИ ДЛЯ FDM-ПЕЧАТИ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТГЛИКОЛЯ

С. А. СИДОРОВА¹, А. Н. ХРУСТАЛЕВ¹, А. В. ЛОСЕВ², Н. А. РАШУТИН¹

¹МИРЭА – Российский технологический университет, 119454, Москва, пр. Вернадского, 78

²НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17, E-mail: admin@viam.ru

Поступила в редакцию 29.01.2025

После доработки 5.03.2025

Принята к публикации 25.03.2025

Печать методом послойного наплавления (FDM) – одна из наиболее распространенных технологий аддитивного производства, базирующихся на экструзии термопластичной нити. Создание композиционных материалов для FDM-печати путем введения в термопластичную матрицу дисперсных наполнителей позволяет получить детали с требуемым набором характеристик. В настоящей работе предпринята попытка улучшения износостойкости образцов из полимерных композиционных материалов на основе полиэтилентерефталатгликоля (PETG) за счет его модификации микропорошком оксида алюминия. Установлено оптимальное содержание модифицирующего компонента, позволяющее реализовать технологический процесс 3D-печати и обеспечить уменьшение износа композиционного материала.

Ключевые слова: технология 3D-печати FDM, термопласты, полимерные материалы для 3D-печати, износостойкость, композиционные материалы

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-99-109

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондрашов С. В., Пыхтин А. А., Ларионов С. А. Функциональные материалы, полученные способом FDM-печати (обзор) // Труды ВИАМ. – 2021. – № 3 (97). – С. 44–57. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 30.01.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-44-57
2. Соколова Л. В., Лосев А. В., Политова Е. Д. Гибкость проходных цепей и наноорганизация полимеров // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2020. – Т. 62, № 2. – С. 1–14.
3. Kuz'micheva G. M., Levko A. A., Manomenova V. L. et al., Growth, structural effects, and non-linear and spectroscopic properties of nanocomposites based on α -NiSO₄·6H₂O single crystals with TiO₂ nanoparticles or sols // Journal of Alloys and Compounds. – 2023. – V. 965. – P. 171369. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.171369
4. Янсен Х., Дудчиг С., Анезирис К. Г. MgO-С-бетон с новыми свойствами // Огнеупоры и техническая керамика. – 2009. – № 1–2. – С. 47–50. – EDN NBIGMJ.
5. Соколова Л. В., Лосев А. В., Политова Е. Д. Влияние диоксида титана на структуру наноорганизации двойных сополимеров // Труды ВИАМ. – 2024. – № 4 (134). – С. 64–82. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 30.01.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-64-82. – EDN SQSPQW.
6. Соколова Л. В., Хрусталева А. Н., Волков В. В., Переверзева С. Ю. Наноорганизация полизопренов и их деформируемость // Бутлеровские сообщения. – 2023. – Т. 73, № 1. – С. 50–61. DOI 10.37952/ROI-jbc-01/23-73-1-50. – EDN YEYMUJ.

7. Каблов Е. Н., Кондрашов С. В., Мельников А. А. и др. Исследование влияния теплового режима FDM-печати на структурирование и коробление образцов полиэтилена // Труды ВИАМ. – 2021. – № 7 (101). – С. 48–58. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 30.01.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-48-58
8. Cuenca Pérez D. E., Zumba Novay E. G., Castillo Mazon H. P., Quincuela Llamuca J. P. Elasticity and plasticity of PLA, PETG, ABS polymers for printing automotive parts // *Espirales Revista Multidisciplinaria de investigación*. – 2024. – V. 8, N 4. – P. 51–61.
9. Szykiedans K., Credo W., Osiński D. Selected mechanical properties of PETG 3-D prints // *Procedia Engineering*. – 2017. – V. 177. – P. 455–461.
10. Valvez S., Silva A. P., Reis P. N. B. Optimization of printing parameters to maximize the mechanical properties of 3D-printed PETG-based parts // *Polymers*. – 2022. – V. 14, N 13. – P. 2564.
11. Kumar M. A., Khan M. S., Mishra S. B. Effect of machine parameters on strength and hardness of FDM printed carbon fiber reinforced PETG thermoplastics // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – V. 27. – P. 975–983.
12. Шумейко И. А., Зайченко Н. О. Анализ пластмасс при их выборе для 3d печати модели ветроэнергетической установки // *Universum: технические науки*. – 2021. – N 3 (84). – С. 74–77.
13. Chen T., Zhang W., Zhang J. Alkali resistance of poly (ethylene terephthalate) (PET) and poly (ethylene glycol-co-1, 4-cyclohexanedimethanol terephthalate)(PETG) copolyesters: The role of composition // *Polymer Degradation and Stability*. – 2015. – V. 120. – P. 232–243.
14. Camargo J. R., Crapnell R. D., Bernalte E. et al. Conductive recycled PETg additive manufacturing filament for sterilisable electroanalytical healthcare sensors // *Applied Materials Today*. – 2024. – V. 39. – P. 102285. DOI: 10.1016/j.apmt.2024.102285
15. Хрусталеv А. Н., Смирнов А. В., Арбанас Л. А. и др. Диэлектрические свойства полимерных композиционных материалов с керамическими наполнителями для СВЧ-приборов и оборудования // *Авиационные материалы и технологии*. – 2024. – № 4 (77). – С. 95–116. DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-95-116
16. Применение PolyMax™ PETG ESD в производстве гибких плоских кабелей [электронный ресурс]. – 2024. URL: <https://lider-3d.ru/blog/stati/primenenie-polymax-petg-esd-v-proizvodstve-gibkikh-ploskikh-kabeley/> (дата обращения: 31.07.2024)
17. Yan C., Kleiner C., Tabigue A. et al. PETG: applications in modern medicine // *Engineered Regeneration*. – 2023. – V. 5 (1). – P. 45–55. DOI: 10.1016/j.engreg.2023.11.001
18. Batista M., Lagomazzini J. M., Ramirez-Peña M., Vazquez-Martinez J. M. Mechanical and Tribological Performance of Carbon Fiber-Reinforced PETG for FFF Applications // *Appl. Sci*. – 2023. – V. 13. – P. 12701. DOI: 10.3390/app132312701
19. Vijayasankar K N, Bonthu D., Doddamani M., Pati F. Additive Manufacturing of Short Silk Fiber Reinforced PETG Composites // *Materials Today Communications*. – 2022. – V. 33. – P. 104772. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.104772
20. Rijckaert S., Daelemans L., Cardon L. et al. Continuous Fiber-Reinforced Aramid/PETG 3D-Printed Composites with High Fiber Loading through Fused Filament Fabrication // *Polymers*. – 2022. – V. 14, N 2. – 16 p. DOI 10.3390/polym14020298. – EDN YTDYJC.
21. Kumar J., Negi S., Mishra V. 3D printed PETG/cenosphere syntactic foam composites for lightweight structural applications // *Materials Letters*. – 2024. – V. 355. – P. 135493. DOI: 10.1016/j.matlet.2023.135493
22. Silva P. A. P., Oréface R. L., Da Silva A. B., Santos J. P. F. Self-healing polymer blend based on PETG and EMAA // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2021. – V. 138, N 14. – P. 50148. DOI: 10.1002/app.50148. – EDN LZQWVB.
23. Холодкова А. А., Корнюшин М. В., Смирнов А. В. и др. Холодное спекание α - и γ -модификаций оксидгидроксида алюминия: низкотемпературный способ получения пористой корундовой керамики // *Тонкие химические технологии*. – 2024. – № 19 (4). – С. 337–349. DOI: 10.32362/2410-6593-2024-19-4-337-349

24. Симонов-Емельянов И. Д., Харламова К. И. Теоретические основы, модели и расчеты составов дисперсно-наполненных полимеров с разными типами структур и свойствами // Российский химический журнал. – 2024. – Т. 68, № 1. – С. 58–68. DOI: 10.6060/rcj.2024681.11. – EDN WATGYI.

25. Заякин О. В., Жучков В. И., Акбердин А. А. Физико-химические характеристики оксидных расплавов системы $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO-Cr}_2\text{O}_3\text{-FeO}$ // Бутлеровские сообщения. – 2016. – Т. 48, № 10. – С. 128–133. – EDN XIQTZD.

26. Козлов Г. В., Долбин И. В. Перколяционные модели для описания степени усиления модуля упругости высоконаполненных нанокомпозитов полиуретан/графен // Прикладная физика. – 2017. – № 3. – С. 96–100. – EDN YTYNYZ.

27. Бобрышев А. Н., Зубарев П. А., Кувшинов П. И., Лахно А. В. Анализ распределения наполнителя в структуре композитов // Интернет-вестник ВолгГАСУ. – 2012. – № 1 (20). – С. 28. – EDN RPWPIV.

28. Основы технологии переработки пластмасс. Учебник для вузов / С. В. Власов и др. – М.: Мир, 2006. – 600 с.

29. Rijckaert S., Daelemans L., Cardon L. et al. Continuous Fiber-Reinforced Aramid/PETG 3D-Printed Composites with High Fiber Loading through Fused Filament Fabrication // Polymers. – 2022. – V. 14, N 2. DOI: 10.3390/polym14020298. – EDN YTDY CJ.

УДК 678.067:621.365.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПОЛНИТЕЛЯ НА КИНЕТИКУ НАГРЕВА ОТВЕРЖДЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

И. В. ЗЛОБИНА¹, канд. техн. наук, Н. В. БЕКРЕНЕВ¹, Д. В. КОНДРАТОВ^{1,2,3},
А. В. АНИСИМОВ⁴, д-р техн. наук

¹Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина,
410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77. E-mail: zlobinaiv@sstu.ru

²Институт проблем точной механики и управления РАН, 410028, г. Саратов, ул. Рабочая, 24

³ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н. Г. Чернышевского, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83

⁴НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,
ул. Шпалерная, 49. E-mail: mail@crism.ru

Поступила в редакцию 9.12.2024

После доработки 10.03.2025

Принята к публикации 10.03.2025

Выполнены экспериментальные исследования процесса нагрева отвержденных угле-, стекло- и органопластиков и их компонентов, помещенных в сверхвысокочастотное (СВЧ) электромагнитное поле. Показано, что основное влияние на кинетику процесса оказывают тепло- и электрофизические свойства наполнителя, а также поглощенная мощность излучения. Влияние времени воздействия менее выражено и достаточно точно описывается степенными функциями. Для эпоксидного связующего эта зависимость близка к линейной. Установлено, что степень нагрева углепластика на первой минуте СВЧ-воздействия превышает данный показатель для стекло- и органопластика на 35–38%, несмотря на почти в 4 раза меньший уровень поглощения мощности излучения. Требуется дополнительное изучение и обоснования факта более интенсивного СВЧ-нагрева арамидной ткани и органопластика, чем стеклопластика, о чем свидетельствует практически в 2 раза большая зависимость температуры нагрева от поглощенной мощности излучения.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, наполнители, угле-, стекло- органо-пластики, диэлектрические свойства, СВЧ электромагнитное поле, поглощенная мощность, нагрев, температура

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-110-118

ЛИТЕРАТУРА

1. Дориомедов М. С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. – 2020. – № 6–7. – С. 29–37.
2. Михайлин Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 822 с.
3. Каблов Е. Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. – 2012. – Т. 82, № 6. – С. 520–530.
4. Buendia L., Torres I., Ornelas A., Castellanos A. Influence of Thermal Gradients and Arctic Temperatures on the Mechanical Properties and Fracture Behavior of Woven Carbon and Woven Kevlar® Composites // ASME Open Journal of Engineering. – 2024. – V. 3. DOI: 10.1115/1.4065928
5. Vessey A., Hodges K. I., Shaffrey L. C., Day J. J. The composite development and structure of intense synoptic-scale Arctic cyclones // Weather and Climate Dynamics. – 2022. – N 3 (3). – P. 1097–1112. DOI: 10.5194/wcd-3-1097-2022
6. Дементьев И. И., Устинов А. Н. Метод снижения остаточных напряжений в композитных элементах конструкций космических аппаратов // Альманах современной науки и образования. – 2017. – № 6 (119). – С. 27–31.
7. Спиридонова М. П., Пучков А.Ф., Новопольцева О. М. Химическая модификация полимерных материалов: учебное пособие. – ВПИ (филиал) ФГБОУ ВО ВолгГТУ, 2022. URL: <http://lib.volpi.ru:57772/csp/lib/PDF/723226934.pdf> (Дата обращения 17.06.2025)
8. Рахманкулов А. А. Исследование физико-механических свойств полимерных композитов, полученных на основе бинарных наполнителей // Universum. Технические науки: электрон. научн. журн. – 2023. – № 11 (116). DOI: 10.32743/UniTech.2023.116.11.16238. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16238> (дата обращения 17.06.2025)
9. Студенцов В. Н. Физическая модификация армированных реактопластов // Вестник СГТУ. – 2011. – № 4, вып. 3. – С. 209–217.
10. Злобина И. В., Бекренев Н. В., Егоров А. С., Кузнецов Д. И. Влияние сверхвысокочастотного электромагнитного поля на межслоевую прочность в отвержденных полимерных композиционных материалах // Журнал технической физики. – 2023. – Т. 93, вып. 2. – С. 237–340.
11. Kwak M. Microwave Curing of Carbon-Epoxy Composites: Process Development and Material Evaluation // A thesis submitted to Imperial College London for the degree of Doctor of Philosophy. Imperial College London Department of Aeronautics. – 2016. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/77016173.pdf> (дата обращения 17.06.2025)
12. Злобина И. В., Бекренев Н. В. О механизме повышения механических характеристик отвержденных полимерных композиционных материалов под действием СВЧ электромагнитного поля // Изв. Саратовского ун-та. Новая серия. Серия: Физика. – 2022. – Т. 22, № 2. – С. 158–169.
13. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот / Пер. с англ. Э. Я. Пастрона. – М.: Энергия, 1968. – 311 с.
14. Microwave processing of materials. – Washington: National Academy Press, 1994. – 150 p. URL: <https://nap.nationalacademies.org/read/2266/chapter/1> (Дата обращения 17.06.2025)
15. Архангельский Ю. С. Справочная книга по СВЧ-электротермии. – Саратов, 2011. – 560 с.
16. Effect of lay-up configuration on the microwave absorption properties of carbon fiber reinforced polymer composite materials / Zhou J. et al. // Materials Today Communications. – 2021. – V. 26. – P. 1–10.
17. Mikinka E., Siwak M. Recent advances in electromagnetic interference shielding properties of carbon-fibre-reinforced polymer composites. A topical review // J. Mater. Sci.: Mater. Electron. – 2021. – V. 32. – P. 24585–24643.

18. Chao H-W., Hsu H-C., Chen Y-R., Chang T-H. Characterizing the dielectric properties of carbon fiber at different processing stages // Sci. Rep. – 2021. – V. 11, Is. 1. DOI: 10.1038/s41598-021-96949-6

19. Путилина П. М., Куцевич К. Е., Исаев А. Ю. Полимерные композиционные материалы на основе углеродных и стеклянных волокон для изготовления беспилотных летательных аппаратов и перспективы их развития // Труды ВИАМ. – 2023. – № 8 (126) . – С. 85–99.

УДК 678.067.5

СТЕКЛОПЛАСТИКИ НА ОСНОВЕ НАПОЛНИТЕЛЕЙ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ В СРЕДЕ ПИРИДИНА ПРИ НОРМАЛЬНОМ ДАВЛЕНИИ

А. Е. ПРОЦЕНКО, канд. техн. наук, И. А. ЛЮХО, А. С. ХОЛОДОВ, В. В. ПЕТРОВ, д-р техн. наук

*ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», 681013,
г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: protsenko.ae@yandex.ru*

Поступила в редакцию 5.03.2025

После доработки 25.03.2025

Принята к публикации 25.03.2025

Представлены результаты исследования процессов рециклинга полимерных композиционных материалов на основе реактопластичных матриц методом сольволиза. Для получения матричного материала использовали эпоксидную и эпоксивинилэфирную смолы холодного отверждения. С целью оптимизации выбора среды сольволиза был рассчитан параметр растворимости сегмента матрицы по методу А. А. Аскадского. Подтверждено, что применение параметра растворимости позволяет эффективно подбирать растворители для деструкции полимерных матриц. На основе экспериментальных исследований установлено, что лучшим растворителем среди рассматриваемых является пиридин. Показано, что его применение позволяет сократить время сольволиза до 1 ч при температуре кипения 115°C. Остаточное содержание полимерной матрицы на восстановленных волокнах составило 20%. Прочность восстановленных стеклянных волокон составила до 91% от исходной. Однако прочность на изгиб композитов на основе восстановленных тканей снизилась на 29,7%. Несмотря на это, восстановленные волокна могут быть использованы для производства неответственных малонагруженных изделий. Исследование подтверждает перспективность использования азотсодержащих растворителей для рециклинга полимерных композитов.

Ключевые слова: полимерные композиты, эпоксины, винилэфиры, рециклинг, сольволиз, прочность, термоанализ

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-119-129

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. Дориомедов М. С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. – 2020. – № 6–7 (89). – С. 29–37. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37

3. Дориомедов М. С., Дасковский М. И., Скрипачев С. Ю., Шеин Е. А. Полимерные композиционные материалы в железнодорожном транспорте России (обзор) // Труды ВИАМ. – 2016. – № 7 (43). – С. 12. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-12-12

4. Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Yıldız M., Arslan N., Ataş A. Mechanical performance of marine sandwich composites subjected to flatwise compression and flexural loading: Effect of resin pins // Journal of Sandwich Structures and Materials. – 2018. – N 22 (6). – P. 2030–2048. DOI: 10.1177/1099636218792671

5. Majewski P., Florin N., Jit J., Stewart R. A. End-of-life policy considerations for wind turbine blades // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – N 164 (164). – P. 112538. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112538

6. Chatziparaskeva G., Papamichael I., Voukkali I., Loizia P., Sourkouni G., Argiris C., Zorpas A. A. End-of-Life of Composite Materials in the Framework of the Circular Economy // *Microplastics*. – 2022. – N 1 (3). – P. 377–392. DOI: 10.3390/microplastics1030028
7. Pietroluongo M., Padovano E., Frache A. Badini C. Mechanical recycling of an end-of-life automotive composite component // *Sustainable Materials and Technologies*. – 2020. – N 23. – P. e00143. DOI: 10.1016/j.susmat.2019.e00143
8. Abdallah R., Juaidi A., Savaş M., Çamur H., Albatayneh A. M., Abdala S., Manzano-Agugliaro F. A Critical Review on Recycling Composite Waste Using Pyrolysis for Sustainable Development // *Energies*. – 2021. – N 14 (18). – P. 5748. DOI: 10.3390/en14185748
9. Хрульков А. В., Гусев Ю. А., Мишкин С. И., Дориомедов М. С. Эффективность утилизации композиционных материалов // *Новости материаловедения. Наука и техника*. – 2016. – № 6 (24). – С. 9
10. Kooduvalli K., Unser J., Ozcan S., Vaidya U. Embodied Energy in Pyrolysis and Solvolysis Approaches to Recycling for Carbon Fiber-Epoxy Reinforced Composite Waste Streams // *Recycling*. – 2022. – N 7 (1). – P. 6. DOI: 10.3390/recycling7010006
11. Jiang T. W., Reddy K. S. K., Chen Y. C., Wang M. W., Chang H. C., Abu-Omar M. M., Lin C. H. Recycling Waste Polycarbonate to Bisphenol A-Based Oligoesters as Epoxy-Curing Agents, and Degrading Epoxy Thermosets and Carbon Fiber Composites into Useful Chemicals // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. – 2022. – N 10 (7). – P. 2429–2440. DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c07247
12. Проценко А. Е., Петров В. В. Упрочнение стеклянных волокон, полученных при рециклинге полимерного композиционного материала // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2022. – Т. 18, № 8 (212). – С. 347–351. DOI: 10.36652/1813-1336-2022-18-8-347-351
13. Protsenko A. E., Protsenko A. N., Shakirova O. G., Petrov V. V. Recycling of Epoxy/Fiberglass Composite Using Supercritical Ethanol with (2,3,5-Triphenyltetrazolium)₂[CuCl₄] Complex // *Polymers*. – 2023. – N 15 (6). – P. 1559. DOI: 10.3390/polym15061559
14. Аскадский А. А., Матвеев Ю. И. Химическое строение и физические свойства полимеров. – М.: Химия. – 1983. – 248 с.
15. Protsenko A. E., Petrov V. V. Recycling of Fiberglass Fillers Obtained from Polymer Composites Based on an Epoxy Vinyl Ester Binder // *Mechanics of Composite Materials*. – 2022. – N 58 (9). – P. 1–8. DOI: 10.1007/s11029-022-10048-9
16. Beygisangchin M., Abdul Rashid S., Shafie S., Sadrolhosseini A. R., Lim H. Preparations, Properties, and Applications of Polyaniline and Polyaniline Thin Films – A Review // *Polymers*. – 2021. – N 13 (12). – P. 2003. DOI: 10.3390/polym13122003
17. Xu S., Dong X., Zhao Y., Han J., Ji Y., Kuang R., Zhang S., Ma S. Preparation of Environmentally Friendly Anticorrosive Coatings with Aniline Trimer-Modified Waterborne Polyurethane // *Coatings*. – 2024. – N 14 (11). – P. 1380. DOI: 10.3390/coatings14111380
18. 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.
19. Zhu P., Yang Y. Z., Chen Y., Quian G. R., Liu Q. Influence factors of determining optimal organic solvents for swelling cured brominated epoxy resins to delaminate waste printed circuit boards // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. – 2018. – N 20 (1–3). – P. 245–253. DOI: 10.1007/s10163-016-0574-0

ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА АГРЕГАТНО- И ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННУЮ СТРУКТУРУ КОМПОЗИТНОЙ ЗТА-КЕРАМИКИ

А. В. МАЛЕЦКИЙ^{1,2}, Р. Ш. ИСАЕВ^{1,2}, Д. Р. БЕЛИЧКО¹, канд. физ.-мат. наук, Г. К. ВОЛКОВА¹

¹Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина, 283048, Донецк, ул. Розы Люксембург, 72. E-mail: sashamalecki097@gmail.com

² Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио Кюри, 6

Поступила в редакцию 31.01.2025

После доработки 13.02.2025

Принята к публикации 17.02.2025

Исследовано влияние облучения нейтронами на агрегатно- и дисперсно-упрочненную структуру композитной керамики состава $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 + n\%\text{YSZ}$ ($\text{ZrO}_2 + 3 \text{ мол.}\% \text{Y}_2\text{O}_3$) ($n = 0; 1; 5; 10$ и $15 \text{ мас.}\%$), полученную в результате обработки компактов высоким гидростатическим давлением 300 и 700 МПа. Рентгеноструктурный анализ показал, что нейтронное облучение двухфазной керамики не вызвало фазовых изменений в керамическом композите. В ходе работы установлено, что эффект дробления зерен в материале наблюдается только в отношении частиц YSZ и не наблюдается в отношении зерен $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, что может быть связано с особенностями строения кристаллических решеток $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и $t\text{-ZrO}_2$. Результаты исследований позволяют говорить о перспективах использования изучаемых керамик в условиях радиационного воздействия.

Ключевые слова: композитная керамика, структура, оксид алюминия, диоксид циркония, нейтроны, облучение, радиационная стойкость

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-130-152

ЛИТЕРАТУРА

1. Коренков В. В., Столяров Р. А., Васюков В. М., Шуклинов А. В., Ходан А. Н. Физико-механические свойства керамического композита НОА/МУНТ // Вестник российских университетов. Математика. – 2011. – № 3.
2. Скрипняк Е. Г., Скрипняк В. А., Кульков С. С., Коробенков М. В., Скрипняк В. В. Моделирование механического поведения керамических композитов с трансформационно-упрочненной матрицей при динамических воздействиях // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2010. – № 2.
3. Абызов А. М. Исследования в области создания высококачественной алюмооксидной керамики. Ч. 1: Спекание с добавками, реакционное спекание, получение армированных композитов // Стекло и керамика. – 2018. – № 8. – С. 8–19.
4. Жолудев Д. С. Керамические материалы в ортопедической стоматологии. Керамика на основе оксида алюминия // Проблемы стоматологии. – 2012. – № 5.
5. Жолудев С. Е., Ивлев Ю. Н. Клинический пример использования гибридных материалов в практике ортопедической стоматологии // Проблемы стоматологии. – 2018. – № 1.
6. Mikhailov M. M., Yurshv S. A., Lapin A. N., Goronchko V. A., Mikhailova O. A. Optical properties of aluminum oxide powder modified by nanoparticles and prospects for its use in solar power and space industry // Acta Astronautica. – 2023. – V. 212. – P. 483–491. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.08.030>
7. Tamilarasi T., Pratheep V. G., Rajasekar R., Ravichandran K., Shanmugam A., Sriraam H., Jagan N. Study and performance analysis of graphite and aluminium oxide coating on heat spreader application // Materials Today: Proceedings. – 2022. – V. 66, P. 3. – P. 1066–1073. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.842>
8. Maletsky A. V., Belichko D. R., Konstantinova T. E., Volkova G. K., Doroshkevich A. S., Lyubchik A. I. et al. Structure formation and properties of corundum ceramics based on metastable aluminum oxide doped with stabilized zirconium dioxide // Ceramics International. – 2021. – V. 47, N 14. – P. 19489–19495. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.03.286>

9. Maletsky A. V., Konstantinova T. E., Volkova G. K., Belichko D. R., Doroshkevich A. S., Popov E. et al. High hydrostatic pressure influence on the properties and tendency to agglomeration of ZrO_2 grains of the Al_2O_3 – YSZ composite ceramics system // *Ceramics International*. – 2023. – V. 49, N 10. – P. 16044–16052. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.01.202>
10. Dmitriev K. I., Bobkova T. V., Sorokina T. P., Koveza V. A., Yurtaeva A. S., Doronin V. P., Potapenko O. V. Adjustment of textural and acidic properties of aluminum oxide by modifying the product of thermo-chemical activation of gibbsite with acids in hydrothermal conditions // *Microporous and Mesoporous Materials*. – 2024. – V. 369. – P. 113025. URL: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2024.113025>
11. Danilenko I., Lakusta M., Loladze L., Volkova G., Popov I., Glazunova V., Konstantinova T. Effect of alumina added by mechanical mixing and co-doping on the densification mechanisms of zirconia nanoparticles at the initial stage of sintering // *Results in Physics*. – 2020. – V. 19. – P. 103495. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103495>
12. Ahkozov L., Lakusta M., Danilenko I., Volkova G., Konstantinova T. Influence of cold isostatic pressure on formation of secondary nanoscale zirconia inclusions in alumina grains in ceramic composites 3Y-TZP with small amount of Al_2O_3 // 2018 IEEE 8th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP). – 2018. – P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/NAP.2018.8915299>
13. Chai J., Zhu Y., Niu L., Shen T., Cui M., Wang Z. Fabrication and characterization of SiC-ZTA ceramic composites by hot pressing // *Ceramics International*. – 2023. – V. 49, N 20. – P. 32799–32807. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.07.249>
14. Сафонова М. Н., Федотов А. А. Разработка инструментального материала на основе металлической матрицы, упрочненной порошками природного алмаза // *Евразийский союз ученых*. – 2015. – № 6–3 (15). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-instrumentalnogo-materiala-na-osnove-metallicheskoj-matritsy-uprochnennoy-poroshkami-prirodnogo-almazha>
15. García Ferré F., Mairov A., Ceseracciu L., et al. Radiation endurance in Al_2O_3 // *Scientific Reports*. – 2016. – V. 6. – P. 33478. URL: <https://doi.org/10.1038/srep33478>
16. Lawrence F., Mallika C., Mudali U. K., Natarajan R., Ponraju D., Seshadri S. K., Kumar T. S. S. Radiation degradation in the mechanical properties of polyetheretherketone–alumina composites // *Journal of Nuclear Materials*. – 2012. – V. 420, N 1–3. – P. 338–341. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2011.10.024>
17. Ayshev B., Kozlovskiy A. L., Zhumadilov K. S., Trukhanov A. V. Study of radiation embitterment and degradation processes of Li_2ZrO_3 ceramic under irradiation with swift heavy ions // *Ceramics*. – 2022. – V. 5, N 1. – P. 13–23. URL: <https://doi.org/10.3390/ceramics5010002>
18. Abd El-Hameed A. M. Radiation effects on composite materials used in space systems: a review // *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. – 2022. – V. 11, N 1. – P. 313–324. URL: <https://doi.org/10.1080/20909977.2022.2079902>
19. Giniyatova S. G., Kozlovskiy A. L., Rspayev R. M., Borgekov D. B., Zdorovets M. V. Study of the kinetics of radiation damage in CeO_2 ceramics upon irradiation with heavy ions // *Materials*. – 2023. – V. 16, N 13. – P. 4653. URL: <https://doi.org/10.3390/ma16134653>
20. Danilenko I., Prokhorenko S., Konstantinova T., Ahkozov L., Burkhovetski V., Glazunova V. Effect of small amount of alumina on structure, wear and mechanical properties of 3Y-TZP ceramics // *World Journal of Engineering*. – 2014. – V. 11, N 1. – P. 9–16.
21. Стрекаловский В. Н., Полежаев Ю. М., Пальгуйев С. Ф. Оксиды с примесным беспорядком: состав, структура, фазовые превращения. – М.: Наука, 1987.
22. Константинова Т. Е., Даниленко И. А., Токий В. В., Глазунова В. А. Получение нанопорошка циркония: от инновации к инновации // *Наука и инновации*. – 2005. – Т. 1, № 3. – С. 76–87.
23. Ledo Pereda L. M., Semenov V. N., Rikhvitsky V. S. et al. Ion beam scanning system for EG-5 accelerator // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. – 2024. – V. 21. – P. 938–945. URL: <https://doi.org/10.1134/S1547477124701061>
24. Беличко Д. Р., Волкова Г. К., Малецкий А. В., Исаев Р. Ш. Влияние протонного облучения на структуру и свойства композитной керамики состава YSZ– SiO_2 – Al_2O_3 // *Вопросы материаловедения*. – 2024. – № 3 (119). – С. 46–56. URL: <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2024-119-3-46-56>
25. Андерсон Дж. Структура металлических катализаторов. – М.: Мир, 1973.

26. Guinier A. X-Ray Diffraction in Crystals, Imperfect Crystals, and Amorphous Bodies. – Courier Corporation, 1994.
27. Maletsky A. V., Volkova G. K., Belichko D. R., Glazunova V. A., Doroshkevich A. S., Tatarinova A. A. et al. Influence of stabilized zirconium dioxide and high hydrostatic pressure on the kinetics of sintering nanopowders of metastable aluminum oxide // *Ceramics International*. – 2024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.09.002>
28. Lakusta M., Danilenko I., Volkova G., Loladze L., Golovan G., Brukhanova I. et al. Effect of mechanical activation on sintering behaviour of tetragonal zirconia nanopowders // *Ceramics International*. – 2020. – V. 46, N 9. – P. 13953–13960. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.02.193>
29. Брон В. А. О рекристаллизации корунда // *Доклады Академии наук СССР*. – 1951. – Т. 80, № 4. – С. 661–664.
30. Шапошников А. В., Гриценко Д. В., Петренко И. П., Пчеляков О. П., Гриценко В. А. Атомная и электронная структура ZrO_2 // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2006. – Т. 129, № 5. – С. 914–925.
31. Углов В. В. Радиационные процессы и явления в твердых телах. – Минск: Вышэйшая школа, 2016.
32. Физическое материаловедение. Т. 5: Материалы с заданными свойствами / Под ред. Калинин Б. А. – Москва: НИЯУ МИФИ, 2012.
33. Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах. – М.: Металлургия, 1978.
34. Lakusta M., Danilenko I., Konstantinova T., Volkova G. Influence of obtaining conditions on kinetics of the initial sintering stage of zirconia nanopowders // *Nanoscale Research Letters*. – 2016. – V. 11, N 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1452-3>

УДК 669.295:621.791.011

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ И ВРЕМЕННЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТЫКОВОМ МНОГОПРОХОДНОМ СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ ИЗ ТИТАНОВОГО ПСЕВДО- β -СПЛАВА

В. П. ЛЕОНОВ, д-р техн. наук, И. Ю. САХАРОВ, канд. техн. наук, С. В. КУЗНЕЦОВ,
Д. М. НЕСТЕРОВ

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

Поступила в редакцию 11.03.2025

После доработки 27.05.2025

Принята к публикации 30.05.2025

Технологические операции сварки при изготовлении деталей морских конструкций из титановых псевдо- β -сплавов больших толщин неизбежно приводят к возникновению остаточных сварочных напряжений (ОСН), возникающих на различных участках сварного шва и околошовной зоны и способствующих в ряде случаев возникновению дефектов и трещин. Компьютерное моделирование сварочных процессов широко используется с целью анализа и прогнозирования работоспособности сварных соединений и оптимизации процесса сварки. При этом в силу существенной сложности моделирования процесса сварки и его описания математическими зависимостями применяются численные методы на базе программных комплексов метода конечных элементов (МКЭ), обеспечивающие возможность решения термомодеформационной задачи в пространственно-временных координатах. Цель настоящей работы – разработка методики расчета ОСН, моделирующей формирование временных и остаточных сварочных напряжений при последовательном заполнении разделки шва и одновременном ее выполнении по длине соединения.

Ключевые слова: сварка, титановый псевдо- β -сплав, остаточные сварочные напряжения, метод конечных элементов

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-153-171

ЛИТЕРАТУРА

1. Окерблом Н. О. Сварочные напряжения в металлоконструкциях. – М.: Машгиз, 1950.
2. Винокуров В. А. Сварочные деформации и напряжения. – М.: Машиностроение, 1968.
3. Готовский В. А., Кархин В. А. Теория сварочных деформаций и напряжений. – Л.: ЛКИ, 1980.
4. Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. – СПб.: Политехника, 1993.
5. Карзов Г. П., Леонов В. П., Марголин Б. З. Остаточные сварочные напряжения в оболочечных конструкциях: собственные остаточные напряжения // Судостроительная промышленность. Сер.: Материаловедение. – 1991. – Вып. 12. – С. 3–16.
6. Горынин И. В., Чечулин Б. Б. Титан в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1990.
7. Горынин И. В., Ушков С. С., Хатунцев А. Н. Титановые сплавы для морской техники. – СПб.: Политехника, 2007.
8. Макаров Э. А. Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М.: Машиностроение, 1981.
9. Иванова Л. А., Ильин А. В., Леонов В. П., Мизецкий А. В., Сахаров И. Ю., Хатунцев А. Н. Расчетная оценка уровня и распределения остаточных сварочных напряжений в соединениях из титанового сплава 5В больших толщин // Вопросы материаловедения. – 2008. – Т. 4, № 56. – С. 37–53.
10. Карзов Г. П., Леонов В. П., Марголин Б. З. Расчетное определение полей остаточных сварочных напряжений в конструкциях оболочечного типа (Сообщение 1) // Автоматическая сварка. – 1992. – № 3. – С. 3–8.
11. Карзов Г. П., Леонов В. П., Марголин Б. З. Расчетное определение полей остаточных сварочных напряжений в конструкциях оболочечного типа (Сообщение 2) // Автоматическая сварка. – 1992. – № 4. – С. 7–12.
12. Патент RU 2 690 257 С1. Сплав на основе титана / Ковальчук М. В., Орыщенко А. С., Леонов В. П. и др. Заявка 28 ноября 2018. Оpubл. 31.05.2019.
13. Heinrich L., Feldhausen T., Saleeby K., Saldana C., Kurfess T. Prediction of Thermal Conditions of DED With FEA Metal Additive Simulation. – International Manufacturing Science and Engineering Conference, 2021.
14. Леонов В., Сахаров И., Кузнецов С., Нестеров Д. Расчетно-экспериментальное исследование температурных полей при выполнении сварки по наплавке на псевдо-β титановом сплаве. – Вопросы материаловедения. – 2025. – № 1 (121). – С. 159–170.
15. Махненко О., Мужиченко А., Прудкий И. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния сварных стингерных панелей из титанового сплава BT20. – Автоматическая сварка. – 2013. – № 2. – С. 14–20.
16. Неровный В. М. Теория сварочных процессов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016.
17. Smith D., Pickett P., Grabowski T., Thrope J., Azarmi F. Investigation of Mechanical Properties of Cobalt Chromium Additively Manufactured Using Direct Energy Deposition: Experimental Study and Finite Element Analysis // International Thermal Spray Conference. – 2024. – P. 712–723.
18. ASTM E837-99: Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method.

УДК 621.791.051.6:669.15–194.2

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПОСЛЕСВАРОЧНОГО ОТПУСКА НА СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ИЗ СТАЛИ С СОДЕРЖАНИЕМ 2,25%Cr и 1,0%Mo

Н. И. ЗАТОВКОВЕНКО, Е. А. ПАНИХИДИН, В. Н. ЛЕДЯНКИН

АО «Уралхиммаш», 620010, Свердловская обл., г. Екатеринбург, пер. Хибиногорский, 33.
E-mail: Nikolay.Zatokovenko@omzglobal.com

Поступила в редакцию 13.03.2025

После доработки 17.03.2025

Принята к публикации 21.03.2025

Приведены результаты испытаний контрольных сварных соединений сталей с содержанием 2,25%Cr и 1,0%Mo при различных температурах и продолжительности термической обработки. Показано снижение ударной вязкости и повышение склонности к термическому охрупчиванию металла шва при снижении температуры послесварочной термической обработки и увеличении ее продолжительности.

Ключевые слова: теплоустойчивые стали, автоматическая сварка под флюсом, сварные соединения, термическая обработка, температурное охрупчивание

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-172-179

ЛИТЕРАТУРА

1. СТО 00220368-019–2017. Термическая обработка нефтехимической аппаратуры и ее элементов.
2. Rules for Construction of Pressure Vessels. – ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 2023. – Section VIII, Division 1.
3. Specification for pressure vessel plates, alloy steel, chromium-molybdenum SA-387. – ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 2023. – Section II, P. A.
4. Specification for low-alloy and high manganese steel electrodes and fluxes for submerged arc welding. – AWS Specification A5.23/A5.23M:2021
5. Bruscato R. Temper Embrittlement and Creep Embrittlement of 2¼ Cr-1 Mo Shielded Metal-Arc Weld Deposits // Welding Journal. – 1970. – V. 49 (4). – P. 148–156.
6. Qualification standard for welding, brazing, and fusing procedures; welders; brazers; and welding, brazing, and fusing operators. – ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 2023. – Section IX.
7. ГОСТ 6996–66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств.
8. ГОСТ 34347–2017. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия.
9. Титова Т. И., Семернина И. Ф., Шульган Н. А., Милякова Л. А. Определение стойкости материалов против теплового охрупчивания с применением метода step cooling // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № 6. – С. 14–17.
10. API RP 934-A-2019. Materials and Fabrication of 2¼Cr–1Mo, 2¼Cr–1Mo–¼V, 3Cr–1Mo and 3Cr–1Mo–¼V Steel Heavy Wall Pressure Vessels for High-temperature, High-pressure Hydrogen Service.

УДК 620.193.55

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ВОДОРОДНАЯ КОРРОЗИЯ СТАЛИ. Обзор

А. Н. ДОБРОТВОРСКАЯ, канд. физ.-мат. наук, М. А. ДОБРОТВОРСКИЙ, канд. физ.-мат. наук,
Д. А. ЗАЙЦЕВ

АО «НПО «Ленкор», 192236, Санкт-Петербург, ул. Белы Куна, 31, литера А, помещ. 25-Н, офис 1408. E-mail: adobrotvorskaia@npo-lencor.ru

Поступила в редакцию 13.12.2024

После доработки 18.03.2025

Принята к публикации 18.03.2025

Представлен аналитический обзор научных и прикладных работ, посвященных вопросам высокотемпературной водородной коррозии стали. Рассматриваются современные методы диагностики водородной коррозии и приводится обзор фундаментальных отечественных и зарубежных разработок. Особое внимание уделяется анализу перспективных методов исследования данного типа коррозии для оценки пригодности металлического оборудования к эксплуатации в водородсодержащих средах при повышенных температурах и давлениях и оценки рисков разрушения опасных производственных объектов, вызванных высокотемпературной водородной коррозией.

Ключевые слова: высокотемпературная водородная коррозия, инкубационный период, водород, нефтепереработка, сталь

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-180-200

ЛИТЕРАТУРА

1. Коррозия и защита химической аппаратуры. Т. 9: Нефтеперерабатывающая и нефтехимическая промышленность / Под ред. Сухотина А. М., Шрейдера А. В., Арчакова Ю. И. – Л.: Химия, 1974. – 576 с.
2. Арчаков Ю. И. Водородная коррозия стали. – М.: Metallurgy, 1985.
3. Fletcher E. E., Elsea A. R. The effects of high pressure, high temperature hydrogen on steel. – Defense Metals Information Center, Battelle Memorial Institute, 1964. – 35 с. URL: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015095155274&seq=13>
4. Nugent M., Silfies T., Dobis J., Armitt T. A review of high temperature hydrogen attack (HTHA) modeling, prediction, and non-intrusive inspection in refinery applications // NACE Corrosion Proceedings. – 2017. – March. – P. 11–13. URL: <https://doi.org/10.5006/C2017-08924>
5. Poorhaydari K. A Comprehensive Examination of High-Temperature Hydrogen Attack – A Review of over a Century of Investigations // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2021. – V. 30. – P. 7875–7908.
6. API RP 571. Creep and Stress Rupture // Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry. – American Petroleum Institute, 2020. – 3rd ed.
7. Xu X., Niu J., Li Ch., Huang H., Yin Ch. Comparative Study on Hydrogen Embrittlement Susceptibility in Heat-Affected Zone of TP321 Stainless Steel // Materials Science Forum. – 2020. – V. 993. – P. 568–574. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.993.568
8. Li X., Chen H., Yao Z., Li J., Ke W. Hydrogen Attack on Austenitic Steel 304 under High Temperature and High Pressure // Acta Metall. Sinica Ser. B. – 1993. – V. 6, Is. 11. – P. 374–378.
9. API RP 941. Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants. – Washington: American Petroleum Institute, 2016. – 8th ed.
10. Elliot P. Materials performance in high-temperature environments – making the choice // NACE Corrosion Proceedings. – 2000. – P. 1–22.
11. Технические указания – регламент по эксплуатации и обследованию оборудования установок каталитического риформинга и гидроочистки, работающих в водородсодержащих средах при повышенных температуре и давлении. – СПб.: ВНИИНефтехим, ВНИИНефтемаш, Ленкор, 1998.
12. API RP 579-1/ASME FFS-1, Fitness-For-Service. – Washington: American Petroleum Institute, American Society of Mechanical Engineers, 2021. – 4th ed.
13. Prueter P. E. Leveraging fitness-for-service and inspection techniques to manage the risks associated with high-temperature hydrogen attack // E²G industry insight. – 2019. – V. 7. – Spring/Summer. – 14 p. URL: <https://e2g.com/library-item/leveraging-fitness-for-service-and-inspection-techniques-to-manage-the-risks-associated-with-high-temperature-hydrogen-attack/> (дата обращения 3.06.2025)
14. Martin M. L., Dadfarnia M., Orwig S., Moore D., Sofronis P. A microstructure-based mechanism of cracking in high temperature hydrogen attack // Acta Materialia. – 2017. – V. 140. – P. 300–304. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.08.051> (дата обращения 3.06.2025)
15. Tang S., Guo T. F., Cheng L. Modeling hydrogen attack effect on creep fracture toughness // Int. J. Solids Struct. – 2011. – V. 48, Is. 20. – P. 2909–2919. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2011.06.007> (дата обращения 3.06.2025)
16. Krynicki J., Bagnoli K., McLaughlin J. E. Probabilistic Risk Based Approach for Performing an Onstream High Temperature Hydrogen Attack Inspection // 61st Annual Conference & Exposition. – 2006.
17. Chevreux N., Flament C., Gillia O., David T., Goti R., Le Nevé C., Andrieu E. Understanding the Phenomenon of High Temperature Hydrogen Attack (HTHA) Responsible for Ferrite-Pearlitic Steels Damage // High Temperature Corrosion of Mater. – 2024. – V. 101. – P. 1225–1236. URL: <https://doi.org/10.1007/s11085-024-10281-8>
18. Benzerga A. A., Leblond J. B. Ductile fracture by void growth to coalescence // Advances in applied mechanics. – 2010. – V. 44. – P. 169–305. URL: [https://doi.org/10.1016/S0065-2156\(10\)44003-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2156(10)44003-X)

19. Eliezer D. High-temperature hydrogen attack of carbon steel // *J. Mater. Sci.* – 1981. – V. 16. – P. 2962–2966. URL: <https://doi.org/10.1007/BF00540300>
20. Pillot S., Corre S., Coudreuse L., Chauvy C., Toussaint P. Development and production of creep and hydrogen resistant grade 91 (9 Cr1 Mov) heavy plates for new generating high efficiency refining reactors // *NACE Corrosion Proceedings*. – 2013. – V. 91. – P. 1–15.
21. Schlögl S. M., Svoboda J., Van Der Giessen E. Evolution of the methane pressure in a standard 2.25 Cr–1Mo steel during hydrogen attack // *Acta materialia*. – 2001. – V. 49, N 12. – P. 2227–2238. URL: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00132-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00132-X)
22. Van Der Burg M. W. D., Van Der Giessen E. A Continuum damage relation for hydrogen attack cavitation // *Acta Mater.* – 1997. – V. 45. – P. 3047–3057. URL: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(96\)00382-5](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(96)00382-5)
23. Sundararajan G., Shewmon P. G. The kinetics of hydrogen attack of steels // *Metall Trans A.* – 1981. – V. 12. – P. 1761–1775. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02643758>
24. Shewmon P. G. Synergism between creep ductility and grain boundary bubbles // *Acta Metal.* – 1987. – V. 35. – P. 1317–1324. URL: [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(87\)90013-7](https://doi.org/10.1016/0001-6160(87)90013-7)
25. Dadfarnia M., Martin M. L., Moore D. E., Orwig S. E., Sofronis P. A model for high temperature hydrogen attack in carbon steels under constrained void growth // *Int. J. Fract.* – 2019. – V. 219. – P. 1–17. URL: <https://doi.org/10.1007/s10704-019-00376-8>
26. Pillot S., Coudreuse L. Hydrogen-induced disbonding and embrittlement of steels used in petrochemical refining // *Gaseous hydrogen embrittlement of materials in energy technologies*. – 2012. – P. 51–93. URL: <https://doi.org/10.1533/9780857093899.1.51>
27. Овчинников И. И., Овчинников И. Г. Влияние водородосодержащей среды при высоких температурах и давлениях на поведение металлов и конструкций из них // *Науковедение*. – 2012. – № 4 (13). – 28 с. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/60tvn412.pdf> (дата обращения 2.06.2025)
28. Алексеев В. И., Юсупов В. С., Лазаренко Г. Ю. Механизм влияния молибдена и меди на антикоррозионные свойства стали // *Перспективные материалы*. – 2009. – Т. 6. – С. 21–29.
29. Shewmon P. G. Hydrogen Attack of Carbon Steel // *Metallurgical transactions A.* – V. 7A. – 1976. – P. 279–286. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02644468>
30. Алексеев В. И., Боголюбский С. Д., Ушаков И. С. Термодинамическая оценка склонности хромистых сталей к водородной коррозии при повышенных температурах и давлениях водорода // *Журнал физ. химии*. – 1971. – Т. 45, № 8. – С. 2053.
31. Schlögl S. M., Van Der Giessen E. Micromechanics of High Temperature Hydrogen Attack // *Proceedings of the European Conference on Computational Mechanics, solids, structures, and coupled problems in engineering, August 31 – September 3.* – 1999. – P. 1–11.
32. Bodden Connor M. T., Barrett C. D. Introduction of Molecular Dynamics for HTHA and a Review Article of HTHA // *J Fail. Anal. and Preven.* 2022. – V. 22. – P. 1326–1345. URL: <https://doi.org/10.1007/s11668-022-01419-4>
33. Skrypnik L. D. Analytic evaluation of hydrogen-assisted void growth at high temperatures // *Mater. Sci.* – 1997. – V. 33, N 4. – P. 478–490. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02537545>
34. Parthasarathy T. A., Lopez H. F., Shewmon P. G. Hydrogen Attack kinetics of 2.25Cr-1Mo steel weld metals // *Metall. Trans. A.* – 1985. – V. 16A. – P. 1143–1144. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02811683>
35. Арчаков Ю. И., Гребешкова И. Д. Водородная коррозия сталей // *Коррозия и защита химической аппаратуры*. – Л.: Химия, 1974. – Т. 9, ч. 2. – С. 335–364.
36. Павлов С. Б., Маликов В. А. Влияние водорода на сталь 09Г2С при повышенных температурах и давлениях // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2014. – Т. 10. – P. 38–39.
37. Shih H. M., Johnson H. H. Inclusions, grain boundaries and hydrogen attack // *Scripta Metallurgica*. – 1977. – V. 11. – P. 151–154. DOI: 10.1016/0036-9748(77)90296-4
38. Mostert R. J., Mukarati T. W., Pretorius C. C. E., Mathoho V. M. A constitutive equation for the kinetics of high temperature hydrogen attack // *Procedia Structural Integrity*. – 2022. – V. 37. – P. 763–770. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.02.007>

39. Looney L., Hurst R. C., Taylor D. The effect of high pressure hydrogen on the creep fracture of notched ferritic-steel components // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1998. – V. 77. – P. 25–31. URL: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00384-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00384-1)
40. Alshahrani M. A. M., Ooi S. W., Colliander M. H., El-Fallan G. M. A. M., Bhadeshia H. K. D. H. High-temperature hydrogen attack on 2.25 Cr-1Mo steel: the roles of residual carbon, initial microstructure and carbide stability // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2022. – V. 53, N 12. – P. 4221–4232. URL: <https://doi.org/10.1007/s11661-022-06809-9>
41. Арчаков Ю. И. Феноменологическая теория легирования водородоустойчивых сталей // *Вопросы атомной науки и техники*. – 2008. – № 2. – С. 31–36.
42. ASM Handbook Committee. V 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys – ASM International, 1990. URL: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v01.9781627081610>
43. Shimomura J.-I., Tani H., Kooriyama T., Sato Sh., Ueda S. High Strength 2-1/4 and 3% Cr-1% Mo Steels with Excellent Hydrogen Attack Resistance // *Kawasaki steel technical report*. – 1989. – N 20. – P. 78–87.
44. Арчаков Ю. И. Водородоустойчивость стали. – М.: Металлургия, 1978. – 112 с.
45. Алексеев В. И., Боголюбский С. Д., Ушаков И. С., Шварцман Л. А. Термодинамическая оценка склонности хромистых сталей к водородной коррозии при повышенных температурах и давлениях водорода // *Журнал физ. химии*. – 1971. – Т. 45. – С. 2053–2055.
46. Утевский Л. М. Отпускная хрупкость стали. – М.: Металлургиздат, 1961. – 101 с.
47. Chao B. L., Odette G. R., Lucas G. E. Kinetics and mechanisms of hydrogen attack in 2.25Cr-1Mo steel. – Santa Barbara (USA): Oak Ridge National Lab, 1988.
48. Schlögl S. M., Giessen E. van der, Leeuwen Y. van. On methane generation and decarburization in low-alloy Cr-Mo steels during hydrogen attack // *Metal. Mater. Trans. A*. – 2000. – V. 31, N 1. – P. 125–137. DOI: 10.1007/s11661-000-0059-5
49. Chan S. L. I. Hydrogen trapping ability of steel with different microstructure // *Journal of the Chinese Institute of Engineers*. – 1999. – V. 22, N 1. – P. 43–53. URL: <https://doi.org/10.1080/02533839.1999.9670440>
50. Yamani A. A cost effective development of an ultrasonic A-scans database for high-temperature hydrogen attack // *NDT&E International*. – 2008. – V. 41. – P. 163–168. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2007.10.007>
51. Allevato C. Utilizing acoustic emission testing to detect high-temperature hydrogen attack (HTHA) in Cr-Mo reformer reactors and piping during thermal gradients // *Procedia Engineering*. – 2011. – V. 10. – P. 3552–3560. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.585>
52. Hlongwa N., Mabuwa S., Msomi V. The development of techniques to detect high temperature hydrogen attack – A mini review // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – V. 45. – P. 5415–5418. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.112>
53. Li X., Dong C., Li M., Chen H. Effect of hydrogen attack on acoustic emission behavior of low carbon steel // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. – 2002. – V. 9, N 2. – P. 130–134.
54. Panzarella C., Cochran J. The E2G Model of High Temperature Hydrogen Attacks and the New Prager Curves // *WRC Bulletin Current Concepts for Life Assessment of Pressure Vessels and Piping*. – 2016. – V. 568. – P. 135–169.
55. Nugent M., Silfies T., Kowalski P., Sutton N. Recent applications of evaluations of equipment in HTHA service // *NACE Proceedings*. – 2018. – P. 10509.
56. High temperature hydrogen attack: New NDE advanced capabilities – development and feedback / C. Le Névé, S. Layan, L. Le Jeune, S. Mahaut, S. Demonte, D. Chauveau, M. Tessier et al. // *Proceedings of ASME 2019 Pressure Vessels and Piping Conference*. American Society of Mechanical Engineers. – 2019. – Paper No PVP2019-94001, V007T07A011. – P. 11. DOI: 10.1115/PVP2019-94001
57. Добротворский А. М., Копыльцов А. В., Добротворский М. А. Новые физико-химические методы выявления причин отказов технологического оборудования нефтеперерабатывающих предприятий // *Химическая техника*. – 2017. – № 1. – 30 с.
58. Асвиян М. Б. Влияние масштабного фактора на длительную прочность труб при высоком внутреннем давлении водорода // *Заводская лаборатория*. – 1963. – Т. 3. – С. 352–356.

59. Асвиян М. Б. Основные факторы, влияющие на длительную прочность стали при высоких давлениях водорода // Физико-химическая механика материалов. – 1977. – Т. 6. – С. 3–6.
60. Черных Н. П. Влияние водорода на длительную прочность некоторых сталей // Влияние водорода на служебные свойства стали. – Иркутск: Иркутское кн. изд-во, 1963.
61. Карташов А. М. Влияние водородного воздействия при высокой температуре и давлении на упругие свойства углеродистой стали // Сб. научн. тр. аспирантов. – Л.: ЛИТМО, 1974. – С. 142–145.
62. Миронов В. И., Емельянов И. Г., Вичужанин Д. И., Замараев Л. М., Огорелков Д. А., Яковлев В. В. Влияние температуры наводороживания и растягивающего напряжения на параметры полной диаграммы деформирования стали 09Г2С // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. – 2020. – № 1. – С. 24–33.
63. Арчаков Ю. И., Тесля Б. М. Исследование влияния водорода на работоспособность оборудования и трубопроводов при длительных сроках эксплуатации // Процессы нефтепереработки и нефтехимии: сб. науч. тр. к 75-летию ВНИИНефтехима. – СПб., 2005.
64. Nelson G. Hydrogenation Plant Steels // Proceedings API. – 1949. – V. 29M. – P. 163–174.
65. API Publication 940: Steel Deterioration in Hydrogen: A Report on Corrosion Research. – Washington: American Petroleum Institute, 1967.
66. API Publication 945: A Study of the Effects of High-temperature, High-pressure Hydrogen on Low-alloy Steels. – Washington: American Petroleum Institute, 1975.
67. Cantwell J. High-Temperature Hydrogen Attack // Mater. Perform. – 1994. – V. 33 (7). – P. 58–61.
68. Staats J., Buchheim G. A new practical method for prioritizing equipment in HTHA service for inspection and replacement and the challenges in obtaining process conditions to be used in the HTHA assessment // NACE Corrosion Proceedings. – 2016. – P. 7233.
69. Sutton N. G., Time Dependent Nelson Curve Update // World Fertilizer. – 2024. – July/August.
70. Osage D. et al. E2G Technical Report 94: E2G HTHA JIP FFS. Rules for API 579-1/ASME FFS-1, Part 15. Version 7. The Equity Engineering Group, 2017.
71. Pretorius C. C. E., Mostert R. J., Mukarati T. W., Mathoho V. M. Microstructural influences on the damage evolution and kinetics of high temperature hydrogen attack in a C-0.5 Mo welded joint // *Suid-Afrikaanse Tydskrif vir Natuurwetenskap en Tegnologie*. – 2021. – V. 40, N 1. – P. 212–223. URL: https://hdl.handle.net/10520/ejc-aknat_v40_n1_a55
72. Panzarella C. H., Osage D. A., Spring D. W., Gassama E., Cochran J. The α - Ω HTHA Model and the Time-Dependent Prager Curves // WRC Bulletin 585, The Welding Research Council – New York. – 2021.

УДК 621.791.019:539.421:621.039.536.4

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛА РАЗНОРОДНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ ДУ800 ГЦТ И ГЦН РУ ВВЭР-1000 ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПРИМЕНИМОСТИ КОНЦЕПЦИИ «ТЕЧЬ ПЕРЕД РАЗРУШЕНИЕМ»

Н. В. ВАСИЛЬЕВ¹, канд. техн. наук, М. Н. ТИМОФЕЕВ¹, канд. техн. наук, А. С. ШАЛЫГИН¹,
И. А. ХОМИЧ¹, В. А. ПЕТРОВ¹, канд. техн. наук, Д. Ф. ГУЦЕВ², канд. техн. наук, В. В. ШИТОВ³

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,
ул. Шпалерная, 49. E-mail: mail@crism.ru

²АО «Концерн Росэнергоатом», 109507, Москва, ул. Ферганская, 25

³Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Балаковская атомная станция», 413801,
Саратовская обл., г. Балаково

Поступила в редакцию 10.02.2025

После доработки 17.02.2025

Принята к публикации 17.02.2025

Представлены результаты исследования характеристик трещиностойкости металла разнородного сварного соединения переходников главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) и патрубка главного циркуляционного насоса (ГЦН). Полученные исходные данные необходимы для выполнения расчетного обоснования применения концепции «течь перед разрушением» при продлении срока службы ГЦТ реакторных установок ВВЭР-1000 до 60 лет (до 520 тыс. ч). Исследования проведены на образцах, вырезанных из контрольных сварных соединений приварки переходников трубопровода Ду800 из стали 10ГН2МФА к патрубку ГЦН из стали 06Х12Н3ДЛ. Для построения J -кривых проведены исследования трещиностойкости металла сварного шва, выполненного ручной и автоматической сваркой, и зоны переходной наплавки в исходном состоянии и после теплового старения в интервале температур эксплуатации от 100 до 290°C. По прогнозируемым значениям $T_K(\tau)$ дана оценка вязкости разрушения $K_{Jc}(\tau)$, а также ударной вязкости KCV при расчетной температуре 290°C на конец срока эксплуатации.

Ключевые слова: реакторная установка ВВЭР-1000, главный циркуляционный трубопровод, продление срока службы, контрольное сварное соединение, переходная наплавка, тепловое старение, вязкость разрушения, критическая температура хрупкости, расчетное обоснование

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-201-217

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимофеев М. Н., Карзов Г. П., Галяткин С. Н., Михалева Э. И. Влияние термического цикла сварки на структурные и фазовые превращения металла шва для жаропрочных Cr-Mo-V сталей // Неорганические материалы: прикладные исследования. – 2017. – № 8 (6). – С. 886–891.
2. ГОСТ Р 58328-2018. Трубопроводы атомных станций. Концепция «течь перед разрушением».
3. Тимофеев М. Н., Галяткин С. Н. Исследование структуры и свойств металла сварного соединения корпуса атомного реактора из Cr-Mo-V стали в процессе изготовления и эксплуатации // Вопросы материаловедения. – 2022. – № 2 (110). – С. 111–123.
4. ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств.
5. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов ПНАЭ Г-7-002-86.
6. ASTM E 1820-16. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.
7. Баландин Ю. Ф., Горынин И. В., Звездин Ю. И., Марков В. Г. Конструкционные материалы АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 280 с.
8. Alekseenco N. N., Amaev A. D., Gorynin I. V., Nikolaev V. A. Radiation damage of nuclear power plant pressure vessel steels. – La Grange Park, Illinois, USA: Am. Nuc. Soc., 1997.
9. Силаев А. А., Носов С. И. Оценка длительного термического старения на сталь марки 10ГН2МФА и ее сварные соединения для ГЦН и ГЦНА реакторной установки с ВВЭР // Тяжелое машиностроение. – 2023. – № 11–12. – С. 2–6.
10. Сиратори М., Миёси Т., Мацусита Х. Вычислительная механика разрушения. – М.: Мир, 1986. – 334 с.
11. ГОСТ Р 59115.6-2021. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Методы определения характеристик трещиностойкости конструкционных материалов.

METALS SCIENCE. METALLURGY

- Motovilina G.D., Korotovskaya S.V., Khlusova E.I., Golubeva M.V., Zabavicheva E.V.* Structure and properties of varying thickness rolling made of high-strength martensitic steel after hardening and tempering 5
- Kurteva K.Yu., Motovilina G.D., Pazilova U.A., Khlusova E.I., Yakovleva E.A.* Study of the influence of heat treatment modes on the formation of an α -phase layer with a modified structure on the surface of a sheet made of low-carbon Cr–Ni–Mo steel 15
- Pospelov I.D., Matveeva D.V.* Microstructure and hardness of hot-rolled structural chromium steel after various types of spheroidizing annealing 26
- Tsareva I.N., Krivina L.A., Berdnik O.B., Razov E.N., Moskvichev A.A.* Study of the microstructure of a heat-resistant monocrystal alloy after high-temperature operation 35
- Igolkin A.I., Lebedeva N.V., Petrov S.N.* Metal quality of the 19th-century construction beams 43

FUNCTIONAL MATERIALS

- Gangalo A.N., Miroshnichenko S.V.* Influence investigation of the die geometry on hydrostatic pressure in the equal channel angular pressing 50
- Kim A.E., Mazeeva A.K., Razumov N.G., Volokitina E.V., Popovich A.A.* High-entropy magnetic alloy $\text{Fe}_x\text{Co}_6\text{Al}_3\text{Ni}_2\text{Si}$, produced by mechanical alloying and spark plasma sintering 62
- Nesterova E.D., Bobkova T.I., Mukhamedzyanova L.V., Khromenkov M.V., Serdyuk N.A.* Formation of composite powders of multicomponent alloys of the $\text{Al}_x\text{NiCoFeCr}$ system obtained by mechanosynthesis 75
- Leonov V.P., Chudakov E.V., Malinkina Yu.Yu., Garanina I.M., Drugachuk S.D., Markova Yu.M., Karyagin D.A., Smirnov M.O.* Application of hot isostatic pressing to increase the properties of titanium pseudo- α -alloy 86

POLYMER STRUCTURAL MATERIALS

- Sidorova S.A., Khrustalev A.N., Losev A.V., Rashutin N.A.* Study of the physical and mechanical properties of aluminum oxide filament based on polyethylene terephthalate glycol for FDM-printing 99
- Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Kondratov D.V., Anisimov A.V.* Study of the influence of filler on the heating kinetics of cured polymer composite materials in a microwave electromagnetic field 110
- Protsenko A.E., Lyukho I.A., Kholodov A.S., Petrov V.V.* Fiberglass reinforced plastics based on fillers recovered in pyridine under normal pressure 119
- Maletsky A.V., Isaev R.Sh., Belichko D.R., Volkova G.K.* Effects of neutron irradiation on aggregate- and dispersion-hardened structure of ZTA composite ceramics 130

WELDING, WELDING MATERIALS AND TECHNOLOGIES

- Leonov V.P., Sakharov I.Yu., Kuznetsov S.V., Nesterov D.M.* Computational studies of residual and temporary welding stresses in a multiple-pass butt welded joint made of titanium pseudo- β -alloy 153
- Zatokovenko N.I., Panikhidin E.A., Ledyankin V.N.* Influence of temperature and duration of post-welded tempering on the welded joints of petrochemical equipment made of 2.25%Cr and 1.0%Mo steel 172

CORROSION AND PROTECTION OF METALS

- Dobrotvorskaya A.N., Dobrotvorsky M.A., Zaitsev D.A.* High-temperature hydrogen corrosion of steel: a review 180

STRUCTURAL INTEGRITY AND SERVICEABILITY OF MATERIALS

- Vasiliev N.V., Timofeev M.N., Shalygin A.S., Khomich I.A., Petrov V.A., Gusev D.F., Shitov V.V.* Forecasting the parameters of crack resistance of dissimilar welded joints of Du800 MCP and MCP pipelines of WWER-1000 reactor to substantiate the applicability of the "leak before break" concept 201

- Guidelines for authors of the scientific and technical journal "Voprosy Materialovedeniya". Manuscript requirements** 218

STRUCTURE AND PROPERTIES OF VARYING THICKNESS ROLLING MADE OF HIGH-STRENGTH MARTENSITIC STEEL AFTER HARDENING AND TEMPERING

G.D. MOTOVILINA, Cand Sc. (Eng), S.V. KOROTOVSKAYA, Cand Sc. (Eng),
E.I. KHLUSOVA, Dr Sc. (Eng), M.V. GOLUBEVA, Cand Sc. (Eng), E.V. ZABAVICHEVA
NRC "Kurchatov Institute" – CRISM "Prometey", 49 Shpalernaya St 191015, St Petersburg,
Russian Federation. E-mail: mail@crism.ru

Received January 20, 2025

Revised March 19, 2025

Accepted March 21, 2025

Abstract—A set of studies on the influence of tempering modes on structural changes in sheet metal products of various thicknesses of high-strength low-carbon martensitic steel has been carried out. It has been shown that the formation of a carbide phase in lath martensite and self-tempered martensite has a decisive influence on the level of impact work of steel with a martensitic structure.

Keywords: high-strength steel, furnace heating quenching, high tempering, sheet metal, structure, lath martensite, self-tempered martensite, special carbides, secondary hardening, impact work

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-05-14

REFERENCES

1. Gorynin, I.V., Rybin, V.V., Malyshevsky, V.A., Semicheva, T.G., Sherokhina, L.G., Prevrashcheniya dislokatsionnogo martensita pri otpuske vtorichnotverdeyushchei stali [Transformations of dislocation martensite during tempering of secondary-hardening steel], *MiTOM*, 1999, No 9, pp. 13–32.
2. Kroshkin, A.A., Malyshevsky, V.A., Rybin, V.V., Sherokhina, L.G., Issledovanie tonkoi struktury vysokoprochnoi nizkouglerodistoi vtorichno-tverdeyushchei stali [Study of fine structure of high-strength low-carbon secondary-hardening steel], *Voprosy sudostroeniya. Seriya Metallovedenie. Metallurgiya*, 1983, Is. 37, pp. 3–10.
3. Rybin, V.V., Belozersky, G.N., Malyshevsky, V.A., et al., Vliyanie dislokatsy na mekhanizm vtorichnogo tverdeniya [Influence of dislocations on the secondary solidification mechanism], *FMM*, 1982, V. 54, Is. 5, pp. 990–999.
4. Gorynin, I.V., Rybin, V.V., Malyshevsky, V.A., Semicheva, T.G., Teoreticheskie i eksperimentalnye osnovy sozdaniya vtorichnotverdeyushchikh svarivaemykh konstruktsionnykh staley [Theoretical and experimental bases for creation of secondary-hardening weldable structural steels], *MiTOM*, 1999, No 9, pp. 7–13.
5. Rybin, V.V., Malyshevsky, V.A., Semicheva, T.G., Razvitie teorii vtorichnogo tverdeniya pri sozdanii vysokoprochnykh korpusnykh marok stali [Development of the theory of secondary solidification in the creation of high-strength hull grades of steel], *Voprosy Materialovedeniya*, 2005, No 2 (42), pp. 55–68.
6. Novikov, I.I., *Teoriya termicheskoi obrabotki* [Theory of heat treatment], Moscow: Metallurgiya, 1978.
7. Yakovleva, I.L., Tereshchenko, N.A., Urtsev, N.V., Nablyudenie martensitno-austenitnoi sostavlyayushchei v strukture nizkouglerodistoi nizkolegirovannoi trubnoi stali [Observation of martensitic-austenitic component in the structure of low-carbon low-alloy pipe steel], *FMM*, 2020, V. 121, No 4, pp. 396–402.
8. *Fizicheskoe materialovedenie. V. 1: Fizika tverdogo tela* [Physical Materials Science. V. 1: Solid State Physics], Moscow: NIYaU MIFI, 2012.

**STUDY OF THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT MODES ON THE FORMATION
OF AN α -PHASE LAYER WITH A MODIFIED STRUCTURE ON THE SURFACE
OF A SHEET MADE OF LOW-CARBON Cr–Ni–Mo STEEL**

K.Yu. KURTEVA, G.D. MOTOVILINA, Cand Sc. (Eng), U.A. PAZILOVA, Cand Sc. (Eng),
E.I. KHLUSOVA, Dr Sc. (Eng), E.A. YAKOVLEVA, Cand Sc. (Eng)

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

Received October 29, 2024

Revised February 4, 2025

Accepted March 10, 2025

Abstract—The work investigates the effect of heat treatment on the formation of an α -phase layer with a modified structure, representing polyhedral grains of different sizes, on the surface of rolled sheet products made of high-strength low-carbon chromium-nickel-molybdenum bainitic-martensitic shipbuilding steel. After varying the hardening and tempering modes, metallographic studies and hardness measurements from the surface to the middle of the rolled product with a thickness of 10 mm were carried out. The deformation capacity of the rolled sheet products was estimated based on the results of bending tests at an angle of 180°. It was shown that the duration of high tempering has a decisive effect on the formation of such a layer. Based on the research results, a mode of heat treatment of rolled sheet products with a thickness of less than 16 mm was proposed, ensuring the formation of an α -phase layer with a modified structure of the smallest depth without significant changes in hardness.

Keywords: low-carbon chromium-nickel-molybdenum steel, bainite, martensite, tempering, sheet metal surface, α -phase layer with modified structure, deformation capacity, bending

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-15-25

REFERENCES

1. Kuwata, K., Takemoto, Y., Okayasu, M., Bian, J., Senuma, T., Decarburizing Behavior and Its Effect on Mechanical Properties of Ultrahigh Strength Steel Sheets, *ISIJ International*, 2021, V. 61, No 4, pp. 1300–1308. URL: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-416>
2. Duan, X., Yu, H., Lu, J., Huang, Z., Temperature Dependence and Formation Mechanism of Surface Decarburization Behavior in 35CrMo Steel, *Steel Research International*, 2019, May. DOI: 10.1002/srin.201900188
3. Roumina, R., Bruhis, M., Masse, J.P., Zurob, H.S., Jain, M., Bouaziz, O., Embury, J.D., Bending properties of functionally graded 300M steels, *Materials Science & Engineering: A*, 2016, V. 653, pp. 63–70.
4. Golubeva, M.V., Motovilina, G.D., Svyatysheva, E.V., Sych, O.V., Osobennosti formirovaniya struktury stali marki 09KhGN2MD posle termouluchsheniya [Peculiarities of structure formation of 09CrKhN2MD steel after heat treatment], *Uralskaya shkola molodykh metallovedov. Materialy XVIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi shkoly-seminara metallovedov – molodykh uchenykh*, A. A. Popova (Ed.), 2017, pp. 138–142.
5. Golubeva, M.V., Sych, O.V., Khlusova, E.I., Motovilina, G.D., Svyatysheva, E.V., Rogozhkin, S.V., Lukyanchuk, A.A., Izmenenie struktury vysokoprochnoi ekonomnolegirovannoi stali marki 09KhGN2MD pri otpuske [Changes in the structure of high-strength economically alloyed 09CrHN2MD steel at tempering], *Voprosy Materialovedeniya*, 2018, No 1 (39), pp. 15–26.
6. Novikov, I.I., *Teoriya termicheskoi obrabotki metallov* [Theory of heat treatment of metals], Moscow: Metallurgiya, 1986.

MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF HOT-ROLLED STRUCTURAL CHROMIUM STEEL AFTER VARIOUS TYPES OF SPHEROIDIZING ANNEALING

I.D. POSPELOV, Cand Sc. (Eng), D.V. MATVEEVA

Received November 8, 2024

Revised January 16, 2025

Accepted January 31, 2025

Abstract—The paper presents the comparable study of changes in hardness and microstructure of the 0.35Cr hot rolled chromium steel after isothermal and cycle annealing. After conducting the experiment, temperature modes of such annealing have been provided to meet additional requirements to hardness and depth of the decarburized layer according to National Standard GOST 4543–71. The advantage of the developed cycle annealing with soaking above the A_{c3} critical point in terms of temperature-and-rate conditions of cooling at the final cycle for formation of the uniform structure of granular pearlite and spheroidization of the carbide phase along the entire area of studied samples is demonstrated.

Keywords: 0.35Cr structural hot rolled steel, Brinell hardness, isothermal annealing, cycle annealing, microstructure, carbide phase, spheroidization

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-26-34

REFERENCES

1. GOST 4543–2016: *Structural alloy steel products. Specifications* [Metal products made of structural alloy steel. Technical specifications].
2. Xie, H., Du, L., Hu, J., Misra, R., Microstructure and mechanical properties of a novel 1000 MPa grade TMCP low carbon microalloyed steel with combination of high strength and excellent toughness, *Materials science and engineering*, 2014, V. 612, pp. 123–130. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.06.033>
3. Bandyopadhyay, P.S., Ghosh, S.K., Kundu, S., Chatterjee, S., Evolution of microstructure and mechanical properties of thermomechanically processed ultrahigh-strength steel, *Metallurgical and materials transactions*, 2011, V. 42, pp. 2742–2752. URL: <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0711-2>
4. Kaijalainen, A., Hannula, J., Somani, M., Kömi, J., Influence of chromium content on the mechanical properties and HAZ simulations of low-carbon bainitic steels, *Proceedings of the 28th International Conference on Metallurgy and Materials*, 2019, pp. 520–525. URL: <https://doi.org/10.37904/metal.2019.712>
5. Zhou, J., Yu, Z., Chen, J., Wu, S., Wu, K., Pan, L., The Performance of niobium-microalloying ultrahigh-strength bridge cable steel during hot rolling, *Materials*, 2024, V. 17 (6), p. 1259. URL: <https://doi.org/10.3390/ma17061259>
6. Matrosov, M.Yu., Efron, L.I., Kichkina, A.A., Lyasotsky, I.V., Issledovanie mikrostruktury mikrolegirovannoi niobiem trubnoi stali posle razlichnykh rezhimov kontroliruemoi prokatki s uskorennym okhlazhdeniem [Study of the microstructure of pipe steel microalloyed with Nb after different modes of controlled rolling with accelerated cooling], *Metalovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2008, No 3, pp. 44–49.
7. Javaheri, V., Khodaie, N., Kaijalainen, A., Porter, D., Effect of niobium and phase transformation temperature on the microstructure and texture of a novel 0.40% C thermomechanically processed steel, *Materials Characterization*, 2018, V. 142, pp. 295–308. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.05.056>
8. Rancel, L., Gómez, M., Medina, S.F., Influence of microalloying elements (Nb, V, Ti) on yield strength in bainitic steels, *Steel research international*, 2008, V. 79, pp. 947–953. URL: <https://doi.org/10.2374/SRI08SP064>
9. Xia, T., Ma, Y., Zhang, Y., Li, J., Xu, H., Effect of Mo and Cr on the microstructure and properties of low-alloy wear-resistant steels, *Materials*, 2024, V. 17 (10), p. 2408. URL: <https://doi.org/10.3390/ma17102408>
10. Rodriguez-Galeano, K.F., Nutter, J., Azakli, Y., Slater, C., Rainforth, W.M. Influence of Cr and Cr+Nb on the interphase precipitation and mechanical properties of V–Mo microalloyed steels, *Materials Science and Engineering: A*, 2024, V. 893, p. 146140. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146140>

11. Garber, E.A., Pospelov, I.D., Kozhevnikova, I.A., Vliyanie khimicheskogo sostava i uprugikh svoystv polosy i valkov na energosilovye parametry shirokopolosnykh stanov goryachei prokatki [Influence of practically chemical composition and elastic properties of strip and rolls on calculation accuracy of energy and force parameters in wide strip hot rolling mills], *Proizvodstvo prokata*, 2011, No 8, pp. 2–7.
12. Bernshtein, M.L., *Struktura deformirovannykh metallov* [The structure of deformed metals], Moscow: Metallurgiya Publ., 1977.
13. Rudskoi, A.I., Lunev V.A., *Teoriya i tekhnologiya prokatnogo proizvodstva* [Theory and technology of rolling production], St Petersburg: Nauka Publ., 2005. ISBN 5-02-025065-1
14. Zhu, S., Zhen, X., Wang, G., Ma, C., Cao, C., Effect of SCM435 initial microstructure and annealing process on spheroidization grade and properties, *Vibroengineering PROCEDIA*, 2023, V. 48, pp. 61–66. URL: <https://doi.org/10.21595/vp.2022.23091>
15. Inam, A., Brydson, R., Edmonds, D.V., Effect of starting microstructure upon the nucleation sites and distribution of graphite particles during a graphitising anneal of an experimental medium-carbon machining steel, *Materials Characterization*, 2015, V. 106, pp. 86–92. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.05.014>
16. Rounaghi, S.A., Kiani-Rashid, A.R., Study on graphitization acceleration during annealing of martensitic hypereutectoid steel, *Phase Transitions*, 2011, V. 84 (11–12), pp. 981–991. URL: <https://doi.org/10.1080/01411594.2011.563153>
17. Pospelov, I.D., Matveeva, D.V., Vliyanie izotermicheskogo otzhiga pered kholodnoi prokatkoi na mekhanicheskie svoystva zaevtektoidnoi stali dlya vysokoprochnykh kholodnokatanykh lent [The effect of isothermal annealing before cold rolling on the mechanical properties of hypereutectoid steel for high-strength cold-rolled strips], *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2024, No 10, pp. 26–31. URL: <https://doi.org/10.30906/mitom.2024.10.26-31>
18. Pospelov, I.D., Matveeva, D.V., Research of the mechanical properties of steel U10A for the production of high-strength cold-rolled strips after cyclic annealing and plastic deformation, *Basic Problems of Material Science*, 2024, V. 21 (2), pp. 247–253. URL: <https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2024.02.013>
19. Gauvin, M., Dutta, A., Lorenz, U., Duprez, L., Waterschoot, T., Micro- to nanoscale microstructural differences induced by intercritical annealing in a hot-rolled medium manganese steel, *Steel research international*, 2023, V. 94 (11), p. 2300032. URL: <https://doi.org/10.1002/srin.202300032>
20. Wang, Y., Ding, R., Franke, C., Li, T., Rong, X., Wen, P., Yang, Z., Chen, H., Flash annealing of a chemically heterogeneous medium Mn steel, *Scripta Materialia*, 2024, V. 242, p. 115923. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2023.115923>
21. Rivolta, B., Gerosa, R., Panzeri, D., Piazza, L., Angelini, L., Alfonso, M., Bolognani, N., Panzeri, A., Parimbelli, A., Sala, C., Spheroidizing annealing of thermomechanically hot-rolled steel rods: influence of the prior microstructure on the mechanical characteristic and phase transformations, *Ironmaking & steelmaking*, 2022, V. 49 (7), pp. 716–725. URL: <https://doi.org/10.1080/03019233.2022.2049582>
22. Wang, H., Yuan, G., Lan, M., Microstructure and mechanical properties of a novel hot-rolled 4% Mn steel processed by intercritical annealing, *Journal of materials science*, 2018, V. 53 (17), pp. 12570–12582. URL: <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2512-0>
23. Zhang, Y., Wang, J., Xie, Z., Microstructural Characteristics and tensile behavior of a hot-rolled medium-Mn steel (0.25C–8.5Mn–0.5Si–2.5Al) processed by intercritical annealing treatment, *Journal of materials engineering and performance*, 2020, V. 29, pp. 2623–2634. URL: <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04755-4>

UDC 669.245.018.44:621.785.78

STUDY OF THE MICROSTRUCTURE OF A HEAT-RESISTANT MONOCRYSTAL ALLOY AFTER HIGH-TEMPERATURE OPERATION

I.N. TSAREVA¹, Cand Sc. (Phys-Math), L.A. KRIVINA¹, Cand Sc. (Eng),
O.B. BERDNIK², Cand Sc. (Eng), E.N. RAZOV¹, A.A. MOSKVICHEV¹, Cand Sc. (Eng)

¹Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IMP RAS),
85 Belinsky St, 603024 Nizhny Novgorod, Russian Federation. E-mail: krivina.lydmila@mail.ru

²Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (NSTU), 24 Minina St,
603155 Nizhny Novgorod, Russian Federation

Received December 16, 2024

Revised February 17, 2025

Accepted March 11, 2025

Abstract—The microstructure of the material of the first-stage working blade of the Siemens SGT-400 gas turbine made of a heat-resistant single-crystal alloy was investigated in the post-operational state (after working out the assigned resource of ~25,000 h). The structural and phase state of the heat-resistant single-crystal nickel-based alloy after full-scale operation under conditions of long-term exposure to a high-temperature gas flow and working loads was studied using electron microscopy, X-ray diffraction analysis and differential scanning calorimetry. The regularities of the high-temperature aging process were studied, manifested in the appearance of coarse porosity, precipitation of the lamellar γ' -phase and local fusion of γ' -phase cells in the axes of dendrites. The microindentation method was used to study the microhardness in different zones and structural components of the material of the locking and feather parts of the blade.

Keywords: heat-resistant single-crystal alloy, post-operational state, microstructure, dendritic structure, intermetallic phase, microhardness, high-temperature aging

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-35-42

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out with the financial support of the State Assignment of the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences for the implementation of fundamental scientific research for 2024–2026, registration number of R&D 124031500079-2 (code FFUF-2024-0031).

REFERENCES

1. Kablov, E.N., Petrushin, N.V., Svetlov, I.L., Liteinye zharoprochnye nikelovye splavy dlya perspektivnykh aviatsionnykh GTD [Foundry heat-resistant nickel alloys for advanced aviation gas turbine engines], *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2007, No 2, pp. 17–23.
2. Bondarenko, Yu.A., Bazyleva, O.A., Echin, A.B., Surova, V.A., Narsky, A.R., Vysokogradientnaya napravlenaya kristallizatsiya detalei iz splava VKNA-1V [Highly gradient directional crystallization of VKNA-1V alloy parts], *Liteynoe proizvodstvo*, 2012, No 6, pp. 3–15.
3. Kablov E.N., *Litye lopatki gazoturbinnnykh dvigatelei (splavy, tekhnologiya, pokrytiya)* [Cast blades of gas turbine engines (alloys, technology, coatings)], Moscow: MISIS, 2001.
4. Bulakhtina, M.A., *Osobennosti strukturnykh izmeneniy v liteinykh splavakh na osnove Ni_3Al pri termicheskoi obrabotke, postoyannykh i tsiklicheskiy nagruzheniyakh pri vysokikh temperaturakh* [Features of structural changes in Ni_3Al -based casting alloys during heat treatment, constant and cyclic loadings at high temperatures]: thesis for the degree of Candidate of Sciences (Eng), Moscow, 2022.
5. Kablov, E.N., Orlov, M.R., Ospennikova, O.G., Mekhanizmy obrazovaniya poristosti v monokristallicheskiy lopatkakh turbiny i kinetika ee ustraneniya pri goryachem izostaticheskom pressovanii [Mechanisms of porosity formation in single crystal turbine blades and kinetics of its elimination during hot isostatic pressing], *Yubileiny nauchno-tekhnichesky sbornik: 80 let. Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2012, pp. 20–43.
6. Petrushin, N.V., Bronfin, M.B., Kablov, E.N., Khatsinskaya, I.M., Chabina, E.B., Roshchina, I.N., Timofeeva, O.B., *Osobennosti strukturno-fazovykh prevrashcheniy pri termicheskoi obrabotke vysokorenivnykh zharoprochnykh splavov* [Features of structural and phase transformations during heat treatment of high-rhenium heat-resistant alloys], *Liteinye zharoprochnye splavy. Effekt S.T. Kishkina*, Moscow: Nauka, 2006, pp. 142–154.
7. Logunov, A.V., *Zharoprochnye nikelovye splavy dlya lopatok i diskov gazovykh turbin* [Heat-resistant nickel alloys for gas turbine blades and discs], Rybinsk: Gazoturbinnye tekhnologii, 2017.

8. Morozova, G.I., Timofeeva, O.B., Petrushin, N.V., Osobennosti struktury i fazovogo sostava vysokorenievogo zharoprochnogo splava [Features of the structure and phase composition of a high-rhenium heat-resistant alloy], *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2009, No 2 (644), pp. 10–16.

UDC 669.141.2:624.014.2:624.072.2

METAL QUALITY OF THE 19th-CENTURY CONSTRUCTION BEAMS

A.I. IGOLKIN¹, Cand Sc. (Eng), N.V. LEBEDEVA², Cand Sc. (Eng), S.N. PETROV², Dr Sc. (Eng)

¹Center of Scientific and Technical Services “Prometey”, 2n/29A Bakunin St, 191144 St Petersburg, Russian Federation

²NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: mail@crism.ru

Received December 26, 2024

Revised January 20, 2025

Accepted January 31, 2025

Abstract—The structure and properties of the metal of construction beams in buildings of the 19th century have been studied: the I-beam as a load-bearing element of the Monier brick vault and the rail as the base of the balcony. The metal of the I-beam was found as low-carbon steel, moderately contaminated with impurities. The mechanical properties of the metal are sufficiently high at the ambient temperature. However due to the great amount of the carbon macrosegregations the metal is prone to cold brittleness. The rail is made in England from the puddling iron. The metal is characterized by brittleness and it contains numerous non-metal inclusions enriched with phosphorous.

Keywords: steel, iron, 19th century, buildings, vaults, balcony, I-beam, rail, properties, structure, brittleness

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-43-49

ACKNOWLEDGMENTS

Experimental studies were performed on the equipment of the Center for Collective Use “Composition, Structure and Properties of Structural and Functional Materials” of the NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”.

REFERENCES

1. Ishkin, E.S., Letaev, V.R., Smyshlyaev, S.A., Dragunov, P.S., Osobennosti obsledovaniya nesushchikh konstruktov zdany dorevolutsionnoi postroiki [Features of the survey of load-bearing structures of buildings of pre-revolutionary construction], *NAU. Arhitektura*, 2015, No 7, pp. 37–39.
2. Ivanova, E.G., Strakhov, D.A., Sinyakov, L.N., Zimin, S.S., Sovmestnaya rabota stalnykh balok perekrytiya i svodov [Joint work of steel floor beams and arches], *Stroitelstvo unikalnykh zdany i sooruzheny*, 2018, No 10 (73), pp. 7–15.
3. Enkina, U.S., Tukkiya, A.L., Golykh, O.V., Otsenka nesushchei sposobnosti metallicheskh balok v sostave kirpichnykh svodov [Assessment of the bearing capacity of metal beams in brick vaults], *Molodoy ucheny*, 2020, No 50 (340), pp. 79–81.
4. Bedov, A.I., Gabitov, A.I., Domarova, E.V., Salov, A.S., Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie svodov iz kamennoi kladki, opirayushchikhsya na stalnye balki v perekrytiyakh [Stress-strain condition of masonry arches supported by steel beams in the floors], *Stroitelnye materialy*, 2023, No 5, pp. 58–65.
5. Minasyan, G.A., Prochnost i nesushchaya sposobnost kirpichnykh svodov Monie [The strength and bearing capacity of Monier brick vaults], *Vestnik Stroitelstvo*, 2020, No 2 (25), pp. 89–95.
6. Segedova, L.N., Moskalenko, A.I., Konstruktivnye resheniya balkonov v zhilykh domakh XIX–XX vekov [Constructive solutions of balconies in residential buildings of the 19th–20th centuries], *Stroitelstvo i arhitektura. Inzhenerny vestnik Dona*, 2013, No 4.
7. *Russkie uchenye-metallovedy: zhizn, deyatelnost i izbrannye trudy* [Russian Metal Scientists: Life, Work and Selected Works], Nakhimov, D.M., Rahshtadt, A.G. (Eds.), Moscow: Mashgiz, 1951.

8. Russky normalny metrichesky sortament fasonnogo zheleza: Uglovoe, tavoroe, dvutavoroe, korytnoe i zetovoe [Russian normal metric grade of shaped iron: Angular, T-shaped, I-shaped, trough and Z-shaped], *Postoyannaya soveshchatelnaya kontora zhelezozavodchikov*, St Petersburg: Tekhn. avtoli-togr. inzh. Dobroumova i De-Kelsh, 1899.

9. Rodionov, D.P., Schastlivtsev, V.M., Filippov, Yu.I., Struktura i mekhanicheskie svoystva uralskogo svarochnogo zheleza [Structure and mechanical properties of Ural welding iron], *Fizika metallov i metallovedenie*, 2004, V. 97, No 1, pp. 89–95.

10. Lesiuk, G., Szata, M., Bocian, M., The mechanical properties and microstructural degradation effects in an old low carbon steels after 100-years operating time, *Arch. Civ. Mech. Eng.*, 2015, V. 15, pp. 786–797.

11. Kossakowski, P.G., Mechanical properties of bridge steel from the late 19th century, *Appl. Sci.*, 2021, No 2 (11).

12. Paglia, C., Antonietti, C., Mosca, C., The deterioration of 100 years old coated steel bridge, *5th International conference on materials science and engineering sciences*, Corea, March 2021.

13. Lesiuk, G., Coreia, J., Smolnicki, M., et al., Fatigue crack growth rate of the long term operated puddle iron from the Eiffel bridge, *Metals*, 2019, No 9 (53).

UDC 621.777

INFLUENCE INVESTIGATION OF THE DIE GEOMETRY ON HYDROSTATIC PRESSURE IN THE EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING

A.N. GANGALO, Cand Sc. (Eng), S.V. MIROSHNICHENKO

*Donetsk Institute for Physics and Engineering named after A.A. Galkin, 72 St R. Luxemburg,
283114 Donetsk, Russian Federation. E-mail: al-gangalo@yandex.ru; svmiro@mail.ru*

Received January 9, 2025

Revised February 28, 2025

Accepted March 5, 2025

Abstract—Influence investigation of the angular die parameters on hydrostatic pressure during equal channel angular pressing was studied by finite element method. The channel intersection angle has been considered in the range 90–120°, and the outer die radius was studied in the range (0.05–1). The problem is solved under the assumption of a plane-strain state using a model of an ideal rigid-plastic body. The friction conditions with the coefficient of friction equal 0.1 are determined by Coulomb – Amonton’s law. The results of modeling the level of hydrostatic pressure on the axis of the deformation zone are compared with the analytical solution. The hydrostatic pressure distribution dependence at the input and output of the plastic deformation zone boundaries on the die geometry characteristics was estimated. The hydrostatic pressure heterogeneity in plastic deformation zone was determined.

Keywords: equal channel angular pressing, hydrostatic pressure, finite element method, die geometry, stress field, plastic deformation zone, heterogeneity

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-50-61

REFERENCES

1. Segal, V.M., Reznikov, V.I., Kopylov, V.I., et al., *Protsessy plasticheskogo strukturoobrazovaniya* [Plastic structure formation processes], Minsk: Nauka i tekhnika, 1994.

2. Edalati, K., Bachmaier, A., Beloshenko, V.A., Beygelzimer, Y. et al., Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances, *Materials Research Letters*, 2022, V. 10, No 4, pp. 163–256. DOI: 10.1080/21663831.2022.2029779

3. Valiev, R.Z., Zhilyaev, A.P., Langdon, T.G., *Obimnye nanostrukturnye materialy: fundamentalnye osnovy i primeneniya* [Bulk nanostructured materials: fundamental principles and applications], St Petersburg: Eko-Vektor, 2017.

4. Yilmaz, T.A., Totik, Y., Senoz, G.M.L., Bostan, B., Microstructure evolution and wear properties of ECAP treated Al-Zn-Mg alloy: effect of route, temperature and number of passes, *Mater. Today Commun.*, 2022, V. 33, p. 104628. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.104628

5. Alateyah, A.I., Ahmed, M.M.Z., Alawad, M.O., et al., Effect of ECAP die angle on the strain homogeneity, microstructural evolution, crystallographic texture and mechanical properties of pure magnesium: numerical simulation and experimental approach, *J. Mater. Res. Technol.*, 2022, V. 17, pp. 1491–1511.
6. Sabirov, I.N., Enikeev, N.A., Murashkin, M.Yu. et al., *Obiemye nanostrukturnye materialy s mnogofunktsionalnymi svoystvami* [Bulk nanostructured materials with multifunctional properties], St Petersburg: Eko-Vektor, 2018.
7. Utyashev, F.Z., Raab, G.I., Valitov, V.A., *Deformatsionnoe nanostrukturirovanie metallov i splavov* [Deformation nanostructuring of metals and alloys], St Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2020.
8. Sabbaghian, M., Mahmudi, R., Shin, K.S., A comparative study on the microstructural features and mechanical properties of an Mg-Zn alloy processed by ECAP and SSE, *Mater. Sci. Eng.*, 2022, V. 845, June 15, Art.143218. DOI: 10.1016/j.msea.2022.143218
9. Patil Basavaraj, V., Chakkingal, U., Prasanna Kumar, T.S., Study of channel angle influence on material flow and strain inhomogeneity in equal channel angular pressing using 3D finite element simulation, *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, V. 209, pp. 89–95.
10. Kim, J.K., Kim, W.J., Analysis of deformation behavior in 3D during equal channel angular extrusion, *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, V. 176, pp. 260–267.
11. Luis Perez, C.J., Gonzales, P., Garces, Y., Equal channel angular extrusion in a commercial Al-Mn alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, V. 143–144, pp. 506–511.
12. Bowen, J.R., Gholinia, A., Roberts, S.M., et al., Analysis of the billet deformation behavior in equal channel angular extrusion, *Materials Science and Engineering A*, 2000, V. 287, pp. 87–99.
13. Kim, H.S., Evaluation of strain rate during equal-channel angular pressing, *Journal of Materials and Research*, 2002, V. 17, pp. 172–178.
14. Spuskanyuk, V.Z., Gangalo, A.N., Davidenko, A.A., Vliyanie usloviy ravnokanalnogo uglovogo pressovaniya na skorost deformatsii zagotovok [Influence of equal-channel angular pressing conditions on the deformation rate of workpieces], *FTVD*, 2010, V. 20, No 4, pp. 135–147.
15. Li, S., Bourke, M.A.M., Beyerlein, I.J., et al., Finite element analysis of the plastic deformation zone and working load in equal channel angular extrusion, *Materials Science and Engineering A*, 2004, V. 382, pp. 217–236.
16. Nagasekhar, A.V., Tick-Hon, Y., Li, S., Seow, H.P., Stress and strain histories in equal channel angular extrusion/pressing, *Materials Science and Engineering A*, 2006, V. 423, pp. 143–147.
17. Nagasekhar, A.V., Tick-Hon, Y., Li, S., Seow, H.P., Deformation behavior and strain homogeneity in equal channel angular extrusion/pressing, *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, V. 192–193, pp. 449–452.
18. Yang, F., Saran, A., Okazaki, K., Finite element simulation of equal channel angular extrusion, *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, V. 166, pp. 71–78.
19. Zou, Z., Xu, S., Gao, R., Xue, X., et al., Deformation mechanism finite element analysis and die geometry optimization of magnesium alloys by equal channel angular processing, *Int. Journal of Simul. Multidisci. Des. Optim.*, 2023, V. 14, Art. 15, pp. 2–7. URL: <https://doi.org/10.1051/smdo/2023013>
20. Xu, S., Zhao, G., Ren, G., Ma, X., Numerical simulation and experimental investigation of pure copper deformation behavior for equal channel angular pressing/extrusion processes, *Computation material science*, 2008, V. 44, pp. 251–259.
21. Singh, N., Agrawal, M.K., Verma, S.K., Tiwari, A.K., Impact design of die parameters on severe plastic deformation during equal channel angular pressing: An overview, *E3S Web of Conferences (ICMPC)*, 2023, V. 430, Art. 01255. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343001255>
22. Singh, N., Agrawal, M.K., Verma, S.K., Tiwari, A.K., A Review on effect of stress and strain distribution on the AA5083 with respect to different channel angle of ECAP, *International Research Journal on Advanced Science Hub*, 2022, V. 4, Issue 3, pp. 57–66. URL: <https://rspsciencehub.com/index.php/journal/article/view/577/482> (reference date 06/05/2025)
23. Kim, H.S., Seo, M.H., Hong, S.I., Plastic deformation analysis of metals during equal channel angular extrusion, *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, V. 113, pp. 622–626.

24. Raab, G.I., Razvitie metodov intensivnoi plasticheskoi deformatsii dlya polucheniya dlinnomernykh nanostrukturnykh polufabrikatov [Development of intensive plastic deformation methods for obtaining long-length nanostructured semi-finished products], *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy*, 2007, V. 17, No 3, pp. 89–97.

25. Segal, V.M., Slip line solutions, deformation mode and loading history during equal channel angular extrusion, *Materials Science and Engineering A*, 2003, V. 345, pp. 36–46.

26. Nakashima, K., Horita, Z., Nemoto, M., Langdon, T.G., Influence of channel angle on the development of ultrafine grains in equal channel angular pressing, *Acta Mater.*, 1998, V. 46, p. 1589.

27. Dalla Torre, F.H., Pereloma, E.V., Davies, C.H.J., Strain hardening behavior and deformation kinetics of Cu deformed by equal channel angular extrusion from 1 to 16 passes, *Acta Mater.*, 2006, V. 54, pp. 1135–1146.

28. Grudev, A.P., Zilberg, Yu.V., Tilik, V.T., *Trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem* [Friction and lubricants in metalworking by pressure]: reference book, Moscow: Metallurgiya, 1982.

29. Alkorta, J., Sevillano, J.G., A comparison of FEM and upper-bound type analysis of equal-channel angular pressing (ECAP), *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, V. 141, pp. 313–318.

30. Eivani, A.R., Taheri, A.K., An upper bound solution of ECAE process with outer curved corner, *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, V. 182, pp. 555–563.

31. Altan, B.S., Purcek, G., Miskioglul, I., An upper-bound analysis for equal-channel angular extrusion, *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, V. 168, Is. 1, pp. 137–146.

UDC 621.762.22:537.622

HIGH-ENTROPY MAGNETIC ALLOY $\text{Fe}_x\text{Co}_6\text{Al}_3\text{Ni}_2\text{Si}$, PRODUCED BY MECHANICAL ALLOYING AND SPARK PLASMA SINTERING

A.E. KIM, A.K. MAZEEVA, Cand. Sc. (Eng), N.G. RAZUMOV, Dr Sc. (Eng), E.V. VOLOKITINA,
A.A. POPOVICH, Dr Sc. (Eng)

*Peter the Great St Petersburg Polytechnic University, 29 Polytechnicheskaya St, 195251
St Petersburg, Russian Federation. E-mail: artem_7.kim@mail.ru*

Received November 5, 2024

Revised December 2, 2024

Accepted December 2, 2024

Abstract—In this work, a high-entropy alloy $\text{Fe}_x\text{Co}_6\text{Al}_3\text{Ni}_2\text{Si}$ (where $x = 5, 6, 8$) was obtained by mechanical alloying. The microstructure, phase and granulometric compositions of the obtained powders were studied. The required specific energy dose for the formation of a homogeneous solid solution ($D = 30 \text{ W}\cdot\text{h/g}$) was determined. Using the CALPHAD method, a phase diagram was constructed for the multicomponent $\text{Fe}_x\text{Co}_6\text{Al}_3\text{Ni}_2\text{Si}$ system. The $\text{Fe}_8\text{Co}_6\text{Al}_3\text{Ni}_2\text{Si}$ alloy powder after mechanical alloying showed a saturation magnetization of 154 emu/g and a coercive force of 53 Oe. Compact samples were obtained from the $\text{Fe}_8\text{Co}_6\text{Al}_3\text{Ni}_2\text{Si}$ alloy powder in a spark plasma sintering installation and annealed at temperatures of 900, 950 and 1000°C. The microstructure and phase composition of the samples after annealing were studied. Tests of magnetic properties of samples showed that the saturation magnetization of samples ranged from 159 to 168 emu/g, coercive force – from 8.9 to 29.2 Oe. Compressive strength of samples ranged from 2190 to 2680 MPa, and microhardness – from 681 to 811 HV.

Keywords: high entropy alloy, mechanical alloying, spark plasma sintering, CALPHAD

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-62-74

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment for Fundamental Scientific Research 075-03-2024-004).

REFERENCES

1. Malaya, E.V., Reshenkin, A.S., Goncharov, R.A., Vorobiev, S.S., Svoistva poroshkovykh kompozitsionnykh magnitomyagkikh materialov elektrotekhnicheskogo naznacheniya [Properties of powder composite soft magnetic materials for electrical appointment], *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii*, 2024, No 5, pp. 45–48.

2. Semin, A.P., Gromov, V.E., Ivanov, Yu.F., Panin, S.V., Kolubaev, E.A., Litovchenko, I.Yu., Borovsky, S.V., Struktura i svoistva lenty magnitomyakogo splava Fe-Co-Ni-Si-B, izgotovlennoy metodom spinningovaniya [Structure and properties of the Fe-Co-Ni-Si-B soft magnetic alloy tape manufactured by the spinning method], *Fizicheskaya mekhanika*, 2024, V. 27, No 5, pp. 63–70.
3. Sai Ram, B., Paul, A.K., Kulkarni, S.V., Soft magnetic materials and their applications in transformers, *J. Magn. Magn. Mater.*, 2021, V. 537, No 1, p. 168210. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168210>
4. Chekhunova, A.M., Vliyanie termicheskoi obrabotki na magnitnye i mekhanicheskie svoistva stali 10KhSND [Effect of heat treatment on magnetic and mechanical properties of 10KhSND steel], *Evrasiyskiy soyuz uchenykh*, 2015, No 12-5 (21), pp. 116–119.
5. Weir, G., Leveneur, J., Long, N., Magnetic susceptibility of soft magnetic composite materials, *J. Magn. Magn. Mater.*, 2022, V. 551, No 1, p. 169103. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169103>
6. Ferraris, L., Franchini, F., Pošković, E., Actis Grande, M., Bidulský, R., Effect of the Temperature on the Magnetic and Energetic Properties of Soft Magnetic Composite Materials, *Energies*, 2021, V. 14, No 15, p. 4400. DOI: [10.3390/en14154400](https://doi.org/10.3390/en14154400)
7. Talaat, A., Suraj, M.V., Byerly, K., Wang, A., Wang, Y., Lee, J.K., Ohodnicki, P.R., Review on soft magnetic metal and inorganic oxide nanocomposites for power applications, *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, V. 870, p. 159500. DOI: [10.1016/j.jallcom.2021.159500](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159500)
8. Zeraati, M., Feizabad, M., Khayati, G., An investigation of the magnetic, mechanical, and kinetic characteristics of CuCrFeTiNi high entropy alloy by mechanical alloying and spark plasma sintering, *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, V. 958, p. 170347. DOI: [10.1016/j.jallcom.2023.170347](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170347)
9. Lin, M., Zhao, R., Liao, Y., Li, Y., Zhang, X., Determining magnetic properties of high entropy alloys by molar volume difference predicted by machine learning, *AIP Advances*, 2024, V. 14, No 4, pp. 045204–045204-6. DOI: [10.1063/5.0165470](https://doi.org/10.1063/5.0165470)
10. Tsai, M.-H., Physical Properties of High Entropy Alloys, *Entropy*, 2013, V. 15, No 12, pp. 5338–5345. DOI: [10.3390/e15125338](https://doi.org/10.3390/e15125338)
11. Kitagawa, J., Shintakuin, D., Magnetic Properties of High-Entropy Alloy FeCoNiTi // *Materials Science and Engineering A*, 2024, V. 9 (35), pp. 37197–37204. DOI: [10.1021/acsomega.4c04556](https://doi.org/10.1021/acsomega.4c04556)
12. Zhao, R.-F., Ren, B., Zhang, G.-P., Liu, Z.-X., Cai, B., Zhang, J., CoCrxCuFeMnNi high-entropy alloy powders with superior soft magnetic properties, *J. Magn. Magn. Mater.*, 2019, V. 491, p. 165574.
13. Zhu, J., Lv, M., Liu, C., Tan, X., Xu, H., Effect of neodymium and yttrium addition on microstructure and DC soft magnetic property of dual-phase FeCoNi(CuAl)_{0.8} high-entropy alloy, *J. Rare Earths*, 2023, V. 41, No 10, pp. 1562–1567.
14. 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, p. 168461.
15. Xiaohua Tan, X., Chen, L., Lv, M., Peng, W., Xu, H., Tailoring Mechanical and Magnetic Properties in Dual-Phase FeCoNi(CuAl)_{0.8} High-Entropy Alloy, *Materials*, 2023, V. 16 (22), p. 7222. DOI: [10.3390/ma16227222](https://doi.org/10.3390/ma16227222)
16. Setia Budi, S., Sukro Muhab, S., Purwanto, A., Kurniawan, B., Manaf, A., Effect of the Electrodeposition Potential on the Magnetic Properties of FeCoNi Films, *Materials Science-Poland*, 2019, V. 37 (3), pp. 389–394. DOI: [10.2478/msp-2019-0044](https://doi.org/10.2478/msp-2019-0044)
17. Ouyang, G., Chen, X., Liang, Y.F., Macziewski, C., Cui, J., Review of Fe-6.5 wt% Si high silicon steel—A promising soft magnetic material for sub-kHz application, *J. Magn. Magn. Mater.*, 2019, V. 481, 1 July, pp. 234–250. DOI: [10.1016/j.jmmm.2019.02.089](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.02.089)
18. Xiaohua Tan, X., Li, J., Zhang, S., Xu, H., Enhanced DC and AC Soft Magnetic Properties of Fe-Co-Ni-Al-Si High-Entropy Alloys via Texture and Iron Segregation, *J. Mater. Sci. Technol.*, 2024, V. 14 (10), p. 1113. DOI: [10.3390/met14101113](https://doi.org/10.3390/met14101113)
19. Feuerbacher, M., Lienig, T., Thomas, C., A single-phase bcc high-entropy alloy in the refractory Zr-Nb-Ti-V-Hf system, *Scripta Materialia*, 2018, V. 152, pp. 40–43. DOI: [10.1016/j.scriptamat.2018.04.009](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.04.009)
20. Yang, T., Zhao, Y.L., Tong, Y., Jiao, Z.B., Wei, J., Cai, J.X., Han, X.D., Chen, D., Hu, A., Kai, J.J., Multicomponent intermetallic nanoparticles and superb mechanical behaviors of complex alloys, *Science*, 2018, V. 362, pp. 933–937. DOI: [10.1126/science.aas8815](https://doi.org/10.1126/science.aas8815)

21. Zhao, Y.J., Qiao, J.W., Ma, S.G., Gao, M.C., Yang, H.J., Chen, M.W., Zhang, Y., A hexagonal close-packed high-entropy alloy: the effect of entropy, *Materials & Design*, 2016, V. 96, pp. 10–15. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.01.149
22. Liliensten, L., Couzinié, J.P., Perrière, L., Bourgon, J., Emery, N., Guillot, I., New structure in refractory high-entropy alloys, *Materials Letters*, 2014, V. 132, pp. 123–125. DOI: 10.1016/j.matlet.2014.06.064
23. Lu, L., Chen, X., Huang, X., Lu, K., Revealing the maximum strength in nanotwinned copper, *Science*, 2009, V. 323, pp. 607–610. DOI: 10.1126/science.1167641
24. Gao, M.C., Zhang, B., Guo, S.M., Qiao, J.W., Hawk, J.A., High-entropy alloys in hexagonal close-packed structure, *Metallurgical and Materials Transactions A.*, 2016, V. 47, pp. 3322–3332. DOI: 10.1007/s11661-015-3091-1
25. Chen, C., Zhang, H., Fan, Y., Zhang, W., Ran Wei, R., Tan Wang, T., Tao Zhang, T., Li, F., A novel ultrafine-grained high entropy alloy with excellent combination of mechanical and soft magnetic properties, *J. Magn. Magn. Mater.*, 2020, V. 502, p. 166513. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.166513
26. Li, Z., Tasan, C.C., Pradeep, K.G., Raabe, D., A trip-assisted dual-phase high-entropy alloy: grain size and phase fraction effects on deformation behavior, *Acta Materialia*, 2017, V. 131, pp. 323–335. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.03.069
27. Streletsky, A.N., Measurements and calculation of main parameters of powder mechanical treatment in different mills, *Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Application of Mechanical Alloying*, 1993, pp. 51–58
28. Takacs, L., McHenry, J.S., Temperature of the milling balls in shaker and planetary mills, *Journal of Materials Science*, 2006, V. 41, pp. 5246–5249.
29. Kim, A., Makhmutov, T., Razumov, N., Silin, A., Popovich, A., Zhu, J.-N., Popovich, V., Synthesis of NiTi alloy powders for powder-based additive manufacturing, *Materials Today: proceedings 2020 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment*, 2020, V. 30, pp. 679–682. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.521

UDC 621.762.22

FORMATION OF COMPOSITE POWDERS OF MULTICOMPONENT ALLOYS OF THE $\text{Al}_x\text{NiCoFeCr}$ SYSTEM OBTAINED BY MECHANOSYNTHESIS

E.D. NESTEROVA, T.I. BOBKOVA, Cand. Sc. (Eng), L.V. MUKHAMEDZYANOVA,
M.V. KHROMENKOV, N.A. SERDYUK, Cand Sc. (Eng)

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

Received April 27, 2024

Revised January 15, 2025

Accepted February 13, 2025

Abstract—The paper studies formation of composite powders of the $\text{Al}_x\text{NiCoFeCr}$ system at $1.6 \leq x \leq 60$ at%, suitable for coatings obtained by the microplasma spraying. The phase composition of all combinations was investigated. An analysis of the granulometric composition, uniformity of the distribution of elements in the synthesized conglomerates was carried out, and the Vickers microhardness of the powders was measured. For the equiatomic system, the microhardness indicators were 6–9 GPa with a range of values up to 16%, the morphology of the particles was round, the diameter was from 6 to 63 μm . It has been established that for microplasma spraying it is advisable to use powders containing aluminum $20 \leq x \leq 60$ at%.

Keywords: high-entropy alloys, multicomponent systems, composite powder, morphology, granulometric composition, microhardness

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-75-85

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation, project No 21-73-30019.

REFERENCES

- 1 Avvakumov, E.G., Gusev, A.A., *Mekhanicheskie metody aktivatsii v pererabotke prirodnogo i tekhnogennogo syriya* [Mechanical activation methods in the processing of natural and man-made raw materials]: study guide, Novosibirsk: IKhTTM SO RAN, 2009.
- 2 Takacs, L., The historical development of mechanochemistry, *Chemical Society Reviews*, 2013, V. 42, Is. 18, pp. 7649–7659.
- 3 Lapshin, O.V., Boldyreva, E.V., Boldyrev, V.V., Rol' smesheniya i dispergirovaniya v mekhan-okhimicheskoy sinteze [The role of mixing and dispersion in mechanochemical synthesis]: review, *Zhurnal neorganicheskoy khimii*, 2021, V. 66, No 3, pp. 402–424.
- 4 Lovshenko, F.G., Lovshenko, G.F., *Kompozitsionnye nanostrukturnye mekhanicheski legirovannye poroshki dlya gazotermicheskikh pokrytiy* [Composite nanostructured mechanically alloyed powders for gas thermal coatings], Mogilev: Belorus.-Ros. un-t, 2013.
- 5 Rempel, A.A., Valeeva, A.A., *Materialy i metody nanotekhnologii* [Materials and methods of nanotechnology]: study guide, Ekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2015.
- 6 Chicardi, E., Gallego-Parra, S., Salvo, C., Sepúlveda, R., Efficient single-step mechanosynthesis route of nanostructured $\text{Hf}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{V}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Co}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$ High Entropy Carbonitride Powder, *Ceramics International*, 2024, V. 50, Is. 14, pp. 26059–26064.
- 7 Martinez-Garcia, A., Estrada-Guel, I., Reguera, E., Amaro-Hernandez, R., González, S., Garay-Reyes, C.G., Martínez-Sánchez, R., Design and mechanosynthesis of Low-Weight High-Entropy Alloys with hydrogen storage potential properties, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, V. 50, Part D, pp. 670–684.
- 8 Rafai, H., Smili, B., Sakher, E., Sakmeche, M., Chadli, S., Tigrine, R., Pesci, R., Bououdin, M., Bellucci, S., Temperature-dependent structural and magnetic properties of mechanically alloyed $\text{Ni}_{80}\text{Co}_{17}\text{Mo}_3$ powder mixture, *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, V. 999, p. 174981.
- 9 Murty, B.S., Yeh, J.W., Ranganathan, S., *High Entropy Alloys*, Butterworth-Heinemann Ltd (Verlag), 2014, p. 204.
- 10 Cantor, B., Multicomponent and High Entropy Alloys, *Entropy*, 2014, V. 16, pp. 4749–4768.
- 11 Ruiz-Esparza-Rodriguez, M.A., Garay-Reyes, C.G., Mendoza-Duarte, J.M., Estrada-Guel, I., Hernandez-Rivera, J.L., Cruz-Rivera, J.J., Gutierrez-Castaneda, E., Gonzalez S., Garay-Tapia, A.M., Martinez Sanchez, R., Evaluation of High-Frequency Induction Heat Sintering and Conventional Sintering in $\text{Al}_x\text{CoCrFeMnNi}$ High-Entropy Alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, V. 910, p. 164780.
- 12 Cantor, B., Multicomponent high-entropy Cantor alloys, *Progress in Materials Science*, 2021, V. 120, p. 100754.
- 13 Munitz, A., Salhov, S., Hayun, S., Frage, N., Heat treatment impacts the microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, V. 683, pp. 221–230.
- 14 Savinov, R., Su, Yu., Wang, J., Wang, Ya., Shi, J., Study of microstructure and properties of in-situ alloyed AlCoCrFeNi(Y) high-entropy alloy by laser directed energy deposition method, *Manufacturing Letters*, 2022, V. 33, pp. 678–685.
- 15 Gorban, V.F., Krapivka, N.A., Firsov, S.A., Vysokoentropiynye splavy – elektronnaya kontseptsiya – fazovy sostav – parametr reshetki – svoystva [High-entropy alloys – electronic concept – phase composition – lattice parameter – properties], *FMM*, 2017, V. 118, No 10, pp. 1017–1029.
- 16 Debski, A., Debski, R., Gasior, W., New features of Entall database: comparison of experimental and model formation enthalpies, *Archives of Metallurgy and Materials*, 2014, V. 59, No 4, pp. 1337–1343.
- 17 Sholkin, S.E., Mikroplazmennoe napylenie funktsionalnykh nanostrukturirovannykh pokrytiy na osnove Al_2O_3 [Microplasma deposition of functional nanostructured coatings based on Al_2O_3], *Novye materialy i tekhnologii proizvodstva*, 2010, No 6 (60), pp. 39.
- 18 Korobov, Yu.S., Panov, V.I., Razikov, N.M., Analiz svoystv gazotermicheskikh pokrytiy. Ch.1: Osnovnye metody i materialy gazotermicheskogo napyleniya [Analysis of the properties of gas-thermal coatings. Part 1: Basic methods and materials of gas-thermal spraying]: a textbook, Ekaterinburg: Izd-vo Ural. universiteta, 2016.

APPLICATION OF HOT ISOSTATIC PRESSING TO INCREASE THE PROPERTIES OF TITANIUM PSEUDO- α -ALLOY

V.P. LEONOV¹, Dr Sc. (Eng), E.V. CHUDAKOV¹, Cand Sc. (Eng), Yu.Yu. MALINKINA¹, Cand Sc. (Eng),
I.M. GARANINA¹, S.D. DRUGACHUK¹, Yu.M. MARKOVA¹, D.A. KARYAGIN²,
M.O. SMIRNOV², Cand Sc. (Eng)

¹NRC "Kurchatov Institute" – CRISM "Prometey", 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg,
Russian Federation. E-mail: mail@crism.ru

²Stupino Metallurgical Company, 2 Pristantsionnaya St, 142800 Moscow Region, Stupino,
Russian Federation. E-mail: info@cmk-group.ru

Received December 16, 2024

Revised March 6, 2025

Accepted March 14, 2025

Abstract—The article presents the results of the study of mechanical and operational properties of the metal of the experimental model made of titanium pseudo- α -alloy PT-3V, obtained using hot isostatic pressing (HIP technology). The mechanical properties, as well as the performance characteristics of the experimental model, fully comply with the requirements of the regulatory documentation imposed on deformed semi-finished products of similar sections. The microstructural studies carried out in various thicknesses demonstrate the isotropy of the compacted part compared to the deformed semi-finished product.

Keywords: titanium pseudo- α -alloy, compacted material, hot isostatic pressing, mechanical and operational properties

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-86-98

ACKNOWLEDGMENTS

Experimental studies were performed on the equipment of the Center for Collective Use "Composition, Structure and Properties of Structural and Functional Materials" of the NRC "Kurchatov Institute" – CRISM "Prometey".

REFERENCES

1. *Metallurgiya granul* [Metallurgy of granules], A.F. Belov (Ed.), Moscow: VILS, 1983.
2. Samarov, V., Seliverstov, D., Raisson, G., Goloveshkin, V., Physical Principles of Shape and Densification Control during HIP, *Proceedings of the 2011 International Conference on Hot Isostatic Pressing*, Kobe, Japan, 2011.
3. Aleksandrov, A.V., Kuznetsov, S.Yu., Demchenkov, G.G., Afonin, E.A., Perspektivy dalneishego razvitiya i sovershenstvovaniya granulnoi metallurgii [Prospects for further development and improvement of pellet metallurgy], *Titan*, 2015, No 3, pp. 39–41.
4. Borzetsovskaya, K.M., Kuzin, V.F., Ryabova, R.M., Issledovanie svoystv kompaktoy iz granul vyso-koprechnykh titanovykh splavov VT22 i VT23 [Investigation of the properties of compacts made of granules of high-strength titanium alloys VT22 and VT23], *Trudy VIAM*, pp. 434–438.
5. Samarov, V., Khaykin, R., Nepomnyatschy, V., Koshelev, V., Khomyakov, E., Out-gassing of powders before HIP: problems and solutions, *Proceedings of the International Conference HIP*, May 20–22, 2002, VILS, Moscow, 2002.
6. Garibov, G.S., Grits, N.M., Dobatkin, V.I., Metallurgiya granul zharoprechnykh nikelovykh splavov [Metallurgy of granules of heat-resistant nickel alloys], *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2015, No 2, pp. 34–39.
7. Zhang, G.Q., Research and Development of High Temperature Structural Materials for Aero-Engine Application, *Acta Metallurgica sinica*, 2005, V. 18, No 4, pp. 443–452.
8. Leonov, V.P., Malinkina, Yu.Yu., Chudakov, E.V., Drugachuk, S.D., Khachatryan, I.M., Sravnitelny analiz tekhnologicheskikh svoystv i mikrostruktury titanovykh poroshkov razlichnykh klassov [Comparative analysis of technological properties and microstructure of titanium powders of various classes], *Voprosy Materialovedeniya*, 2024, No 1 (117), pp. 1–13.

9. Oryshchenko, A.S., Leonov, V.P., Malinkina, Yu.Yu., Khachatryan, I.M., Iksanov, M.V., Petrov, S.N., Karyagin, D.A., Struktura i svoistva psevd- α -titanovogo splava, poluchennogo metodom goryachego izostaticheskogo pressovaniya [Structure and properties of a pseudo- α -titanium alloy obtained by hot isostatic pressing], *Titan*, 2023, No 1 (77), pp. 29–37.

10. National Standard GOST 1497–2023: *Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie* [Metals. Tensile testing methods].

11. National Standard GOST 9454–78: *Metally. Metod ispytaniya na udarny izgib pri ponizhennykh, komnatnoi i povyshennykh temperaturakh* [Metals. Impact bending test method at low, room and elevated temperatures].

12. National Standard GOST 25.502–79: *Raschety i ispytaniya na prochnost v mashinostroenii. Metody mekhanicheskikh ispytaniy metallov. Metody ispytaniy na ustalost* [Calculations and strength tests in mechanical engineering. Methods of mechanical testing of metals. Fatigue testing methods].

13. National Standard GOST 10145–81: *Metod ispytaniya na dlitelnyuyu prochnost* [Long-term strength test method].

14. National Standard GOST 25.506–85: *Raschety i ispytaniya na prochnost. Metody mekhanicheskikh ispytaniy metallov. Opredelenie kharakteristik treshchinostoikosti (vyazkosti razrusheniya) pri staticheskom nagruzhении* [Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of metals. Determination of crack resistance (fracture toughness) characteristics under static loading].

15. National Standard GOST 3248–81: *Metally: Metod ispytaniya na polzuchest* [Metals: Creep test method].

16. National Standard GOST 9450–76 (ST SEV 1195–78): *Izmerenie mikrotverdosti vdavlivaniem almaznykh nakonechnikov* [Measurement of microhardness by indentation of diamond tips].

17. Technical specifications TU 1-5-357–95: *Listy i plity iz titanovykh splavov marok PT-3V i 40*. [Sheets and plates made of titanium alloys of grades PT-3B and 40].

18. Oryshchenko, A.S., Polkin, I.S., Leonov, V.P., Mikhailov, V.I., Osobennosti primeneniya titanovoi svarochnoi provoloki pri izgotovlenii konstruktsiy morskoi tekhniki [Features of titanium welding wire application in the manufacture of marine engineering structures], *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2021, No 2, pp. 59–62.

UDC 678.073:621.763

STUDY OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM OXIDE FILAMENT BASED ON POLYETHYLENE TEREPHTHALATE GLYCOL FOR FDM-PRINTING

S.A. SIDOROVA¹, A.N. KHRUSTALEV¹, A.V. LOSEV², N.A. RASHUTIN¹

¹MIREA – Russian Technological University, 78 Vernadsky Ave, 119454 Moscow, Russian Federation

²National Research Center “Kurchatov Institute” – VIAM, 17 Radio St, 105005 Moscow, Russian Federation. E-mail: admin@viam.ru

Received January 29, 2025

Revised March 5, 2025

Accepted March 25, 2025

Abstract—Fused deposition modeling (FDM) is one of the most common additive manufacturing technologies based on the extrusion of thermoplastic filament. The creation of composite materials for FDM-printing by introducing dispersed fillers into a thermoplastic matrix allows obtaining parts with the required set of characteristics. In this paper, an attempt was made to improve the wear resistance of PETG-based polymer composite materials (PCM) samples by modifying them with aluminum oxide micropowder. The optimal content of the modifying component was determined, thus ensuring the 3D-printing process and reducing the wear of such PCM.

Keywords: FDM-printing, thermoplastics, composite polymer materials, wear resistance, thermoplastic filament

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-99-109

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out using the equipment of the CCU RTU MIREA with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation. The work was carried out using the equipment of the CCU "Climatic Testing" of the National Research Center "Kurchatov Institute" – VIAM.

REFERENCES

1. Kondrashov, S.V., Pykhtin, A.A., Larionov, S.A., Funktsionalnye materialy, poluchennye sposobom FDM-pechati [Functional materials obtained by FDM printing]: review, *Trudy VIAM*, 2021, No 3 (97), pp. 44–57. URL: <http://www.viam-works.ru> (reference date 30/01/2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-44-57
2. Sokolova, L.V., Losev, A.V., Politova, E.D., Gibkost prokhodnykh tsepei i nanoorganizatsiya polimerov [Flexibility of flow chains and nanoorganization of polymers], *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A*, 2020, V. 62, No 2, pp.1–14.
3. Kuzmicheva, G.M., Levko, A.A., Manomenova, V.L., et al., Growth, structural effects, and non-linear and spectroscopic properties of nanocomposites based on α -NiSO₄·6H₂O single crystals with TiO₂ nanoparticles or sols, *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, V. 965, p. 171369. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.171369
4. Yansen, H., Dudchig, S., Aneziris, K.G., MgO–C-beton s novymi svoistvami [MgO–C-concrete with new properties], *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2009, No 1–2, pp. 47–50. EDN NBIGMJ.
5. Sokolova, L.V., Losev, A.V., Politova, E.D., Vliyanie dioksida titana na strukturu nanoorganizatsii dvoynykh sopolimerov [Effect of titanium dioxide on the nanoorganization structure of double copolymers], *Trudy VIAM*, 2024, No 4 (134), pp. 64–82. URL: <http://www.viam-works.ru> (reference date 30/01/2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-64-82. EDN SQSPQW.
6. Sokolova, L.V., Khurstalev, A.N., Volkov, V.V., Pereverzeva, S.Yu., Nanoorganizatsiya polizoprenov i ikh deformiruemost [Nanoorganization of polyzoprenes and their deformability], *Butlerovskie soobshcheniya*, 2023, V. 73, No 1, pp. 50–61. DOI 10.37952/ROI-jbc-01/23-73-1-50. EDN YEYMUK.
7. Kablov, E.N., Kondrashov, S.V., Melnikov, A.A., et al., Issledovanie vliyaniya teplovogo rezhima FDM-pechati na strukturirovanie i koroblenie obraztsov polietilena [Investigation of the effect of the thermal regime of FDM printing on the structuring and warping of polyethylene samples], *Trudy VIAM*, 2021, No 7 (101), pp. 48–58. URL: <http://www.viam-works.ru> (reference date 30.01.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-48-58
8. Cuenca Pérez, D.E., Zumba Novay, E.G., Castillo Mazon, H.P., Quincuela Liamuca, J.P., Elasticity and plasticity of PLA, PETG, ABS polymers for printing automotive parts, *Espiraes Revista Multidisciplinaria de investigación*, 2024, V. 8, No 4, pp. 51–61.
9. Szykiedans K., Credo W., Osiński D. Selected mechanical properties of PETG 3-D prints, *Procedia Engineering*, 2017, V. 177, pp. 455–461.
10. Valvez, S., Silva, A.P., Reis P.N.B., Optimization of printing parameters to maximize the mechanical properties of 3D-printed PETG-based parts, *Polymers*, 2022, V. 14, No 13.
11. Kumar, M.A., Khan, M.S., Mishra, S.B., Effect of machine parameters on strength and hardness of FDM printed carbon fiber reinforced PETG thermoplastics, *Materials Today: Proceedings*, 2020, V. 27, pp. 975–983.
12. Shumeiko, I.A., Zaichenko, N.O., Analiz plastmass pri ikh vybore dlya 3D-pechati modeli vetro-energeticheskoi ustanovki [Analysis of plastics when choosing them for 3D-printing of a model of a wind power plant], *Universum: tekhnicheskie nauki*, 2021, No 3 (84), pp. 74–77.
13. Chen, T., Zhang, W., Zhang, J., Alkali resistance of poly (ethylene terephthalate) (PET) and poly (ethylene glycol-co-1, 4-cyclohexanedimethanol terephthalate) (PETG) copolyesters: The role of composition, *Polymer Degradation and Stability*, 2015, V. 120, pp. 232–243.
14. Camargo, J.R., Crapnell, R.D., Bernalte, E., et al., Conductive recycled PETG additive manufacturing filament for sterilisable electroanalytical healthcare sensors, *Applied Materials Today*, 2024, V. 39, p. 102285. DOI: 10.1016/j.apmt.2024.102285
15. Khurstalev, A.N., Smirnov, A.V., Arbanas, L.A., et al., Dielektricheskie svoistva polimernykh kompozitsionnykh materialov s keramicheskimi napolnitelyami dlya SVCh-priborov i oborudovaniya [Dielectric

properties of polymer composite materials with ceramic fillers for microwave devices and equipment], *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii*, 2024, No 4 (77), pp. 95–116. DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-95-116

16. *Primenenie PolyMax™ PETG ESD v proizvodstve gibkikh ploskikh kabelei* [Application of PolyMax™ PETG ESD in the production of flexible flat cables]: elektronnyy resurs, 2024. URL: <https://lider-3d.ru/blog/stati/primenenie-polymax-petg-esd-v-proizvodstve-gibkikh-ploskikh-kabelei/> (reference date: 31/07/2024)

17. Yan, C., Kleiner, C., Tabigue, A., et al., PETG: applications in modern medicine, *Engineered Regeneration*, 2023, V. 5 (1), pp. 45–55. DOI: 10.1016/j.engreg.2023.11.001

18. Batista, M., Lagomazzini, J.M., Ramirez-Peña, M., Vazquez-Martinez, J.M., Mechanical and Tribological Performance of Carbon Fiber-Reinforced PETG for FFF Applications, *Appl. Sci.*, 2023, V. 13, p. 12701. DOI: 10.3390/app132312701

19. Vijayasankar, K.N., Bonthu, D., Doddamani, M., Pati, F., Additive Manufacturing of Short Silk Fiber Reinforced PETG Composites, *Materials Today Communications*, 2022, V. 33, p. 104772. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.104772

20. Rijckaert, S., Daelemans, L., Cardon, L., et al., Continuous Fiber-Reinforced Aramid/PETG 3D-Printed Composites with High Fiber Loading through Fused Filament Fabrication, *Polymers*, 2022, V. 14, No 2, p. 16. DOI 10.3390/polym14020298, EDN YTDYJC.

21. Kumar, J., Negi, S., Mishra, V., 3D printed PETG/cenosphere syntactic foam composites for light-weight structural applications, *Materials Letters*, 2024, V. 355, p. 135493. DOI: 10.1016/j.matlet.2023.135493

22. Silva, P.A.P., Oréfice, R.L., Da Silva, A.B., Santos, J.P.F., Self-healing polymer blend based on PETG and EMAA, *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, V. 138, No 14, p. 50148. DOI: 10.1002/app.50148, EDN LZQWVB.

23. Kholodkova, A.A., Korniyushin, M.V., Smirnov, A.V., et al., Kholodnoe spekanie α - i γ -modifikatsii oksidirovannogo alyuminiya: nizkotemperaturnyy sposob polucheniya poristoi korundovoi keramiki [Cold sintering of α - and γ -modifications of aluminum oxohydroxide: a low-temperature method for producing porous corundum ceramics], *Tonkie khimicheskie tekhnologii*, 2024, No 19 (4), pp. 337–349. DOI: 10.32362/2410-6593-2024-19-4-337-349

24. Simonov-Emelyanov, I.D., Kharlamova, K.I., Teoreticheskie osnovy, modeli i raschety sostavov dispersno-napolnennykh polimerov s raznymi tipami struktur i svoystvami [Theoretical foundations, models and calculations of compositions of disperse-filled polymers with different types of structures and properties], *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2024, V. 68, No 1, pp. 58–68. DOI: 10.6060/rcj.2024681.11. EDN WATGYI.

25. Zayakin, O.V., Zhuchkov, V.I., Akberdin, A.A., Fiziko-khimicheskie kharakteristiki oksidnykh rasplavov sistemy $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO-Cr}_2\text{O}_3\text{-FeO}$ [Physico-chemical characteristics of oxide melts of the $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO-Cr}_2\text{O}_3\text{-FeO}$ system], *Butlerovskie soobshcheniya*, 2016, V. 48, No 10, pp. 128–133, EDN XIQTZD.

26. Kozlov, G.V., Dolbin, I.V., Perkolyatsionnye modeli dlya opisaniya stepeni usileniya modulya uprugosti vysokonapolnennykh nanokompozitov poliuretan/grafen [Percolation models for describing the degree of strengthening of the elastic modulus of highly filled polyurethane/graphene nanocomposites], *Prikladnaya fizika*, 2017, No 3, pp. 96–100, EDN YTYNYZ.

27. Bobryshev, A.N., Zubarev, P.A., Kuvshinov, P.I., Lakhno, A.V., Analiz raspredeleniya napolnitelya v strukture kompozitov [Analysis of the filler distribution in the composite structure], *Internet-vestnik VolgGASU*, 2012, No 1 (20), p. 28, EDN PWPIIV.

28. Vlasov, S.V., et al., *Osnovy tekhnologii pererabotki plastmass* [Fundamentals of plastic recycling technology]: study guide for universities, Moscow: Mir, 2006.

29. Rijckaert, S., Daelemans, L., Cardon, L., et al., Continuous Fiber-Reinforced Aramid/PETG 3D-Printed Composites with High Fiber Loading through Fused Filament Fabrication, *Polymers*, 2022, V. 14, No 2. DOI 10.3390/polym14020298, EDN YTDYJC

STUDY OF THE INFLUENCE OF FILLER ON THE HEATING KINETICS OF CURED POLYMER COMPOSITE MATERIALS IN A MICROWAVE ELECTROMAGNETIC FIELD

I.V. ZLOBINA¹, Cand Sc. (Eng), N.V. BEKRENEV¹, D.V. KONDRATOV^{1,2,3},
A.V. ANISIMOV⁴, Dr Sc. (Eng)

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

Received December 9, 2024

Revised March 10, 2025

Accepted March 10, 2025

Abstract— Experimental studies of the heating process of cured carbon, glass and organoplastics and their components placed in an ultra-high-frequency (UHF) electromagnetic field have been performed. It has been shown that the main influence on the kinetics of the process is exerted by the thermal and electrophysical properties of the filler, as well as the absorbed radiation power. The effect of exposure time is less pronounced and is described quite accurately by power functions. For an epoxy binder, this dependence is close to linear. It has been established that the heating of carbon plastic in the first minute of microwave exposure exceeds this indicator for glass and organoplastic by 35–38%, despite an almost 4 times lower level of absorption of radiation power. The fact of more intense microwave heating of aramid fabric and organoplastic than fiberglass, which is manifested in an almost 2 times greater dependence of the heating temperature on the absorbed radiation power, requires additional study and justification.

Keywords: polymer composite materials, fillers, carbon, glass, organoplastics, dielectric properties, microwave electromagnetic field, absorbed power, heating, temperature

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-110-118

ACKNOWLEDGMENTS

The work was supported by the Russian Science Foundation grant 23-29-00526 "Analytical model of heating regulated by the criterion of increasing the mechanical properties of hardened polymer composite materials reinforced with fabrics and fibers of various nature in a microwave electromagnetic field".

REFERENCES

1. Doriomedov, M.S., Rossiisky i mirovoi rynok polimernykh kompozitov [Russian and global polymer composites market]: review, *Trudy VIAM*, 2020, No 6–7, pp. 29–37.
2. Mihailin, Yu.A., *Konstruktsionnye polimernye kompozitsionnye materialy* [Structural polymer composite materials], St Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2010, 2nd ed.
3. Kablov, E.N., Materialy i khimicheskie tekhnologii dlya aviatsionnoi tekhniki [Materials and chemical technologies for aviation equipment], *Vestnik Rossiiskoi Akademii nauk*, 2012, V. 82, No 6, pp. 520–530.
4. Buendia, L., Torres, I., Ornelas, A., Castellanos, A., Influence of Thermal Gradients and Arctic Temperatures on the Mechanical Properties and Fracture Behavior of Woven Carbon and Woven Kevlar® Composites, *ASME Open Journal of Engineering*, 2024, V. 3. DOI: 10.1115/1.4065928
5. Vessey, A., Hodges, K.I., Shaffrey, L.C., Day, J.J., The composite development and structure of intense synoptic-scale Arctic cyclones, *Weather and Climate Dynamics*, 2022, No 3 (3), pp. 1097–1112. DOI: 10.5194/wcd-3-1097-2022
6. Dementiev, I.I., Ustinov, A.N., Metod snizheniya ostatochnykh napryazheniy v kompozitnykh elementakh konstruktsiy kosmicheskikh apparatov [A method for reducing residual stresses in composite elements of spacecraft structures], *Almanakh sovremennoi nauki i obrazovaniya*, 2017, No 6 (119), pp. 27–31.
7. Spiridonova, M.P., Puchkov, A.F., Novopoltseva, O.M., Khimicheskaya modifikatsiya polimernykh materialov [Chemical modification of polymer materials]: a textbook, VPI (filial) FGBOU VO VolgGTU, 2022, URL: <http://lib.volpi.ru:57772/csp/lib/PDF/723226934.pdf> (reference date 17/06/2025)
8. Rakhmankulov, A.A., Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv polimernykh kompozitov, poluchennykh na osnove binarnykh napolniteley [Investigation of the physico-mechanical properties of polymer composites based on binary fillers], *Universum*, 2023, No 11 (116). DOI: 10.32743/UniTech.2023.116.11.16238. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16238> (reference date 17/06/2025)

9. Studentsov, V.N., Fizicheskaya modifikatsiya armirovannykh reaktoplastov [Physical modification of reinforced reactoplastics], *Vestnik SGTU*, 2011, No 4, Is. 3, pp. 209–217.
10. Zlobina, I.V., Bekrenev, N.V., Egorov, A.S., Kuznetsov, D.I., Vliyanie sverkhvysoko-chastotnogo elektromagnitnogo polya na mezhsloevuyu prochnost v otverzhennykh polimernykh kompozitsionnykh materialakh [Effect of ultrahigh frequency electromagnetic field on interlayer strength in cured polymer composite materials], *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2023, V. 93, Is. 2, pp. 237–340
11. Kwak, M., *Microwave Curing of Carbon-Epoxy Composites: Process Development and Material Evaluation*: A thesis submitted to Imperial College London for the degree of Doctor of Philosophy. Imperial College London Department of Aeronautics, 2016. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/77016173.pdf> (reference date 17/06/2025)
12. Zlobina, I.V., Bekrenev, N.V., O mekhanizme povysheniya mekhanicheskikh kharakteristik otverzhennykh polimernykh kompozitsionnykh materialov pod deistviem SVCh elektromagnitnogo polya [On the mechanism of increasing the mechanical characteristics of cured polymer composite materials under the action of a microwave electromagnetic field], *Izv. Saratovskogo universiteta. Ser.: Fizika*, 2022, V. 22, No 2, pp.158–169.
13. Pyushner, G., Nagrev energiy sverkhvysokikh chastot [Ultrahigh frequency energy heating], Moscow: Energiya, 1968.
14. *Microwave processing of materials*, Washington: National Academy Press, 1994. URL: <https://nap.nationalacademies.org/read/2266/chapter/1> (reference date 17/06/2025)
15. Arkhangelsky, Yu.S., *Spravochnaya kniga po SVCh-elektrotermii* [Reference book on microwave electrothermy], Saratov, 2011.
16. Zhou, J., et al., Effect of lay-up configuration on the microwave absorption properties of carbon fiber reinforced polymer composite materials, *Materials Today Communications*, 2021, V. 26, pp. 1–10.
17. Mikinka, E., Siwak, M., Recent advances in electromagnetic interference shielding properties of carbon-fibre-reinforced polymer composites. A topical review, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2021, V. 32, pp. 24585–24643.
18. Chao H-W., Hsu H-C., Chen Y-R., Chang T-H. Characterizing the dielectric properties of carbon fiber at different processing stages, *Sci. Rep.*, 2021, V. 11, Is. 1. DOI: 10.1038/s41598-021-96949-6
19. Putilina, P.M., Kutsevich, K.E., Isaev, A.Yu., Polimernye kompozitsionnye materialy na osnove uglirodnykh i steklyannykh volokon dlya izgotovleniya bespilotnykh letatelnykh apparatov i perspektivy ikh razvitiya [Polymer composite materials based on carbon and glass fibers for the manufacture of unmanned aerial vehicles and prospects for their development], *Trudy VIAM*, 2023, No 8 (126), pp. 85–99.

UDC 678.067.5

FIBERGLASS REINFORCED PLASTICS BASED ON FILLERS RECOVERED IN PYRIDINE UNDER NORMAL PRESSURE

A.E. PROTSENKO, Cand Sc. (Eng), I.A. LYUKHO, A.S. KHOLODOV, V.V. PETROV, Dr Sc. (Eng)

*Komsomolsk-na-Amure State University, 27 Lenin St, 681013, Komsomolsk-on-Amur,
Russian Federation. E-mail: protsenko.ae@yandex.ru*

Received March 5, 2025

Revised March 25, 2025

Accepted March 25, 2025

Abstract—The article presents the results of a study on the recycling of polymer composite materials (PCMs) based on reactive matrices using solvolysis. Epoxy and epoxy vinyl ester resins were used as the matrix material, which were cured at room temperature. To optimize the selection of the solvolysis medium, the solubility parameter of the matrix component was calculated using the method of A. Askadsky. This method has been shown to be effective in selecting solvents for polymer matrices destruction. Based on experimental studies, pyridine was found to be the best solvent out of those considered. Its use reduced the time of the solvolysis process to 1 hour at boiling point (115°C). The resulting fibers had a residual content of 20% of the original polymer matrix. The strength of these recovered fibers was found to be up to 91% of their initial strength. However, composites made from these reconstituted fibers showed a 29.7% reduction in bending strength compared to the original composites. Despite this, the recovered fibers can

be used to create non-essential, low-weight products. The study confirms the potential of using nitrogen-based solvents for recycling polymer composites.

Keywords: polymer composites, epoxies, vinyl ethers, recycling, solvolysis, alcoholysis, strength, thermal analysis, catalysis

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-119-129

ACKNOWLEDGMENTS

The study was financially supported by the Russian Science Foundation within the framework of the scientific project No 23-79-01137, <https://rscf.ru/project/23-79-01137/>.

REFERENCES

1. Kablov, E.N., Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tekhnologiy ikh pererabotki na period do 2030 goda [Strategical areas of developing materials and their processing technologies for the period up to 2030], *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2012, No S, pp. 7–17.
2. Doriomedov, M.S., Rossiiskiy i mirovoy rynek polimernykh kompozitov [Russian and world market of polymer composites]: review, *Trudy VIAM*, 2020, V. 89, No 6–7, pp. 29–37. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37
3. Doriomedov, M.S., Daskovskiy, M.I., Skripachev, S.Yu., Shein, E.A., Polimernye kompozitsionnye materialy v zheleznodorozhnom transporte Rossii [Polymer composite materials in the Russian railways]: review, *Trudy VIAM*, 2016, V. 7, No 43, p. 12. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-12-12
4. Balikoğlu, F., Demircioğlu, T.K., Yıldız, M., Arslan, N., Ataş, A., Mechanical performance of marine sandwich composites subjected to flatwise compression and flexural loading: Effect of resin pins, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2018, V. 22, No 6, pp. 2030–2048. DOI: 10.1177/1099636218792671
5. Majewski, P., Florin, N., Jit, J., Stewart, R.A., End-of-life policy considerations for wind turbine blades, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, V. 164, p. 112538. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112538
6. Chatziparaskeva, G., Papamichael, I., Voukkali, I., Loizia, P., Sourkouni, G., Argiris, C., Zorpas, A.A., End-of-Life of Composite Materials in the Framework of the Circular Economy, *Microplastics*, 2022, V. 1, No 3, pp. 377–392. DOI: 10.3390/microplastics1030028
7. Pietroluongo, M., Padovano, E., Frache, A., Badini, C., Mechanical recycling of an end-of-life automotive composite component, *Sustainable Materials and Technologies*, 2020, V. 23, p. e00143. DOI: 10.1016/j.susmat.2019.e00143
8. Abdallah, R., Juaidi, A., Savaş, M., Çamur, H., Albatayneh, A.M., Abdala, S., Manzano-Agugliaro, F.A., Critical Review on Recycling Composite Waste Using Pyrolysis for Sustainable Development, *Energies*, 2021, V. 14, No 18, p. 5748. DOI: 10.3390/en14185748
9. Khrulkov, A.V., Gusev, Yu.A., Mishkin, S.I., Doriomedov, M.S., Effektivnost utilizatsii kompozitsionnykh materialov [Efficiency of utilization of composite materials], *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2016, V. 6, No 24, p. 9.
10. Kooduvalli, K., Unser, J., Ozcan, S., Vaidya, U., Embodied Energy in Pyrolysis and Solvolysis Approaches to Recycling for Carbon Fiber-Epoxy Reinforced Composite Waste Streams, *Recycling*, 2022, V. 7, No 1, p. 6. DOI: 10.3390/recycling7010006
11. Jiang, T.W., Reddy, K.S.K., Chen, Y.C., Wang, M.W., Chang, H.C., Abu-Omar, M.M., Lin, C.H., Recycling Waste Polycarbonate to Bisphenol A-Based Oligoesters as Epoxy-Curing Agents, and Degrading Epoxy Thermosets and Carbon Fiber Composites into Useful Chemicals, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, V. 10, No 7, pp. 2429–2440. DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c07247
12. Protsenko, A.E., Petrov, V.V., Uprochnenie steklyannykh volokon, poluchennykh pri retsiklinge polimernogo kompozitsionnogo materiala [Strengthening of glass fibers obtained by recycling of polymer composite material], *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2022, V. 18, pp. 347–351. DOI: 10.36652/1813-1336-2022-18-8-347-351
13. Protsenko, A.E., Protsenko, A.N., Shakirova, O.G., Petrov, V.V., Recycling of Epoxy/Fiberglass Composite Using Supercritical Ethanol with (2,3,5-Triphenyltetrazolium)₂[CuCl₄] Complex, *Polymers*, 2023, V. 15, No 6, p. 1559. DOI: 10.3390/polym15061559

14. Askadsky, A.A., Matveev, Yu.I., *Khimicheskoe stroenie i fizicheskie svoystva polimerov* [Chemical structure and physical properties of polymers], Moscow: Khimiya, 1983.
15. Protsenko, A.E., Petrov, V.V., Recycling of Fiberglass Fillers Obtained from Polymer Composites Based on an Epoxy Vinyl Ester Binder, *Mechanics of Composite Materials*, 2022, No 58 (9), pp. 1–8. DOI: 10.1007/s11029-022-10048-9
16. Beygisangchin, M., Abdul Rashid, S., Shafie, S., Sadrolhosseini, A.R., Lim, H., Preparations, Properties, and Applications of Polyaniline and Polyaniline Thin Films – A Review, *Polymers*, 2021, No 13 (12), p. 2003. DOI: 10.3390/polym13122003
17. Xu, S., Dong, X., Zhao, Y., Han, J., Ji, Y., Kuang, R., Zhang, S., Ma, S., Preparation of Environmentally Friendly Anticorrosive Coatings with Aniline Trimer-Modified Waterborne Polyurethane, *Coatings*, 2024, No 14 (11), p. 1380. DOI: 10.3390/coatings14111380
18. Deev, I.S., Dobryanskaya, O.A., Kurshev, E.V., Vliyanie morskoi vody na mikrostrukturu i mekhanicheskie svoystva ugleplastika v napryazhennom sostoyanii, *Materialovedenie*, 2012, No 11, pp. 37–41.
19. Zhu, P., Yang, Y.Z., Chen, Y., Quian, G.R., Liu, Q., Influence factors of determining optimal organic solvents for swelling cured brominated epoxy resins to delaminate waste printed circuit boards, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2018, No 20 (1–3), pp. 245–253. DOI: 10.1007/s10163-016-0574-0

UDC 666.798.2:621.039.531

EFFECTS OF NEUTRON IRRADIATION ON AGGREGATE- AND DISPERSION-HARDENED STRUCTURE OF ZTA COMPOSITE CERAMICS

A.V. MALETSKY^{1,2}, R.Sh. ISAEV^{1,2}, D.R. BELICHKO¹, Cand Sc. (Phys-Math), G.K. VOLKOVA¹

¹ *Donetsk Institute for Physics and Engineering named after A.A. Galkin, 72 St R. Luxemburg, 283114 Donetsk, Russian Federation. E-mail: sashamalecki097@gmail.com*

² *Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot Curie St, 141980 Moscow Region, Dubna, Russian Federation*

Received January 31, 2025

Revised February 13, 2025

Accepted February 17, 2025

Abstract—The work investigated the effect of neutron irradiation on the aggregate- and dispersion-hardened structure of composite ceramics of the composition α -Al₂O₃ + n% YSZ (ZrO₂ + 3 mol.% Y₂O₃) (n = 0; 1; 5; 10 and 15 wt.%) obtained as a result of processing compacts with high hydrostatic pressure (HHP) – 300 and 700 MPa. X-ray structural analysis showed that neutron irradiation of two-phase ceramics did not cause phase changes in the ceramic composite. In the course of the work it was established that the effect of grain fragmentation in the material is observed only in relation to YSZ particles and is not observed in relation to α -Al₂O₃ grains, which may be associated with the structural features of the crystal lattices of α -Al₂O₃ and t-ZrO₂. The results of the research allow us to talk about the prospects for using the studied ceramics under conditions of radiation exposure.

Keywords: composite ceramics, structure, aluminum oxide, zirconium dioxide, neutrons, irradiation, radiation resistance

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-130-152

ACKNOWLEDGMENTS

The research was carried out with the support of the Russian Science Foundation, grant No 24-72-10072. <https://rscf.ru/project/24-72-10072/>

REFERENCES

1. Korenkov, V.V., Stolyarov, R.A., Vasyukov, V.M., Shuklinov, A.V., Khodan, A.N., Fiziko-mekhanicheskie svoystva keramicheskogo kompozita NOA/MUNT [Physico-mechanical properties of ceramic composite NOA/MUNT], *Vestnik Rossiyskikh universitetov: Matematika*, 2011, No 3.
2. Skripnyak, E.G., Skripnyak, V.A., Kulkov, S.S., Korobenkov, M.V., Skripnyak, V.V., Modelirovanie mekhanicheskogo povedeniya keramicheskikh kompozitov s transformatsionno-uprochnennoi matritsei pri

dinamicheskikh vozdeistviyakh [Modeling of the mechanical behavior of ceramic composites with a transformation-hardened matrix under dynamic influences], *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2010, No 2.

3. Abyzov, A.M., Issledovaniya v oblasti sozdaniya vysokokachestvennoi alyumooksidnoi keramiki. Ch. 1. Spekanie s dobavkami, reaktsionnoe spekanie, poluchenie armirovannykh kompozitov [Research in the field of creating high-quality aluminum oxide ceramics. Part 1: Sintering with additives, reaction sintering, production of reinforced composites], *Steklo i keramika*, 2018, No 8, pp. 8–19.

4. Zholudev, D.S., Keramicheskie materialy v ortopedicheskoi stomatologii. Keramika na osnove oksida alyuminiya [Ceramic materials in orthopedic dentistry. Ceramics based on aluminum oxide], *Problemy stomatologii*, 2012, No 5.

5. Zholudev, S.E., Ivlev, Yu.N., Klinicheskiy primer ispolzovaniya gibridnykh materialov v praktike ortopedicheskoi stomatologii [A clinical example of the use of hybrid materials in the practice of orthopedic dentistry], *Problemy stomatologii*, 2018, No 1.

6. Mikhailov, M.M., Yuryev, S.A., Lapin, A.N., Goronchko, V.A., Mikhailova, O.A., Optical properties of aluminum oxide powder modified by nanoparticles and prospects for its use in solar power and space industry, *Acta Astronautica*, 2023, V. 212, pp. 483–491. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.08.030>

7. Tamilarasi, T., Pratheep, V.G., Rajasekar, R., Ravichandran, K., Shanmugam, A., Sriraam, H., Jagan, N., Study and performance analysis of graphite and aluminium oxide coating on heat spreader application, *Materials Today: Proceedings*, 2022, V. 66, P. 3, pp. 1066–1073. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.842>

8. Maletsky, A.V., Belichko, D.R., Konstantinova, T.E., Volkova, G.K., Doroshkevich, A.S., Lyubchik, A.I., et al., Structure formation and properties of corundum ceramics based on metastable aluminum oxide doped with stabilized zirconium dioxide, *Ceramics International*, 2021, V. 47, No 14, pp. 19489–19495. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.03.286>

9. Maletsky, A.V., Konstantinova, T.E., Volkova, G.K., Belichko D. R., Doroshkevich A. S., Popov E., et al. High hydrostatic pressure influence on the properties and tendency to agglomeration of ZrO₂ grains of the Al₂O₃ – YSZ composite ceramics system, *Ceramics International*, 2023, V. 49, No 10, pp. 16044–16052. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.01.202>

10. Dmitriev, K.I., Bobkova, T.V., Sorokina, T.P., Koveza, V.A., Yurtaeva, A.S., Doronin, V.P., Potapenko, O.V., Adjustment of textural and acidic properties of aluminum oxide by modifying the product of thermo-chemical activation of gibbsite with acids in hydrothermal conditions // *Microporous and Mesoporous Materials*, 2024, V. 369, p. 113025. URL: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2024.113025>

11. Danilenko, I., Lakusta, M., Loladze, L., Volkova, G., Popov, I., Glazunova, V., Konstantinova, T., Effect of alumina added by mechanical mixing and co-doping on the densification mechanisms of zirconia nanoparticles at the initial stage of sintering, *Results in Physics*, 2020, V. 19, p. 103495. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103495>

12. Ahkozov, L., Lakusta, M., Danilenko, I., Volkova, G., Konstantinova, T., Influence of cold isostatic pressure on formation of secondary nanoscale zirconia inclusions in alumina grains in ceramic composites 3Y-TZP with small amount of Al₂O₃, *2018 IEEE 8th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP)*, 2018, pp. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/NAP.2018.8915299>

13. Chai, J., Zhu, Y., Niu, L., Shen, T., Cui, M., Wang, Z., Fabrication and characterization of SiC–ZTA ceramic composites by hot pressing, *Ceramics International*, 2023, V. 49, No 20, pp. 32799–32807. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.07.249>

14. Safonova, M.N., Fedotov, A.A., Razrabotka instrumentalnogo materiala na osnove metallicheskoj matritsy, uprochnennoi poroshkami prirodnogo almaza [Development of a tool material based on a metal matrix reinforced with natural diamond powders], *Evrasiyskiy Soyuz Uchenykh*, 2015, No 6–3 (15). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-instrumentalnogo-materiala-na-osnove-metallicheskoj-matritsy-uprochnennoy-poroshkami-prirodnogo-almaza>

15. García Ferré, F., Mairov, A., Ceseracciu, L., et al., Radiation endurance in Al₂O₃, *Scientific Reports*, 2016, V. 6, p. 33478. URL: <https://doi.org/10.1038/srep33478>

16. Lawrence, F., Mallika, C., Mudali, U.K., Natarajan, R., Ponraju, D., Seshadri, S.K., Kumar, T.S.S., Radiation degradation in the mechanical properties of polyetheretherketone–alumina composites, *Journal*

- of *Nuclear Materials*, 2012, V. 420, No 1–3, pp. 338–341. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2011.10.024>
17. Aбышев, Б., Козловский, А.Л., Жумадилов, К.С., Труханов, А.В., Study of radiation embitterment and degradation processes of Li_2ZrO_3 ceramic under irradiation with swift heavy ions, *Ceramics*, 2022, V. 5, No 1, pp. 13–23. URL: <https://doi.org/10.3390/ceramics5010002>
18. Abd El-Hameed, A.M., Radiation effects on composite materials used in space systems: a review, *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 2022, V. 11, No 1, pp. 313–324. URL: <https://doi.org/10.1080/20909977.2022.2079902>
19. Giniyatova, S.G., Kozlovskiy, A.L., Rspayev, R.M., Borgekov, D.B., Zdorovets, M.V., Study of the kinetics of radiation damage in CeO_2 ceramics upon irradiation with heavy ions, *Materials*, 2023, V. 16, No 13, p. 4653. URL: <https://doi.org/10.3390/ma16134653>
20. Danilenko, I., Prokhorenko, S., Konstantinova, T., Ahkozov, L., Burkhovetski, V., Glazunova, V. Effect of small amount of alumina on structure, wear and mechanical properties of 3Y-TZP ceramics, *World Journal of Engineering*, 2014, V. 11, No 1, pp. 9–16.
21. Strekalovsky, V.N., Polezhaev, Yu.M., Palguyev, S.F., *Oksidy s primesnym besporyadkom: sostav, struktura, fazovye prevrashcheniya* [Oxides with impurity disorder: composition, structure, phase transformations], Moscow: Nauka, 1987.
22. Konstantinova, T.E., Danilenko, I.A., Tokiy, V.V., Glazunova, V.A., Poluchenie nanoporoshka tsirkoniya: ot innovatsii k innovatsii [Production of zirconium nanopowder: from innovation to innovation], *Nauka i innovatsii*, 2005, V. 1, No 3, pp. 76–87.
23. Ledo Pereda, L.M., Semenov, V.N., Rikhvitsky, V.S., et al., Ion beam scanning system for EG-5 accelerator, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2024, V. 21, pp. 938–945. URL: <https://doi.org/10.1134/S1547477124701061>
24. Belichko, D.R., Volkova, G.K., Maletsky, A.V., Isaev, R.Sh., Vliyanie protonnogo oblucheniya na strukturu i svoystva kompozitnoi keramiki sostava $\text{YSZ-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ [Effect of proton irradiation on the structure and properties of composite ceramics of the composition $\text{YSZ-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$], *Voprosy materialovedeniya*, 2024, No 3 (119), pp. 46–56. URL: <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2024-119-3-46-56>
25. Anderson, Dzh., *Struktura metallicheskih katalizatorov* [Structure of metal catalysts], Moscow: Mir, 1973.
26. Guinier, A., *X-Ray Diffraction in Crystals, Imperfect Crystals, and Amorphous Bodies*, Courier Corporation, 1994.
27. Maletsky, A.V., Volkova, G.K., Belichko, D.R., Glazunova, V.A., Doroshkevich, A.S., Tatarinova, A.A., et al., Influence of stabilized zirconium dioxide and high hydrostatic pressure on the kinetics of sintering nanopowders of metastable aluminum oxide, *Ceramics International*, 2024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.09.002>
28. Lakusta, M., Danilenko, I., Volkova, G., Loladze, L., Golovan, G., Brukhanova, I., et al., Effect of mechanical activation on sintering behaviour of tetragonal zirconia nanopowders, *Ceramics International*, 2020, V. 46, No 9, pp. 13953–13960. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.02.193>
29. Bron, V.A., O rekristallizatsii korunda [About recrystallization of corundum], *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1951, V. 80, No 4, pp. 661–664.
30. Shaposhnikov, A.V., Gritsenko, D.V., Petrenko, I.P., Pchelyakov, O.P., Gritsenko, V.A., Atomnaya i elektronnaya struktura ZrO_2 [Atomic and electronic structure of ZrO_2], *Zhurnal eksperimentalnoi i teoreticheskoi fiziki*, 2006, V. 129, No 5, pp. 914–925.
31. Uglov, V.V., *Radiatsionnye protsessy i yavleniya v tverdykh telakh* [Radiation processes and phenomena in solids], Minsk: Vysheishaya shkola, 2016.
32. *Fizicheskoe materialovedenie. T. 5: Materialy s zadannymi svoystvami* [Physical materials science. V. 5: Materials with specified properties], Kalin B.A. (Ed.), Moscow: NIYaU MIFI, 2012.
33. Bokstein, B.S., *Diffuziya v metallakh* [Diffusion in metals], Moscow: Metallurgiya, 1978.
34. Lakusta, M., Danilenko, I., Konstantinova, T., Volkova, G., Influence of obtaining conditions on kinetics of the initial sintering stage of zirconia nanopowders, *Nanoscale Research Letters*, 2016, V. 11, No 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1452-3>

**COMPUTATIONAL STUDIES OF RESIDUAL AND TEMPORARY WELDING STRESSES
IN A MULTIPLE-PASS BUTT WELDED JOINT MADE OF TITANIUM PSEUDO- β -ALLOY**

V.P. LEONOV, Dr Sc. (Eng), I.Yu. SAKHAROV, Cand Sc. (Eng), S.V. KUZNETSOV, D.M. NESTEROV

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

Received March 11, 2025

Revised May 27, 2025

Accepted May 30, 2025

Abstract—Welding operations in the manufacture of marine structural parts from titanium pseudo- β -alloys of large thicknesses inevitably lead to the occurrence of residual stresses that arise in various areas of the weld and the weld-affected zone and contribute in some cases to the occurrence of defects and cracks. The development of high-gradient fields of temporary and residual welding stress, occurring at various locations within the weld joint and heat-affected zones, poses a specific risk. These stress fields can contribute to the formation of defects and cracks in certain circumstances. Computer simulation of welding processes is extensively utilized today for analyzing and predicting the performance of welded joints, as well as optimizing the welding process. Given the substantial complexity involved in modeling welding operations, mathematical descriptions of these processes have increasingly embraced numerical methods over the past decade. These methods, grounded in Finite Element Method (FEM) software solutions, facilitate the resolution of thermodeformation challenges within spatiotemporal parameters. The purpose of this work is to develop a calculation method that models the formation of temporary and residual welding stresses during sequential filling of the weld bevel and its non-simultaneous execution along the length of the joint.

Keywords: welding, titanium pseudo- β -alloy, residual welding stresses, finite element method

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-153-171

REFERENCES

1. Okerblom, N.O., *Svarochnye napryazheniya v metallokonstruktsiyakh* [Welding stresses in metal structures], Moscow: Mashgiz, 1950.
2. Vinokurov, V.A., *Svarochnye deformatsii i napryazheniya* [Welding deformations and stresses], Moscow: Mashinostroenie, 1968.
3. Gotovsky, V.A., Karkhin, V.A., *Teoriya svarochnykh deformatsiy i napryazheniy* [Theory of welding deformations and stresses], Leningrad: LKI, 1980.
4. Karzov, G.P., Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., *Fiziko-mekhanicheskoe modelirovanie protsessov razrusheniya* [Physical and mechanical modeling of destruction processes], St Petersburg: Politehnika, 1993.
5. Karzov, G.P., Leonov, V.P., Margolin, B.Z. *Ostatochnye svarochnye napryazheniya v obolocheknykh konstruktsiyakh: sobstvennye ostatochnye napryazheniya* [Residual welding stresses in shell structures: proper residual stresses], *Sudostroitel'naya promyshlennost. Ser.: Materialovedenie*, 1991, Issue 12, pp. 3–16.
6. Gorynin, I.V., Chechulin, B.B., *Titan v mashinostroenii* [Titanium in Mechanical engineering], Moscow: Mashinostroenie, 1990.
7. Ushkov, S.S., Khatuntsev, A.N., *Titanovye splavy dlya morskoi tekhniki* [Titanium alloys for marine equipment], St Petersburg: Politehnika, 2007.
8. Makarov, E.A., *Kholodnye treshchiny pri svarke legirovannykh staley* [Cold cracks in welding of alloy steels], Moscow: Mashinostroenie 1981.
9. Ivanova, L.A., Ilyin, A.V., Leonov, V.P., Mizetsky, A.V., Sakharov, I.Yu., Khatuntsev, A.N., *Raschetnaya otsenka urovnya i raspredeleniya ostatochnykh svarochnykh napryazheniy v soedineniyakh iz titanovogo splava 5V bolshikh tolshchin* [Estimated assessment of the level and distribution of residual welding stresses in joints made of high-thickness titanium alloy 5B], *Voprosy materialovedeniya*, 2008, V. 4, No 56, pp. 37–53.

10. Karzov, G.P., Leonov, V.P., Margolin, B.Z., Raschetnoe opredelenie polei ostatochnykh svarochnykh napryazheniy v konstruktsiyakh obolochecnogo tipa [Computational determination of residual welding stress fields in shell-type structures]: Report 1, *Avtomaticheskaya svarka*, 1992, No 3, pp. 3–8.

11. Karzov, G.P., Leonov, V.P., Margolin, B.Z., Raschetnoe opredelenie polei ostatochnykh svarochnykh napryazheniy v konstruktsiyakh obolochecnogo tipa [Computational determination of residual welding stress fields in shell-type structures]: Report 2, *Avtomaticheskaya svarka*, 1992, No 4, pp. 7–12.

12. Kovalchuk, M.V., Oryshchenko, A.S., Leonov, V.P. et al., Patent RU 2 690 257 C1: *Splav na osnove titana* [Titanium-based alloy], Appl. 28 Nov. 2018. Publ. 31.05.2019.

13. Heinrich, L., Feldhausen, T., Saleeby, K., Saldana, C., Kurfess, T., Prediction of Thermal Conditions of DED With FEA Metal Additive Simulation, *Proc. International Manufacturing Science and Engineering Conference*, 2021.

14. Leonov, V., Sakharov, I., Kuznetsov, S., Nesterov, D., Raschetno-eksperimentalnoe issledovanie temperaturnykh polei pri vypolnenii svarki po naplavke na psevdo- β titanovom splave [Computational and experimental study of temperature fields during surfacing welding on a pseudo- β titanium alloy], *Voprosy materialovedeniya*, 2025, No 1(121), pp. 159–170.

15. Makhnenko, O., Muzhichenko, A., Prudky, I., Matematicheskoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya svarnykh stingernykh panelei iz titanovogo splava VT20 [Mathematical modeling of the stress-strain state of welded stinger panels made of VT20 titanium alloy], *Avtomaticheskaya svarka*, 2013, No 2, pp. 14–20.

16. Nerovny, V.M., *Teoriya svarochnykh protsessov* [Theory of welding processes], Moscow: Izdatelstvo MGTU im. N. E. Baumana, 2016.

17. Smith, D., Pickett, P., Grabowski, T., Thrope, J., Azarmi, F., Investigation of Mechanical Properties of Cobalt Chromium Additively Manufactured Using Direct Energy Deposition: Experimental Study and Finite Element Analysis, *International Thermal Spray Conference*, 2024, pp. 712–723.

18. ASTM E837-99. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method.

UDC 621.791.051.6:669.15–194.2

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND DURATION OF POST-WELDED TEMPERING ON THE WELDED JOINTS OF PETROCHEMICAL EQUIPMENT MADE OF 2.25%CR AND 1.0%MO STEEL

N.I. ZATOKOVENKO, E.A. PANIKHIDIN, V.N. LEDYANKIN

JSC Uralkhimmash, 33 Khibinogorsky lane, 620010 Sverdlovsk region, Ekaterinburg,
Russian Federation. E-mail: Nikolay.Zatokovenko@omzglobal.com

Received March 13, 2025

Revised March 17, 2025

Accepted March 21, 2025

Abstract—The results of tests of control welded joints of steels containing 2.25% Cr and 1.0% Mo with different modes of post-weld heat treatment are presented. A decrease of the plastic characteristics of welded joints with decreasing temperature and increasing of the duration of post-weld heat treatment has been shown.

Keywords: heat-resistant steels, automatic submerged arc welding, welded joints, heat treatment, temperature embrittlement

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-172-179

REFERENCES

1. STO 00220368-019-2017: *Termicheskaya obrabotka neftekhimicheskoi apparatury i ee elementov* [Heat treatment of petrochemical equipment and its elements].

2. *Rules for Construction of Pressure Vessels*, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 2023, Section VIII, Division

3. *Specification for pressure vessel plates, alloy steel, chromium-molybdenum SA-387*, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 2023, Section II, P. A.
4. *Specification for low-alloy and high manganese steel electrodes and fluxes for submerged arc welding*, AWS Specification A5.23/A5.23M:2021.
5. Bruscato, R., Temper Embrittlement and Creep Embrittlement of 2¼Cr-1Mo Shielded Metal-Arc Weld Deposits, *Welding Journal*, 1970, V. 49 (4), pp. 148–156.
6. *Qualification standard for welding, brazing, and fusing procedures; welders; brazes; and welding, brazing, and fusing operators*, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 2023, Section IX.
7. National standard GOST 6996-66: *Svarnye soedineniya. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv* [Welded joints. Methods for determining mechanical properties].
8. National standard GOST 34347-2017: *Sosudy i apparaty stalnye svarnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [Welded steel vessels and units. General technical conditions].
9. Titova, T.I., Semernina, I.F., Shulgan, N.A., Milyakova, L.A., Opredelenie stoikosti materialov protiv teplovogo okhrupchivaniya s primeneniem metoda step cooling [Determination of the resistance of materials against thermal embrittlement using the “step cooling” method], *Tyazheloe mashinostroenie*, 2012, No 6, pp. 14–17.
10. API RP 934-A-2019: *Materials and Fabrication of 2¼Cr-1Mo, 2¼Cr-1Mo-¼V, 3Cr-1Mo and 3Cr-1Mo-¼V Steel Heavy Wall Pressure Vessels for High-temperature, High-pressure*
UDC 620.193.55

HIGH-TEMPERATURE HYDROGEN CORROSION OF STEEL: a review

A.N. DOBROTVORSKAYA, Cand Sc. (Phys-Math), M.A. DOBROTVORSKY, Cand Sc. (Phys-Math),
D.A. ZAITSEV

JSC NPO Lenkor, 31A Bely Kuna St, 192236 St Petersburg, Russian Federation.
E-mail: adobrotvorskaia@npolencor.ru

Received December 13, 2024

Revised March 18, 2025

Accepted March 18, 2025

Abstract—The paper offers an analytical review of theoretical and applied research devoted to high-temperature hydrogen attack on steel. Advanced diagnostic techniques of hydrogen attack are examined, the fundamental domestic and foreign developments are reviewed. The article is focused on the most promising recent studies of HTHA damage for purposes of estimating fitness-for-service of metal equipment exposed to hydrogen at elevated temperatures and risk/failure assessment.

Keywords: high-temperature hydrogen attack (HTHA), incubation period, hydrogen, refining, steel

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-180-200

REFERENCES

1. *Neftepererabatyvayushchaya i neftekhimicheskaya promyshlennost* [Oil refining and petrochemical industry], *Korroziya i zashchita khimicheskoi apparatury*, Sukhotin A.M., Shreider A.V., Archakov Yu.I. (Eds.), Leningrad: Khimiya, 1974, V. 9.
2. Archakov, Yu.I., *Vodorodnaya korroziya stali* [Hydrogen corrosion of steel], Moscow: Metallurgiya, 1985.
3. Fletcher, E.E., Elsea, A.R., *The effects of high-pressure, high-temperature hydrogen on steel*, Defense Metals Information Center, Battelle Memorial Institute, 1964, V. 202. URL: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015095155274&seq=13>
4. Nugent, M., Silfies, T., Dobis, J., Armitt, T., A review of high-temperature hydrogen attack (HTHA) modeling, prediction, and non-intrusive inspection in refinery applications, *Corrosion*, 2017, pp. 11–13. URL: <https://doi.org/10.5006/C2017-08924>
5. Poorhaydari, K., A Comprehensive Examination of High-Temperature Hydrogen Attack: A Review of over a Century of Investigations, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, V. 30, pp. 7875–7908.

6. API RP 571: *Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry*, Creep and Stress Rupture, American Petroleum Institute, 2020, 3rd ed.
7. Xu, X., Niu, J., Li, Ch., Huang, H., Yin, Ch., Comparative Study on Hydrogen Embrittlement Susceptibility in Heat-Affected Zone of TP321 Stainless Steel, *Materials Science Forum*, Trans Tech Publications, 2020, V. 993, pp. 568–574. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.993.568>
8. Li, X., Chen, H., Yao, Z., Li, J., Ke, W., Hydrogen Attack on Austenitic Steel 304 under High Temperature and High Pressure, *Acta Metall. Sinica Ser. B*, 1993, V. 6, Is. 11, pp. 374–378.
9. API RP 941: *Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants*, 8th ed., Washington: American Petroleum Institute, 2016.
10. Elliot, P., Materials performance in high-temperature environments – making the choice, *NACE Corrosion Proceedings*, 2000, pp. 1–22.
11. *Tekhnicheskie ukazaniya – reglament po ekspluatatsii i obsledovaniyu oborudovaniya ustanovok kataliticheskogo riforminga i gidroochistki, rabotayushchikh v vodorodsoderzhashchikh sredakh pri povyshennykh temperature i davlenii* [Technical instructions-regulations on exploitation and inspection of catalytic reforming and hydrocleaning equipment operating in water-holding systems at elevated temperatures and pressures], St Petersburg, 1998.
12. API RP 579-1/ASME FFS-1: *Fitness-For-Service*, Washington: American Petroleum Institute and American Society of Mechanical Engineers, 2021, 4th ed.
13. Prueter, P.E., Leveraging fitness-for-service and inspection techniques to manage the risks associated with high-temperature hydrogen attack, *E²G industry insight*, 2019, V. 7, p. 14. URL: <https://e2g.com/library-item/leveraging-fitness-for-service-and-inspection-techniques-to-manage-the-risks-associated-with-high-temperature-hydrogen-attack/> (reference date 3/06/2025)
14. Martin, M.L., Dadfarnia, M., Orwig, S., Moore, D., Sofronis, P., A microstructure-based mechanism of cracking in high temperature hydrogen attack, *Acta Materialia*, 2017, V. 140, pp. 300–304. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.08.051>(reference date 3/06/2025)
15. Tang, S., Guo, T.F., Cheng, L., Modeling hydrogen attack effect on creep fracture toughness, *Int. J. Solids Struct.*, 2011, V. 48, Is. 20, pp. 2909–2919. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2011.06.007>
16. Krynicki, J., Bagnoli, K., McLaughlin, J.E., Probabilistic Risk Based Approach for Performing an Onstream High Temperature Hydrogen Attack Inspection, *61st Annual Conference & Exposition*, 2006.
17. Chevreux, N., Flament, C., Gillia, O., David, T., Goti, R., Le Nevé, C., Andrieu, E., Understanding the Phenomenon of High Temperature Hydrogen Attack (HTHA) Responsible for Ferrite-Pearlitic Steels Damage, *High Temperature Corrosion of mater.*, 2024, V. 101, pp. 1225–1236. URL: <https://doi.org/10.1007/s11085-024-10281-8>
18. Benzerga, A.A., Leblond, J.B., Ductile fracture by void growth to coalescence, *Advances in applied mechanics*, 2010, V. 44, pp. 169–305. URL: [https://doi.org/10.1016/S0065-2156\(10\)44003-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2156(10)44003-X)
19. Eliezer, D., High-temperature hydrogen attack of carbon steel, *J. Mater. Sci.*, 1981, V. 16, pp. 2962–2966. URL: <https://doi.org/10.1007/BF00540300>
20. Pillot, S., Corre, S., Coudreuse, L., Chauvy, C., Toussaint, P., Development and production of creep and hydrogen resistant grade 91 (9 Cr1 Mo) heavy plates for new generating high efficiency refining reactors, *NACE Proceedings*, 2013, V. 91, pp. 1–15.
21. Schlögl, S.M., Svoboda, J., Van der Giessen, E., Evolution of the methane pressure in a standard 2.25 Cr–1Mo steel during hydrogen attack, *Acta Mater.*, 2001, V. 49, No 12, pp. 2227–2238. URL: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00132-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00132-X)
22. Van Der Burg, M.W.D., Van Der Giessen, E., A Continuum damage relation for hydrogen attack cavitation, *Acta Mater.*, 1997, V. 45, pp. 3047–3057. URL: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(96\)00382-5](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(96)00382-5)
23. Sundararajan, G., Shewmon, P.G., The kinetics of hydrogen attack of steels, *Metall Trans A*, 1981, V. 12, pp. 1761–1775. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02643758>
24. Shewmon, P.G., Synergism between creep ductility and grain boundary bubbles, *Acta Metal.*, 1987, V. 35, pp. 1317–1324. URL: [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(87\)90013-7](https://doi.org/10.1016/0001-6160(87)90013-7)
25. Dadfarnia, M., Martin, M.L., Moore, D.E., Orwig, S.E., Sofronis, P., A model for high temperature hydrogen attack in carbon steels under constrained void growth, *Int. J. Fract.*, 2019, V. 219, pp. 1–17. URL: <https://doi.org/10.1007/s10704-019-00376-8>

26. Pillot, S., Coudreuse, L., Hydrogen-induced disbonding and embrittlement of steels used in petrochemical refining, *Gaseous hydrogen embrittlement of materials in energy technologies*, 2012, pp. 51–93. URL: <https://doi.org/10.1533/9780857093899.1.51>
27. Ovchinnikov, I.I., Ovchinnikov, I.G., Vliyanie vodorodosoderzhashchei sredy pri vysokikh temperaturakh i davleniyakh na povedenie metallov i konstruktsiy iz nikh [Influence of a hydrogen-containing medium at high temperatures and pressures on the behavior of metals and structures made of them], *Naukovedenie*, 2012, No 4 (13). URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/60tvn412.pdf> (reference date 2/06/2025).
28. Alekseev, V.I., Yusupov, V.S., Lazarenko, G.Yu., Mekhanizm vliyaniya molibdena i medi na antikorroziionnye svoystva stali [The mechanism of influence of molybdenum and copper on the anticorrosive properties of steel], *Perspektivnye materialy*, 2009, V. 6, pp. 21–29.
29. Shewmon, P.G., Hydrogen Attack of Carbon Steel, *Metallurgical transactions A*, V. 7A, 1976, pp. 279–286. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02644468>
30. Alekseev, V.I., Bogolyubsky, S.D., Ushakov, I.S., Termodinamicheskaya otsenka sklonnosti khromistyykh staley k vodorodnoi korrozii pri povyshennykh temperaturakh i davleniyakh vodoroda [Thermodynamic assessment of the susceptibility of chromium steels to hydrogen corrosion at elevated temperatures and hydrogen pressures], *Zhurnal fiz. khimii*, 1971, V. 45, No 8.
31. Schlögl S. M., Giessen E. van der., Micromechanics of High Temperature Hydrogen Attack, *Proceedings of the European Conference on Computational Mechanics, solids, structures, and coupled problems in engineering, August 31 – September 3, 1999*, pp. 1–11.
32. Bodden Connor, M.T., Barrett, C.D., Introduction of Molecular Dynamics for HTHA and a Review Article of HTHA, *J Fail. Anal. and Preven.*, 2022, V. 22, pp. 1326–1345. URL: <https://doi.org/10.1007/s11668-022-01419-4>
33. Skrypnyk, L.D., Analytic evaluation of hydrogen-assisted void growth at high temperatures, *Mater. Sci.*, 1997, V. 33, No 4, pp. 478–490. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02537545>
34. Parthasarathy, T.A., Lopez, H.F., Shewmon, P.G., Hydrogen Attack kinetics of 2.25 Cr-1 Mo steel weld metals, *Metall. Trans. A*, 1985, V. 16A, pp. 1143–1144. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02811683>
35. Archakov, Yu.I., Grebeshkova, I.D., Neftekhimicheskaya promyshlennost [Petrochemical industry], *Korroziya i zashchita khimicheskoi apparatury*, Leningrad: Khimiya, 1974, V. 9, P. 2, pp. 335–364.
36. Pavlov, S.B., Malikov, V.A., Vliyanie vodoroda na stal 09G2S pri povyshennykh temperaturakh i davleniyakh [The effect of hydrogen on steel 09G2C at elevated temperatures and pressures], *Mezhdunarodny nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2014, V. 10, pp. 38–39.
37. Shih, H.M., Johnson, H.H., Inclusions, grain boundaries and hydrogen attack, *Scripta Metallurgica*, 1977, V. 11, pp. 151–154. DOI: 10.1016/0036-9748(77)90296-4
38. Mostert, R.J., Mukarati, T.W., Pretorius, C.C.E., Mathoho, V.M., A constitutive equation for the kinetics of high temperature hydrogen attack, *Procedia Structural Integrity*, 2022, V. 37, pp. 763–770. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.02.007>
39. Looney, L., Hurst, R.C., Taylor, D., The effect of high pressure hydrogen on the creep fracture of notched ferritic-steel components, *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, V. 77, pp. 25–31. URL: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00384-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00384-1)
40. Alshahrani, M.A.M., Ooi, S.W., Colliander, M.H., El-Fallan, G.M.A.M., Bhadeshia, H.K.D.H., High-temperature hydrogen attack on 2.25 cr-1mo steel: the roles of residual carbon, initial microstructure and carbide stability, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2022, V. 53, No 12, pp. 4221–4232. URL: <https://doi.org/10.1007/s11661-022-06809-9>
41. Archakov, Yu.I., Fenomenologicheskaya teoriya legirovaniya vodorodoustoichivyykh staley, *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki*, 2008, No 2, pp. 31–36.
42. ASM Handbook Committee. V. 1: *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys* – ASM International, 1990. URL: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v01.9781627081610>
43. Shimomura, J-I., Tani, H., Kooriyama, T., Sato, Sh., Ueda, S., High Strength 2-1/4 and 3% Cr–1% Mo Steels with Excellent Hydrogen Attack Resistance, *Kawasaki steel technical report*, 1989, No 20, pp. 78–87.

44. Archakov, Yu.I., *Vodorodoustojchivost' stali* [Hydrogen resistance of steel], Moscow: Metallurgiya, 1978.
45. Alekseev, V.I., Bogolyubsky, S.D., Ushakov, I.S., Shvartsman, L.A., Termodinamicheskaya otsenka sklonnosti khromistyykh staley k vodorodnoy korrozii pri povyshennykh temperaturakh i davleniyakh vodoroda [Thermodynamic assessment of the propensity of chromium steels to hydrogen corrosion at elevated temperatures and hydrogen pressures], *Zhurnal fiz. khimii*, 1971, V. 45, pp. 2053–2055.
46. Utevsky, L.M., *Otpusknaya khrupkost stali* [Tempering brittleness of steel], Moscow: Metallurgizdat, 1961.
47. Chao, B.L., Odette, G.R., Lucas, G.E., *Kinetics and mechanisms of hydrogen attack in 2.25Cr–1Mo steel*, Santa Barbara (USA): Oak Ridge National Lab, 1988.
48. Schlogl, S.M., Van Der Giessen, E., Van Leeuwen, Y., On methane generation and decarburization in low-alloy Cr-Mo steels during hydrogen attack, *Metal. Mater. Trans. A*, 2000, V. 31, No 1, pp. 125–137. URL: <https://doi.org/10.1007/s11661-000-0059-5>
49. Chan, S.L.I., Hydrogen trapping ability of steel with different microstructure, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 1999, V. 22, Is. 1, pp. 43–53. URL: <https://doi.org/10.1080/02533839.1999.9670440>
50. Yamani, A., A cost effective development of an ultrasonic A-scans database for high-temperature hydrogen attack, *NDT&E International*, 2008, V. 41, pp. 163–168. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2007.10.007>
51. Allevato, C., Utilizing acoustic emission testing to detect high-temperature hydrogen attack (HTHA) in Cr-Mo reformer reactors and piping during thermal gradients, *Procedia Engineering*, 2011, V. 10, pp. 3552–3560. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.585>
52. Hlongwa, N., Mabuwa, S., Msomi, V., The development of techniques to detect high temperature hydrogen attack – A mini review, *Materials Today: Proceedings*, 2021, V. 45, pp. 5415–5418. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.112>
53. Li, X., Dong, C., Li, M., Chen, H., Effect of hydrogen attack on acoustic emission behavior of low carbon steel, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2002, V. 9, No 2, pp. 130–134.
54. Panzarella, C., Cochran, J., The E2G Model of High Temperature Hydrogen Attacks and the New Prager Curves, *WRC Bulletin Current Concepts for Life Assessment of Pressure Vessels and Piping*, 2016, V. 568, pp. 135–169.
55. Nugent, M., Silfies, T., Kowalski, P., Sutton, N., Recent applications of evaluations of equipment in HTHA service, *NACE Proceedings*, 2018.
56. Le Nevé, C., Layan, S., Le Jeune, L., Mahaut, S., Demonte, S., Chauveau, D., Tessier, M., et al., High temperature hydrogen attack: New NDE advanced capabilities – development and feedback, *Pressure Vessels and Piping Conference. American Society of Mechanical Engineers*, 2019, Paper No PVP2019-94001, V007T07A011, p. 11. URL: <https://doi.org/10.1115/PVP2019-94001>
57. Dobrotvorsky, A.M., Kopyltsov, A.V., Dobrotvorsky, M.A., Novye fiziko-khimicheskie metody vyyavleniya prichin otkazov tekhnologicheskogo oborudovaniya neftepererabatyvayushchikh predpriyatiy [New physico-chemical methods for identifying the causes of failures of technological equipment of oil refineries], *Khimicheskaya tekhnika*, 2017, V. 1, p 30
58. Asviyan, M.B., Vliyanie masshtabnogo faktora na dlitelnuyu prochnost trub pri vysokom vnutrennem davlenii vodoroda [The effect of the scale factor on the long-term strength of pipes at high internal pressure of hydrogen], *Zavodskaya laboratoriya*, 1963, V. 3, pp. 352–356.
59. Asviyan, M.B., Osnovnye faktory, vliyayushchie na dlitelnuyu prochnost stali pri vysokikh davleniyakh vodoroda [The main factors affecting the long-term strength of steel at high hydrogen pressures], *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov*, 1977, V. 6, pp. 3–6.
60. Chernykh, N.P., Vliyanie vodoroda na dlitelnuyu prochnost nekotorykh staley [The effect of hydrogen on the long-term strength of some steels], *Vliyanie vodoroda na sluzhebnye svoystva stali*, Irkutsk: Irkutskoe kn. izd-vo, 1963.
61. Kartashov, A.M., Vliyanie vodorodnogo vozdeystviya pri vysokoi temperature i davlenii na uprugie svoystva uglerodistoi stali [The effect of hydrogen exposure at high temperature and pressure on the elastic properties of carbon steel], *Sbornik nauchnykh trudov aspirantov*, Leningrad: LITMO, 1974, pp. 142–145.

62. Mironov, V.I., Emelyanov, I.G., Vichuzhanin, D.I., Zamaraev, L.M., Ogorelkov, D.A., Yakovlev, V.V., Vliyaniye temperatury navodorozhivaniya i rastyagivayushchego napryazheniya na parametry polnoi diagrammy deformirovaniya stali 09G2S [Effect of hydrogenation temperature and tensile stress on the parameters of the complete deformation diagram for steel 09G2S], *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*, 2020, No 1, pp. 24–33.

63. Archakov, Yu.I., Teslya, B.M., Issledovanie vliyaniya vodoroda na rabotosposobnost oborudovaniya i truboprovodov pri dlitelnykh srokakh ekspluatatsii [Investigation of the effect of hydrogen on the operability of equipment and pipelines during long-term operation], *Protsessy neftepererabotki i neftekhimii. Sbornik nauchnykh trudov k 75-letiyu VNIINEFTEKHIMA*, St Petersburg, 2005.

64. Nelson, G., Hydrogenation Plant Steels, *Proceedings API*, 1949, V. 29M, pp. 163–174.

65. API Publication 940: *Steel Deterioration in Hydrogen: A Report on Corrosion Research*, Washington: American Petroleum Institute, 1967.

66. API Publication 945: *A Study of the Effects of High-temperature, High-pressure Hydrogen on Low-alloy Steels*, Washington: American Petroleum Institute, 1975.

67. Cantwell, J., High-Temperature Hydrogen Attack, *Mater.Perform.*, 1994, V. 33 (7), pp. 58–61.

68. Staats, J., Buchheim, G., A new practical method for prioritizing equipment in HTHA service for inspection and replacement and the challenges in obtaining process conditions to be used in the HTHA assessment, *NACE Corrosion Proceedings*, 2016, p. 7233.

69. Sutton, N.G., Time Dependent Nelson Curve Update, *World Fertilizer*, 2024, July/August.

70. Osage, D., et al., *E2G Technical Report 94: E2G HTHA JIP FFS. Rules for API 579-1/ASME FFS-1*, Part 15, Version 7, The Equity Engineering Group, 2017.

71. Pretorius, C.C.E., Mostert, R.J., Mukarati, T.W., Mathoho V.M. Microstructural influences on the damage evolution and kinetics of high temperature hydrogen attack in a C-0.5 Mo welded joint, *Suid-Afrikaanse Tydskrif vir Natuurwetenskap en Tegnologie*, 2021, V. 40, No 1, pp. 212–223. URL: https://hdl.handle.net/10520/ejc-aknat_v40_n1_a55

72. Panzarella, C.H., Osage, D.A., Spring, D.W., Gassama, E., Cochran, J., *The α - Ω HTHA Model and the Time-Dependent Prager Curves*, WRC Bulletin 585, The Welding Research Council – New York, 2021.

UDC 621.791.019:539.421:621.039.536.4

FORECASTING THE PARAMETERS OF CRACK RESISTANCE OF DISSIMILAR WELDED JOINTS OF DU800 MCP AND MCP PIPELINES OF WWER-1000 REACTOR TO SUBSTANTIATE THE APPLICABILITY OF THE “LEAK BEFORE BREAK” CONCEPT

N.V. VASILIEV¹, Cand Sc. (Eng), M.N. TIMOFEEV¹, Cand Sc. (Eng), A.S. SHALYGIN¹, I.A. KHOMICH¹, V.A. PETROV¹, Cand Sc. (Eng), D.F. GUSEV², Cand Sc. (Eng), V.V. SHITOV³

¹NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: mail@crism.ru

²JSC Concern Rosenergoatom, 25 Ferganskaya St, 109507 Moscow, Russian Federation

³Branch of JSC Concern Rosenergoatom “Balakovo Nuclear Power Plant”, 413801 Saratov Region, Balakovo, Russian Federation

Received February 10, 2025

Revised February 17, 2025

Accepted February 17, 2025

Abstract—The article presents the results of studies of the data on crack resistance characteristics of dissimilar welded joint metal of the main circulation pipeline insert and the branch pipe of main circulation pump. The obtained data are necessary for performing calculations to justify “Leak-before-break” concept application at lifetime extension of the main circulation pipelines of VVER-1000 reactor to 60 years (up to 520 thousand hours). The studies were performed on specimens from manufactured control welded joints of DN800 pipeline insert made of steel grade 10GN2MFA to the main circulation pump branch pipe made of steel grade 06Kh12N3DL.

Studies of crack resistance were carried out to obtain J -curves of the weld metal, made by manual and automatic welding, and the transition weld zone in the initial state and after thermal aging in the operating temperature range from 100°C to 290°C state. According to the predicted values of $T_K(\tau)$, the values of the fracture toughness $K_{Jc}(\tau)$, as well as the impact strength KCV at design temperature of 290°C for the end of the service life are estimated.

Keywords: lifetime extension, control welded joint, transition weld zone, thermal aging, testing, fracture toughness, critical brittle fracture temperature, J -curves, estimate justification

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-201-217

REFERENCES

1. Timofeev, M.N., Karzov, G.P., Galyatkin, S.N., Mihaleva, E.I., Vliyanie termicheskogo cikla svarki na strukturnye i fazovye prevrashcheniya metalla shva dlya zharoprochnykh Cr-Mo-V stalej [The effect of the thermal welding cycle on the structural and phase transformations of the weld metal for heat-resistant Cr-Mo-V steels], *Neorganicheskie materialy: prikladnye issledovaniya*, 2017, No 8 (6), pp. 886–891.
2. National standard GOST R 58328-2018: *Truboprovody atomnykh stancij. Konceptiya «tech' pered razrusheniem»* [Pipelines of nuclear power plants. The concept of "flow before destruction"].
3. Timofeev, M.N., Galyatkin, S.N., Issledovanie struktury i svoystv metalla svarnogo soedineniya korpusa atomnogo reaktora iz Cr-Mo-V stali v processe izgotovleniya i ekspluatatsii [Investigation of the structure and properties of the metal of the welded joint of the nuclear reactor vessel made of Cr-Mo-V steel during manufacture and operation], *Voprosy materialovedeniya*, 2022, No 2 (110), pp. 111–123.
4. National standard GOST 6996-66: *Svarnye soedineniya. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv* [Welded joints. Methods for determining mechanical properties].
5. *Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov PNAE G-7-002-86* [Calculation standards for the strength of PNAE equipment and pipelines G-7-002-86].
6. ASTM E 1820-16: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.
7. Balandin, Yu.F., Gorynin, I.V., Zvezdin, Yu.I., Markov, V.G., Konstrukcionnye materialy AES [NPP construction materials], Moscow: Energoatomizdat, 1984.
8. Alekseenko, N.N., Amaev, A.D., Gorynin, I.V., Nikolaev, V.A., *Radiation damage of nuclear power plant pressure vessel steels*, La Grange Park, Illinois, USA: Am. Nuc. Soc, 1997.
9. Silaev, A.A., Nosov, S.I., Ocenka dlitel'nogo termicheskogo stareniya na stal' marki 10GN2MFA i ee svarnye soedineniya dlya GCN i GCNA reaktornoy ustanovki s VVER [Assessment of long-term thermal aging on 10GN2MFA grade steel and its welded joints for MCP and MCP reactor installation with VVER], *Tyazheloe mashinostroenie, CNIITMASH*, 2023, No 11–12, pp. 2–6.
10. Siratori, M., Miyosi, T., Macusita, H., *Vychislitel'naya mekhanika razrusheniya* [Computational Mechanics of Destruction], Moscow, Mir, 1986.
11. National standard GOST R 59115.6-2021: *Obosnovanie prochnosti oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok. Metody opredeleniya harakteristik treshchinostojkosti konstrukcionnykh materialov* [Substantiation of the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants. Methods for determining the crack resistance characteristics of structural materials].