

**МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ**

- А. С. Кудрявцев, М. С. Михайлов, С. Н. Петров, Ю. А. Беликова.* Структурные превращения в 12%-ной хромистой мартенситной стали в процессе термического старения ..... 6
- В. А. Карабань, М. А. Рябикина, Д. А. Зареченский, А. В. Чернобай.* Моделирование внутренних напряжений в сталях аустенитного и перлитного класса при износе рабочей части зуба ковша экскаватора ..... 19
- Л. Ф. Сенникова, А. Н. Гангало, Г. К. Волкова, В. А. Глазунова, Е. В. Яшарова, Е. Х. Климова.* Структура и твердость меди М06 после деформационно-термической обработки при комнатной и криогенной температурах ..... 27

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

- Е. Д. Нестерова, Т. И. Бобкова, Р. Ю. Александров, Л. В. Мухамедзянова, А. В. Красиков.* Исследование трибологических характеристик микроплазменного высокоэнтропийного покрытия системы AlNiCoFeCr ..... 35
- М. А. Вохмянин, С. М. Савельев.* Геометрический ауксетизм: аналитический вывод зависимости описанной площади от деформации в ауксетических структурах с сохранением площади тела ..... 44
- С. В. Дьяченко, С. В. Балабанов, М. М. Сычев, А. Г. Чекуряев, В. А. Басова, С. В. Мякин.* Влияние геометрических параметров на энергопоглощающие свойства природоподобной ячеистой структуры с геометрией «примитив Шварца» из стеклонаполненного полиамида ..... 57
- П. А. Кузнецов, Т. В. Косырева, И. В. Шакиров, Л. В. Мухамедзянова, М. С. Михайлов, Д. А. Намеев, А. В. Сидоров, А. А. Мацаев.* Влияние температуры аустенизации на структуру и свойства стали марки 08X18H10T, синтезированной методом прямого лазерного выращивания ..... 76
- А. А. Ахмадиева, В. Д. Мирошкина, В. С. Данько, Н. Л. Савченко, М. В. Григорьев, И. А. Жуков.* Керамика с низкой температурой спекания для технологии LTCC: Обзор. Часть 1. Стеклосодержащая керамика ..... 89
- А. А. Ахмадиева, В. Д. Мирошкина, В. С. Данько, Н. Л. Савченко, М. В. Григорьев, И. А. Жуков.* Низко-температурно спекающаяся керамика для технологии LTCC: Обзор. Часть 2. Бесстекольная керамика ..... 98
- А. А. Иванов, М. Э. Шестаков, И. И. Акимов, И. Н. Трунькин.* Исследования соединения алюминия с нер-жавеющей сталью методом холодного газодинамического напыления ..... 108
- С. Н. Химухин, К. П. Еремина, В. К. Хе.* Комбинированные покрытия, полученные электроискровым легированием ..... 116

**ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

- Г. В. Иванова, Г. В. Цветкова, А. И. Колотий, А. М. Левитский, В. Д. Андреева.* Влияние термообработки на структурные, механические и триботехнические характеристики полиэфирэфиркетона (PEEK), изготовленного методом послойного наплавления (FDM) ..... 125
- А. В. Оконешникова, С. Н. Данилова, Н. Н. Лазарева, А. А. Охлопкова.* Полимерные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и пчелиного воска ..... 137
- П. Н. Петрова, Т. А. Исакова, М. А. Маркова, А. Л. Федоров.* Сравнительный анализ влияния микро- и нановолоконистых углеродных наполнителей на трибологические характеристики ПТФЭ-композиатов в зависимости от схем трения и условий нагружения ..... 147
- Т. А. Борукаев, М. Х. Маламатов, А. Х. Саламов, Л. И. Китиева.* Использование Mg(SbO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> для замены Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в рецептуре кабельного ПВХ-пластиката ..... 160

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ**

- А. В. Ильин, А. А. Лаврентьев, К. Е. Садкин, Р. О. Черчиев.* Масштабный эффект при испытаниях на трещиностойкость листового проката высокопрочных судостроительных сталей ..... 168

**КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ**

- Т. В. Углунц, Р. В. Мендагалиев, М. А. Удовиченко, Т. А. Углунц, Т. Б. Нго, Н. В. Лебедева, О. Г. Климова-Корсмик.* Исследование структуры, свойств и коррозионной стойкости стали 12X18H10T, полученной методом прямого лазерного выращивания ..... 190

**РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

- А. А. Сорокин, Б. З. Марголин, М. С. Михайлов, В. А. Печенкин.* Метод прогнозирования температурно-дозовой зависимости радиационного распухания при нейтронном облучении на базе ионного облучения. Часть 1. Экспериментальное исследование радиационного распухания стали 08X18H10T после ионного облучения ..... 204

**МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ**

УДК: 669.1526-194.55:621.785.78

**СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В 12%-ной ХРОМИСТОЙ МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ**

А. С. КУДРЯВЦЕВ, д-р техн. наук, М. С. МИХАЙЛОВ, С. Н. ПЕТРОВ, д-р техн. наук, Ю. А. БЕЛИКОВА  
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49. E-mail: npk6@crism.ru

Поступила в редакцию 17.04.2026

После доработки 30.04.2026

Принята к публикации 6.05.2026

Исследована эволюция структуры стали марки 07X12НМФБ в процессе термического старения в течение ~5000 ч при температурах от 450 до 600°C. Отмечено существенное изменение фазового состава с увеличением температуры выдержки. Установлено, что в результате старения при температуре 600°C происходит формирование частиц фазы Лавеса размером до 1,5 мкм и образование Z-фазы, что накладывает ограничения на применение стали марки 07X12НМФБ для высоконагруженного оборудования с температурой эксплуатации 600°C и выше.

*Ключевые слова:* хромистая сталь, термическое старение, фазовый состав, плотность дислокаций, фаза Лавеса, Z-фаза

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-126-2-6-18

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Abe F. Research and Development of Heat-Resistant Materials for Advanced USC Power Plants with Steam Temperatures of 700°C and Above // *Materials Science & Engineering A* – 2015. — V. 1. — Is. 2. — P. 211–224. DOI: 10.15302/J-ENG-2015031
2. Rohit Sai Krishna A., Vamshi Krishna B., Sashank T., Harshith D., Subbiah R. Influence and assessment of mechanical properties on treated P91 steel with normalizing processes // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – V. 27. – Part 2. – P. 1555–1558. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.201
3. Wright I. G., Dooley R. B. A review of the oxidation behaviour of structural alloys in steam // *International Materials Reviews*. – 2010. – V. 55. – No 3. – P. 129–167. DOI: 10.1179/095066010X12646898728165
4. Cabet C., Dalle F., Gaganidze E., Henry J., Tanigawa H. Ferritic-martensitic steels for fission and fusion application // *Journal of Nuclear Materials*. – 2019. – V. 523 – P. 510–537. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2019.05.058
5. Abe F., Kern T.-U., Viswanathan R. Creep-resistant steels. – Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, Cambridge England, 2008. – 701 p.
6. Chilukuru H., Durst K., Wadekar S., Schwienheer M., Scholz A., Berger C., Mayer K.H., Blum W. Coarsening of precipitates and degradation of creep resistance in tempered martensite steels // *Materials Science and Engineering A*. – 2009. – V. 510–511. – P. 81–87.
7. Wang W., Xu G., He K. Evolution of creep behavior of CLAM steel during thermal aging // *Journal of Nuclear Materials*. – 2018. – V. 510. – P. 265–269. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2018.07.002
8. Cerjak H., Holzer I., Mayr P., Pein C., Sonderegger B., Kozeschnik E. Proceedings of the International Conference on The Relation between Microstructure and Creep Properties of Martensitic 9–12% Cr Steels // *New Developments on Metallurgy and Applications of High Strength Steels: Buenos Aires*. – 2008. – V. 1, 2. – P. 247–265.
9. Кайбышев Р. О., Скоробогатых В. Н., Щенкова И. А. Формирование Z-фазы и перспективы применения сталей мартенситного класса с 11% Cr для работы при температурах выше 590°C // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2010. – № 3 (657). – С. 4–14.
10. Hald J. Microstructure and long-term creep properties of 9–12% Cr steels // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 2008. – V. 85. – Is. 1–2. – P. 30–37.
11. Карзов Г. П., Кудрявцев А. С., Марков В. Г., Гришмановская Р. Н., Трапезников Ю. М., Ананьева М. А. Разработка конструкционных материалов для атомных энергетических установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем // *Вопросы материаловедения*. – 2015. – № 2 (82). – С. 23–33.
12. Кудрявцев А. С., Суворов С. А., Артемьева Д. А., Рамазанов Р. М. Коррозионная стойкость 12%-ной хромистой стали в условиях эксплуатации парогенератора реакторной установки с натриевым теплоносителем // *Вопросы материаловедения*. – 2022. – № 3 (111). – С. 131–147.

- 13.Блохина А. Н., Лякишев С. Л., Соломатина В. А. Перспективный корпусной парогенератор для энергоблока на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Обеспечение безопасности АЭС. – 2012. – № 31. – С. 5–14.
- 14.Рыбин В. В., Рубцов А. С., Нестерова Е. В. Метод одиночных рефлексов (ОР) и его применение для электронномикроскопического анализа дисперсных фаз // Заводская лаборатория. – 1982. – № 5. – С. 21–26.
- 15.Федосеева А. Э., Козлов П. А., Дудко В. А. и др. Микроструктурные изменения в стали 10Х9В2МФБР при ползучести в течение 40 000 часов при 600°C // Физика металлов и металловедение. – 2015. – Т. 116. – № 10. – С. 1102–1111.
- 16.Кайбышев Р. О., Скоробогатых В. Н., Щенкова И. А. Новые стали мартенситного класса для тепловой энергетики. Жаропрочные свойства // Физика металлов и металловедение. – 2010. – Т. 109. – № 2. – С. 200–215.
- 17.Dudova N., Plotnikova A., Molodov D., Belyakov A., Kaibyshev R. Structural changes of tempered martensitic 9%Cr–2%W–3%Co steel during creep at 650°C // Mater. Sci. Eng. A. – 2012. – V. 534 – P. 632–639. DOI: 10.1016/j.msea.2011.12.020
- 18.Panait C., Bendick W., Fuchsmann A., Gourgues-Lorenzon A.-F., Besson J. Study of the microstructure of the Grade 91 steel after more than 100 000 h of creep exposure at 600°C // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2010. – N 87 (6). – P. 326–335. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2010.03.017
- 19.Jin X., Zhu B., Li Y., Zhao Y., Xue F., Zhang G. Effect of the microstructure evolution on the high-temperature strength of P92 heat-resistant steel for different service times // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2020. – V. 186. – P. 104–131. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2020.104131
- 20.Тарасенко Л. В., Титов В. И. Процессы фазовой нестабильности в жаропрочных сталях при длительных нагревах // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2005. – № 12. – С. 10–15.

УДК 669.15–194.56:539.538:621.879

#### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛЯХ АУСТЕНИТНОГО И ПЕРЛИТНОГО КЛАССА ПРИ ИЗНОСЕ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ ЗУБА КОВША ЭКСКАВАТОРА**

В. А. КАРАБАНЬ, М. А. РЯБИКИНА, канд. техн. наук, Д. А. ЗАРЕЧЕНСКИЙ, канд. техн. наук, А. В. ЧЕРНОБАЙ

*Приазовский государственный технический университет, филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 287642, Мариуполь, ул. Апатова, д.115. E-mail: office-pstu@yandex.ru*

Поступила в редакцию 17.11.2025

После доработки 15.01.2026

Принята к публикации 12.02.2026

В статье приведены результаты компьютерного моделирования напряженно-деформационного состояния зубьев ковша экскаватора после эксплуатации и металлографических исследований натуральных образцов, изготовленных из сталей марок 110Г13Л и термически обработанной 30ХГСА. Установлено, что в поверхностном слое этих сталей при износе образуется наноразмерная структура на глубину порядка 0,2 мм от рабочей поверхности. Исследования поля напряжений, достигающих уровня предела текучести материала зуба, показали необходимость учета изменений структурного состояния металла, склонного к деформационному упрочнению, для адекватного конечно-элементного анализа при моделировании с определением размеров и глубины зон, испытывающих критические нагрузки.

*Ключевые слова:* зубья ковша, моделирование, напряженно-деформированное состояние, структура, глубина наклепа, твердость

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-126-2-19-26

*Авторы выражают благодарность за помощь в редактировании статьи доктору технических наук, профессору Оленину Михаилу Ивановичу.*

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Лебедев Д. И., Федоров М. В., Голиков Н. И., Тихонов Р. П., Винокуров Г. Г. Натурные испытания служебных характеристик наплавленной коронки рыхлителя бульдозера Komatsu D375A // Наука и образование. – 2016. – № 2. – С. 81–87.
2. Йулдашев Ш. Х. Теоретические основы восстановления зубьев ковшей экскаваторов // Universum: технические науки. – 2023. – № 11 (116). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16230> (дата обращения 15.05.2026)

3. Дэлэг Д., Ванчинжав С., Пурэвдорж Н. Исследование самозатачивания зуба ковша экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 1. – С. 402–416.
4. Тепляшин М. В., Комков В. Г., Стариенко В. А. Теоретические исследования методов восстановления рабочих органов с использованием электрошлаковой технологии // Ученые заметки ТОГУ. – 2013. – Т. 4. – № 4. – С. 1537–1542.
5. Федотенко Ю. А., Реброва И. А., Булаева Д. В. Экспериментальные исследования режущих элементов рабочего органа подкапывающей машины // Вестник СибАДИ. – 2014. – № 1 (35). – С. 38–42.
6. Dong Zh., Jiang F., Tan Y., Wang F., Ma R., Liu J. Review of the Modeling Methods of Bucket Tooth Wear for Construction Machinery // Lubricants. – 2023. – N 11 (6). – P. 253–272.
7. Овсянников В. Е. К вопросу применимости расчетного метода оценки сопротивления износу деталей после термодиффузионного упрочнения // Вестник СибАДИ. – 2018. – № 3 (61). – С. 412–420.
8. Болобов В. И. Влияние формы зубьев ковша на энергию, затрачиваемую экскаватором при работе по крупнокусковым горным породам // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 17–1. – С. 179–185.
9. Болобов В. И., Ахмеров Э. В., Ракитин И. В. Влияние вида горной породы на закономерности изнашивания коронки зуба ковша экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6–2. – С. 189–204.
10. Крыжевич Г. Б., Филатов А. Р. Комплексный подход к топологической и параметрической оптимизации судовых конструкций // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2020. – № 1 (391). – С. 95–108.
11. Французов А. А., Шаповалов Я. И., Вдовин Д. С. Применение метода топологической оптимизации в задачах проектирования грузоподъемной техники // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 2 (42). – С. 99–108.
12. Левин В. А., Зингерман К. М., Вершинин А. В., Васильев П. А. Топологическая оптимизация элементов конструкций с учетом структурной неоднородности материала с использованием градиентного метода // Чебышевский сборник. – 2022. – Т. 23. – Вып. 4. – С. 308–326.
13. Kalkat M., Bahadır M., Yılmaz F. The determination of the working life of backhoe-loader bucket teeth showing abrasive wear under the effect of dynamic loads // J. Eng. Sci. – 2023. – № 12 (4). – P. 1499-1507. DOI: 10.28948/ngumuh.1324598
14. Громыка Д. С., Гоголинский К. В., Кремчев Э. А. Моделирование термической усталости зуба при циклическом тепловом воздействии // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 2. – С. 23–29.
15. Попов Д. А., Патюков С. С. Особенности условий эксплуатации рабочих органов строительно-дорожных машин и факторы, влияющие на их ресурс // Воронежский научно-технический вестник. – 2015. – № 1 (11). – С. 85–95.
16. Громыка Д. С., Гоголинский К. В. Методика диагностирования состояния и оценки остаточного ресурса коронки зубьев ковшей экскаваторов // Дефектоскопия. – 2022. – № 5. – С. 51–60.
17. Звонарев И. Е., Иванов С. Л., Шишлянников Д. И., Фокин А. С. Исследования поверхностной твердости металла в областях поверхностного износа и разрушения деталей горных машин // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 11. – С. 67–76.
18. Буцукин В. В., Ширяев А. В. Исследование механических характеристик закаленной валковой стали 90ХФ // Сварочное производство. – 2025. – № 1. – С. 56–59.
19. Иванов А. В., Петров Д. Н., Сидоров К. Л. Повышение износостойкости зубьев экскаваторных ковшей путем локального упрочнения // Цветные металлы. – 2018. – № 7. – С. 67–72.

УДК 669.36:621.777

#### **СТРУКТУРА И ТВЕРДОСТЬ МЕДИ М06 ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ КОМНАТНОЙ И КРИОГЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРАХ**

Л. Ф. СЕННИКОВА, канд. техн. наук, А. Н. ГАНГАЛО, канд. техн. наук, Г. К. ВОЛКОВА, В. А. ГЛАЗУНОВА, Е. В. ЯШАРОВА, Е. Х. КЛИМОВА

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина», 283048,

Донецкая Народная Республика, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, д. 72. E-mail: ludsennikova@mail.ru

Поступила в редакцию 1.11.2025

После доработки 19.11.2025

Принята к публикации 28.11.2025

Изучено влияние деформации осадкой при комнатной и криогенной температурах на структуру и твердость меди М06 в крупнокристаллическом (КК) и субмикроструктурном (СМК) состояниях. Показано, что при сравнительно небольших пластических деформациях осадкой ( $\epsilon \sim 1,0$ ) КК состояния меди криогенные температуры способствуют интенсификации измельчения зерен. После больших пластических деформаций для СМК структуры эффект измельчения зерен при последующей криогенной осадке очень мал. Установлено, что, используя комбинацию методов равноканального углового прессования и криогенной осадки, можно существенно повысить твердость меди М06 до 1410 МПа.

**Ключевые слова:** деформационно-термическая обработка, деформация осадкой, крупнокристаллическое состояние, субмикроструктурное состояние

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2026-126-2-27-34

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Edalati K. et al. Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances // *Mater. Res. Lett.* – 2022. – V. 10. – N 4. – P. 163–256.
2. Prangnell P. B., Bowen J. R., Apps P. J. Ultra-fine grain structures in aluminium alloys by severe deformation processing // *Mater. Sci. Eng.: A.* – 2004. – V. 375–377. – P. 178–185.
3. Huang Y., Prangnell P. B. The effect of cryogenic temperature and change in deformation mode on the limiting grain size in a severely deformed dilute aluminium alloy // *Acta Mater.* – 2008. – V. 56. – P. 1619–1632.
4. Zhang Y., Tao N. R., Lu K. Mechanical properties and rolling behaviors of nanograined copper with embedded nanotwin bundles // *Acta Mater.* – 2008. – V. 56. – P. 2429–2440.
5. Пилюгин В. П., Гапонцева Т. М. и др. Эволюция структуры и твердости никеля при холодной и низкотемпературной деформации под давлением // *ФММ.* – 2008. – Т. 105. – № 4. – С. 438–448.
6. Li Y. S., Tao N. R., Lu K. Microstructural evolution and nanostructure formation in copper during dynamic plastic deformation at cryogenic temperatures // *Acta mater.* – 2008. – V. 56. – P. 230–241.
7. Конькова Т. Н., Миронов С. Ю., Корзников А. В. Интенсивная криогенная деформация меди // *ФММ.* – 2010. – Т. 109. – С. 184–189.
8. Panigrahi S. K., Jayaganathan R. A study on the mechanical properties of cryorolled Al-Mg-Si alloy // *Mater. Sci. Eng.* – 2008. – V. 480. – P. 299–305.
9. Dalla Torre F., Lapovok R., Sandlin J., Thomson P. F., Davies C. H. J., Pereloma E. V. Microstructures and properties of copper processed by equal channel angular extrusion for 1–16 passes // *Acta Mater.* – 2004. – V. 52. – P. 4819–4832.
10. Русаков А. А. Рентгенография металлов. – М.: Атомиздат, 1977. – 479 с.
11. Сенникова Л. Ф., Гангало А. Н., Ткаченко В. М., Волкова Г. К., Глазунова В. А., Климова Е. Х. Влияние гидрокстружии на структуру и механические свойства меди М06, предварительно обработанной равноканальным угловым прессованием // *Вопросы материаловедения.* – 2025. – № 3 (123). – С. 32–39.
12. Рогачев С. О., Землякова Н. В. Особенности рекристаллизации меди в процессе интенсивной пластической деформации при комнатной температуре // *Вестник научно-технического развития.* – 2024. – № 173. – С. 3–8.
13. Горелик С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: МИСиС, 2005. – 432 с.
14. Утяшев Ф. З., Рааб Г. И., Валитов В. А. Деформационное наноструктурирование металлов и сплавов. – СПб.: Научно-технические технологии. – 2020. – 185 с.
15. Полухин П. И., Горелик С. С., Воронцов В. К. Физические основы пластической деформации. – М.: Металлургия, 1982. – 584 с.

#### ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.793.74:621.762.34:621.891

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОПЛАЗМЕННОГО ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ AlNiCoFeCr

Е. Д. НЕСТЕРОВА, Т. И. БОБКОВА, канд. техн. наук, Р. Ю. АЛЕКСАНДРОВ, Л. В. МУХАМЕДЗЯНОВА,  
А. В. КРАСИКОВ, канд. хим. наук

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

Поступила в редакцию 29.01.2026

После доработки 2.03.2026

Принята к публикации 24.03.2026

© 2026

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

<http://www.crism-prometey.ru>

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

В работе представлены исследования высокоэнтропийного покрытия, изготовленного микроплазменным напылением из композиционных порошков системы AlNiCoFeCr, при воздействии сил трения в поперечном и продольном направлениях. Проведенные трибологические испытания по схеме «штифт – диск» и локальная склерометрия по квадрату позволили установить перспективность покрытия для защиты узлов трения стальных изделий.

**Ключевые слова:** высокоэнтропийные покрытия, трибология, склерометрия, микроструктура, микротвердость

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2026-126-2-35-43

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Болсуновская Т. А., Ефимочкин И. Ю., Севостьянов Н. В. Влияние марки графита в качестве твердой смазки на триботехнические свойства металлического композиционного материала // Труды ВИАМ. – 2018. – № 7. – С. 69–77.
2. Сорокин В. М., Курников А. С. Основы триботехники и упрочнения поверхностей деталей машин. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
3. Мышкин Н. К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с.
4. Yeh J.-W., Chen S. K., Lin S. J., Gan J. Y., Chin T. S. et al. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes // *Advanced Engineering Materials*. – 2004. – V. 6. – N 5. – P. 299–303. URL: <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
5. Cantor B. Multicomponent high-entropy Cantor alloys // *Progress in Materials Science*. – 2021. – V. 120. – P. 100754. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100754>
6. Bolelli G., Bonilauri M. F. et al. HVOF deposition of TiC-based hardmetal coatings with High-Entropy Alloy (HEA) matrix // *Surface & Coatings Technology*. – 2025. – V. 512. – P. 132386. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2025.132386>
7. Jin B., Zhang N., Yin S. Strengthening behavior of AlCoCrFeNi(TiN) high-entropy alloy coatings fabricated by plasma spraying and laser remelting // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2022. – V. 121. – P. 163–173. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.12.055>
8. Nakonechnyi S., Soloviova T., Yurkova A., Solodkiy I., Loboda P. Cold sprayed AlNiCoFeCr-TiB<sub>2</sub> metal matrix composite coatings // *Vacuum*. – 2023. – V. 213. – P.112144. URL: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112144>
9. Bolelli G., Bonilauri M. F. et al. Deposition of High-Entropy Alloy (HEA) coatings by HVOF and cold gas spray // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2025. – V. 1039. – P. 183050. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.183050>
10. Harfouche M. M., Liang J., Aghasibeig M., Tarasi F., Moreau C., Dolatabadi A., Wong W., Azarmi F. Effect of WC powder morphology on dry sliding wear behavior of cold sprayed CrMnCoFeNi cantor HEA composite coatings at room temperature // *Wear*. – 2025. – V. 571. – P. 205838. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.205838>
11. Shi X., Li Q., He P., Feng K., Li Z., Wu Y. Microstructure and properties of plasma-sprayed AlCoCrFeNi high-entropy alloy coatings via CeO<sub>2</sub> doping // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2025. – V. 38. – P. 4351–4364. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.08.268>
12. Feng C., Wang X. et al. High Hardness and Wear Resistance in AlCrFeNiV High-Entropy Alloy Induced by Dual-Phase Body-Centered Cubic Coupling Effects // *Materials*. – 2022. – V. 15. – N 19. – P.6896. URL: <https://doi.org/10.3390/ma15196896>
13. Zhang X., Yang Z., Deng Y. Molecular Dynamics Study on Wear Resistance of High Entropy Alloy Coatings Considering the Effect of Temperature // *Materials*. – 2024. – V. 17, N 16. – P. 3911. URL: <https://doi.org/10.3390/ma17163911>
14. 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 // *Вопросы материаловедения*. – 2025. – № 2 (122). – С. 75–85.
15. Maroszek, M. et al., Anisotropy of Mechanical Properties of 3D-Printed Materials—Influence of Application Time of Subsequent Layers // *Materials*. – 2025. – V. 18. – N 14. – Art. 3845. URL: <https://doi.org/10.3390/ma18163845>
16. Кравчук, К. Г. Измерение трибологических свойств покрытий и композиционных материалов на субмикронном и нанометровом масштабах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2015

17. Zhang, H., Wu H. et al. Friction and wear performance of 3D-printed graphite/SiC composites with different graphite layer deflection angles // Tribology International. – 2024. – V. 199. – P. 109986. URL: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109986>

18. Усеинов А. С., Кравчук К. Г., Львова Н. В. Измерение износостойкости сверхтонких наноструктурированных покрытий // Наноиндустрия. – 2011. – № 4. – С. 46–50.

УДК 539.382:620.172

## **ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ АУКСЕТИЗМ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ВЫВОД ЗАВИСИМОСТИ ОПИСАННОЙ ПЛОЩАДИ ОТ ДЕФОРМАЦИИ В АУКСЕТИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ С СОХРАНЕНИЕМ ПЛОЩАДИ ТЕЛА**

М. А. ВОХМЯНИН, канд. техн. наук, С. М. САВЕЛЬЕВ

*Вятский государственный университет, 610000, г. Киров, ул. Московская, 36. E-mail: stud143318@vyatsu.ru*

Поступила в редакцию 22.10.2025

После доработки 14.11.2025

Принята к публикации 11.12.2025

В статье предлагается аналитический метод расчета зависимости описанной площади от параметра деформации в плоских ауксетических структурах, сохраняющих площадь тела при растяжении: шарнирно соединенных квадратов, треугольников, шестиугольников и параллелограммов.

Выведены явные формулы для каждой конфигурации, связывающие геометрические параметры структуры с ее ауксетическим откликом – поперечным расширением при одноосном растяжении, что позволяет прогнозировать поведение материала без численного моделирования. Результаты могут быть использованы для проектирования метаматериалов с программируемыми механическими свойствами, где ключевым требованием является сохранение площади тела при контролируемом расширении.

*Ключевые слова:* ауксетик, ауксетизм, аналитическая модель, отрицательный коэффициент Пуассона, геометрические структуры, планиметрия, планиметрический расчет, геометрический расчет

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2026-126-2-44-56

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Alderson A., Alderson K. L. Auxetic materials // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. – 2007. – V. 221. – Is. 4. – P. 565–575. DOI: 10.1243/09544100JAERO185
2. Gibson L. J., Ashby M. F., Harley B. A. Cellular materials in nature and industry. – Cambridge: CUP, 2010. – 309 p.
3. Grima J. N., Evans K. E. Auxetic behavior from rotating squares // J. Mater. Sci. Lett. – 2000. – V. 19. – P. 1563–1565. DOI: 10.1023/A:1006781224002
4. Milton G. W. The theory of composites. – Cambridge: CUP, 2002. – 719 p.
5. Torquato S. Random heterogeneous materials: microstructure and macroscopic properties. – New York: Springer, 2002. – 703 p.
6. Liu X. N., Hu G. K., Huang G. L., Sun C. T. An elastic metamaterial with simultaneously negative mass density and bulk modulus // Appl. Phys. Lett. – 2011. – V. 98. – Art. 251907. DOI: 10.1063/1.3597651
7. Zadpoor A. A. Mechanical performance of additively manufactured meta-biomaterials // Acta Biomaterialia. – 2019. – V. 85. – P. 41–59. DOI: 10.1016/j.actbio.2018.12.038
8. Lurie A. I. Theory of elasticity. – Berlin: Springer, 2005. – 1050 p.

УДК 678.745.2:539.217.1

## **ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩИЕ СВОЙСТВА ПРИРОДОПОДОБНОЙ ЯЧЕИСТОЙ СТРУКТУРЫ С ГЕОМЕТРИЕЙ «ПРИМИТИВ ШВАРЦА» ИЗ СТЕКЛОПОЛНЕННОГО ПОЛИАМИДА**

С. В. ДЬЯЧЕНКО<sup>1,2</sup>, канд. физ.-мат. наук, С. В. БАЛАБАНОВ<sup>1</sup>,

М. М. СЫЧЕВ<sup>1,2,3</sup>, д-р. техн. наук, А. Г. ЧЕКУРЯЕВ<sup>1</sup>, В. А. БАСОВА<sup>2</sup>,

С. В. МЯКИН<sup>2</sup>, канд. хим. наук

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 24–26/49

Поступила в редакцию 11.08.2025

После доработки 23.01.2026

Принята к публикации 5.03.2026

В работе проведено исследование энергопоглощающих ячеистых структур с геометрией трижды периодической поверхности минимальной энергии типа «примитив Шварца», изготовленных из стеклонанополненного полиамида методом селективного лазерного спекания. В результате исследования проанализированы различия в деформации и механических свойствах структур при испытаниях на сжатие в зависимости от геометрического параметра  $t$ . Предложены критерии отбора ячеистых структур, при их использовании в условиях упругого и пластического деформирования.

**Ключевые слова:** 3D-печать, селективное лазерное спекание, полиамид, ячеистые структуры, трижды периодическая поверхность минимальной энергии, примитив, энергопоглощение

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2026-126-2-57-75

*Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 21-73-30019-П «Новые физические и химические принципы технологии металлических, металлокерамических и керамических материалов с управляемой макро-, микро- и наноструктурой и уникальными служебными характеристиками».*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лорд Э. Э., Маккей А. Л., Ранганатан С. Новая геометрия для новых материалов / Под ред. В. Я. Шевченко, В. Е. Дмитриенко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 260 с.
2. Feng J. et al. Triply periodic minimal surface (TPMS) porous structures: from multi-scale design, precise additive manufacturing to multidisciplinary applications // International Journal of Extreme Manufacturing. – 2022. – V. 4. – N 2. – Art. 022001. DOI: 10.1088/2631-7990/ac5be6
3. Yang W., An J., Chua C. K. et al. Acoustic absorptions of multifunctional polymeric cellular structures based on triply periodic minimal surfaces fabricated by stereolithography // Virtual and Physical Prototyping. – 2020. – V. 15. – Is. 2. – P. 242–249. DOI: 10.1080/17452759.2020.1740747
4. Сысоев Е. И., Сычев М. М., Шафигуллин Л. Н., Дьяченко С. В. Проектирование звукопоглощающих сотовых материалов с геометрией трижды периодических поверхностей минимальной энергии (ТППМЭ) // Акустический журнал. – 2024. – Т. 70. – № 5. – С. 765–777. DOI: 10.31857/S0320791924050111
5. Surendra S. R., Balkrishna M., Pradeep K. et al. Flow Characterization in Triply-Periodic-Minimal-Surface (TPMS) based Porous Geometries: Part 2 // Heat Transfer. – 2023. – P. 1–31. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2427715/v1
6. Zhou N. et al. Stereolithographically 3D Printed SiC Metastructure for Ultrabroadband and High Temperature Microwave Absorption // Advanced Materials Technologies. – 2022. – V. 8. – Is. 4. – Art. 2201222. DOI: 10.1002/admt.202201222
7. DeValk T., Lakes R. Poisson's ratio and modulus of gyroid lattices // Physica status solidi (b). – 2021. – V. 258. – Is. 12. – P. 1–7. DOI: 10.1002/pssb.202100081
8. Корнейчук А. Н. и др. Исследование прочностных свойств термостойких стеклопластиковых сотовых наполнителей для конструкции аэродинамического экрана // Авиационные материалы и технологии. – 2019. – № 4 (57). – С. 35–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-35-40
9. Васильев А. В. и др. Выбор оптимального программного обеспечения для численного моделирования работы энергопоглощающих элементов перспективных систем амортизации специальных объектов в контексте импортозамещения средств инженерного анализа // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». – 2022. – № 3. – С. 5–21. URL: <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2022-3-5-21>
10. Алешин В. Ф. и др. Посадочные устройства космических аппаратов (КА) на основе пенопластов и сотоблоков // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2010. – № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/posadochnye-ustroystva-kosmicheskikh-apparatov-ka-na-osnove-penoplastov-i-sotoblokov> (дата обращения: 20.06.2024)
11. Rawat P., Zhu D., Rahman Dr., Barthelat F. Structural and mechanical properties of fish scales for the bio-inspired design of flexible body armors: A review // Acta Biomaterialia. – 2021. – V. 121. – P. 41–67. DOI: 10.1016/j.actbio.2020.12.003
12. Корниевский А. С., Наседкин А. В. Сравнение моделей пен, составленных из регулярных и нерегулярных массивов открытых ячеек Гибсона – Эшби // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2021. – № 3. – С. 70–83.

13. Wang W. et al. Material extrusion 3D printing of large-scale SiC honeycomb metastructure for ultra-broadband and high temperature electromagnetic wave absorption // *Additive Manufacturing*. – 2024. – V. 85. – P. 104158. URL: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104158>
14. Shevchenko, V.Y., Sychev, M.M., Lapshin, A.E. et al. Ceramic Materials with the Triply Periodic Minimal Surface for Constructions Functioning under Conditions of Extreme Loads // *Glass Phys Chem*. – 2017. – V. 43. – P. 605–607. URL: <https://doi.org/10.1134/S1087659617060153>
15. Diachenko S. V., Dolgin A. S., Khristyuk N. A. et al. 3D Printing of Ceramic Elements with Q-Surface Geometry for the Fabrication of Protective Barrier // *Ceramics*. – 2023. – V. 6. – N 2. – P. 912–921. DOI: 10.3390/ceramics6020053
16. Arsentev M. Yu., Sysoev E. I., Vorobyov S. A., Balabanov S. V., Diachenko S. V., Sychov M. M., Skorb E. V. Crystal-inspired cellular metamaterials with reduced Poisson's ratio as analogues of TPMS // *Composite Structures*. – 2025. – V. 363. – P. 119097. DOI: 10.1016/j.compstruct.2025.119097
17. Balabanov S. V., Kuropiatnik A. M., Sychov M. M. et al. Gradient energy absorbing nature-inspired metamaterial based on the "Schwarz Primitive" geometry // *Materials Physics and Mechanics*. – 2025. – V. 53. – N 2. – P. 157–167. DOI: 10.18149/MPM.5322025\_14
18. Borovkov A. I. et al. Finite element analysis of elastic properties of metamaterials based on triply periodic minimal surfaces // *Materials Physics and Mechanics*. – 2024. – V. 52. – N 2. – P. 11–29. [http://dx.doi.org/10.18149/MPM.5222024\\_2](http://dx.doi.org/10.18149/MPM.5222024_2)
19. Nefedova L. A., Ivkov V. I., Diachenko S. V. et al. Additive manufacturing of ceramic insulators // *Materials Today: Proceedings : 2019 International Scientific Conference on Materials Science: Composites, Alloys and Materials Chemistry, MS-CAMC 2019*. – St Petersburg, 2020. – V. 30. – P. 520–522. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.040
20. Арсентьев М. Ю., Балабанов С. В., Макогон А. И., Сычев М. М. Экспериментальное и теоретическое исследование механических свойств полиамидных изделий с топологией «примитив Шварца», изготовленных методом 3D-печати // *Физика и химия стекла*. – 2019. – Т. 45. – № 6. – С. 596–600. DOI: 10.1134/S0132665119060027
21. Balabanov S. V. et al. Mechanical properties of 3D printed cellular structures with topology of triply periodic minimal surfaces // *Materials Today: Proceedings. 2019 International Scientific Conference on Materials Science: Composites, Alloys and Materials Chemistry, MS-CAMC 2019*. – St Petersburg., 2020. – P. 439–442.
22. Yoo D. J. Recent trends and challenges in computer-aided design of additive manufacturing-based biomimetic scaffolds and bioartificial organs // *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* – 2014. – V. 15. – P. 2205–2217. DOI: 10.1007/s12541-014-0583-7
23. Сычев М. М., Лебедев Л. А., Дьяченко С. В. и др. Аддитивные технологии. – СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2018. – 36 с.
24. Dolgin A. S., Makogon A. I., Bogdanov S. P. Development of 3d printing technology with ceramic paste and study of properties of printed corundum products // *Materials Science Forum*. – 2021. – V. 1040 MSF. – P. 178–184. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.178
25. Pronin I. A., Averin I. A., Karmanov A. A. et al. Control over the Surface Properties of Zinc Oxide Powders via Combining Mechanical, Electron Beam, and Thermal Processing // *Nanomaterials*. – 2022. – V. 12. – Is. 11. DOI: 10.3390/nano12111924
26. Al-Ketan O., Rowshan R. Abu Al-Rub R. K. Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials // *Addit. Manuf.* – 2018. – V. 19. – P. 167–183. DOI: 10.1016/j.addma.2017.12.006
27. Lin Z.-H., Pan J.-H., Li H.-Y. Mechanical Strength of Triply Periodic Minimal Surface Lattices Subjected to Three-Point Bending // *Polymers*. – 2022. – V. 14. – N 2885. URL: <https://doi.org/10.3390/polym14142885>
28. Arsentev M. Yu. et al. High-throughput screening of 3D-printed architected materials inspired by crystal lattices: procedure, challenges, and mechanical properties // *ACS Omega*. – 2023. – V. 8. – N 28. – P. 24865–24874. DOI: 10.1021/acsomega.3c00874
29. Zhu L. Y., Li L., Li Z. A., Shi J. P., Tang W. L., Yang J. Q. Jiang Q. Design and biomechanical characteristics of porous meniscal implant structures using triply periodic minimal surfaces // *J. Transl. Med.* – 2019. – V. 17. – Art. 89. DOI: 10.1186/s12967-019-1834-2
30. Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2023663731, Российская Федерация. Программный комплекс для анализа структуры материала (ПК «АнСМат»). – № 2023662565, заявл. 16.06.2023, опубл. 27.06.2023, бюл. № 7.

31. Diachenko S. V., Balabanov S. V., Sychov M. M. et al. The impact of the geometry of cellular structure made of glass-filled polyamide on the energy-absorbing properties of design elements // *Strojnski Vestnik*. – 2024. – V. 70. – Is. 11–12. – P. 607–619. DOI: 10.5545/sv-jme.2024.975
32. Markov M. A. et al. Investigation of the Microstructure of Reaction-Sintered Silicon Carbide Ceramics Using Approaches of Digital Materials Science // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2024. – V. 53. – N 6. – P. 624–631.
33. Markov M. A., Nikolaev A. N., Chekuryaev A. G., Sychev M. M., Dyuskina D. A., Bykova A. D., Belyakov A. N. Research on the Method of Obtaining Ceramics of Reaction-Sintered Materials Based on SiC–MoSi<sub>2</sub> Using Analytical Approaches of Digital Materials Science // *Glass Physics and Chemistry*. – 2024. – V. 50, N 3. – P. 260–269.
34. Chekuryaev A. G., Sychov M. M., Myakin S. V. Analysis of the Structure of Composite Systems by Means of Fractal Characteristics Using the BaTiO<sub>3</sub>–Fullerenol–CEPVA System as an Example // *Phys. Solid State*. – 2021. – V. 63. – P. 789–795. URL: <https://doi.org/10.1134/S1063783421060032>
35. Chekuryaev A. G. et al. Analysis of Microstructure and Fractal Characteristics of Polymer Based Dielectric Composites with Graphene-Modified Barium Titanate Filler by Box-Counting Method // *Glass Phys. Chem.* – 2022. – V. 48. – P. 659–663. URL: <https://doi.org/10.1134/S1087659622600892>
36. Chekuryaev A. G. et al. Digital Characteristics of Microstructure of Diamond-Silicon Carbide Composites // *Ceramics*. – 2023. – V. 6. – P. 1067–1077. URL: <https://doi.org/10.3390/ceramics6020063>
37. Sychov M. M. et al. Digital Materials Science: Numerical Characterization of Steel Microstructure / Khakhomov S., Semchenko I., Demidenko O., Kovalenko D. (Ed.) // *Research and Education: Traditions and Innovations (Inter-academia, 2021). Lecture Notes in Networks and Systems*, Springer, Singapore. – 2022. – V. 422. – P. 159–169.
38. Gibson L. J., Ashby M. F. *The Mechanics of Three-Dimensional Cellular Materials*. // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. – 1982. – V. 382. – Is. 1782. – P. 43–59.

УДК 669.14.018.8:621.762.5:621.78–978

### **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ АУСТЕНИЗАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТАЛИ МАРКИ 08X18H10T, СИНТЕЗИРОВАННОЙ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ**

П. А. КУЗНЕЦОВ<sup>1</sup>, Т. В. КОСЫРЕВА<sup>1</sup>, И. В. ШАКИРОВ<sup>1</sup>, Л. В. МУХАМЕДЗЯНОВА<sup>1</sup>, М. С. МИХАЙЛОВ<sup>1</sup>,  
Д. А. НАМЕЕВ<sup>2</sup>, А. В. СИДОРОВ<sup>2</sup>, А. А. МАЦАЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49

<sup>2</sup> АО «ТВЭЛ», 119017, Москва, ул. Большая Ордынка, д. 24.

<sup>3</sup> ООО «Росатом Аддитивные технологии», 115409, Москва, Каширское шоссе, 49

Поступила в редакцию 15.07.2025

После доработки 15.01.2026

Принята к публикации 30.01.2026

Представлены результаты исследования механических свойств и микроструктуры нержавеющей аустенитной стали марки 08X18H10T, синтезированной методом прямого лазерного выращивания (ПЛВ), до и после аустенизации в диапазоне температур 1050–1250°C. Установлено, что исходная структура при температуре 1150°C полностью рекристаллизуется, что обеспечивает максимальный уровень ударной вязкости; образование, рост и растворение дисперсных частиц влияют на морфологию зерна и механические свойства стали после аустенизации. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования процессов термической обработки сталей, изготовленных методом ПЛВ, с целью повышения вязкости и пластичности.

**Ключевые слова:** нержавеющая сталь 08X18H10T, прямое лазерное выращивание (ПЛВ), аустенизация, микроструктура, рекристаллизация, ударная вязкость, термическая обработка, рентгеноструктурный анализ, электронная микроскопия, механические свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-126-2-76-88

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Zekovic S., Dwivedi R., Kovacevic R. Numerical simulation and experimental investigation of gas-powder flow from radially symmetrical nozzles in laser-based direct metal deposition // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2007. – V. 47. – P. 112–123.
2. Yin H., Song M., Deng P., Li L., Prorok B., Lou X. Thermal stability and microstructural evolution of additively manufactured 316 L stainless steel by laser powder bed fusion at 500–800°C // *Additive Manufacturing*. – 2021. – V. 41. – 18 p.

3. DebRoy T., Wei H. L., Zuback J. S., Mukherjee T., Elmer J. W., Milewski J. O., Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties // *Progress in Materials Science*. – 2018. – V. 92. – P. 112–224.
4. Haghdadi N., Laleh M., Moyle M., Primig S. Additive Manufacturing of Steels: a Review of Achievements and Challenges // *Journal of Materials Science*. – 2020. – V. 56. – P. 64–107.
5. Kučerová L., Jandova A., Zetková I. Comparison of Microstructure and Mechanical Properties of Additively Manufactured and Conventional Maraging Steel // *Defect and Diffusion Forum*. – 2020. – V. 405. – P. 133–138.
6. Astafurov S., Astafurova E. Phase Composition of Austenitic Stainless Steels in Additive Manufacturing: A Review // *Metals*. – 2021. – V. 11. – P. 19.
7. Паршин А.М. Структура, прочность и радиационная повреждаемость коррозионноустойчивых сталей и сплавов // Челябинск: Металлургия. – 1988. – 655 с.
8. Ghayoor M., Lee K., He Y., Chang C. H., Paul B. K., Pasebani S. Selective laser melting of 304L stainless steel: Role of volumetric energy density on the microstructure, texture and mechanical properties // *Additive Manufacturing*. – 2019. – V. 32 (2). – Art. 101011.
9. Wang Q., Chen J., Sun G., Liu H., Yuan X., Wang Z., Pan H., Zhang Y., Jiang P., Wu W. Microstructure and mechanical performance of 304 stainless steel fabricated by powder-bed selective laser melting process: The effect of post-processing heat treatment // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020. – V. 9. – No. 3. – P. 4770–4783.
10. Королев В.А., Сидоров А.В., Михайлов И.Ю., Мацаев А.А., Земляков Е.В., Кузнецов П.А., Намеев Д.А. Разработка технологии прямого лазерного выращивания крупногабаритных изделий атомной энергетики // *Перспективные материалы. Новые технологии получения и обработки материалов*. – 2023. – № 5. – С. 46–55.
11. Сидоров А. В., Михайлов И. Ю., Мацаев А. А., Земляков Е. В., Кузнецов П. А., Дуб А. В., Намеев Д. А. Разработка технологии прямого лазерного выращивания с изготовлением фрагмента выгорodka реакторной установки из порошкового материала нержавеющей стали 08X18H10T // *Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Материаловедение и новые материалы*. – 2023. – Вып. 4 (120). – С. 44–56.
12. Melia M. A., Nguyen H.-D. A., Rodelas J. M., Schindelholz E. J. Corrosion properties of 304L stainless steel made by directed energy deposition additive manufacturing // *Corrosion Science*. – 2019. – V. 152. – P. 20–30.
13. Smith H. R., Sugar J. D., San Marchi C., Schoenung J. M. Strengthening mechanisms in directed energy deposited austenitic stainless steel // *Acta Materialia*. – 2019. – V. 164. – P. 728–740.
14. Fu J. W., Yang Y. S. Solidification behavior in three-phase region of AISI 304 stainless steel // *Materials Letters*. – 2013. – V. 93. – P. 18–20.
15. Kim S. H., Moon H. K., Kang T., Lee C. S. Dissolution kinetics of delta ferrite in AISI 304 stainless steel produced by strip casting process // *Materials Science and Engineering: A*. – 2003. – V. 356. – P. 390–398.
16. Cristobal M., San-Martin D., Capdevila C., Jiménez J. A., Milenkovic S. Rapid fabrication and characterization of AISI 304 stainless steels modified with Cu additions by additive alloy melting (ADAM) // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2018. – V. 7 (4). – P. 450–460.
17. Jeong J., Lee Y., Park J. M., Lee D. J., Jeon I., Sohn H., Kim H. S., Nam T.-H., Sung H., Seol J. B., Kim J. G. Metastable  $\delta$ -ferrite and twinning-induced plasticity on the strain hardening behavior of directed energy deposition-processed 304L austenitic stainless steel // *Additive Manufacturing*. – 2021. – V. 47. – P. 1–11.
18. Pinto F. C., Aota L. S., Souza Filho I. R., et al. Recrystallization in non-conventional microstructures of 316L stainless steel produced via laser powder-bed fusion: effect of particle coarsening kinetics // *Journal of Materials Science*. – 2022. – V. 57. – P. 9576–9598.
19. Sames W. J., List F. A., Pannala S., Dehoff R. R., Babu S. S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing // *International Materials Reviews*. – 2016. – V. 61. – P. 315–360.
20. Song B., Dong S., Liu Q., Liao H., Coddet C. Vacuum heat treatment of iron parts produced by selective laser melting: microstructure, residual stress and tensile behavior // *Materials & Design*. – 2014. – V. 54. – P. 727–733.
21. Bertsch K. M., Meric de Bellefon G., Kuehl B., Thoma D. J. Origin of dislocation structures in an additively manufactured austenitic stainless steel 316L // *Acta Materialia*. – 2020. – V. 199. – P. 19–33.
22. Deng P., Yin H., Song M., Li D., Zheng Y., Prorok B. C., Lou X. On the thermal stability of dislocation cellular structures in additively manufactured austenitic stainless steels: roles of heavy element segregation and stacking fault energy // *JOM*. – 2020. – V. 72. – P. 4232–4243.

23. Chen N., Ma G., Zhu W., Godfrey A., Shen Z., Wu G., Huang X. Enhancement of an additive-manufactured austenitic stainless steel by post-manufacture heat-treatment // *Materials Science and Engineering: A*. – 2019. – V. 759. – P. 65–69.
24. Huang W., Yuan S., Chai L., Jiang L., Liu H., Wang F., Wang D., Wang J. Development of grain boundary character distribution in medium-strained 316L stainless steel during annealing // *Materials International*. – 2019. – V. 25. – P. 364–371.
25. Ariasetta A., Kobayashi S., Takeyama M., Wang Y., Imano S. Characterization of recrystallization and second-phase particles in solution-treated additively manufactured alloy 718 // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2020. – V. 51. – P. 973–981.
26. Lei J., Ge Y., Liu T., Wei Z., Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 316L steel synthesized by selective laser melting // *Materials Science and Engineering: A*. – 2019. – V. 748. – P. 205–212.
27. Коджаспиров Г. Е. Основы легирования стали. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2015. – 263 с.
28. Гольдштейн М. И., Грачёв С. В., Векслер Ю. Г. Специальные стали. – М.: МИСИС, 1999. – 408 с.
29. Оленин М. И., Романов О. Н., Марголин Б. З., Сорокин А. А., Зернов Э. А., Бушуев С. В., Бережко Б. И., Шахьян С. А., Апинов Ж. Э. Влияние гомогенизационного отжига на процессы карбидообразования в литом металле и в поковке из стали марки 10X16H20M2T // *Вопросы материаловедения*. – 2025. – № 3 (123). – С. 7–20.

УДК 666.651:621.315.612

## КЕРАМИКА С НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ СПЕКАНИЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ЛТСС: ОБЗОР.

### Часть 1. Стеглосодержащая керамика

А. А. АХМАДИЕВА, В. Д. МИРОШКИНА, В. С. ДАНЬКО, Н. Л. САВЧЕНКО, д-р техн. наук, М. В. ГРИГОРЬЕВ, канд. техн. наук. И. А. ЖУКОВ, д-р техн. наук  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36.

E-mail: nas99.9@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.01.2026

После доработки 30.01.2026

Принята к публикации 5.02.2026

За последние 30 лет технология низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (ЛТСС) развивалась в ответ на потребность в компактных, легких и многофункциональных электронных модулях. Она позволяет получать трехмерные керамические структуры с низкими диэлектрическими потерями и встроенными металлическими электродами. Одним из ключевых направлений развития ЛТСС является создание диэлектриков, спекающихся при температурах ниже температуры плавления Ag-электродов и сохраняющих требуемые электрофизические, механические и тепловые характеристики. В первой части обзора рассмотрены стеклосодержащие материалы: стеклокерамические композиты и стеклокерамики, применяемые в технологии ЛТСС.

*Ключевые слова:* низкотемпературная керамика, ЛТСС, стеклокерамика, стеклокерамические композиты, диэлектрические свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-126-2-89-97

*Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2025-607 от 01.07.2025).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Sebastian M. T., Jantunen H. Low loss dielectric materials for LTCC applications: a review // *International Materials Reviews*. – 2008. – V. 53. – N 2. – P. 57–90.
2. Li B., Xu Y., Zhang S. The size-effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the sinterability, microstructure and properties of glass-alumina composites // *Glass Phys. Chem.* – 2015. – V. 41. – N 5. – P. 503–508.
3. Ebrahimi F., Nemati A., Banijamali S. Fabrication and microwave dielectric characterization of cordierite/BZBS (Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZnO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>) glass composites for LTCC applications // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – V. 882. – Art. 160722.
4. Guo J. et al. Design and preparation of BaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Quartz LTCC composites with tailored coefficient of thermal expansion // *Ceramics International*. – 2022. – V. 48. – N 9. – P. 12065–12073.

5. Imanaka Y. Multilayered low temperature cofired ceramics (LTCC) technology. – Boston, MA: Springer US, 2005.
6. Jean J. H., Gupta T. K. Densification kinetics of binary borosilicate glass composite // Journal of materials research. – 1994. – V. 9. – N 2. – P. 486–492.
7. Luo X. et al. Eco-friendly tape casting of borosilicate glass/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  sheets for LTCC applications // Ceramics International. – 2022. – V. 48. – N 18. – P. 25975–25983.
8. Wang F. et al. Improved flexural strength and dielectric loss in  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -based LTCC with glass  $\text{La}_2\text{O}_3$ - $\text{CaO}$ - $\text{B}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  // Ceramics International. – 2021. – V. 47. – N 7. – P. 9955–9960.
9. Luo X. et al. Fabrication and performance of dielectric tape based on  $\text{CaO}$ - $\text{B}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  glass/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  for LTCC applications // Ceramics International. – 2018. – V. 44. – N 6. – P. 6354–6361.
10. Swedlow J. L. On Griffith's theory of fracture // International Journal of Fracture Mechanics. – 1965. – V. 1. – N 3. – P. 210–216.
11. Nagaoka T. et al. Effects of  $\text{CaO}$  addition on sintering and mechanical properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  // Journal of materials science letters. – 1996. – V. 15. – N 20. – P. 1815–1817.
12. Kawai S. et al. Development of LTCC materials with high mechanical strength // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2011. – V. 18. – N 9. – P. 092013.
13. Chen X. et al. Densification and characterization of  $\text{SiO}_2$ - $\text{B}_2\text{O}_3$ - $\text{CaO}$ - $\text{MgO}$  glass/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  composites for LTCC application // Ceramics International. – 2013. – V. 39. – N 6. – P. 6355–6361.
14. Mao H. et al. Effects of alkaline earth oxides on the densification and microwave properties of low-temperature fired  $\text{BaO}$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  glass-ceramic/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  composites // Journal of Materials Science. – 2019. – V. 54. – N 19. – P. 12371–12380.
15. Han Y. et al. Effect of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  content on high-temperature dielectric properties and crystallisation of CMAS glass-ceramic // Materials Research Express. – 2019. – V. 6. – N 7. – P. 075213.
16. Xiang L. et al. Densification, flexural strength and dielectric properties of  $\text{CaO}$ - $\text{MgO}$ - $\text{ZnO}$ - $\text{SiO}_2$ / $\text{Al}_2\text{O}_3$  glass ceramics for LTCC applications // Ceramics International. – 2021. – V. 47. – N 20. – P. 28904–28912.
17. Wu L. et al. Hot-pressing sintered  $\text{BN}$ - $\text{SiO}_2$  composite ceramics with excellent thermal conductivity and dielectric properties for high frequency substrate // Ceramics International. – 2018. – V. 44. – N 14. – P. 16594–16598.
18. Zhou J. Towards rational design of low-temperature co-fired ceramic (LTCC) materials // Journal of Advanced Ceramics. – 2012. – V. 1. – N 2. – P. 89–99.
19. Yang C. et al. Sintering behaviors, microstructures and dielectric properties of  $\text{CaO}$ - $\text{B}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  glass ceramic for LTCC application with various network modifiers content // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2021. – V. 32. – N 22. – P. 26655–26665.
20. Wang S., Zhou H. Densification and dielectric properties of  $\text{CaO}$ - $\text{B}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  system glass ceramics // Materials Science and Engineering: B. – 2003. – V. 99. – N 1–3. – P. 597–600.
21. Zhu H. et al. Microstructure and microwave dielectric characteristics of  $\text{CaO}$ - $\text{B}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  glass ceramics // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2009. – V. 20. – N 11. – P. 1135–1139.
22. Xiong Z. et al. Crystallization and microwave dielectric properties of  $\text{CaO}$ - $\text{B}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  glass-ceramic/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  for LTCC applications // Materials Today Communications. – 2024. – V. 40. – P. 109787.
23. Chu W., Jiang T., Ho P. S. Effect of wiring density and pillar structure on chip packaging interaction for mixed-signal Cu low k chips // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. – 2021. – V. 21. – N 3. – P. 290–296.
24. Arcaro S. et al. Synthesis and characterization of LZS/ $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  glass-ceramic composites for applications in the LTCC technology // Ceramics International. – 2014. – V. 40. – N 4. – P. 5269–5274.
25. Xia G., He L., Yang D. Preparation and characterization of  $\text{CaO}$ - $\text{B}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  glass/fused silica composites for LTCC application // Journal of alloys and compounds. – 2012. – V. 531. – P. 70–76.
26. Keshavarz M., Ebadzadeh T., Banijamali S. Preparation of forsterite/MBS ( $\text{MgO}$ - $\text{B}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ ) glass-ceramic composites via conventional and microwave assisted sintering routes for LTCC application // Ceramics International. – 2017. – V. 43. – N 12. – P. 9259–9266.
27. Wang F. et al. Synthesis and characterization of low CTE value  $\text{La}_2\text{O}_3$ - $\text{B}_2\text{O}_3$ - $\text{CaO}$ - $\text{P}_2\text{O}_5$  glass/cordierite composites for LTCC application // Ceramics International. – 2019. – V. 45. – N 6. – P. 7203–7209.
28. Kumari P. et al. Low temperature sintering and characterization of  $\text{MgO}$ - $\text{B}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  glass-ceramics for LTCC substrate applications // Transactions of the Indian Ceramic Society. – 2016. – V. 75. – N 4. – P. 229–233.
29. Li B., Li W., Zheng J. Effect of  $\text{SiO}_2$  content on the sintering kinetics, microstructures and properties of  $\text{BaO}$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{B}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  glass-ceramics for LTCC application // Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – V. 725. – P. 1091–1097.

30. Ju K. et al. Ultra-Low Temperature Sintering and Dielectric Properties of SiO<sub>2</sub>-Filled Glass Composites // Journal of the American Ceramic Society. – 2013. – V. 96. – N 11. – P. 3563–3568.
31. Chen G. et al. Synthesis and characterization of CBS glass/ceramic composites for LTCC application // Journal of alloys and compounds. – 2009. – V. 478. – N 1/2. – P. 858–862.
32. Ebrahimi F., Nemati A., Banijamali S. Fabrication and microwave dielectric characterization of cordierite/BZBS (Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZnO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>) glass composites for LTCC applications // Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – V. 882. – P. 160722.
33. Synkiewicz B., Szwaigierczak D., Kulawik J. Multilayer LTCC structures based on glass-cordierite layers with different porosity // Microelectronics International. – 2017. – V. 34. – N 3. – P. 110–115.
34. Zhao Y. et al. Analysis and optimization of dielectric properties of cordierite-based glass composites for advanced LTCC applications // Ceramics International. – 2025.
35. Knickerbocker S.H., Ananda H.K., Heron L.W. Cordierite glass ceramics for multilayer ceramic packaging // Journal of the American Ceramic Society – 1993. – V. 72. – P. 90–95.
36. Wu X. G. et al. Synthesis and microwave dielectric properties of Zn<sub>3</sub>B<sub>2</sub>O<sub>6</sub> ceramics for substrate application // Journal of the American Ceramic Society. – 2012. – V. 95. – N 6. – P. 1793–1795.
37. Kržmanc M. M., Došler U., Suvorov D. Effect of a TiO<sub>2</sub> nucleating agent on the nucleation and crystallization behavior of MgO–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> glass // Journal of the American Ceramic Society. – 2012. – V. 95. – N 6. – P. 1920–1926.
38. Lin Z. et al. Crystallization mechanism and properties of CaO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (CBSN) glass-ceramics // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2023. – V. 614. – P. 122379.
39. Chen S., Zhu D. Phase formation and properties of the BaO–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics prepared via an aqueous suspension route // Journal of alloys and compounds. – 2012. – V. 536. – P. 73–79.
40. Arora A. et al. Structural, thermal and crystallization kinetics of ZnO–BaO–SiO<sub>2</sub>–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based glass sealants for solid oxide fuel cells // Ceramics International. – 2011. – V. 37. – N 7. – P. 2101–2107.
41. Hou L. et al. Effects of the replacing content of ZnBr<sub>2</sub> on the properties of ZnO–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>: Mn<sup>2+</sup> glass-ceramics // Ceramics International. – 2014. – V. 40. – N 8. – P. 13097–13103.
42. Levitskii I. A., Gailevich S. A., Shimchik I. S. The effect of bivalent cations on the physicochemical properties and structure of borosilicate glasses // Glass and Ceramics. – 2004. – V. 61. – N 3. – P. 73–76.
43. Wu J. M., Huang H. L. Microwave properties of zinc, barium and lead borosilicate glasses // Journal of non-crystalline solids. – 1999. – V. 260. – N 1–2. – P. 116–124.
44. Eldem M. A., Orton B. R., Whitaker A. Phase equilibria in the system ZnO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> at 950°C // Journal of materials science. – 1987. – V. 22. – N 11. – P. 4139–4143.
45. Monteiro R.C.C. et al. Thermal characteristics and crystallization behavior of zinc borosilicate glasses containing Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2018. – V. 491. – P. 124–132.
46. Nguyen N. H. et al. Effect of Zn/Si ratio on the microstructural and microwave dielectric properties of Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> ceramics // Journal of the American Ceramic Society. – 2007. – V. 90. – N 10. – P. 3127–3130.

УДК 666.651:621.315.612

## **НИЗКОТЕМПЕРАТУРНО СПЕКАЮЩАЯСЯ КЕРАМИКА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ LTCC: ОБЗОР.**

### **Часть 2. Бесстекольная керамика**

А. А. АХМАДИЕВА, В. Д. МИРОШКИНА, В. С. ДАНЬКО, Н. Л. САВЧЕНКО, д-р техн. наук, М. В. ГРИГОРЬЕВ,  
канд. техн. наук, И. А. ЖУКОВ, д-р техн. наук

*ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», 634050, г. Томск,  
пр. Ленина, д. 36.*

*E-mail: nas99.9@yandex.ru*

Поступила в редакцию 14.01.2026

После доработки 30.01.2026

Принята к публикации 5.02.2026

В последние годы значительно возрос интерес к микроволновой диэлектрической керамике, применяемой в антеннах, фильтрах, резонаторах и других компонентах систем беспроводной связи. Такие материалы обеспечивают передачу сигнала, резонансные и фильтрующие функции в микроволновых цепях, поэтому их диэлектрические характеристики напрямую влияют на рабочие параметры устройств. Для технологии низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (LTCC) особенно важны низкая температура спекания  $T_{сп}$ , совместимость с Ag-электродами, низкая относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$ , высокая добротность  $Q$  или произведение  $Q \times f$  и близкий к нулю температурный коэффициент резонансной частоты  $t_f$ .

© 2026

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

<http://www.cris-m-prometey.ru>

Научно-технический журнал

«Вопросы материаловедения»

Керамические материалы для технологии LTCC можно разделить на три группы: стеклокерамические композиты, стеклокерамики и материалы с изначально низкой температурой спекания.

В данной части обзора рассмотрены бесстекольные керамики с низкой температурой спекания, разработанные за последние 20 лет для применения в технологии LTCC. Анализ литературы показывает, что это направление развивается за счет поиска составов, которые сочетают низкую температуру спекания  $T_{\text{сп}}$ , малые диэлектрические потери  $\text{tg}\delta$ , приемлемую  $\epsilon_r$ , стабильный  $\text{tg}\delta$  и химическую совместимость с Ag-электродами.

*Ключевые слова:* низкотемпературная керамика, LTCC, бесстекольная керамика, диэлектрические свойства, микроволновый диапазон

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-126-2-98-107

*Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2025-607 от 01.07.2025).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Xie C. et al. Rational design of inorganic dielectric materials with expected permittivity // Scientific Reports. – 2015. – V. 5. – N 1. – Art. 16769.
2. Mei H. et al. Principal element design of garnets to access structure stability and excellent microwave dielectric properties // Journal of the American Ceramic Society. – 2022. – V. 105. – N 7. – P. 4805–4814.
3. Mei H. et al.  $\text{Na}_2\text{CaTi}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ : An anti-reductive garnet ceramic with high quality factor and chemical compatibility with Cu/Ag electrodes for low temperature co-fired application // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – V. 926. – P. 166960.
4. Ren J. et al. Novel  $\text{Al}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ -based temperature-stable microwave dielectric ceramics for LTCC applications // Journal of Materials Chemistry C. – 2018. – V. 6. – N 42. – P. 11465–11470.
5. Hao Y. Z. et al. Microwave dielectric properties of  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  ceramics doped with LiF for LTCC applications // Journal of alloys and compounds. – 2013. – V. 552. – P. 173–179.
6. Hong W. B. et al. Room-temperature-densified  $\text{H}_3\text{BO}_3$  microwave dielectric ceramics with ultra-low permittivity and ultra-high Qf value // Journal of Materiomics. – 2020. – V. 6. – N 2. – P. 233–239.
7. Yang H. et al. Synthesis of  $\text{CaAl}_{2x}\text{B}_2\text{O}_{4+3x}$ : Novel microwave dielectric ceramics with low permittivity and low loss // Journal of the European Ceramic Society. – 2021. – V. 41. – N 4. – P. 2596–2601.
8. Shannon R. D. Dielectric polarizabilities of ions in oxides and fluorides // Journal of Applied physics. – 1993. – V. 73. – N 1. – P. 348–366.
9. Geyer R. G., Baker-Jarvis J., Krupka J. Dielectric characterization of single-crystal  $\text{LiF}$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{BaF}_2$ , and  $\text{SrF}_2$  at microwave frequencies // The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society. – 2004. – P. 493–497.
10. Song X. Q. et al. Low-fired fluoride microwave dielectric ceramics with low dielectric loss // Ceramics International. – 2019. – V. 45. – N 1. – P. 279–286.
11. Zhou M. F. et al. Ultra-low permittivity  $\text{MgF}_2$  ceramics with high Qf values and their role as microstrip patch antenna substrates // Ceramics International. – 2023. – V. 49. – N 1. – P. 369–374.
12. Chen X. et al. Low temperature fired  $\text{CaF}_2$ -based microwave dielectric ceramics with enhanced microwave properties // Journal of the European Ceramic Society. – 2022. – V. 42. – N 12. – P. 4969–4973.
13. Wang H. et al.  $\text{MgF}_2$ -based microwave dielectric ceramics with ultra-low sintering temperature and high thermal expansion coefficient // Journal of the European Ceramic Society. – 2024. – V. 44. – N 4. – P. 2150–2156.
14. Ding Y., Bian J. Structural evolution, sintering behavior and microwave dielectric properties of  $(1-x)\text{Li}_2\text{TiO}_3+x\text{LiF}$  ceramics // Materials Research Bulletin. – 2013. – V. 48. – N 8. – P. 2776–2781.
15. Zhang Z. et al.  $\text{Li}_5\text{Ti}_2\text{O}_6\text{F}$ : a new low-loss oxyfluoride microwave dielectric ceramic for LTCC applications // Journal of Materials Science. – 2020. – V. 55. – N 1. – P. 107–115.
16. Liu K. et al. Sintering behavior, structural evolution, and dielectric properties of  $\text{Li}_{2+x}\text{MgTiO}_4\text{F}_x$  microwave dielectric ceramics // Journal of the European Ceramic Society. – 2023. – V. 43. – N 14. – P. 6098–6106.
17. Zhai S., Liu P., Wu S. Novel ultra-low loss and low-fired  $\text{Li}_8\text{Mg}_x\text{Ti}_3\text{O}_{9+x}\text{F}_2$  microwave dielectric ceramics for resonator antenna applications // Journal of the European Ceramic Society. – 2023. – V. 43. – N 8. – P. 3331–3337.
18. Chu X. et al. A new high-Q $\times$ f  $\text{Li}_4\text{NbO}_4\text{F}$  microwave dielectric ceramic for LTCC applications // Ceramics International. – 2021. – V. 47. – N 3. – P. 4344–4351.
19. Zhai S., Liu P., Zhang S. A novel high-Q oxyfluoride  $\text{Li}_4\text{Mg}_2\text{NbO}_6\text{F}$  microwave dielectric ceramic with low sintering temperature // Journal of the European Ceramic Society. – 2021. – V. 41. – N 8. – P. 4478–4483.

20. Zhai S. et al. Novel series of high-Q oxyfluoride microwave dielectric ceramics for LTCC applications // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – V. 899. – P. 163145.
21. Wei M. et al. Solid-solution assisted densification and microwave/millimeter-wave dielectric properties of BaF<sub>2</sub>-SrF<sub>2</sub> ceramics for high-reliability LTCC applications // Ceramics International. – 2025. – V. 51. – N 1. – P. 1055–1062.
22. Li R. et al. Ultra-low loss Li<sub>4+x</sub>Ti<sub>2</sub>Mg<sub>7</sub>O<sub>13</sub>F<sub>x</sub> (0 ≤ x ≤ 175) system microwave dielectric ceramics for LTCC applications // Ceramics International. – 2025. – V. 51. – N 7. – P. 8824–8831.
23. Mei H. et al. Compositional design, structure stability, and microwave dielectric properties in Ca<sub>3</sub>MgBGe<sub>3</sub>O<sub>12</sub> (B=Zr, Sn) garnet ceramics with tetravalent cations on B-site // Ceramics International. – 2022. – V. 48. – N 4. – P. 4658–4664.
24. Xiang H. et al. Low-firing and microwave dielectric properties of Na<sub>2</sub>YMg<sub>2</sub>V<sub>3</sub>O<sub>12</sub> ceramic // Ceramics International. – 2016. – V. 42. – N 2. – P. 3701–3705.
25. Li C. et al. Ultralow-temperature synthesis and densification of Ag<sub>2</sub>CaV<sub>4</sub>O<sub>12</sub> with improved micro-wave dielectric performances // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2021. – V. 9. – N 43. – P. 14461–14469.
26. Hu Y. et al. Crystal structure, Raman spectra and microwave – 2025. – V. 51. – N 18 (B). – P. 25944–25950.
27. Zhai S. et al. Novel series of high-Q oxyfluoride microwave dielectric ceramics for LTCC applications // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – V. 899. – P. 163145.
28. Sun Z. et al. Effects of 0.5B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–0.5CuO on the microwave dielectric properties of low-temperature sintered ZZNT ceramics // Ceramics International. – 2022. – V. 48. – N 5. – P. 7153–7158.
29. Du J. et al. Low temperature sintered Ca<sub>1-x</sub>(Li<sub>0.5</sub>Bi<sub>0.5</sub>)<sub>x</sub>WO<sub>4</sub> ceramics with enhanced microwave dielectric properties for LTCC applications // Ceramics International. – 2022. – V. 48. – N 23. – P. 34446–34453.
30. Huang B. et al. Microwave dielectric properties of Li<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>-added SrWO<sub>4</sub> ceramics for LTCC applications // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2022. – V. 33. – N 27. – P. 21925–21934.
31. Liu Y. et al. LiF-Modulated Sintering Behavior and Microwave Dielectric Performance of Scheelite-Type NaLa(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> Ceramics for 5G-Oriented LTCC Applications // Ceramics International. – 2025. – V. 51. – Is. 24. – Part A. – P. 40841–40849.
32. Gupta R. et al. Structural, microstructural, and microwave dielectric properties of (Al<sub>1-x</sub>B<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Mo<sub>3</sub>O<sub>12</sub> ceramics with low dielectric constant and low dielectric loss for LTCC applications // Ceramics International. – 2023. – V. 49. – Is. 14. – Part A. – P. 22690–22701.
33. Ramarao S.D., Kiran S. R., Murthy V. R. K. Structural, lattice vibrational, optical and micro-wave dielectric studies on Ca<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>MoO<sub>4</sub> ceramics with scheelite structure // Materials Research Bulletin. – 2014. – V. 56. – P. 71–79.
34. Mullens B.G. et al. Long-range A-site cation disorder in NaA(MO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> (M= Mo, W) double scheelite oxides // Journal of Solid State Chemistry. – 2023. – V. 321. – P. 123871.
35. Pang L. X. et al. Microwave dielectric properties of (Li<sub>0.5</sub>Ln<sub>0.5</sub>)MoO<sub>4</sub> (Ln= Nd, Er, Gd, Y, Yb, Sm, and Ce) ceramics // Journal of the American Ceramic Society. – 2015. – V. 98. – N 1. – P. 130–135.
36. Xi H. et al. Microwave dielectric properties of low firing scheelite-related (Na<sub>0.5</sub>La<sub>0.5</sub>)MoO<sub>4</sub> ceramic // Materials Letters. – 2015. – V. 142. – P. 221–224.
37. Zhou D. et al. Low temperature firing microwave dielectric ceramics (K<sub>0.5</sub>Ln<sub>0.5</sub>)MoO<sub>4</sub> (Ln= Nd and Sm) with low dielectric loss // Journal of the European Ceramic Society. – 2011. – V. 31. – N 15. – P. 2749–2752.
38. Liu W., Zuo R. A novel low-temperature firable La<sub>2</sub>Zr<sub>3</sub>(MoO<sub>4</sub>)<sub>9</sub> microwave dielectric ceramic // Journal of the European Ceramic Society. – 2018. – V. 38. – N 1. – P. 339–342.
39. Gao P. et al. Sintering behavior, phase structure and microwave dielectric properties of novel glass-free low-temperature cofiring NaCaLn(MoO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> (Ln = Nd, Sm) ceramics // Ceramics International. – 2024. – V. 50. – N 4. – P. 6508–6516.
40. Yao G. G. et al. Synthesis and microwave dielectric properties of Li<sub>2</sub>MgTiO<sub>4</sub> ceramics // Ceramics International. – 2015. – V. 41. – P. S563–S566.
41. Li C. et al. Ultra-low loss microwave dielectric ceramic Li<sub>2</sub>Mg<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> and low-temperature firing via B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition // Journal of Electronic Materials. – 2018. – V. 47. – N 11. – P. 6383–6389.
42. Fu Z. et al. Novel series of ultra-low loss microwave dielectric ceramics: Li<sub>2</sub>Mg<sub>3</sub>BO<sub>6</sub> (B=Ti, Sn, Zr) // Journal of the European Ceramic Society. – 2016. – V. 36. – N 3. – P. 625–629.
43. Bi J. X. et al. Crystal structure, infrared spectra and microwave dielectric properties of ultra low-loss Li<sub>2</sub>Mg<sub>4</sub>TiO<sub>7</sub> ceramics // Materials Letters. – 2017. – V. 196. – P. 128–131.

44. Bi J., Niu Y., Wu H.  $\text{Li}_4\text{Mg}_3\text{Ti}_2\text{O}_9$ : a novel low-loss microwave dielectric ceramic for LTCC applications // *Ceramics International*. – 2017. – V. 43. – N 10. – P. 7522–7530.
45. Zhang Y. et al. Phase Composition and Microwave Dielectric Properties of  $\text{Li}_2(1+x)\text{Mg}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  Ceramics with Inverse Spinel Structure // *Journal of Electronic Materials*. – 2024. – V. 53. – N 10. – P. 6553–6562.
46. Ohashi M. et al. Microwave dielectric properties of low-temperature sintered  $\text{Li}_3\text{AlB}_2\text{O}_6$  ceramic // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2005. – V. 25. – N 12. – P. 2877–2881.
47. Zhang R. Z., Reece M. J. Review of high entropy ceramics: design, synthesis, structure and properties // *Journal of Materials Chemistry A*. – 2019. – V. 7. – N 39. – P. 22148–22162.
48. Xiang H. et al. Microwave dielectric high-entropy ceramic  $\text{Li}(\text{Gd}_{0.2}\text{Ho}_{0.2}\text{Er}_{0.2}\text{Yb}_{0.2}\text{Lu}_{0.2})\text{GeO}_4$  with stable temperature coefficient for low-temperature cofired ceramic technologies // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2021. – V. 93. – P. 28–32.
49. Shao P. et al. Synthesis, microstructure, and dielectric properties of novel dual-phase high-entropy  $(\text{Ba}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{Bi}_{0.2})\text{WO}_4$  ceramics for LTCC applications // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2024. – V. 44. – Is. 8. – P. 5203–5210.
50. Liu H. et al. High-entropy processed high quality and low-temperature cofired  $\text{LiMgPO}_4$ -based dielectric ceramics for low-loss packaged millimeter-wave filters // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2025. – V. 45. – N 2. – P. 116957.

УДК 621.793.7:[669.71+669.14.018.8]

### ИССЛЕДОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ АЛЮМИНИЯ С НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛЬЮ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

А. А. ИВАНОВ, М. Э. ШЕСТАКОВ, И. И. АКИМОВ, канд. техн. наук, И. Н. ТРУНЬКИН, канд. физ.-мат. наук  
НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1. E-mail: [Ivanov\\_AAL@nrcki.ru](mailto:Ivanov_AAL@nrcki.ru)

Поступила в редакцию 28.10.2025

После доработки 21.01.2026

Принята к публикации 12.02.2026

В настоящей работе исследовали характеристики неразъемного соединения пластин из алюминия марки А5М и нержавеющей стали 08Х18Н10Т, выполненного методом холодного газодинамического напыления (ХГН). Для формирования холодного шва использовали порошок состава: алюминий (ХЧ) 45 мас.%, титан (ХЧ) 45 мас.%, корунд  $\text{Al}_2\text{O}_3$  10 мас.% с медианой крупности частиц 30–50 мкм. Анализ структуры полученного шва показал низкий уровень пористости 1–2%, отсутствие микротрещин после циклических термических нагрузок и однородность распределения составляющих напыленного материала. Механические испытания образцов, соединенных внахлест, продемонстрировали достаточную прочность на сдвиг. Экспериментальное исследование конструкции «стальная труба – алюминиевое ребро» показало, что теплопроводность соединения, полученного методом ХГН, приблизительно на 25% выше, чем полученного прижимом с термопастой КПТ-8.

**Ключевые слова:** холодное газодинамическое напыление (ХГН), неразъемное соединение, тепловой контакт, пористость, теплопроводность

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-126-2-108-115

### ЛИТЕРАТУРА

1. Князев С. Н., Тепин Н. В., Смагин Н. М. Технологии изготовления биметаллических труб // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2022. – № 4. – С. 116 – 123. URL: <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2022-24-4-116-123>
2. Афанасьева И. В. Существующие технологии оребрения труб // *Инженерный вестник Дона*. – 2019. – № 1. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5677>
3. Кунтыш В. Б., Сухоцкий А. Б., Санкович Е. С., Мулин В. П. Трубчатые ребристые поверхности с интенсифицированным теплообменом и технология их изготовления для аппаратов воздушного охлаждения топливно-энергетического комплекса // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. – 2013. – № 3. – С. 34–44. URL: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2013-0-3-80-84>
4. Kocurek R., Adamiec J. Manufacturing technologies of finned tubes // *Advances in Materials Sciences*. – 2013. – V. 13 (3). – P. 26–35. DOI: 10.2478/adms-2013-0009
5. Акимов И. И., Титов А. О., Митин В. С., Школин С. А., Крюков Д. А., Тараторкин П. Н. Функциональные и защитные покрытия для изделий атомной техники // *Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Материаловедение и новые материалы*. – 2016. – № 2 (85). – С. 4–15.

© 2026

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

<http://www.cris-m-prometey.ru>

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

6. Акимов И. И., Лобынцев В. В., Щербаков В. И., Титов А. О. Использование ХГН-покрытий в полупроводниковой преобразовательной технике // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Материаловедение и новые материалы. – 2015. – № 2 (81). – С. 32–40.
7. Козлов И. А., Фомина М. А., Демин С. А., Васильев А. С. Тенденции развития порошковых материалов для нанесения защитных и функциональных покрытий методом ХГН // Труды ВИАМ. – 2023. – № 8 (126). – С. 100–112. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-100-112
8. Козлов И. А., Лещев К. А., Никифоров А. А., Демин С. А. Холодное газодинамическое напыление покрытий (обзор) // Труды ВИАМ. – 2020. – № 8 (90). – С. 77–93. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-77-93
9. Басов А. А., Клочкова М. А., Махин И. Д. О возможности использования технологии «холодного» газодинамического напыления теплопроводного порошкового материала для обеспечения теплового контакта между элементами конструкции // Космическая техника и технологии. – 2014. – № 3 (6). – С. 64–70.
10. Appel F., Brossmann U., Christoph U. et al. Recent Progress in the Development of Gamma Titanium Aluminide Alloys // Advanced Engineering Materials. – 2000. – No 2 (11). – P. 699–720.
11. Каширин А. И., Шкодкин А. В. Метод газодинамического напыления металлических покрытий: развитие и современное состояние // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 12. – С. 22–33.

УДК 621.793

### КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

С. Н. ХИМУХИН, д-р техн. наук, К. П. ЕРЕМИНА, канд. техн. наук, В. К. ХЕ

*Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук,*

*680042, Хабаровск, Россия, ул. Тихоокеанская, 153. E-mail: [im.febras.net@mail.ru](mailto:im.febras.net@mail.ru); [bksenya\\_p@bk.ru](mailto:bksenya_p@bk.ru)*

Поступила в редакцию 26.01.2026

После доработки 27.02.2026

Принята к публикации 17.03.2026

Методом электроискрового легирования (ЭИЛ) на стали 20Х13 (катод) получены слоистые и двухслойные покрытия с увеличенной трещиностойкостью ( $K_{1C}$ ) и уменьшенной повреждаемостью ( $Hv/K_{1C}$ ). В качестве анодов использовали комплексно-легированные сплавы на основе NiAl (КЛС) и сталь 20, из которых получали слоистые и двухслойные покрытия. Слоистые покрытия (4–7 слоев) формировали посредством поочередного ЭИЛ анодами из КЛС и стали 20. Это позволило в слоях покрытия увеличить концентрацию Fe до 80–14 ат.% против 8–5 ат.% в однослойных покрытиях (КЛС). В слоистых покрытиях  $K_{1C}$  увеличилась на 16%, а  $Hv/K_{1C}$  снизилась на 30%. Двухслойные покрытия позволили увеличить  $K_{1C}$  на ~33 %, а  $Hv/K_{1C}$  снизить на 50%. Показана возможность получения двухслойных и слоистых покрытий из твердых сплавов ВК 20 и КЛС.

*Ключевые слова:* слоистые и двухслойные покрытия, электроискровое легирование, структура и свойства покрытий

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-126-2-116-124

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00399-25-03.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Konovalov S., Chen X., Sarychev V. et al. Mathematical modeling of the concentrated energy flow effect on metallic materials // Metals. – 2017. – V. 7. – Is. 1. – P. 4. DOI: 10.3390/met7010004
2. Barile C., Casavola C., Pappalettera G. et al. Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review // Coatings. – 2022. – V. 12. – Is. 10. – P. 1536. DOI: 10.3390/coatings12101536
3. Khimukhin S. N., Eremina K. P. Structure of coatings produced on steel by Ni-Al based alloys after thermal cycling // Metallurgist. – 2024. – V. 68. – Is. 3. – P. 418–426. DOI: 10.1007/s11015-024-01743-0
4. Awotunde M. A., Ayodele O. O., Adegbenjo A. O. et al. NiAl intermetallic composites – a review of processing methods, reinforcements and mechanical properties // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – V. 104. – P. 1733–1747. DOI: 10.1007/s00170-019-03984-9
5. Sampath S., Ravi V. P., Sundararajan S. An Overview on Synthesis, Processing and Applications of Nickel Aluminides: From Fundamentals to Current Prospects // Crystals. – 2023. – V. 13. – Is. 3. – P. 435. DOI: 10.3390/cryst13030435
6. Химухин С. Н., Еремина К. П., Хе В. К. Структура комбинированных интерметаллидных электроискровых покрытий на стали 45 // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2024. – № 11. – С. 20–27.

7. Ogneva T. S.; Ruktuev A. A., Lazurenko D. V. et al. Structure and oxidation behavior of NiAl-based coatings produced by non-vacuum electron beam cladding on low-carbon steel // *Metals*. – 2022. – V. 12. – Is. 10. – P. 1679. DOI: 10.3390/met12101679
8. Николенко С. В., Верхотуров А. Д. Новые электродные материалы для электроискрового легирования. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 220 с.
9. Gostishchev V., Khimukhin S., Ri E., et al. Synthesis of complex alloyed aluminides from oxide compounds by aluminothermic method // *Metals*. – 2018. –V. 8. – N 6. – С. 439
10. Химухин С. Н., Теслина М. А., Ри Х., Ри Э. Х. Формирование, микроструктура и свойства «белого слоя» сталей при низковольтном электроискровом легировании // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2011. – № 4 (76). – С. 7–11.
11. Лапицкая В. А., Кузнецова Т. А., Чижик С. А. и др. Исследование трещиностойкости покрытий микродугового оксидирования после лазерного легирования оксидом циркония // *Журнал технической физики*. – 2019. – Т. 89. – Вып. 11. – С. 1699–1704. DOI: 10.21883/JTF.2019.11.48331.117-19
12. Yuan J., Wang Q., Liu X., et al. Microstructures and high-temperature wear behavior of NiAl/WC-Fex coatings on carbon steel by plasma cladding // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – V. 842. – Art. 155850. – P. 1–7. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.155850
13. Дворник М. И., Михайленко Е. А. Создание ультрамелкозернистого твердого сплава WC-15Co из порошка, полученного электроэрозионным диспергированием отходов сплава ВК15 в воде // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. – 2020. – № 3. – С. 4-16

### ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 678.073:621.785:621.891

#### ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА СТРУКТУРНЫЕ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА (РЕЕК), ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ (FDM)

Г. В. ИВАНОВА, канд. техн. наук, Г. В. ЦВЕТКОВА, А. И. КОЛОТИЙ, А. М. ЛЕВИТСКИЙ, канд. техн. наук,  
В. Д. АНДРЕЕВА

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

Поступила в редакцию 27.11.2025

После доработки 17.12.2025

Принята к публикации 15.01.2026

В работе исследовано влияние термообработки (ТО) на структурно-фазовое состояние, механические и триботехнические свойства полиэфирэфиркетона (РЕЕК), полученного методом послойного наплавления (FDM). Комплекс исследований, включавший рентгеноструктурный фазовый анализ на дифрактометре BRUKER D8 ADVANCE, статические испытания на растяжение и триботехнические испытания на машине трения Rtec MFT-5000, показал, что термообработка приводит к улучшению механических и триботехнических свойств. В результате предел прочности при растяжении увеличился на 58%, а модуль Юнга – на 32%. Ключевым результатом является значительное повышение триботехнического ресурса: критический фактор  $p_v$ , характеризующий износостойкость, вырос с 0,9 МПа·м/с для исходного материала до 1,3 МПа·м/с для термообработанного. Результаты работы доказывают необходимость применения термообработки для обеспечения высокой стабильности и долговечности 3D-печатных деталей из РЕЕК, работающих в условиях трения скольжения.

*Ключевые слова:* РЕЕК, термообработка, послойное наплавление (FDM), структура, механические свойства, износ, трение

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-126-2-125-136

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Машков Ю. К., Байбарацкая М. Ю., Григорьевский Б. В. Конструкционные пластмассы и полимерные композиционные материалы: Учеб. пособие. – Омск: ОмГТУ, 2002. – 129 с.
2. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трение, смазка, износ. – М.: Физматлит, 2007. – 368 с.
3. Мышкин Н. К., Песецкий С. С., Григорьев А. Я. Трение и износ полимерных композитов // *Инженер-механик*, 2012. – № 2. – С. 24–31.
4. Стукач А. В. Исследование свойств металлополимерных и фуллеренсодержащих композитов при трении // *Технико-технологические проблемы сервиса*. – 2010. – № 3 (13). – С. 10–19.

© 2026

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

<http://www.cris-m-prometey.ru>

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

5. Wang L., Yang Ch., Sun Ch., Yan X., He J., Shi Ch., Liu Ch., Li D., Jiang T., Huang L. Fused deposition modeling PEEK implants for personalized surgical application: from clinical need to biofabrication // Int J Bioprint. – 2022. – V. 8. – Is. 4. – P. 225–243. DOI: 10.18063/ijb.v8i4.615
6. Vishal K., Rajkumar K. Dry sliding wear behavior of Poly Ether Ether Ketone (PEEK) reinforced with graphite and synthetic diamond particles // Diamond and Related Materials. – 2022. – V. 130. – Art. 109404. URL: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109404>
7. Zhang H., Liang M., Yao J. et al. Effect of Annealing on Structure and Mechanical Properties of 3D-Printed Polymer Composites // Polymer Composites. – 2025. – V. 47. – Is. 3. – P. 1953–1969. URL: <https://doi.org/10.1002/pc.70286>
8. Golbang A., Crawford R. J., Al Ali S. Additive Manufacturing and Injection Moulding of High-Performance Polymers: A Comparative Study Including PEEK // Frontiers in Materials. – 2021. – V. 8. – Art. 745088. DOI: 10.3389/fmats.2021.745088
9. Zhen H., Zhao B., Quan L., Fu J. Effect of 3D-Printing Process Parameters and Heat Treatment Conditions on the Mechanical Properties and Microstructure of PEEK Parts // Polymers. – 2023. V. 15. – Is. 9. URL: <https://doi.org/10.3390/polym15092209>
10. He Y., Shen M., Wang Q. et al. Effects of FDM parameters and annealing on the mechanical and tribological properties of PEEK // Composite Structures. – 2023. – V. 313. – Art. 116901. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.116901
11. Adamson M., Eslami B. Post-Processing PEEK 3D-Printed Parts: Experimental Investigation of Annealing on Microscale and Macroscale Properties // Polymers. – 2025. – V. 17. – Is. 6. – Art. 744. URL: <https://doi.org/10.3390/polym17060744>
12. Седакова Е. Б., Козырев Ю. П., Ли С., Жаров В. Е. Анализ причин снижения износостойкости полимерных материалов в парах трения с легированной сталью // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63. – № 4. – С. 302–309.

УДК 678.742.2

## **ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА И ПЧЕЛИНОГО ВОСКА**

А. В. ОКОНЕШНИКОВА, С. Н. ДАНИЛОВА, канд. техн. наук, Н. Н. ЛАЗАРЕВА, канд. техн. наук,  
А. А. ОХЛОПКОВА, д-р техн. наук

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова», 677000, Республика Саха (Якутия), Якутск, ул. Кулаковского, 48. E-mail: [anasema2003@mail.ru](mailto:anasema2003@mail.ru)

Поступила в редакцию 24.11. 2025

После доработки 16.12.2025

Принята к публикации 15.01.2026

В данной работе исследовано влияние пчелиного воска (ПВ) как пластифицирующей добавки на свойства и структуру полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Проведено комплексное исследование характеристик композитов на основе двух марок СВМПЭ (GUR 4150 и GUR 4022) с различной молекулярной массой. Исследовано влияние малых концентраций пчелиного воска (0,5–2 мас.%) на механические, трибологические, термические и структурные свойства ПКМ. Используемый ПВ проявил себя как эффективный модификатор структуры, обеспечивающий упорядочение надмолекулярной организации и повышение степени кристалличности полимерной матрицы. Это обусловлено формированием более плотно компаундированной структуры СВМПЭ, что приводит к упрочнению композита. Наибольшая эффективность модификации наблюдалась при содержании 2 мас.% ПВ, который способствует увеличению прочности при растяжении на 59% и относительного удлинения на 33% относительно исходного полимера. Трибологические исследования показали снижение коэффициента трения на 44% и уменьшение скорости массового изнашивания в 7 раз. Данные дифференциальной сканирующей калориметрии подтвердили структурное упорядочение композита при введении пчелиного воска, что коррелирует с улучшением механических и трибологических характеристик.

*Ключевые слова:* сверхвысокомолекулярный полиэтилен, композит, пластификатор, пчелиный воск

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-126-2-137-146

*Работа была выполнена при финансовой поддержке МНУВО РФ НИР (номер FSRG-2026-0007)*

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Kurdi A., Chang L. Recent advances in high performance polymers – tribological aspects // Lubricants. – 2019. – V. 7. – N 1. – P. 2. DOI: 10.3390/lubricants7010002

© 2026

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

<http://www.cris-m-prometey.ru>

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

2. Склифос В. О., Рыжко А. А., Щеглов Д. П. Наночастицы для полимерных композиционных материалов в строительстве // *Перспективы науки*. – 2021. – № 5. – С. 123–125.
3. Шерстюков Б. Г. Климатические условия Арктики и новые подходы к прогнозу изменения климата // *Арктика и Север*. – 2016. – № 24. – С. 39–67. DOI: 10.17238/issn2221-2698.2016.24.39
4. Selyutin G. E., Gavrillov Y. U., Voskresenskaya E. N., Zakharov V. A., Nikitin V. E., Poluboyarov V. A. Composite materials based on ultra-high molecular polyethylene: properties, application prospects // *Chemistry for Sustainable Development*. – 2010. – V. 18. – N 3. – P. 301–314.
5. Abdul Samad M. Recent advances in UHMWPE/UHMWPE Nanocomposite/UHMWPE hybrid nanocomposite polymer coatings for tribological applications: a comprehensive review // *Polymers*. – 2021. – V. 13. – Is. 4. – P. 608. DOI: 10.3390/polym13040608
6. Chen X., Wang X., Feng Y., Qu J., Yu D., Cao C., Chen X. Enhancing chain mobility of ultrahigh molecular weight polyethylene by regulating residence time under a consecutive elongational flow for improved processability // *Polymers*. – 2021. – V. 13. – Is. 13. – P. 2192. DOI: 10.3390/polym13132192
7. Liu S. et al. Ultra-high molecular weight polyethylene with reduced fusion defects and improved mechanical properties by liquid paraffin // *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*. – 2015. – V. 20. – N 2. – P. 138–149.
8. Wu J. J., Buckley C. P., O'Connor J. J. Mechanical integrity of compression-moulded ultra-high molecular weight polyethylene: effects of varying process conditions // *Biomaterials*. – 2002. – V. 23. – N 17. – P. 3773–3783.
9. Hu S. et al. Structure and properties of UHMWPE products strengthened and toughened by pulse vibration molding at low temperature // *Polymer*. – 2021. – V. 229. – P. 124026.
10. Dayyoub T., Olifirov L. K., Chukov D. I., Kaloshkin S. D., Kolesnikov E., Nematulloev S. The structural and mechanical properties of the UHMWPE films mixed with the PE-Wax // *Materials*. – 2020. – V. 13. – Is. 15. – P. 3422. DOI: 10.3390/ma13153422
11. Wood W. J., Maguire R. G., Zhong W. H. Improved wear and mechanical properties of UHMWPE–carbon nanofiber composites through an optimized paraffin-assisted melt-mixing process // *Composites Part B: Engineering*. – 2011. – V. 42. – N 3. – P. 584–591.
12. Hepburn H. R., Pirk C. W. W., Duangphakdee O. The chemistry of beeswax // *Honeybee Nests: Composition, Structure, Function*. – Heidelberg: Springer, 2014. – P. 319–339.
13. Gul R. M. et al. Effect of consolidation on adhesive and abrasive wear of ultrahigh molecular weight polyethylene // *Biomaterials*. – 2003. – V. 24. – N 19. – P. 3193–3199.
14. Galeski A. et al. Morphology and plastic yielding of ultrahigh molecular weight polyethylene // *Macromolecules*. – 2020. – V. 53. – N 14. – P. 6063–6077.
15. Ito A. et al. Additive effects of solid paraffins on mechanical properties of high-density polyethylene // *Polymers*. – 2023. – V. 15. – N 5. – P. 1320. URL: <https://doi.org/10.3390/polym15051320>
16. Cai T. et al. Study on the tribological properties of UHMWPE modified by UV-induced grafting under seawater lubrication // *Tribology International*. – 2022. – V. 168. – N 3. – P. 107419.
17. Тарасевич Б. Н. ИК спектры основных классов органических соединений: справочные материалы. – М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2012. – 55 с.
18. Mao X. et al. The relationship between the crystallization of UHMWPE/HDPE injection-molded products and their frictional and mechanical properties // *Polymer*. – 2025. – V. 320. – P. 128092.

УДК 678.743.41:621.891

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МИКРО- И НАНОВОЛОКНИСТЫХ УГЛЕРОДНЫХ  
НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПТФЭ-КОМПОЗИТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ  
СХЕМ ТРЕНИЯ И УСЛОВИЙ НАГРУЖЕНИЯ**

П. Н. ПЕТРОВА, канд. техн. наук, Т. А. ИСАКОВА, М. А. МАРКОВА, канд. техн. наук,

А. Л. ФЕДОРОВ, канд. техн. наук

Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677007, Якутск, ул. Петровского, 2.

E-mail: [ppavlina@yandex.ru](mailto:ppavlina@yandex.ru)

Поступила в редакцию 24.11.2025

После доработки 10.02.2026

Принята к публикации 12.02.2026

В данной статье на примере ПТФЭ-композиатов, модифицированных углеродными микро- и нановолокнистыми наполнителями, приведены результаты сравнительных триботехнических испытаний при однонаправленном

© 2026

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

<http://www.cris-m-prometey.ru>

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

трении скольжения на разных машинах трения с различными схемами трения при изменении подаваемой нагрузки на образцы. Образцами для испытаний являются полимерные столбики с диаметром 5 мм, триботехнические испытания проведены по схемам трения «палец – диск» и «палец – торец диска», отличающиеся между собой геометрией поверхностей трения элементов трибосистемы. Установлено, что в начальный период испытаний по схеме «палец – торец диска» интенсивность изнашивания ПКМ в 5–6 раз превышает аналогичный показатель, регистрируемый при использовании схемы «палец – диск». При этом в условиях сухого трения скольжения показано, что композит, модифицированный нановолокнами, обеспечивает более эффективную защиту от износа полимерной компоненты узла трения при изменении режимов нагружения по сравнению с композитом с микроволокнами.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, углеродное волокно, трение, износ, коэффициент трения, геометрия контакта пар трения

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-126-2-147-159

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. № 126022417885-6) с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.*

### Литература

1. Фторопластовые композиции с бронзой. URL: <https://ftoroplast.com.ru/bronze-filled-ptfe-compounds/> (дата обращения 01.11.2025)
2. Wei X.-F., Linde E., Hedenqvist M. S. Plasticizer loss from plastics or rubber products through diffusion and evaporation // *Materials Degradation*. – 2019. – V. 18. – N 3. – P. 1–8.
3. Машков Ю. К., Кропотин О. В., Шилько С. В., Егорова В. А., Чемисенко О. В. Формирование структуры и свойств антифрикционных композитов модификацией политетрафторэтилена полидисперсными наполнителями // *Материаловедение*. – 2015. – № 1. – С. 22–25.
4. Машков Ю. К., Кургузова О. А., Рубан А. С. Разработка и исследование износостойких полимерных нанокомпозитов // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. – 2018. – Т. 15. – № 1 (59). – С. 36–45.
5. Малий О. В. Проблема повышения надежности автобронетанковой техники в работах научной школы трибологии и материаловедения // *Национальные приоритеты России*. – 2015. – № 3 (17). – С. 29–32.
6. Корнопольцев В. Н., Могнонов Д. М., Аюрова О. Ж., Дашицыренова М. С., Субанакоев А. К. Исследование триботехнических свойств листовых металлофторопластовых материалов // *Письма о материалах*. – 2018. – Т. 8. – № 3 (31). – С. 235–239. DOI: 10.22226/2410-3535-2018-3-235-239
7. Васильев А. П., Охлопкова А. А., Стручкова Т. С., Алексеев А. Г. Влияние модифицированного серицита на свойства и структуру политетрафторэтилена // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. – 2020. – Т. 25. – № 2. – С. 147–156. DOI: 10.31242/2618-9712-2020-25-2-12
8. Miao Y., Chen Q., Li Y., Zhuo D., Wang R. Tribological properties of carbon nanotube/polymer composites: A mini-review // *Frontiers in Materials*. – 2023. – V. 10. – P. 1129676. DOI: 10.3389/fmats.2023.1129676
9. Машков Ю. К. Трибофизика и свойства наполненного фторопласта. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 1997. – 192 с.
10. Chand N., Fahim M. Introduction to tribology of polymer composites // *Tribology of Natural Fiber Polymer Composites*. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2008. – P. 59–83. DOI: 10.1533/9781845695057.59
11. Чичинадзе А. В., Браун Э. Д., Буше Н. А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для техн. вузов, 2-е изд. перераб и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
12. Справочник по триботехнике / под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. Т. 1: Теоретические основы. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
13. Friedrich K., Chang L., Hauptert F. Current and Future Applications of Polymer Composites in the Field of Tribology // *Composite Materials*. – Springer, London, 2011. – P. 129–167. DOI: 10.1007/978-0-85729-166-0\_6
14. Hussein M. A., Mohammed A. S., Al-Aqeeli N. Wear Characteristics of Metallic Biomaterials: A Review // *Materials*. – 2015. – V. 8. – Is. 5. – P. 2749–2768. DOI: 10.3390/ma8052749
15. Богданович П. Н., Прушак В. Я. Трение и износ в машинах: учебник для вузов. – Минск, 1999. – 374 с.
16. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с.
17. Lancaster J. K. Geometrical effects on wear of polymers and carbons // *Journal of Lubrication Technology*. – 1997. – V. 2. – P. 187–194.

18. Петрова П. Н., Маркова М. А., Федоров А. Л. Исследование влияния технологий получения на свойства и структуру композитов на основе ПТФЭ // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2024. – Т. 29. – № 1. – С. 162–171. DOI: 10.31242/2618-9712-2024-29-1-162-171
19. Маркова М. А., Петрова П. Н. Исследование влияния углеродных волокон и технологий получения композитов на свойства ПКМ на основе политетрафторэтилена // Перспективные материалы. – 2020. – № 11. – С. 59–68. DOI: 10.30791/1028-978X-2020-11-59-68
20. Mohamed M.G., Kuo S.W. Functional Polyimide/Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane Nanocomposites // Polymers. – 2019. – V. 11. – Is. 1. – P. 26. DOI: 10.3390/polym11010026
21. Khare H. S., Moore A. C., Haidar D. R., Gong L., Ye J., Rabolt J. F., Burris D. L. Interrelated effects of temperature and environment on wear and tribochemistry of an ultralow wear PTFE composite // The Journal of Physical Chemistry C. – 2015. – V. 119. – No 29. – P. 16518–16527. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b00947
22. Krick B.A., Ewin J.J., Blackman G.S., Junk C.P., Gregory Sawyer W. Environmental dependence of ultra-low wear behavior of polytetrafluoroethylene (PTFE) and alumina composites suggests tribochemical mechanisms // Tribology International. – 2012. – V. 51. – P. 42–46. DOI: 10.1016/j.triboint.2012.02.015
23. Harris K. L., Pitenis A. A., Sawyer W. G., Krick B. A., Blackman G. S., Kasprzak D. J., Junk C. P. PTFE Tribology and the Role of Mechanochemistry in the Development of Protective Surface Films // Macromolecules. – 2015. – V. 48. – No 11. – P. 3739–3745. DOI: 10.1021/acs.macromol.5b00452
24. Onodera T., Kawasaki K., Nakakawaji T., Higuchi Y., Ozawa N., Kurihara K., Kubo M. Effect of Tribochemical Reaction on Transfer-Film Formation by Poly (tetrafluoroethylene) // The Journal of Physical Chemistry C. – 2014. – V. 118. – No 22. – P. 11820–11826. DOI: 10.1021/jp503331e
25. Дехант И., Данц Р., Киммер В., Шмольке Р. Инфракрасная спектроскопия полимеров. – М.: Химия, 1976. – 472 с.

УДК 678.743.22:536.468

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ $Mg(SbO_3)_2$ ДЛЯ ЗАМЕНЫ $Sb_2O_3$ В РЕЦЕПТУРЕ КАБЕЛЬНОГО ПВХ-ПЛАСТИКАТА**

Т. А. БОРУКАЕВ<sup>1</sup>, д-р хим. наук, М. Х. МАЛАМАТОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, А. Х. САЛАМОВ<sup>2</sup>, канд. пед. наук,  
Л. И. КИТИЕВА<sup>2</sup>, канд. хим. наук

<sup>1</sup> Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова, 360004, Нальчик,  
ул. Чернышевского, 173

<sup>2</sup> Ингушский государственный университет, 386001, Магас, ул. И. Б. Зязикова, 7

Поступила в редакцию 16.12.2025

После доработки 3.02.2026

Принята к публикации 12.02.2026

Получен антимонат магния, который использован для замены оксида сурьмы ( $Sb_2O_3$ ) в рецептуре кабельного поливинилхлоридного пластиката. Исследованы горючесть и физико-механические свойства полученного компаунда. Обнаружено, что замена  $Sb_2O_3$  в рецептуре кабельного поливинилхлоридного пластиката не приводит к снижению горючести компаунда. При этом основные эксплуатационные показатели (механические и термические свойства) поливинилхлоридного пластиката с добавкой  $Mg(SbO_3)_2$  сохраняются на высоком уровне.

**Ключевые слова:** поливинилхлорид, пластикат, состав, оксид сурьмы (III), антимонат магния, свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-126-2-160-167

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Мартынова А. В., Мазина Л. А., Ключников О. Р. Модификация кабельных поливинилхлоридных пластикатов пониженной горючести // Вестник КНИТУ. Химическая технология. – 2016. – Т. 19. – № 15. – С. 73–75. EDN: WLPBUZ
2. Каменский М. К., Мещанов Г. И., Фрик А. А. Кабели и провода пожаробезопасного исполнения. Современное состояние и тенденции развития // Кабели и провода. – 2017. – № 3. – С. 30–35. EDN: ZRNTWX
3. Борукаев Т. А., Мартазанова Р. М. Теплофизические и физико-механические свойства модернизированного промышленного ПВХ-пластиката // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 1 (105). – С. 84–93. URL: <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2021-105-1-84-93>
4. Зарипов И. И., Вихарева И. Н., Буйлова Е. А., Берестова Т. В., Мазитова А. К. Добавки для снижения горючести полимеров // Нанотехнологии в строительстве. – 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 156–161. URL: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-2-156-161>

5. Еремеева А. В., Готлиб Е. М. Снижение горючести ПВХ линолеума // Вестник КНИТУ. Химическая технология. – 2015. – Т. 18. – № 23. – С. 16–18. EDN: VHISSR
6. Борукаев Т. А., Саламов А. Х., Маламатов А. Х., Паштова Л. Р. Влияние добавки  $(\text{Mg}(\text{OH}))_2\text{CO}_3$  на некоторые характеристики пожарной опасности и физико-механические свойства ПЭНД // Материаловедение. – 2024. – № 12. – С. 30–37. EDN: HNRMKH
7. Анцупов Е. В., Родивилов С. М. Антипирены для пористых материалов // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20. – № 10. – С. 25–32. EDN: OHKWUL
8. Аминова Г. К., Маскова А. Р., Буйлова Е. А., Анисимова В. С., Ахметова И. И. Исследование термостабильности некоторых ПВХ-композиций // Башкирский химический журнал. – 2016. – Т. 23. – № 2. – С. 16–19. EDN: WHFCLR
9. Нафикова Р. Ф., Фаткулин Р. Н., Афанасьев Ф. И., Степанова Л. Б., Исламутдинова А. А. Исследование влияния пластификатора ДЭС М-2 на физико-механические и технологические свойства ПВХ пластикутов // Пластические массы. – 2020. – № 3–4. – С. 33–36. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-3-4-33-36
10. Лавров Н. А., Ксенофонтов Г. В., Белухичев Е. В. О механизме стабилизации поливинилхлорида (обзор) // Пластические массы. – 2016. – № 11–12. – С. 16–20. EDN: XUYNOP
11. Kuznetsov S. M., Sagitova E. A., Prokhorov K. A., Nikolaeva G. Y., Mendeleev D. I., Donfack P., Materny A. Raman spectroscopic detection of polyene-length distribution for high-sensitivity monitoring of photo- and thermal degradation of polyvinylchloride // Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc. – 2021. – V. 252. – Art. 119494. – P. 1–8. EDN: QYWFZR
12. Лавров Н. А., Колерт К., Ксенофонтов Г. В., Лаврова Т. В., Белухичев Е. В. О механизме деструкции поливинилхлорида (обзор) // Известия СПбГТИ(ТУ). – 2012. – Т. 42. – № 16. – С. 31–35. EDN: PKYQGD
13. Лутфуллаев С. Ш. Исследование влияния наполнителей на свойства ПВХ композиции // Universum: технические науки: электр. научн. журнал. – 2022. – № 12 (105). URL: [https://7universum.com/pdf/tech/12\(105\)%20\[15.12.2022\]/Lutfullaev1.pdf](https://7universum.com/pdf/tech/12(105)%20[15.12.2022]/Lutfullaev1.pdf)
14. Галигузов А. А., Сердан А. А., Яшин Н. В., Авдеев В. В. Влияние состава ПВХ пластика на эксплуатационные свойства и огнезащитную эффективность полимерных материалов на его основе // Пожаровзрывобезопасность. – 2023. – Т. 32. – № 5. – С. 26–39. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.2639

## КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

УДК 669.14.018.293:539.421

### МАСШТАБНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ВЫСОКОПРОЧНЫХ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

А. В. ИЛЬИН, д-р техн. наук, А. А. ЛАВРЕНТЬЕВ, К. Е. САДКИН, канд. техн. наук, Р. О. ЧЕРЧИЕВ  
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49. E-mail: [nrk6@crism.ru](mailto:nrk6@crism.ru)

Поступила в редакцию 2.02.2026

После доработки 8.04.2026

Принята к публикации 6.05.2026

Широко известен масштабный эффект при определении трещиностойкости – возрастание измеряемой ее характеристики ( $K_{Ic}$ , критических значений  $J$ -интеграла или раскрытия трещины) при уменьшении размеров образца. В количественном отношении он определяется вошедшей в стандарты поправкой на толщину, теоретически вытекающей из представления о хрупком разрушении как случайном событии в микрообъеме металла и связи вероятности разрушения с объемом зоны процесса исходя из принципа «слабого звена». Однако при испытаниях стандартных образцов с высоким уровнем трещиностойкости наблюдаются существенные отличия от известных поправок: при хрупких разрушениях масштабный эффект оказывается более резко выражен, чем это следует из поправок стандартов, а при вязких разрушениях наблюдается инверсионный масштабный эффект – возрастание определяемого по стандартам параметра трещиностойкости с возрастанием толщины. В работе анализируются эти особенности испытаний применительно к высокопрочным судостроительным сталям, для которых испытания на трещиностойкость являются обязательным элементом сертификационных испытаний металла нового производителя.

**Ключевые слова:** низколегированная сталь, параметры трещиностойкости, хрупкие и вязкие разрушения, масштабный эффект

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-126-2-168-189

© 2026

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

<http://www.crism-prometey.ru>

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования научным оборудованием «Состав, структура и свойства конструкционных и функциональных материалов» НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. 13: Материалы. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2023.
2. BS 7910:2013+A1:2015: Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. – 492 p.
3. ASTM E1820-18a: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.
4. ASTM E1921-18a: Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range.
5. BS 7448: Fracture Mechanics Toughness Test. Part 1: Method for determination of  $K_{Ic}$ , critical CTOD and critical J-values of metallic materials. – 1991.
6. ГОСТ Р 59115.6-2021: Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Методы определения характеристик трещиностойкости конструкционных материалов.
7. Сыч О. В., Хлусова Е. И. Взаимосвязь параметров структуры с характеристиками работоспособности судостроительных сталей различного легирования // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 4 (104). – С. 17–31.
8. Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Швецова В. А. Прогнозирование трещиностойкости реакторных сталей в вероятностной постановке на основе локального подхода // Проблемы прочности. – 1999. – Сообщ. 1: № 1. С. 5–20; Сообщ. 2: № 2. С. 5–22.
9. Ильин А. В., Лаврентьев А. А., Мизецкий А. В. О формулировке локального критерия хрупкого разрушения для прогнозирования трещиностойкости высокопрочной стали // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 3 (103). – С. 114–134.
10. Larsson, S. G., Carlsson, A. J. Influence of non-singular stress terms and specimen geometry on small-scale yielding at crack tips in elastic plastic material // J. Mech. Phys. Solids. – 1973 – V. 21. – P. 263–277. DOI: 10.1016/0022-5096(73)90024-0.
11. Du Z.-Z., Hancock J.-W. The effect of non-singular stresses on crack-tip constraint // J. Mech. Phys. Solids. – 1991. – V. 39. – Is. 4. – P. 555–567.
12. O’Dowd N. P., Shih C.F., Family of crack-tip fields characterised by a triaxiality parameter: 1. Structure of fields // J. Mech. Phys. Solids. – 1991. – V. 39. – Is. 8. – P. 989–1015. DOI: 10.1016/0022-5096(91)90049-T
13. Kim Y.-J., Kim J.-S., Cho S.-M., Kim Yo.-J. 3-D constraint effects on J testing and crack tip constraint in M(T), SE(B), SE(T) and C(T) specimens: numerical study // Engineering Fracture Mechanics. – 2004. – V. 71. – Is. 9. – P. 1203–1218. DOI: 10.1016/S0013-7944(03)00211-X
14. Kim Y., Chao Y. J., Zhu X. K. Effect of specimen size and crack depth on 3D crack-front constraint for SENB specimens // International Journal of Solids and Structures. – 2003. – V. 40. – P. 6267–6284.
15. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2 т. / пер. с англ. под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – Т. 1. – С. 51–56.
16. Ильин А. В., Лаврентьев А. А., Мизецкий А. В., Садкин К. Е. Об использовании локального критерия хрупкого разрушения для связи трещиностойкости высокопрочных сталей с результатами испытаний образцов с концентратором и структурными характеристиками материала // Вопросы материаловедения. – 2024. – № 4 (120). – С. 145–170.

#### КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ

УДК 621.762.5:669.14.018.8:620.193.27

#### ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, СВОЙСТВ И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СТАЛИ 12Х18Н10Т, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

Т. В. УГЛУНЦ<sup>1,2</sup>, Р. В. МЕНДАГАЛИЕВ<sup>1</sup>, М. А. УДОВИЧЕНКО<sup>2</sup>, Т. А. УГЛУНЦ<sup>2</sup>, Т. Б. НГО<sup>3</sup>, Н. В. ЛЕБЕДЕВА<sup>4</sup>, О. Г. КЛИМОВА-КОРСМИК<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3. E-mail: tuglunts@mail.ru

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

<sup>3</sup> Южное отделение совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра, Хошимин, Вьетнам 3, ул. 3/2, район 10

<sup>4</sup> НИЦ «Курчатowski институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49

Поступила в редакцию 20.10.2025

После доработки 16.01.2026

Принята к публикации 1.04.2026

В статье представлены результаты исследования микроструктуры и коррозионной стойкости нержавеющей стали 12X18H10T, полученной методом прямого лазерного выращивания (ПЛВ). Сравнительный анализ проведен для образцов горячекатаной стали (ГК) и методом ПЛВ в исходном состоянии и после термической обработки (ТО). Коррозионные испытания проведены методами электрохимической поляризации и натуральных испытаний в морской воде (испытания в Нячанге, 2544 ч). Полученные данные показали, что выращенные образцы после ТО обладают повышенной питтингостойкостью ( $\Delta E = 460$  мВ) благодаря гомогенизации структуры и снижению химической неоднородности. Полученные результаты испытаний на стойкость к межкристаллитной коррозии показывают значительный рост стойкости у выращенной стали после ТО по сравнению с исходным состоянием. Лабораторные испытания подтвердили более высокую коррозионную стойкость выращенных образцов по сравнению с горячекатаной, которые показывают более высокую устойчивость к образованию питтингов. Однако в условиях морской среды оба материала показали сопоставимую скорость коррозии ( $0,019-0,032$  г/м<sup>2</sup>·ч) из-за биообрастания, провоцирующего щелевую и язвенную коррозию.

**Ключевые слова:** прямое лазерное выращивание, микроструктура, механические свойства, коррозионная стойкость

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2026-126-2-190-203

*Исследование было проведено при финансовой поддержке программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030», соглашение № 075-15-2025-124 «Цифровые промышленные технологии».*

*Испытания на коррозию проводились при поддержке программы исследований и разработок Совместного Российско-Вьетнамского тропического научно-исследовательского и технологического центра по теме Эколан Т-2.2.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. DebRoy T., Wei H. L., Zuback J. S., Mukherjee T., Elmer J. W., Milewski J. O., Beese A. M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties // Progress in Materials Science. – 2018. – V. 92. – P. 112–224. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001
2. Li Y., Su Q., Sheng G., Hosseini S. R. E., Badran B. E., Gong P., Xin C., Wang H. Recent advances in artificial intelligence enhanced additive manufacturing of heat exchangers for thermal management: a review // Materials & Design. – 2025. – V. 256. – Art. 114339. DOI: 10.1016/j.matdes.2025.114339
3. Hemwat J., Seenawat M., Promoppatum P., Pandee P. Welding of additively and conventionally manufactured 316L stainless steel // Materials Today Communications. – 2025. – V. 46. – Art. 112683. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2025.112683
4. Kim J.-M., Chun Y.-B., Kang S. H., Lee B. S. Effects of annealing temperature on cellular structure and mechanical properties of additively manufactured 304L stainless steel by directed energy deposition // Materials Science and Engineering: A. – 2025. – V. 924 (1). – Art. 147821. DOI: 10.1016/j.msea.2025.147821
5. Zou L., Huang Y., Tan Y., Wang Y., Wang T., Ma Y., Yuan T., Li R. Anisotropy study of the microstructure, phase composition and properties of 321 stainless steel additively manufactured by laser powder bed fusion // Journal of Manufacturing Processes. – 2025. – V. 141. – P. 1135–1150. DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.03.038
6. Korsmik R., Tsybulskiy I., Rodionov A., Klimova-Korsmik O., Gogolukhina M., Ivanov S., Zadykhan G., Mendagaliev R. The approaches to design and manufacturing of large-sized marine machinery parts by direct laser deposition // Procedia CIRP. – 2020. – V. 94. – P. 298–303. DOI: 10.1016/j.procir.2020.09.056
7. Shaysultanov D., Povolyaeva E., Semenyuk A., Mendagaliev R., Alymov N., Zherebtsov S., Stepanov N. Laser direct energy deposition of gradient medium-entropy Fe<sub>45.0</sub>Co<sub>19.6</sub>Ni<sub>19.6</sub>Cr<sub>15.0</sub>Co<sub>0.8</sub> (at%) / Fe material with tunable TRIP effect // Journal of Alloys and Compounds. – 2025. – V. 1036. – Art. 182025. DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.182025
8. Gushchina M. O., Anisimov D. M., Shabunina Zh. S., Shalnova S. A., Klimova-Korsmik O. G., Topalov I. K., Aleksandrov V. L., Turichin G. A. Features of the Ti-6Al-4V microstructure and phase composition formation by changing

- the thermal cycle during the process of direct energy deposition // *Materials Characterization*. – 2025. – V. 227. – Art. 115330. DOI: 10.1016/j.matchar.2025.115330
9. Shalnova S. A., Volosevich D. V., Sannikov M. I., Magidov I. S., Mikhaylovskiy K. V., Turichin G. A., Klimova-Korsmik O. G. Direct energy deposition of SiC reinforced Ti–6Al–4V metal matrix composites: Structure and mechanical properties // *Ceramics International*. – 2022. – V. 48. – Is. 23. – Part A. – P. 35076–35084. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.08.097
10. Britt C., Liu Z.-K., Beese A. M., Keist J. Martensitic to stainless steel gradient by laser-based directed energy deposition: Effect of thermal history on microstructure and hardness // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2025. – V. 150. – P. 662–669. DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.06.030
11. Seerangan N. R., Chinnasamy R., Natrajan R., Ashok Kumar A., Ranganathan H. Stress corrosion cracking of friction stir welded AISI 304 and 316 L dissimilar steel alloys // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – V. 68. – Part 5. – P. 1663–1666. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.08.125
12. Veysi A., Roushani M., Najafi H. Synthesis and evaluation of CuNi-MOF as a corrosion inhibitor of AISI 304 and 316 stainless steel in 1N HCl solution // *Heliyon*. – 2025. – V. 11. – Is. 1. – Art. e41296. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e41296
13. Shtefan V., Kanunnikova N., Zuyok V. Comparative evaluation of microstructure and electrochemical, high-temperature corrosion rates of titanium- and aluminum-modified black chromium coatings on AISI 304 stainless steel // *Surface and Coatings Technology*. – 2025. – V. 497. – Art. 131706. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.131706
14. Wang M., Liu C., Bai G., Liu H., Liu Y., Fan D., Wang Z., Pang G. Enhancement of surface quality and corrosion resistance in 321 stainless steel by electrochemical machining // *Vacuum*. – 2025. – V. 240. – Art. 114487. DOI: 10.1016/j.vacuum.2025.114487
15. Tiarniyu A. A., Eduok U., Odeshi A. G., Szpunar J. A. Effect of prior plastic deformation and deformation rate on the corrosion resistance of AISI 321 austenitic stainless steel // *Materials Science and Engineering: A*. – 2019. – V. 745. – P. 1–9. DOI: 10.1016/j.msea.2018.12.093
16. Ramdane H., Benaïoun N., Guezzoul M., Moulayat N., Craciun V. Investigation of the corrosion-preventing properties of nickel-coated austenitic stainless steel (AISI 304) in NaOH and NaOH + 10% NaCl solutions // *Inorganic Chemistry Communications*. – 2023. – V. 152. – Art. 110671. DOI: 10.1016/j.inoche.2023.110671

## РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.039.531:669.15–194.56

### МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ДОЗОВОЙ ЗАВИСИМОСТИ РАДИАЦИОННОГО РАСПУХАНИЯ ПРИ НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ НА БАЗЕ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ.

#### Часть 1. Экспериментальное исследование радиационного распухания стали 08X18H10T после ионного облучения

А. А. СОРОКИН, канд. техн. наук, Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, М. С. МИХАЙЛОВ, В. А. ПЕЧЕНКИН, канд. физ.-мат. наук

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, д. 49

Поступила в редакцию 30.01.2026

После доработки 27.02.2026

Принята к публикации 5.03.2026

Проведены исследования радиационного распухания методами растровой электронной микроскопии аустенитной стали 08X18H10T после облучения ионами никеля и гелия до максимальной повреждающей дозы 175 сна в диапазоне температур 500–650°C. Разработан подход по установлению соответствия между распуханием исследуемой зоны облученного слоя и значением повреждающей дозы, рассчитанным для сплошного тела без вакансионных пор. Получены дозовые и температурные зависимости радиационного распухания для стали 08X18H10T в диапазоне повреждающих доз 60–160 сна после ионного облучения.

Проведено сопоставление полученных зависимостей с данными по распуханию исследуемой стали после нейтронного облучения. Обнаружено расхождение между распуханием при ионном и нейтронном облучении даже при компенсации влияния увеличения скорости набора дозы посредством увеличения температуры облучения. Выдвинута гипотеза, что обнаруженное расхождение вызвано не выбором параметров ионного облучения, а спецификой распухания в очень тонком облучаемом ионами слое, которая будет рассмотрена во второй части настоящей статьи.

**Ключевые слова:** ионное облучение, радиационное распухание, вакансионная пористость, растровая микроскопия, РЭМ, аустенитная сталь, 08X18H10T

© 2026

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

<http://www.cris-m-prometey.ru>

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

## ЛИТЕРАТУРА

1. Марголин Б. З., Сорокин А. А., Каштанов А. Д., Петров С. Н., Дуб А. В., Печенкин В. А. Методология оценки радиационной стойкости материалов, облученных в ионных ускорителях // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-реакторные константы. – 2025. – № 4. – С. 164–204
2. Грудзевич О. Т., Печенкин В. А., Кобец У. А. и др. Исследования радиационной стойкости конструкционных материалов на ускорителях ионов // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-реакторные константы. – 2022. – № 3. – С. 127–145.
3. Чернов И. И., Стальцев М. С., Калинин Б. А. и др. Особенности развития микроструктуры ванадия при облучении ионами  $Ni^{2+}$  энергией 7,5 МэВ при 650°C // Атомная энергия. – 2015. – Т. 118. – Вып. 6. – С. 321–324.
4. Jiao Z. et al. Microstructure evolution of T91 irradiated in the BOR60 fast reactor // J. Nucl. Mater. – 2018. – V. 504. – P. 122–134.
5. Li J., Miao S., Liuqing Y. et al. A comparison study of void swelling in additively manufactured and cold-worked 316L stainless steels under ion irradiation // J. Nucl. Mater. – 2019. – V. 51. – P. 152946.
6. Taller S., Van Coevering G., Wirth B. D. et al. Predicting structural material degradation in advanced nuclear reactors with ion irradiation // Sci Rep. – 2021. – V. 11. – Art. 2949.
7. Kalchenko A. S., Bryk V. V., Lazarev N. P. et al. Prediction of swelling of 18Cr10NiTi austenitic steel over a wide range of displacement rates // J. Nucl. Mater. – 2010. – V. 399. – Is. 1. – P. 114–121.
8. Liu C., Ma H., Fan P. et al. Cavity swelling of 15-15Ti steel at high doses by ion irradiation // Materials. – 2024. – V. 17. – Is. 4. Art. 925. URL: <https://doi.org/10.3390/ma17040925>
9. Lin Y.-R., Bhattacharya A., Chen D., Kai J.-J., Henry J., Zinkle S. J. Temperature-dependent cavity swelling in dual-ion irradiated Fe and Fe-Cr ferritic alloys // Acta Materialia. – 2021. – V. 33. – Art. 116660.
10. Garner F. A., Toloczko M. B., Sencer B. H. Comparison of swelling and irradiation creep behavior of FCC-austenitic and BCC-ferritic/martensitic alloys at high neutron exposure // J. Nucl. Mater. – 2000. – V. 276. – P. 123–142.
11. Garner F. A. Radiation Damage in Austenitic Steels // Comprehensive Nuclear Materials. – Amsterdam: Elsevier, 2012. – Ch. 4. – P. 33–95.
12. Getto E., Sun K., Monterrosa A. M., Jiao Z., Hackett M. J., Was G. S., Void swelling and microstructure evolution at very high damage level in self-ion irradiated ferritic-martensitic steels // J. Nucl. Mater. – 2016. – V. 480. – P. 159–176.
13. Mansur L. K. Void Swelling in Metals and Alloys Under Irradiation: An Assessment of the Theory // Nuclear Technology. – 1978. – V. 40. – N 1. – P. 5–34. DOI: 10.13182/NT78-2
14. Johnston W., Rosolowski J., Turkalo A., Lauritzen T. Nickel Ion Bombardment of Types 304 and 316 Stainless Steels: Comparison with Fast-Reactor Swelling Data // Effects of Radiation on Substructure and Mechanical Properties of Metals and Alloys. ASTM International, 1973. – P. 213–228.
15. Was G. S. Fundamentals of Radiation Materials Science. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – 827 p.
16. Glasgow B. B., Si-Ahmed A., Wolfer W. G., Garner F. A. Helium bubble formation and swelling in Metals // J. Nucl. Mater. – 1981. – V. 103–104. – P. 981–986.
17. Stoller R. E., Odette G. R. Effect of helium on swelling in stainless steel: influence of cavity density and morphology // ASTM STP. – 1982. – V. 782.
18. Woodley D., Taller S., Jiao Z., Sun K., Was G. S. The Role of Co-injected Helium on Swelling and Cavity Evolution at High Damage Levels in Ferritic-Martensitic Steels // J. Nucl. Mater. – 2021. – V. 550. – Art. 152912.
19. Марголин Б. З., Сорокин А. А., Беляева Л. А. Моделирование радиационного упрочнения нержавеющей ферритно-мартенситных и аустенитных сталей посредством облучения в ионном ускорителе. Ч. 1: Разработка методологии выбора режима ионного облучения ферритно-мартенситных сталей // Вопросы материаловедения. – 2024. – № 2 (118). – С. 187–211.
20. Рогожкин С. В., Искандаров Н. А., Алеев А. А. и др. Исследование влияния облучения ионами Fe на наноструктуру ферритно-мартенситной стали ЭК-181 // Перспективные материалы. – 2013. – № 2. – С. 36–41.
21. Рогожкин С. В., Никитин А. А., Хомич А. А., Искандаров Н. А., Алеев А. А. и др. Имитационные эксперименты на пучках тяжелых ионов для моделирования радиационных повреждений конструкционных материалов активной зоны ядерных и термоядерных энергетических установок // Ядерная физика и инжиниринг. – 2018. – Т. 9. – № 3. – С. 245–258.

22. Lear C. R., Song M., Wang M., Was G. S. Dual ion irradiation of commercial and advanced alloys: Evaluating microstructural resistance for high dose core internals // J. Nucl. Mater. – 2019. – V. 51. – P. 125–134
23. SRIM, Computer Code for Stopping and Range of Ions in Matter. URL: <http://www.srim.org>.
24. Pechenkin V. A., Chernova A. D., Molodtsov V. L., Garner F.A. Effect of internal sink strength on diffusion mass transport in alloys under high dose ion irradiation // Proceedings of the 12th International Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerators (November 10–13, 2015, Washington, USA). – 2016. – P. 103–109.
25. Васина Н. К., Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Курсевич И. П. Радиационное распухание аустенитных сталей: влияние различных факторов. Обработка экспериментальных данных и формулировка определяющих уравнений // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 4 (48) . – С. 69–88.
26. Марголин Б. З., Мурашова А. И., Неустроев В. С. Влияние напряжений на радиационное распухание аустенитных сталей // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 4 (68) . – С. 124–139.
27. ГОСТ Р 59429-2021: Устройства внутрикорпусные водо-водяного энергетического реактора. Расчет на прочность на стадии проектирования.

## SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL “Voprosy Materialovedeniya”, 2026, No 2 (126)

### CONTENTS

#### METALS SCIENCE. METALLURGY

- Kudryavtsev A.S., Mikhailov M.S., Petrov S.N., Belikova Yu.A. Microstructural evolution in 12% Cr steels during thermal aging..... 6
- Karaban V.A., Ryabikina M.A., Zarechensky D.A., Chernobay A.V. Modeling of internal stresses in austenite and perlite steels during wear of the working part of the excavator bucket tooth..... 19
- Sennikova L.F., Gangalo A.N., Volkova G.K., Glazunova V.A., Yasharova E.V., Klimova E.Kh. Structure and hardness of M0b copper after deformation-heat treatment at room and cryogenic temperatures ..... 27

#### FUNCTIONAL MATERIALS

- Nesterova E.D., Bobkova T.I., Aleksandrov R.Yu., Mukhamedzyanova L.V., Krasikov A.V. Study of tribological characteristics of microplasma high-entropy coating of the AlNiCoFeCr system..... 35
- Vokhmyanin M.A., Savelyev S.M. Geometric auxetics: analytical derivation of the described area dependence on deformation in auxetic structures with constant body area..... 44
- Dyachenko S.V., Balabanov S.V., Sychev M.M., Chekuryaev A.G., Basova V.A., Myakin S.V. Influence of geometric parameters on the energy absorption properties of a nature-like cellular structure with schwarz primitive geometry made of glass-filled polyamide..... 57
- Kuznetsov P.A., Kosyreva T.V., Shakirov I.V., Mukhamedzyanova L.V., Mikhailov M.S., Nameev D.A., Sidorov A.V., Matsaev A.A. Influence of austenizing temperature on the structure and properties of 08Kh18N10T steel synthesized by direct laser growth ..... 76
- Akhmadieva A.A., Miroshkina V.D., Danko V.S., Savchenko N.L., Grigoryev M.V., Zhukov I.A. Low-temperature sintering ceramics for LTCC technology: A review. Part 1. Glass-containing ceramics..... 89
- Akhmadieva A.A., Miroshkina V.D., Danko V.S., Savchenko N.L., Grigoryev M.V., Zhukov I.A. Low-temperature sintering ceramics for LTCC technology: A review. Part 2. Glass-free ceramics ..... 98
- Ivanov A.A., Shestakov M.E., Akimov I.I., Trunkin I.N. Studies of aluminum-stainless steel bonding by cold gas-dynamic spraying..... 108
- Khimukhin S.N., Eremina K.P., Khe V.K. Combined coatings produced by electrospark deposition..... 116

#### POLYMER STRUCTURAL MATERIALS

- Ivanova G.V., Tsvetkova G.V., Kolotiy A.I., Levitsky A.M., Andreeva V.D. Effect of heat treatment on the structural, mechanical, and tribotechnical characteristics of PEEK produced by fusion deposition manufacturing (FDM)..... 125
- Okoneshnikova A.V., Danilova S.N., Lazareva N.N., Okhlopko A.A. Polymeric materials based on ultra-high molecular weight polyethylene and beeswax ..... 137
- Petrova P. N., Isakova T. A., Markova M. A., Fedorov A. L. Comparative analysis of the effect of micro- and nanofibrous carbon fillers on the tribological characteristics of PTFE composites depending on friction patterns and loading conditions ..... 147
- Borukaev T.A., Malamatov A.Kh., Salamov A.Kh., Kitieva L.I. Replacing  $Sb_2O_3$  with  $Mg(SbO_3)_2$  in the formulation of PVC cable plastic compound..... 160

## STRUCTURAL INTEGRITY AND SERVICEABILITY OF MATERIALS

Ilyin A.V., Lavrentiev A.A., Sadkin K.E., Cherchiev R.O. Scale effect in fracture toughness testing of high-strength shipbuilding steels..... 168

## CORROSION AND PROTECTION OF METALS

Uglunts T.V., Mendagaliev R.V., Udovichenko M.A., Uglunts T.A., Ngo T.B., Lebedeva N.V., Klimova-Korsmik O.G. Study of the structure, properties, and corrosion resistance of 12Kh18N10T steel produced by direct laser growth .. 190

## RADIATION MATERIALS SCIENCE

Sorokin A.A., Margolin B.Z., Mikhailov M.S., Pechenkin V.A. A method for predicting the temperature-dose dependence of radiation swelling under neutron irradiation based on ion irradiation. Part 1. Experimental study of radiation swelling of 08Kh18N10T steel after ion irradiation ..... 204

**Guidelines for authors of the scientific and technical journal “Voprosy Materialovedeniya”. Manuscript requirements..... 222**

## METALS SCIENCE. METALLURGY

UDC 669.1526-194.55:621.785.78

### MICROSTRUCTURAL EVOLUTION IN 12% Cr STEELS DURING THERMAL AGING

A.S. KUDRYAVTSEV, Dr Sc. (Eng), M.S. MIKHAILOV, S.N. PETROV, Dr Sc. (Eng), Yu.A. BELIKOVA

*NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”,*

*49 Shpaleynaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: npk6@crism.ru*

Received April 17, 2026

Revised April 30, 2026

Accepted May 6, 2026

**Abstract**—The paper investigates microstructural evolution of 12Cr-Ni-Mo-V-Nb steel (grade 07Kh12NMFB) after thermal aging for ~5000 h at temperatures from 450 to 600°C. A phase composition changes significantly while holding temperature increases. It has been established that after aging at a temperature of 600°C, the formation of Laves phase particles up to 1.5 μm in size and the formation of the Z-phase occur. These microstructural changes impose limitations on using the steel under examination for heavily loaded equipment at operating temperatures of 600°C and above. The microstructure of the steel at temperatures up to 550°C is quite stable that points to the possible long-term material operation.

*Keywords:* 12Cr steels, thermal aging, Laves phase, Z-phase, phase composition, dislocation density, microstructural evolution

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2026-126-2-6-18

## ACKNOWLEDGMENTS

*Experimental studies were carried out at the Center for Collective Use of the Equipment “Composition, structure and properties of structural and functional materials” of the NRC “Kurchatov Institute – CRISM “Prometey”.*

## REFERENCES

1. Abe, F., Research and Development of Heat-Resistant Materials for Advanced USC Power Plants with Steam Temperatures of 700°C and Above, *Materials Science & Engineering A*, 2015, V. 1, Is. 2, pp. 211–224. DOI: 10.15302/J-ENG-2015031
2. Rohit Sai Krishna, A., Vamshi Krishna, B., Sashank, T., Harshith, D., Subbiah R., Influence and assessment of mechanical properties on treated P91 steel with normalizing processes, *Materials Today: Proceedings*, 2020, V. 27, Part 2, pp. 1555–1558. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.201

3. Wright, I.G., Dooley, R.B., A review of the oxidation behaviour of structural alloys in steam, *International Materials Reviews*, 2010, V. 55, No 3, pp. 129–167. DOI: 10.1179/095066010X12646898728165
4. Cabet, C., Dalle, F., Gaganidze, E., Henry, J., Tanigawa, H., Ferritic-martensitic steels for fission and fusion application, *Journal of Nuclear Materials*, 2019, V. 523, pp. 510–537. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2019.05.058
5. Abe, F., Kern, T.-U., Viswanathan, R., *Creep-resistant steels*, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, Cambridge England, 2008.
6. Chilukuru, H., Durst, K., Wadekar, S., Schwienheer, M., Scholz, A., Berger, C., Mayer, K.H., Blum, W., Coarsening of precipitates and degradation of creep resistance in tempered martensite steels, *Materials Science and Engineering A*, 2009, V. 510–511, pp. 81–87. DOI: 10.1016/j.msea.2008.04.088
7. Wang, W., Xu, G., He, K., Evolution of creep behavior of CLAM steel during thermal aging, *Journal of Nuclear Materials*, 2018, V. 510, pp. 265–269. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2018.07.002
8. Cerjak, H., Holzer, I., Mayr, P., Pein, C., Sonderegger, B., Kozeschnik, E., *The Relation between Microstructure and Creep Properties of Martensitic 9–12% Cr Steels*, Proceedings of the International Conference on New Developments on Metallurgy and Applications of High Strength Steels, Buenos Aires, 2008, V. 1, 2, pp. 247–265.
9. Kaibyshev, R.O., Skorobogatykh, V.N., Shchenkova, I.A., Formirovanie Z-fazy i perspektivy primeneniya stali martensitnogo klassa s 11% Cr dlya raboty pri temperaturakh vyshe 590°C [Formation of Z-phase and prospects of application of martensitic steel with 11% Cr for operation above 590°C], *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2010, No 3 (657), pp. 4–14.
10. Hald, J., Microstructure and long-term creep properties of 9–12% Cr steels, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2008, V. 85, Is. 1–2, pp. 30–37. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2007.06.010
11. Karzov, G.P., Kudryavtsev, A.S., Markov, V.G., Grishmanovskaya, R.N., Trapeznikov, Yu.M., Ananieva, M.A., Razrabotka konstruktsionnykh materialov dlya atomnykh energeticheskikh ustanovok na bystrykh neutronakh s natrievym teplonositelem [The development of structural materials for sodium-cooled fast neutron reactor], *Voprosy Materialovedeniya*, 2015, No 2 (82), pp. 23–33.
12. Kudryavtsev, A.S., Suvorov, S.A., Artemieva, D.A., Ramazanov, R.M., Koroziionnaya stoikost 12% khromistoi stali v usloviyakh ekspluatatsii parogeneratora reactornoi ustanovki s natrievym teplonositelem [Corrosion resistance of 12% Cr steel under the operation conditions of a steam generator of a reactor plant with sodium coolant], *Voprosy Materialovedeniya*, 2022, No 3 (111), pp. 131–147.
13. Blokhina, A.N., Lyakishev, S.L., Solomatina, V.A., Perspektivny korpusnoi parogenerator dlya energobloka na bystrykh neutronakh s natrievym teplonositelem, *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser.: Obespechenie bezopasnosti AES*, 2012, No 31, pp. 5–14.
14. Rybin, V.V., Rubtsov, A.S., Nesterova, E.V., Metod odinochnykh reflektsov (OR) i ego primeneniye dlya elektronnomikroskopicheskogo analiza dispersnykh faz [The single-reflection method and its application for electron microscopic analysis of dispersed phases], *Zavodskaya laboratoriya*, 1982, No 5, pp. 21–26.
15. Fedoseeva, A.E., Dudko, V.A., Kaibyshev, R.O., Kozlov, P.A., Skorobogatykh, V.N., Shchenkova, I.A., Mikrostrukturnye ismeneniya v stali 10Kh9VMFBR pri polsuchesti v techenii 40,000 chasov pri 600°C [Microstructural changes in steel 10Kh9VMFBR during creep for 40,000 hours at 600°C], *Fizika metallov i metallovedenie*, 2015, V. 116, No 10, pp. 1102–1111. DOI: 10.1134/S0031918X15080049
16. Kaybyshev, R.O., Skorobogatykh, V.N., Shchenkova, I.A., Novye stali martensitnogo klassa dlya teplovoi energetiki. Zharoprochnye svoystva [New martensitic-class steels for fossil power plant. Creep resistance], *Fizika metallov i metallovedenie*, 2010, V. 109, No 2, pp. 200–215. DOI: 10.1134/S0031918X10020110

17. Dudova, N., Plotnikova, A., Molodov, D., Belyakov, A., Kaibyshev, R., Structural changes of tempered martensitic 9%Cr–2%W–3%Co steel during creep at 650°C, *Mater. Sci. Eng. A*, 2012, V. 534, pp. 632–639. DOI: 10.1016/j.msea.2011.12.020
18. Panait, C., Bendick, W., Fuchsmann, A., Gourgues-Lorenzon, A.-F., Besson, J., Study of the microstructure of the Grade 91 steel after more than 100,000 h of creep exposure at 600°C, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2010, No 87 (6), pp. 326–335. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2010.03.017
19. Jin, X., Zhu, B., Li, Y., Zhao, Y., Xue, F., Zhang, G., Effect of the microstructure evolution on the high-temperature strength of P92 heat-resistant steel for different service times, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2020, V. 186, pp. 104–131. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2020.104131
20. Tarasenko, L.V., Titov, V.I., Protsessy fazovoi nestabilnosti v zharoprochnykh stalyakh pri dlitelnykh nagrevakh [Processes of phase instability in high-temperature steels upon long-term heating], *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2005, No 12, pp. 10–15.

UDC 669.15–194.56:539.538:621.879

**MODELING OF INTERNAL STRESSES IN AUSTENITE AND PERLITE STEELS DURING WEAR OF THE WORKING PART OF THE EXCAVATOR BUCKET TOOTH**

V.A. KARABAN, M.A. RYABIKINA Cand Sc. (Eng),

D.A. ZARECHENSKY, Cand Sc. (Eng), A.V. CHERNOBAY

*Pryazovsky State Technical University, Branch of the National Research Moscow State University of Civil Engineering, 115 Apatova St, 287642 Mariupol, Russian Federation. E-mail: office-pstu@yandex.ru*

Received November 17, 2025

Revised January 15, 2026

Accepted February 12, 2026

**Abstract**—The article presents computer modeling of the stress-strain state of the excavator bucket teeth after operation and metallographic studies of full-scale samples made of 110G13L and heat-treated 30KhGSA steels. It was found that a nanosized martensitic structure is formed in the surface layer of the steels in question during wear to a depth of about 0.2 mm from the working surface. An examination of the stress field reaching the yield point of the tooth material led to the conclusion that changes in the structural state of the metal, which is prone to hardening during deformation, must be taken into account for adequate finite element analysis in modeling with the determination of the size and depth of zones experiencing critical loads.

*Keywords:* bucket teeth, modeling, stress-strain state, structure, work hardening depth, and hardness

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2026-126-2-19-26

**REFERENCES**

1. Lebedev, D.I., Fedorov, M.V., Golikov, N.I., Tikhonov, R.P., Vinokurov, G.G., Naturnye ispytaniya sluzhebnykh kharakteristik naplavlennoi koronki rykhlytelya buldozera Komatsu D375A [Field tests of the service characteristics of the welded crown of the Komatsu D375A bulldozer ripper], *Nauka i obrazovanie*, 2016, No 2, pp. 81–87.
2. Yuldashev, Sh.K., Teoreticheskie osnovy vosstanovleniya zubiev kovshei ekskavatorov [Theoretical foundations of restoration of excavator bucket teeth], *Universum: tekhnicheskie nauki*, 2023, No 11 (116). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16230> reference date 15/05/2026)

3. Delag, D., Vanchizhav, S., Purevdorj, N., Issledovanie samozatachivaniya zuba kovsha ekskavatora [Research on self-sharpening of the excavator bucket tooth], *Gorny informatsionno-analitichesky byulleten*, 2008, No 1, pp. 402–416.
4. Teplyashin, M.V., Komkov, V.G., Starienko, V.A., Teoreticheskie issledovaniya metodov vosstanovleniya rabochikh organov s ispolzovaniem elektroshlakovoi tekhnologii [Theoretical research of methods for restoring working bodies using electroslag technology], *Uchenye zametki TOGU*, 2013, V. 4, No 4, pp. 1537–1542.
5. Fedotenko, Yu.A., Rebrova, I.A., Bulaeva, D.V., Eksperimentalnye issledovaniya rezhushchikh elementov rabocheho organa podkapyvayushchei mashiny [Experimental Research of Cutting Elements of the Working Body of a Trenching Machine], *Vestnik SibADI*, 2014, No 1 (35), pp. 38–42.
6. Dong, Zh., Jiang, F., Tan, Y., Wang, F., Ma, R., Liu, J., Review of the Modeling Methods of Bucket Tooth Wear for Construction Machinery, *Lubricants*, 2023, No 11(6), pp. 253–272.
7. Ovsyannikov, V.E., K voprosu primenimosti raschetnogo metoda otsenki soprotivleniya iznosu detalei posle termodiffuzionnogo uprochneniya [On the applicability of the calculation method for assessing the wear resistance of parts after thermodynamic diffusion hardening], *Vestnik SibADI*, 2018, No 3 (61), pp. 412–420.
8. Bolobov, V.I., Vliyanie formy zubiev kovsha na energiyu zatrachivaemuyu ekskavatorom pri rabote po krupnokuskovym gornym porodam [Influence of the shape of the bucket teeth on the energy consumed by an excavator when working on large-grained rocks], *Transportnoe, gornoe i stroitelnoe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo*, 2022, No 17–1, pp. 179–185.
9. Bolobov, V.I., Akhmerov, E.V., Rakitin, I.V., Vliyanie vida gornoj porody na zakonomernosti iznashivaniya koronki zuba kovsha ekskavatora [Influence of the type of rock on the patterns of wear of the crown of the excavator bucket tooth], *Gorny informatsionno-analitichesky byulleten*, 2022, No 6-2, pp. 189–204.
10. Kryzhevich, G.B., Filatov, A.R., Kompleksny podkhod k topologicheskoi i parametricheskoi optimizatsii sudovykh konstruksii [A comprehensive approach to topological and parametric optimization of ship structures], *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*, 2020, No 1 (391), pp. 95–108.
11. Frantsuzov, A.A., Shapovalov, Ya.I., Vdovin, D.S., Primenenie metoda topologicheskoi optimizatsii v zadachakh proektirovaniya gruzopodiemnoi tekhniki [application of the topological optimization method in the design of lifting equipment], *Izvestiya Vysshykh Uchebnykh Zavedeniy. Povolzhsky Region. Tekhnicheskie Nauki*, 2017, No 2 (42), pp. 99–108.
12. Levin, V.A., Zingerman, K.M., Vershinin, A.V., Vasilyev, P.A., Topologicheskaya optimizatsiya elementov konstruksiy s uchetom strukturnoi neodnorodnosti materiala s ispolzovaniem gradientnogo metoda [Topological Optimization of Structural Elements Taking into Account the Structural Heterogeneity of the Material Using the Gradient Method], *Chebyshevsky sbornik*, 2022, V. 23, No 4, pp. 308–326.
13. Kalkat, M., Bahadır, M., Yılmaz, F., The determination of the working life of backhoe-loader bucket teeth showing abrasive wear under the effect of dynamic loads, *J. Eng. Sci.*, 2023, No 12 (4), pp. 1499–1507. DOI: 10.28948/ngumuh.1324598
14. Gromyka, D.S., Gogolinsky, K.V., Kremcheev, E.A., Modelirovanie termicheskoi ustalosti zuba pri tsiklicheskom teplovom vozdeistvii [Modeling of thermal fatigue of a tooth under cyclic thermal exposure], *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2021, No 2, pp. 23–29.
15. Popov, D.A., Patyukov, S.S., Osobennosti usloviy ekspluatatsii rabochih organov stroitelno-dorozhnykh mashin i factory, vliyayushchie na ih resurs [Features of the operating conditions of the working bodies of

construction and road machines and the factors affecting their resource], *Voronezhsky nauchno-tekhnichesky vestnik*, 2015, No 1 (11), pp. 85–95.

16. Gromyka, D.S., Gogolinsky, K.V., Metodika diagnostirovaniya sostoyaniya i otsenki ostatocnogo resursa koronok zubiev kovshei ekskavatorov [Methodology for Diagnosing the Condition and Estimating the Remaining Resource of the Teeth of Excavator Buckets], *Defektoskopiya*, 2022, No 5, pp. 51–60.

17. Zvonarev, I.E., Ivanov, S.L., Shishlyannikov, D.I., Fokin, A.S., Issledovaniya poverkhnostnoi tverdsti metalla v oblastyakh poverkhnostnogo iznosa i razrusheniya detalei gornyykh mashin [Research of the surface hardness of metal in the areas of surface wear and destruction of parts of mining machines], *Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2014, No 11, pp. 67–76.

18. Butsukin, V.V., Shiryaev, A.V., Issledovanie mekhanicheskikh kharakteristik zakalenoj valkovoj stali 90HF [Research of the Mechanical Characteristics of Tempered Roll Steel 90KhF], *Svarochnoe proizvodstvo*, 2025, No 1, pp. 56–59.

19. Ivanov, A.V., Petrov, D.N., Sidorov, K.L., Povyshenie iznosostoikosti zubiev ekskavatornykh kovshei putem lokalnogo uprochneniya [Increasing the wear resistance of excavator bucket teeth by local hardening], *Tsvetnye metally*, 2018, No 7, pp. 67–72.

UDC 669.36:621.777

## STRUCTURE AND HARDNESS OF M0b COPPER AFTER DEFORMATION-HEAT TREATMENT AT ROOM AND CRYOGENIC TEMPERATURES

L.F. SENNIKOVA, Cand. Sc. (Eng), A.N. GANGALO, Cand. Sc. (Eng), G.K. VOLKOVA,

V.A. GLAZUNOVA, E.V. YASHAROVA, E.Kh. KLIMOVA

*Donetsk Institute of Physics and Technology named after A.A. Galkin, 72 Rosa Luxemburg St, 283048 Donetsk,*

*Russian Federation. E-mail: ludsennikova@mail.ru*

Received November 1, 2025

Revised November 19, 2025

Accepted November 28, 2025

The effect of upsetting deformation at room and cryogenic temperatures on the structure and hardness of M0b copper in the coarse-crystalline and submicrocrystalline states was studied. It has been shown that, for relatively small plastic deformations ( $\epsilon \sim 1.0$ ) of copper, cryogenic temperatures promote intensified grain refinement. After large plastic deformations, the grain refinement effect during subsequent cryogenic upsetting is very small for the SMC structure. It has been established that, using a combination of equal-channel angular pressing and cryogenic upsetting, the hardness of M0b copper can be significantly increased to 1410 MPa.

*Keywords:* deformation-heat treatment, deformation by upsetting, coarse-crystalline state, submicrocrystalline state, cryogenic temperature

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2026-126-2-27-34

## REFERENCES

1. Edalati, K., et al., Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances, *Mater. Res. Lett.*, 2022, V. 10, No 4, pp. 163–256.

2. Prangnell, P.B., Bowen, J.R., Apps, P.J., Ultra-fine grainstructures in aluminium alloys by severe deformation processing, *Mater. Sci. Eng.: A*, 2004, V. 375–377, pp. 178–185.

3. Huang, Y., Prangnell, P.B., The effect of cryogenic temperature and change in deformation mode on the limiting grain size in a severely deformed dilute aluminium alloy, *Acta Mater.*, 2008, V. 56, pp. 1619–1632.
4. Zhang, Y., Tao, N.R., Lu, K., Mechanical properties and rolling behaviors of nanograined copper with embedded nanotwin bundles, *Acta Mater.*, 2008, V. 56, pp. 2429–2440.
5. Pilyugin, V.P., Gapontseva, T.M., et al., Evolyutsiya struktury i tverdosti nikelya pri kholodnoi i nizkotemperaturnoi deformatsii pod davleniem [Evolution of nickel structure and hardness during cold and low-temperature deformation under pressure], *FMM*, 2008, V. 105, No 4, pp. 438–448.
6. Li, Y.S., Tao, N.R., Lu, K., Microstructural evolution and nanostructure formation in copper during dynamic plastic deformation at cryogenic temperatures, *Acta mater.*, 2008, V. 56, pp. 230–241.
7. Konkova, T.N., Mironov, S.Yu., Korznikov, A.V., Intensivnaya kriogennaya deformatsiya medi [Intensive cryogenic deformation of copper], *FMM*, 2010, V. 109, pp. 184–189.
8. Panigrahi, S.K., Jayaganathan, R., A study on the mechanical properties of cryorolled Al-Mg-Si alloy, *Mater. Sci. Eng.*, 2008, V. 480, pp. 299–305.
9. Dalla Torre, F., Lapovok, R., Sandlin, J., Thomson, P.F., Davies, C.H.J., Pereloma, E.V., Microstructures and properties of copper processed by equal channel angular extrusion for 1–16 passes, *Acta Mater.*, 2004, V. 52, pp. 4819–4832.
10. Rusakov, A.A., *Rentgenografiya metallov* [Radiography of metals], Moscow: Atomizdat, 1977.
11. Sennikova, L.F., Gangalo, A.N., Tkachenko, V.M., Volkova, G.K., Glazunova, V.A., Klimova, E.Kh., Vliyanie gidroekstruzii na strukturu i mekhanicheskie svoistva medi M0b, predvaritelno obrabotannoi ravnokanalnym uglovym pressovaniem [Effect of hydroextrusion on the structure and mechanical properties of M0b copper pre-treated by equal-channel angle pressing], *Voprosy materialovedeniya*, 2025, No 3 (123), pp. 32–39.
12. Rogachev, S.O., Zemlyakova, N.V., Osobennosti rekristallizatsii medi v protsesse intensivnoi plasticheskoi deformatsii pri komnatnoi temperature [Features of copper recrystallization during intensive plastic deformation at room temperature], *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, 2024, No 173, pp. 3–8.
13. Gorelik, S.S., *Rekristallizatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys], Moscow: MISiS, 2005.
14. Utyashev, F.Z., Raab, G.I., Valitov, V.A., *Deformatsionnoe nanostrukturirovanie metallov i splavov* [Deformational Nanostructuring of Metals and Alloys], St Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2020.
15. Polukhin, P.I., Gorelik, S.S., Vorontsov, V.K., *Fizicheskie osnovy plasticheskoi deformatsii* [Physical foundations of plastic deformation], Moscow: Metallurgiya, 1982.

## FUNCTIONAL MATERIALS

UDC 621.793.74:621.762.34:621.891

### STUDY OF TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF MICROPLASMA HIGH-ENTROPY COATING OF THE AlNiCoFeCr SYSTEM

E.D. NESTEROVA, T.I. BOBKOVA, R.Yu. ALEKSANDROV, L.V. MUKHAMEDZYANOVA, A.V. KRASIKOV  
NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: mail@crism.ru

Received January 29, 2026

Revised March 2, 2026

Accepted March 24, 2026

**Abstract**—This paper presents studies of a high-entropy coating produced by microplasma spraying using AlNiCoFeCr composite powders under the influence of friction forces in the transverse and longitudinal directions. Tribological tests using a pin-on-disk setup and localized square sclerometry demonstrated the coating's potential for protecting friction components of steel components.

**Keywords:** high-entropy coatings, tribology, sclerometry, microstructure, microhardness

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2026-126-2-35-43

## REFERENCES

1. Bolsunovskaya, T.A., Efimochkin, I.Yu., Sevostyanov, N.V., Vliyanie marki grafita v kachestve tverdoi smazki na tribotekhnicheskie svoystva metallicheskogo kompozitsionnogo materiala [Influence of graphite grade as a solid lubricant on the tribotechnical properties of a metal composite material], *Trudy VIAM*, 2018, No 7, pp. 69–77.
2. Sorokin, V.M., Kurnikov, A.S., *Osnovy tribotekhniki i uprochneniya poverkhnostei detalei mashin* [Fundamentals of Tribology and Surface Hardening of Machine Parts], Moscow: Mashinostroenie, 1968.
3. Myshkin, N.K., *Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i tekhnicheskie prilozheniya tribologii* [Friction, lubrication, and wear. Physical fundamentals and technical applications of tribology], Moscow: FIZMATLIT, 2007.
4. Yeh, J.-W., Chen, S.K., Lin, S.J., Gan, J.Y., et al., Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes, *Advanced Engineering Materials*, 2004, V. 6, No 5, pp. 299–303. URL: <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
5. Cantor, B., Multicomponent high-entropy Cantor alloys, *Progress in Materials Science*, 2021, V. 120. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100754>
6. Bolelli, G., Bonilauri, M.F., et al., HVOF deposition of TiC-based hardmetal coatings with High-Entropy Alloy (HEA) matrix, *Surface & Coatings Technology*, 2025, V. 512, P. 132386. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2025.132386>
7. Jin, B., Zhang, N., Yin, S., Strengthening behavior of AlCoCrFeNi(TiN) high-entropy alloy coatings fabricated by plasma spraying and laser remelting, *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, V. 121, pp. 163–173. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.12.055>
8. Nakonechnyi, S., Soloviova, T., Yurkova, A., Solodkiy I., Loboda, P., Cold sprayed AlNiCoFeCr-TiB<sub>2</sub> metal matrix composite coatings, *Vacuum*, 2023, V. 213, P. 112144. URL: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112144>
9. Bolelli, G., Bonilauri, M.F., et al., Deposition of High-Entropy Alloy (HEA) coatings by HVOF and cold gas spray, *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, V. 1039, P. 183050. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.183050>
10. Harfouche, M.M., Liang, J., Aghasibeig, M., Tarasi, F., Moreau, C., Dolatabadi, A., Wong, W., Azarmi, F., Effect of WC powder morphology on dry sliding wear behavior of cold sprayed CrMnCoFeNi cantor HEA composite coatings at room temperature, *Wear*, 2025, V. 571, P. 205838. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.205838>
11. Shi, X., Li, Q., He, P., Feng, K., Li, Z., Wu, Y., Microstructure and properties of plasma-sprayed AlCoCrFeNi high-entropy alloy coatings via CeO<sub>2</sub> doping, *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, V. 38, pp. 4351–4364. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.08.268>
12. Feng C., Wang X., et al., High Hardness and Wear Resistance in AlCrFeNiV High-Entropy Alloy Induced by Dual-Phase Body-Centered Cubic Coupling Effects, *Materials*, 2022, V. 15, No 19, p. 6896. URL: <https://doi.org/10.3390/ma15196896>

13. Zhang, X., Yang, Z., Deng, Y., Molecular Dynamics Study on Wear Resistance of High Entropy Alloy Coatings Considering the Effect of Temperature, *Materials*, 2024, V. 17, No 16, P. 3911. URL: <https://doi.org/10.3390/ma17163911>
14. Nesterova, E.D., Bobkova, T.I., Mukhamedzyanova, L.V., Khromenkov, M.V., Serdyuk, N.A., Formirovanie kompozitsionnykh poroshkov multikomponentnykh splavov sistemy  $Al_xNiCoFeCr$  metodom mekhanokhimicheskogo sinteza [Formation of composite powders of multicomponent alloys of the  $Al_xNiCoFeCr$  system by mechanochemical synthesis], *Voprosy materialovedeniya*, 2025, No 2 (122), pp. 75–85.
15. Maroszek, M., et al., Anisotropy of Mechanical Properties of 3D-Printed Materials—Influence of Application Time of Subsequent Layers, *Materials*, 2025, V. 18, No 14, Art. 3845. URL: <https://doi.org/10.3390/ma18163845>
16. Kravchuk, K.G., *Izmerenie tribologicheskikh svoystv pokrytiy i kompozitsionnykh materialov na submikronnom i nanometrovom masshtabakh* [Measurement of tribological properties of coatings and composite materials at the submicron and nanometer scales]: Abstract of a PhD thesis, Moscow, 2015.
17. Zhang, H., Wu, H., et al., Friction and wear performance of 3D-printed graphite/SiC composites with different graphite layer deflection angles, *Tribology International*, 2024, V. 199, p. 109986. URL: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109986>
18. Useinov, A.S., Kravchuk, K.G., Lvova, N.V., Izmerenie iznosostoikosti sverkh-tonkikh nanostrukturovannykh pokrytiy [Measurement of the wear resistance of ultra-thin nanostructured coatings], *Nanoindustriya*, 2011, No 4, pp. 46–50.

UDC 539.382:620.172

## **GEOMETRIC AUXETICS: ANALYTICAL DERIVATION OF THE DESCRIBED AREA DEPENDENCE ON DEFORMATION IN AUXETIC STRUCTURES WITH CONSTANT BODY AREA**

M.A. VOKHMYANIN, Cand Sc. (Eng), S.M. SAVELYEV

*Vyatka State University, 36 Moskovskaya St, 610000 Kirov, Russian Federation.*

*E-mail: stud143318@vyatsu.ru*

Received October 22, 2025

Revised November 14, 2025

Accepted December 11, 2025

**Abstract**—This paper proposes an analytical method for calculating the dependence of the described area on the deformation parameter in planar auxetic structures that maintain constant body area under tension: hinged squares, triangles, hexagons, and parallelograms. Explicit formulas are derived for each configuration, linking geometric parameters of the structure to its auxetic response (transverse expansion under uniaxial tension) enabling material behavior prediction without numerical simulation. The results can be used to design metamaterials with programmable mechanical properties, where key requirements include constant body area under controlled expansion.

*Keywords:* auxetic, auxetics, analytical model, negative Poisson's ratio, geometric structures, planimetry, geometric calculation

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2026-126-2-44-56

## **REFERENCES**

1. Alderson, A., Alderson, K.L., Auxetic materials, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2007, V. 221, Is. 4, pp. 565–575. DOI: 10.1243/09544100JAERO185

2. Gibson, L.J., Ashby, M.F., Harley, B.A., *Cellular materials in nature and industry*, Cambridge University Press, 2010.
3. Grima, J.N., Evans, K.E., Auxetic behavior from rotating squares, *Journal of Materials Science Letters*, 2000, V. 19, pp. 1563–1565. DOI: 10.1023/A:1006781224002
4. Milton, G.W., *The theory of composites*, Cambridge University Press, 2002.
5. Torquato, S., Random heterogeneous materials: microstructure and macroscopic properties, *Springer Science & Business Media*, 2002.
6. Liu, X.N., Hu, G.K., Huang, G.L., Sun, C.T., An elastic metamaterial with simultaneously negative mass density and bulk modulus, *Appl. Phys. Lett.*, 2011, V. 98, Art. 251907. DOI: 10.1063/1.3597651
7. Zadpoor, A.A., Mechanical performance of additively manufactured meta-biomaterials, *Acta Biomaterialia*, 2019, V. 85, pp. 41–59. DOI: 10.1016/j.actbio.2018.12.038
8. Lurie, A.I., *Theory of elasticity*, Berlin: Springer, 2005.

UDC 678.745.2:539.217.1

## INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS ON THE ENERGY ABSORPTION PROPERTIES OF A NATURE-LIKE CELLULAR STRUCTURE WITH SCHWARZ PRIMITIVE GEOMETRY MADE OF GLASS-FILLED POLYAMIDE

S.V. DYACHENKO<sup>1,2</sup>, Cand Sc. (Phys-Math), S.V. BALABANOV<sup>1</sup>, M.M. SYCHEV<sup>1,2,3</sup>, Dr Sc. (Eng),

A.G. CHEKURYAEV<sup>1</sup>, V.A. BASOVA<sup>2</sup>, S.V. MYAKIN<sup>2</sup>, Cand Sc. (Chem)

<sup>1</sup> NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”,

49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: mail@crism.ru

<sup>2</sup> St Petersburg State Institute of Technology,

24–26/49, Moskovsky Ave, 190013 St Petersburg, Russian Federation

<sup>3</sup> Branch of the B. P. Konstantinov St Petersburg Institute of Nuclear Physics of the Kurchatov Institute

Research Center – I. V. Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry,

2 Makarova Emb, 199034 St Petersburg, Russian Federation

Received August 11, 2025

Revised January 23, 2026

Accepted March 5, 2026

**Abstract** – This paper examines energy-absorbing cellular structures with a triply periodic minimum-energy surface geometry, such as the Schwarz primitive, manufactured from glass-filled polyamide using selective laser sintering. The study analyzes differences in the deformation and mechanical properties of the structures during compression tests, depending on the geometric parameter  $t$ . Criteria for the selection of cellular structures designed to operate under conditions of elastic and plastic deformation are proposed.

**Keywords:** 3D printing, selective laser sintering, polyamide, cellular structures, primitive, energy absorption

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2026-126-2-57-75

### ACKNOWLEDGEMENTS

*The work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation project No 21-73-30019-P “New physical and chemical principles of the technology of metallic, metal-ceramic and ceramic materials with controlled macro-, micro- and nanostructure and unique service characteristics.”*

### REFERENCES

1. Lord, E.A., Mackay, A.L., Ranganathan, S., *New Geometries for New Materials*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006.
2. Feng, J., et al. Triply periodic minimal surface (TPMS) porous structures: from multi-scale design, precise additive manufacturing to multidisciplinary applications, *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2022, V. 4, No 2, Art. 022001. DOI: 10.1088/2631-7990/ac5be6
3. Yang, W., An, J., Chua, C.K., et al. Acoustic absorptions of multifunctional polymeric cellular structures based on triply periodic minimal surfaces fabricated by stereolithography, *Virtual and Physical Prototyping*, 2020, V. 15, Is. 2, pp. 1–8. DOI: 10.1080/17452759.2020.1740747
4. Sysoev, E.I., Sychev, M.M., Shafigullin, L.N., Diachenko, S.V., Proektirovanie zvukopogloshchayushchikh sotovykh materialov s geometriey trizhdy periodicheskikh poverkhnostei minimalnoi energii (TPPME) [Design of sound-absorbing cellular materials with the geometry of three-periodic minimum energy surfaces (MES)], *Akustichesky zhurnal*, 2024, V. 70, No 5, pp. 765–777. DOI: 10.31857/S0320791924050111
5. Surendra, S. R., Balkrishna, M., Pradeep K., et al., Flow Characterization in Triply-Periodic-Minimal-Surface (TPMS) based Porous Geometries: Part 2, *Heat Transfer*, 2023, pp. 1–31. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2427715/v1
6. Zhou, N., et al., Stereolithographically 3D Printed SiC Metastructure for Ultrabroadband and High Temperature Microwave Absorption, *Advanced Materials Technologies*, 2022, V. 8, Is. 4, Art. 2201222. DOI: 10.1002/admt.202201222
7. DeValK, T., Lakes, R., Poisson's ratio and modulus of gyroid lattices, *Physica status solidi (b)*, 2021, V. 258, No 12, pp. 1–7. DOI: 10.1002/pssb.202100081
8. Korneichuk, A.N., et al., Issledovanie prochnostnykh svoystv termostoikikh stekloplastikovyykh sotovykh zapolnitelei dlya konstruksii aerodinamicheskogo ekrana [Study of the strength properties of heat-resistant fiberglass honeycomb fillers for aerodynamic shield construction], *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2019, No 4 (57), pp. 35–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-35-40
9. Vasiliev, A.V., et al., Vybor optimalnogo programmogo obespecheniya dlya chislennogo modelirovaniya raboty energopogloshchayushchikh elementov perspektivnykh sistem amortizatsii spetsialnykh ob'ektov v kontekste importozameshcheniya sredstv inzhenernogo analiza [Selection of the optimal software for numerical modeling of the operation of energy-absorbing elements of advanced shock absorption systems for special objects in the context of import substitution of engineering analysis tools], *Vestnik Kontserna VKO Almaz-Antey*, 2022, No 3, pp. 5–21. URL: <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2022-3-516>.
10. Aleshin, V.F., et al., Posadochnye ustroystva kosmicheskikh apparatov (KA) na osnove penoplastov i sotoblokov [Landing devices for spacecraft (KS) based on foams and honeycomb blocks], *Mashinostroenie i kompyuternye tekhnologii*, 2010, No 04. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/posadochnye-ustroystva-kosmicheskikh-apparatov-ka-na-osnove-penoplastov-i-sotoblokov> (reference date 20.06.2024)
11. Rawat, P., Zhu, D., Rahman, Dr., Barthelat, F., Structural and mechanical properties of fish scales for the bio-inspired design of flexible body armors: A review. *Acta Biomaterialia*. 2021, V. 121, pp.41–67. DOI: 10.1016/j.actbio.2020.12.003
12. Kornievsky, A.S., Nasedkin, A.V., Sravnenie modeley pen, sostavlennykh iz regulyarnykh i neregulyarnykh massivov otkrytykh yacheek Gibsona – Eshbi [Comparison of models of foams composed of regular and irregular arrays of open Gibson – Ashby cells], *Vestnik PNIPU. Mekhanika*, 2021, No 3, pp. 70–83.

13. Wang, W., et al., Material extrusion 3D printing of large-scale SiC honeycomb metastructure for ultra-broadband and high temperature electromagnetic wave absorption, *Additive Manufacturing*, 2024, V. 85, p. 104158. URL: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104158>
14. Shevchenko, V.Y., Sychev, M.M., Lapshin, A.E. et al. Ceramic Materials with the Triply Periodic Minimal Surface for Constructions Functioning under Conditions of Extreme Loads. *Glass Phys Chem* 43, 605–607 (2017). URL: <https://doi.org/10.1134/S1087659617060153>.
15. Diachenko, S.V., Dolgin, A.S., Khristyuk, N.A., et al., 3D Printing of Ceramic Elements with Q-Surface Geometry for the Fabrication of Protective Barrier, *Ceramics*, 2023, V. 6, No 2, pp. 912–921. DOI: 10.3390/ceramics6020053
16. Arsentev, M.Yu., Sysoev, E.I., Vorobyov, S.A., Balabanov, S.V., Diachenko, S.V., Sychov, M.M., Skorb, E.V., Crystal-inspired cellular metamaterials with reduced Poisson's ratio as analogues of TPMS, *Composite Structures*, 2025, V. 363, p. 119097. DOI: 10.1016/j.compstruct.2025.119097
17. Balabanov, S.V., Kuropiatnik, A.M., Sychov, M.M., et al., Gradient energy-absorbing nature-inspired metamaterial based on the Schwarz Primitive geometry, *Materials Physics and Mechanics*, 2025, V. 53, No 2, pp. 157–167. DOI: 10.18149/MPM.5322025\_14
18. Borovkov, A.I., et al., Finite element analysis of elastic properties of metamaterials based on triply periodic minimal surfaces, *Materials Physics and Mechanics*, 2024, V. 52, No 2, pp. 11–29. URL: [http://dx.doi.org/10.18149/MPM.5222024\\_2](http://dx.doi.org/10.18149/MPM.5222024_2)
19. Nefedova, L.A., Ivkov, V.I., Diachenko, S.V., et al., Additive manufacturing of ceramic insulators, *Materials Today: Proceedings: 2019 International Scientific Conference on Materials Science: Composites, Alloys and Materials Chemistry, MS-CAMC 2019*, St Petersburg, 2020, V. 30, Part 3, Saint Petersburg: Elsevier Ltd., pp. 520–522. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.040
20. Arsentev, M.Yu., Balabanov, S.V., Makogon, A.I., Sychev, M.M., Eksperimentalnoe i teoreticheskoe issledovanie mekhanicheskikh svoystv poliamidnykh izdeliy s topologiyey "primitiv Shvartsa", izgotovlennykh metodom 3D-pechati [Experimental and theoretical study of the mechanical properties of polyamide products with a Schwarz primitive topology, manufactured using 3D printing], *Fizika i khimiya stekla*, 2019, V. 45, No 6, pp. 596–600. DOI: 10.1134/S0132665119060027
21. Balabanov, S.V., et al., Mechanical properties of 3d printed cellular structures with topology of triply periodic minimal surfaces, *Materials Today: Proceedings. 2019 International Scientific Conference on Materials Science: Composites, Alloys and Materials Chemistry, MS-CAMC 2019*, St Petersburg, 2020, pp. 439–442.
22. Yoo, D.J., Recent trends and challenges in computer-aided design of additive manufacturing-based biomimetic scaffolds and bioartificial organs, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 2014, V. 15, pp. 2205–2217. DOI: 10.1007/s12541-014-0583-7
23. Sychev, M.M., Lebedev, L.A., Dyachenko, S.V., et al., *Additivnye tekhnologii* [Additive technologies], St Petersburg: SPbGTI(TU), 2018.
24. Dolgin, A.S., Makogon, A.I., Bogdanov, S.P., Development of 3d printing technology with ceramic paste and study of properties of printed corundum products, *Materials Science Forum*, 2021, V. 1040 MSF, pp. 178–184. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.178
25. Pronin, I.A., Averin, I.A., Karmanov, A.A., et al., Control over the Surface Properties of Zinc Oxide Powders via Combining Mechanical, Electron Beam, and Thermal Processing, *Nanomaterials*, 2022, V. 12, No 11. DOI: 10.3390/nano12111924

26. Al-Ketan, O., Rowshan, R., Abu Al-Rub, R.K., Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials, *Addit. Manuf.*, 2018, V. 19, pp. 167–183. DOI: 10.1016/j.addma.2017.12.006
27. Lin, Z.-H.; Pan, J.-H.; Li, H.-Y. Mechanical Strength of Triply Periodic Minimal Surface Lattices Subjected to Three-Point Bending, *Polymers*, 2022, V. 14, p. 2885. URL: <https://doi.org/10.3390/polym14142885>
28. Arsentev, M.Yu., et al., High-throughput screening of 3D-printed architected materials inspired by crystal lattices: procedure, challenges, and mechanical properties, *ACS Omega*, 2023, V. 8, No 28, pp. 24865–24874. DOI: 10.1021/acsomega.3c00874
29. Zhu, L.Y., Li, L., Li, Z. A., Shi, J. P., Tang, W. L., Yang, J. Q., Jiang Q., Design and biomechanical characteristics of porous meniscal implant structures using triply periodic minimal surfaces, *J. Transl. Med.*, 2019, V. 17, Is. 1. DOI: 10.1186/s12967-019-1834-2
30. Remizova, O.A., Zlygostev, S.S., Chekuryaev, A.G., *Programmnyy kompleks dlya analiza struktury materiala (PK AnSMat)* [Software package for analyzing the structure of a material (PC “AnSMat”)], Gosudarstvennaya registraciya programmy dlya EVM № 2023663731, Russian Federation, No 2023662565, 16.06.2023, publ. 27.06.2023, bul. No 7.
31. Diachenko, S.V., Balabanov, S.V., Sychov, M.M., et al., The Impact of the Geometry of Cellular Structure Made of Glass-Filled Polyamide on the Energy-Absorbing Properties of Design Elements, *Strojniski Vestnik*, 2024, V. 70, No 11–12, pp. 607–619. DOI: 10.5545/sv-jme.2024.975
32. Markov, M.A., Chekuryaev, A.G., Sychev, M.M., Kravchenko, I.N., Dyuskina, D.A., Nikolaev, A.N., Bykova, A.D., Belyakov, A.N., Smolyanov, A.V., Investigation of the Microstructure of Reaction-Sintered Silicon Carbide Ceramics Using Approaches of Digital Materials Science, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2024, V. 53, No 6, pp. 624–631.
33. Markov, M.A., Nikolaev, A.N., Chekuryaev, A.G., Sychev, M.M., Dyuskina, D.A., Bykova, A.D., Belyakov, A.N., Research on the Method of Obtaining Ceramics of Reaction-Sintered Materials Based on SiC–MoSi<sub>2</sub> Using Analytical Approaches of Digital Materials Science, *Glass Physics and Chemistry*, 2024, V. 50, No 3, pp. 260–269.
34. Chekuryaev, A.G., Sychov, M.M. & Myakin, S.V. Analysis of the Structure of Composite Systems by Means of Fractal Characteristics Using the BaTiO<sub>3</sub>–Fullerenol–CEPVA System as an Example, *Phys. Solid State*, 2021, V. 63, pp. 789–795. URL: <https://doi.org/10.1134/S1063783421060032>
35. Chekuryaev, A.G., et al., Analysis of Microstructure and Fractal Characteristics of Polymer Based Dielectric Composites with Graphene-Modified Barium Titanate Filler by Box-Counting Method, *Glass Phys. Chem.*, 2022, V. 48, pp. 659–663. URL: <https://doi.org/10.1134/S1087659622600892>
36. Sychov, M.M., et al., Digital Materials Science: Numerical Characterization of Steel Microstructure, Khakhomov, S., Semchenko, I., Demidenko, O., Kovalenko, D. (Eds.), *Research and Education: Traditions and Innovations. Inter-academia 2021*, Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Singapore, 2022, V. 422, pp. 159–169.
37. Chekuryaev, A.G., et al., Digital Characteristics of Microstructure of Diamond-Silicon Carbide Composites, *Ceramics*, 2023, V. 6, pp. 1067–1077. URL: <https://doi.org/10.3390/ceramics6020063>
38. Gibson, L.J., Ashby, M.F. The Mechanics of Three-Dimensional Cellular Materials, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1982, V. 382, Is. 1782, pp. 43–59

UDC 669.14.018.8:621.762.5:621.78–978

# INFLUENCE OF AUSTENIZING TEMPERATURE ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF 08Kh18N10T STEEL SYNTHESIZED BY DIRECT LASER GROWTH

P.A. KUZNETSOV<sup>1</sup>, Dr Sc. (Eng), T.V. KOSYREVA<sup>1</sup>, Cand Sc. (Eng), I.V. SHAKIROV<sup>1</sup>,  
L.V. MUKHAMEDZYANOVA<sup>1</sup>, M.S. MIKHAILOV<sup>1</sup>, D.A. NAMEEV<sup>2</sup>, A.V. SIDOROV<sup>2</sup>, A.A. MATSAEV<sup>3</sup>

<sup>1</sup> NRC "Kurchatov Institute" – CRISM "Prometey", 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg,

Russian Federation. E-mail: mail@crism.ru

<sup>2</sup> JSC TVEL

<sup>3</sup> LLC Rosatom Additive Technologies

Received July 15, 2025

Revised January 15, 2026

Accepted January 30, 2026

**Abstract**—The article presents the results of a study of the mechanical properties and microstructure of 08Kh18N10T stainless austenitic steel synthesized by direct laser growth (DLG) before and after austenitization with elements of recrystallization annealing in the temperature range of 1050–1250°C. It was found that the original structure completely recrystallizes at 1150°C, which ensures maximum impact toughness; the formation, growth, and dissolution of dispersed particles affect the grain morphology and mechanical properties of the steel after austenitization. The obtained results can be used to improve heat treatment processes for DLG steels to increase their toughness and ductility.

**Keywords:** stainless steel 08Kh18N10T, direct laser growth (DLG), austenitization, microstructure, recrystallization, impact toughness, heat treatment, X-ray diffraction analysis, electron microscopy, mechanical properties

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2026-126-2-76-88

## REFERENCES

1. Zekovic, S., Dwivedi, R., Kovacevic, R., Numerical simulation and experimental investigation of gas-powder flow from radially symmetrical nozzles in laser-based direct metal deposition, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, V. 47, pp. 112–123.
2. Yin, H., Song, M., Deng, P., Li, L., Prorok, B., Lou, X., Thermal stability and microstructural evolution of additively manufactured 316 L stainless steel by laser powder bed fusion at 500–800°C, *Additive Manufacturing*, 2021, V. 41.
3. DebRoy, T., Wei, H.L., Zuback, J.S., Mukherjee, T., Elmer, J.W., Milewski, J.O., Zhang, W., Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties, *Progress in Materials Science*, 2018, V. 92, pp. 112–224.
4. Haghdadi, N., Laleh, M., Moyle, M., Primig, S., Additive manufacturing of steels: a review of achievements and challenges, *Journal of Materials Science*, Springer Science and Business Media LLC, 2020, V. 56, pp. 64–107.
5. Kučerová, L., Jandova, A., Zetková, I., Comparison of microstructure and mechanical properties of additively manufactured and conventional maraging steel, *Defect and Diffusion Forum*, 2020, V. 405, pp. 133–138.
6. Astafurov, S., Astafurova, E., Phase composition of austenitic stainless steels in additive manufacturing: a review, *Metals*, 2021, V. 11, p. 19.
7. Parshin, A.M., *Struktura, prochnost i radiatsionnaya povrezhdaemost korroзионно-stoikikh stalei i splavov* [Structure, strength, and radiation damage of corrosion-resistant steels and alloys], Chelyabinsk: Metallurgiya, 1988.

8. Ghayoor, M., Lee, K., He, Y., Chang, Ch.-H., Paul, B.K., Pasebani, S., Selective laser melting of 304L stainless steel: Role of volumetric energy density on the microstructure, texture and mechanical properties, *Additive Manufacturing*, 2019, December, No 32(2), Art. 101011.
9. Wang, Q., Chen, J., Sun, G., Liu, H., Yuan, X., Wang, Z., Pan, H., Zhang, Y., Jiang, P., Wu, W., Microstructure and mechanical performance of 304 stainless steel fabricated by powder-bed selective laser melting process: The effect of post-processing heat treatment, *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, V. 9, No 3, pp. 4770–4783.
10. Korolev, V.A., Sidorov, A.V., Mikhailov, I.Yu., Matsaev, A.A., Zemlyakov, E.V., Kuznetsov, P.A., Nameev, D.A., Development of Direct Laser Deposition Technology for Large-Scale Products of Nuclear Power Engineering, *Inorganic Materials: Applied Research*, 2023, V. 14, No 5–6, pp. 1451–1457.
11. Sidorov, A.V., Mikhailov, I.Yu., Matsaev, A.A., Zemlyakov, E.V., Kuznetsov, P.A., Dub, A.V., Nameev, D.A., Razrabotka tekhnologii pryamogo lazernogo vyrashchivaniya s izgotovleniem fragmenta vygorodki reaktornoj ustanovki iz poroshkovogo materiala nerzhaveyushchei stali 08Kh18N10T [Development of a direct laser growth technology for manufacturing a fragment of a reactor unit baffle from 08Kh18N10T stainless steel powder material], *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser.: Materialovedenie i novye materialy*, 2023, No 4 (120), pp. 44–56.
12. Melia, M.A., Nguyen, H.-D.A., Rodelas, J.M., Schindelholz, E.J., Corrosion properties of 304L stainless steel made by directed energy deposition additive manufacturing, *Corrosion Science*, 2019, V. 152, pp. 20–30.
13. Smith, H.R., Sugar, J.D., San Marchi, C., Schoenung, J.M., Strengthening mechanisms in directed energy deposited austenitic stainless steel, *Acta Materialia*, 2019, V. 164, pp. 728–740.
14. Fu, J.W., Yang, Y.S., Solidification behavior in three-phase region of AISI 304 stainless steel, *Materials Letters*, 2013, V. 93, pp. 18–20.
15. Kim, S.H., Moon, H.K., Kang, T., Lee, C.S., Dissolution kinetics of delta ferrite in AISI 304 stainless steel produced by strip casting process, *Materials Science and Engineering: A*, 2003, V. 356, pp. 390–398.
16. Cristobal, M., San-Martin, D., Capdevila, C., Jiménez, J.A., Milenkovic, S., Rapid fabrication and characterization of AISI 304 stainless steels modified with Cu additions by additive alloy melting (ADAM), *Journal of Materials Research and Technology*, 2018, V. 7 (4), pp. 450–460.
17. Jeong, J., Lee, Y., Park, J.M., Lee, D.J., Jeon, I., Sohn, H., Kim, H.S., Nam, T.-H., Sung, H., Seol, J.B., Kim, J.G., Metastable  $\delta$ -ferrite and twinning-induced plasticity on the strain hardening behavior of directed energy deposition-processed 304L austenitic stainless steel, *Additive Manufacturing*, 2021, V. 47, pp. 1–11.
18. Pinto, F.C., Aota, L.S., Souza Filho, I.R., et al., Recrystallization in non-conventional microstructures of 316L stainless steel produced via laser powder-bed fusion: effect of particle coarsening kinetics, *Journal of Materials Science*, 2022, V. 57, pp. 9576–9598.
19. Sames, W.J., List, F.A., Pannala, S., Dehoff, R.R., Babu, S.S., The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing, *International Materials Reviews*, 2016, V. 61, pp. 315–360.
20. Song, B., Dong, S., Liu, Q., Liao, H., Coddet, C., Vacuum heat treatment of iron parts produced by selective laser melting: microstructure, residual stress and tensile behavior, *Materials & Design*, 2014, V. 54, pp. 727–733.
21. Bertsch, K.M., Meric de Bellefon, G., Kuehl, B., Thoma, D.J., Origin of dislocation structures in an additively manufactured austenitic stainless steel 316L, *Acta Materialia*, 2020, V. 199, pp. 19–33.
22. Deng, P., Yin, H., Song, M., Li, D., Zheng, Y., Prorok, B.C., Lou, X., On the thermal stability of dislocation cellular structures in additively manufactured austenitic stainless steels: roles of heavy element segregation and stacking fault energy, *JOM*, 2020, V. 72, pp. 4232–4243.

23. Chen, N., Ma, G., Zhu, W., Godfrey, A., Shen, Z., Wu, G., Huang, X., Enhancement of an additive-manufactured austenitic stainless steel by post-manufacture heat-treatment, *Materials Science and Engineering: A*, 2019, V. 759, pp. 65–69.
24. Huang, W., Yuan, S., Chai, L., Jiang, L., Liu, H., Wang, F., Wang, D., Wang, J., Development of grain boundary character distribution in medium-strained 316L stainless steel during annealing, *Materials International*, 2019, V. 25, pp. 364–371.
25. Ariasetta, A., Kobayashi, S., Takeyama, M., Wang, Y., Imano, S., Characterization of recrystallization and second-phase particles in solution-treated additively manufactured alloy 718, *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2020, V. 51, pp. 973–981.
26. Lei J., Ge Y., Liu T., Wei Z. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 316L steel synthesized by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A*, 2019, V. 748, pp. 205–212.
27. Kodzhaspirov, G.E., *Osnovy legirovaniya stali* [Fundamentals of steel alloying], St Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy politekhnicheskyy universitet, 2015.
28. Goldstein, M.I., Grachyov, S.V., Veksler, Yu.G., *Spetsialnye stali* [Special steels], Moscow: MISIS, 1999.
29. Olenin, M.I., Romanov, O.N., Margolin, B.Z., Sorokin, A.A., Zernov, E.A., Bushuev, S.V., Berezhko, B.I., Shakhkhan, S.A., Apinov, Zh.E., Vliyanie gomogenizatsionnogo otzhiga na protsessy karbidoobrazovaniya v litom metalle i v pokovke iz stali marki 10Kh16N20M2T [Effect of homogenization annealing on carbide formation processes in cast metal and forged steel 10Kh16N20M2T], *Voprosy materialovedeniya*, 2025, No 3 (123), pp. 7–20.

UDC 666.651:621.315.612

## LOW-TEMPERATURE SINTERING CERAMICS FOR LTCC TECHNOLOGY: A REVIEW.

### Part 1. Glass-containing ceramics

A.A. AKHMADIEVA, V.D. MIROSHKINA, V.S. DANKO, N.L. SAVCHENKO, Dr Sc. (Eng),

M.V. GRIGORYEV, Cand Sc. (Eng), I.A. ZHUKOV, Dr Sc. (Eng)

*Tomsk State University, 36 Lenin Ave, 634050 Tomsk, Russian Federation*

*E-mail: nas99.9@yandex.ru*

Received January 14, 2026

Revised January 30, 2026

Accepted February 5, 2026

**Abstract**—Over the past 30 years, low-temperature co-fired ceramic (LTCC) technology has evolved in response to the need for compact, lightweight, and multifunctional electronic modules. It enables the production of three-dimensional ceramic structures with low dielectric loss and embedded metal electrodes. One of the key areas of LTCC development is the creation of dielectrics that sinter at temperatures below the melting point of Ag electrodes and retain the required electrical, mechanical, and thermal properties. The first part of the review examines glass-containing materials: glass-ceramic composites and glass-ceramics used in LTCC technology.

*Keywords:* low-temperature ceramics, LTCC, glass ceramics, glass-ceramic composites, dielectric properties

DOI 10.22349/1994-6716-2026-126-2-89-97

### ACKNOWLEDGMENTS

*The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No 075-15-2025-607 dated 01/07/2025).*

### REFERENCES

© 2026

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

<http://www.cism-prometey.ru>

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

1. Sebastian, M.T., Jantunen, H., Low loss dielectric materials for LTCC applications: a review, *International Materials Reviews*, 2008, V. 53, No 2, pp. 57–90.
2. Li, B., Xu, Y., Zhang, S., The size-effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the sinterability, microstructure and properties of glass-alumina composites, *Glass Phys. Chem.*, 2015, V. 41, No 5, pp. 503–508.
3. Ebrahimi, F., Nemati, A., Banijamali, S., Fabrication and microwave dielectric characterization of cordierite/BZBS (Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZnO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>) glass composites for LTCC applications, *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, V. 882, Art. 160722
4. Guo, J., et al., Design and preparation of BaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Quartz LTCC composites with tailored coefficient of thermal expansion, *Ceramics International*, 2022, V. 48, No 9, pp. 12065–12073.
5. Imanaka, Y., *Multilayered low temperature cofired ceramics (LTCC) technology*, Boston, MA: Springer US, 2005.
6. Jean, J.H., Gupta, T.K., Densification kinetics of binary borosilicate glass composite, *Journal of materials research*, 1994, V. 9, No 2, pp. 486–492.
7. Luo, X., et al., Eco-friendly tape casting of borosilicate glass/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sheets for LTCC applications, *Ceramics International*, 2022, V. 48, No 18, pp. 25975–25983.
8. Wang, F., et al., Improved flexural strength and dielectric loss in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based LTCC with La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glass, *Ceramics International*, 2021, V. 47, No 7, pp. 9955–9960.
9. Luo, X., et al., Fabrication and performance of dielectric tape based on CaO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glass/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for LTCC applications, *Ceramics International*, 2018, V. 44, No 6, pp. 6354–6361.
10. Swedlow, J.L., On Griffith's theory of fracture, *International Journal of Fracture Mechanics*, 1965, V. 1, No 3, pp. 210–216.
11. Nagaoka, T., et al., Effects of CaO addition on sintering and mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, *Journal of materials science letters*, 1996, V. 15, No 20, pp. 1815–1817.
12. Kawai, S., et al., Development of LTCC materials with high mechanical strength, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing, 2011, V. 18, No 9.
13. Chen, X., et al., Densification and characterization of SiO<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-MgO glass/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites for LTCC application, *Ceramics International*, 2013, V. 39, No 6, pp. 6355–6361.
14. Mao, H., et al. Effects of alkaline earth oxides on the densification and microwave properties of low-temperature fired BaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glass-ceramic/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites, *Journal of Materials Science*, 2019, V. 54, No 19, pp. 12371–12380.
15. Han, Y., et al., Effect of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content on high-temperature dielectric properties and crystallisation of CMAS glass-ceramics, *Materials Research Express*, 2019, V. 6, No 7.
16. Xiang, L., et al., Densification, flexural strength and dielectric properties of CaO-MgO-ZnO-SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glass ceramics for LTCC applications, *Ceramics International*, 2021, V. 47, No 20, pp. 28904–28912.
17. Wu, L., et al., Hot-pressing sintered BN-SiO<sub>2</sub> composite ceramics with excellent thermal conductivity and dielectric properties for high frequency substrate, *Ceramics International*, 2018, V. 44, No 14, pp. 16594–16598.
18. Zhou, J., Towards rational design of low-temperature co-fired ceramic (LTCC) materials, *Journal of Advanced Ceramics*, 2012, V. 1, No 2, pp. 89–99.
19. Yang, C., et al., Sintering behaviors, microstructures and dielectric properties of CaO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glass ceramic for LTCC application with various network modifiers content, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2021, V. 32, No 22, pp. 26655–26665.

20. Wang, S., Zhou, H., Densification and dielectric properties of CaO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> system glass ceramics, *Materials Science and Engineering: B*, 2003, V. 99, No 1–3, pp. 597–600.
21. Zhu, H., et al., Microstructure and microwave dielectric characteristics of CaO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glass ceramics, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2009, V. 20, No 11, pp. 1135–1139.
22. Xiong, Z., et al., Crystallization and microwave dielectric properties of CaO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glass-ceramic/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for LTCC applications, *Materials Today Communications*, 2024, V. 40, p. 109787.
23. Chu, W., Jiang, T., Ho, P.S., Effect of wiring density and pillar structure on chip packaging interaction for mixed-signal Cu low k chips, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2021, V. 21, No 3, pp. 290–296.
24. Arcaro, S., et al., Synthesis and characterization of LZS/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glass-ceramic composites for applications in the LTCC technology, *Ceramics International*, 2014, V. 40, No 4, pp. 5269–5274.
25. Xia, G., He, L., Yang, D., Preparation and characterization of CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glass/fused silica composites for LTCC application, *Journal of alloys and compounds*, 2012, V. 531, pp. 70–76.
26. Keshavarz, M., Ebadzadeh, T., Banijamali, S., Preparation of forsterite/MBS (MgO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>) glass-ceramic composites via conventional and microwave assisted sintering routes for LTCC application, *Ceramics International*, 2017, V. 43, No 12, pp. 9259–9266.
27. Wang, F., et al., Synthesis and characterization of low CTE value La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> glass/cordierite composites for LTCC application, *Ceramics International*, 2019, V. 45, No 6, pp. 7203–7209.
28. Kumari, P., et al., Low temperature sintering and characterization of MgO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glass-ceramics for LTCC substrate applications, *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 2016, V. 75, No 4, pp. 229–233.
29. Li, B., Li, W., Zheng, J., Effect of SiO<sub>2</sub> content on the sintering kinetics, microstructures and properties of BaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glass-ceramics for LTCC application, *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, V. 725, pp. 1091–1097.
30. Ju, K., et al., Ultra-Low Temperature Sintering and Dielectric Properties of SiO<sub>2</sub>-Filled Glass Composites, *Journal of the American Ceramic Society*, 2013, V. 96, No 11, pp. 3563–3568.
31. Chen, G., et al., Synthesis and characterization of CBS glass/ceramic composites for LTCC application, *Journal of alloys and compounds*, 2009, V. 478, No 1–2, pp. 858–862.
32. Ebrahimi, F., Nemati, A., Banijamali, S., Fabrication and microwave dielectric characterization of cordierite/BZBS (Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZnO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>) glass composites for LTCC applications, *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, V. 882.
33. Synkiewicz, B., Szwagierczak, D., Kulawik, J., Multilayer LTCC structures based on glass-cordierite layers with different porosity, *Microelectronics International*, 2017, V. 34, No 3, pp. 110–115.
34. Zhao, Y., et al., Analysis and optimization of dielectric properties of cordierite-based glass composites for advanced LTCC applications, *Ceramics International*, 2025.
35. Knickerbocker, S.H., Ananda, H.K., Heron, L.W., Cordierite glass ceramics for multilayer ceramic packaging, *Journal of the American Ceramic Society*, 1993, V. 72, pp. 90–95.
36. Wu, X.G., et al., Synthesis and microwave dielectric properties of Zn<sub>3</sub>B<sub>2</sub>O<sub>6</sub> ceramics for substrate application, *Journal of the American Ceramic Society*, 2012, V. 95, No 6, pp. 1793–1795.
37. Kržmanc, M.M., Došler, U., Suvorov, D., Effect of a TiO<sub>2</sub> nucleating agent on the nucleation and crystallization behavior of MgO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glass, *Journal of the American Ceramic Society*, 2012, V. 95, No 6, pp. 1920–1926.
38. Lin, Z., et al., Crystallization mechanism and properties of CaO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (CBSN) glass-ceramics, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2023, V. 614.

39. Chen, S., Zhu, D., Phase formation and properties of the BaO–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics prepared via an aqueous suspension route, *Journal of alloys and compounds*, 2012, V. 536, pp. 73–79.
40. Arora, A., et al., Structural, thermal and crystallization kinetics of ZnO–BaO–SiO<sub>2</sub>–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based glass sealants for solid oxide fuel cells, *Ceramics International*, 2011, V. 37, No 7, pp. 2101–2107.
41. Hou, L., et al., Effects of the replacing content of ZnBr<sub>2</sub> on the properties of ZnO–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>: Mn<sup>2+</sup> glass-ceramics, *Ceramics International*, 2014, V. 40, No 8, pp. 13097–13103.
42. Levitskii, I.A., Gailevich, S.A., Shimchik, I.S., The effect of bivalent cations on the physicochemical properties and structure of borosilicate glasses, *Glass and Ceramics*, 2004, V. 61, No 3, pp. 73–76.
43. Wu, J.M., Huang, H.L., Microwave properties of zinc, barium and lead borosilicate glasses, *Journal of non-crystalline solids*, 1999, V. 260, No 1–2, pp. 116–124.
44. Eldem, M.A., Orton, B.R., Whitaker, A., Phase equilibria in the system ZnO–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> at 950°C, *Journal of materials science*, 1987, V. 22, No 11, pp. 4139–4143.
45. Monteiro, R.C.C., et al., Thermal characteristics and crystallization behavior of zinc borosilicate glasses containing Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2018, V. 491, pp. 124–132.
46. Nguyen, N.H., et al., Effect of Zn/Si ratio on the microstructural and microwave dielectric properties of Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> ceramics, *Journal of the American Ceramic Society*, 2007, V. 90, No 10, pp. 3127–3130.

UDC 666.651:621.315.612

## LOW-TEMPERATURE SINTERING CERAMICS FOR LTCC TECHNOLOGY: A REVIEW.

### Part 2. Glass-free ceramics

A.A. AKHMADIEVA, V.D. MIROSHKINA, V.S. DANKO, N.L. SAVCHENKO, Dr Sc. (Eng),

M.V. GRIGORYEV, Cand Sc. (Eng), I.A. ZHUKOV, Dr Sc. (Eng)

*Tomsk State University, 36 Lenin Ave, 634050 Tomsk, Russian Federation*

*E-mail: nas99.9@yandex.ru*

Received January 14, 2026

Revised January 30, 2026

Accepted February 5, 2026

**Abstract**—In recent years, interest has increased in microwave dielectric ceramics used in antennas, filters, resonators, and other components of wireless communication systems. These materials provide signal transmission, resonance, and filtering functions in microwave circuits; therefore, their dielectric characteristics directly affect device performance. For low-temperature co-fired ceramic (LTCC) technology, the most important requirements are low sintering temperature  $T_s$ , compatibility with Ag electrodes, low relative permittivity  $\epsilon_r$ , low dielectric loss tangent  $\text{tg}\delta$ , high quality factor  $Q$  or  $Q \times f$ , and a near-zero temperature coefficient of resonant frequency  $\tau_f$ . The parameters are given in a unified format:  $\epsilon_r$ ,  $\text{tg}\delta$ , and  $Q$  are dimensionless;  $Q \times f$  is given in GHz;  $\tau_f$  in ppm/°C;  $T_s$  in °C. LTCC ceramic materials can be divided into three groups: glass-ceramic composites, glass-ceramics, and materials with inherently low sintering temperatures. This part of the review considers glass-free low-temperature sintering ceramics developed over the past 20 years for LTCC technology.

**Keywords:** low-temperature ceramics, LTCC, glass-free ceramics, dielectric properties, microwave range

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2026-126-2-98-107

### ACKNOWLEDGMENTS

The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No 075-15-2025-607 dated 01/07/2025).

## REFERENCES

1. Xie, C., et al. Rational design of inorganic dielectric materials with expected permittivity, *Scientific Reports*, 2015, V. 5, No 1, Art. 16769.
2. Mei, H., et al., Principal element design of garnets to access structure stability and excellent micro-wave dielectric properties, *Journal of the American Ceramic Society*, 2022, V. 105, No 7, pp. 4805–4814.
3. Mei, H., et al.,  $\text{Na}_2\text{CaTi}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ : An anti-reductive garnet ceramic with high quality factor and chemical compatibility with Cu/Ag electrodes for low temperature co-fired application, *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, V. 926.
4. Ren, J., et al., Novel  $\text{Al}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ -based temperature-stable microwave dielectric ceramics for LTCC applications, *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, V. 6, No 42, pp. 11465–11470.
5. Hao, Y.Z., et al., Microwave dielectric properties of  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  ceramics doped with LiF for LTCC applications, *Journal of alloys and compounds*, 2013, V. 552, pp. 173–179.
6. Hong, W.B. et al. Room-temperature-densified  $\text{H}_3\text{BO}_3$  microwave dielectric ceramics with ultra-low permittivity and ultra-high Qf value, *Journal of Materiomics*, 2020, V. 6, No 2, pp. 233–239.
7. Yang, H., et al., Synthesis of  $\text{CaAl}_2\text{B}_2\text{O}_{4+3x}$ : Novel microwave dielectric ceramics with low permittivity and low loss, *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, V. 41, No 4, pp. 2596–2601.
8. Shannon, R.D., Dielectric polarizabilities of ions in oxides and fluorides, *Journal of Applied physics*, 1993, V. 73, No 1, pp. 348–366.
9. Geyer, R.G., Baker-Jarvis, J., Krupka, J., Dielectric characterization of single-crystal  $\text{LiF}$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{BaF}_2$ , and  $\text{SrF}_2$  at microwave frequencies, *The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, 2004, pp. 493–497.
10. Song, X.Q., et al., Low-fired fluoride microwave dielectric ceramics with low dielectric loss, *Ceramics International*, 2019, V. 45, No 1, pp. 279–286.
11. Zhou, M.F., et al., Ultra-low permittivity  $\text{MgF}_2$  ceramics with high Qf values and their role as microstrip patch antenna substrates, *Ceramics International*, 2023, V. 49, No 1, pp. 369–374.
12. Chen, X., et al., Low temperature fired  $\text{CaF}_2$ -based microwave dielectric ceramics with enhanced microwave properties, *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, V. 42, No 12, pp. 4969–4973.
13. Wang, H., et al.,  $\text{MgF}_2$ -based microwave dielectric ceramics with ultra-low sintering temperature and high thermal expansion coefficient, *Journal of the European Ceramic Society*, 2024, V. 44, No 4, pp. 2150–2156.
14. Ding, Y., Bian, J., Structural evolution, sintering behavior and microwave dielectric properties of  $(1-x)\text{Li}_2\text{TiO}_3\text{-}x\text{LiF}$  ceramics, *Materials Research Bulletin*, 2013, V. 48, No 8, pp. 2776–2781.
15. Zhang, Z., et al.,  $\text{Li}_5\text{Ti}_2\text{O}_6\text{F}$ : a new low-loss oxyfluoride microwave dielectric ceramic for LTCC applications, *Journal of Materials Science*, 2020, V. 55, No 1, pp. 107–115.
16. Liu, K., et al., Sintering behavior, structural evolution, and dielectric properties of  $\text{Li}_{2+x}\text{MgTiO}_4\text{F}_x$  microwave dielectric ceramics, *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, V. 43, No 14, pp. 6098–6106.
17. Zhai, S., Liu, P., Wu, S., Novel ultra-low loss and low-fired  $\text{Li}_8\text{Mg}_x\text{Ti}_3\text{O}_{9+x}\text{F}_2$  microwave dielectric ceramics for resonator antenna applications, *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, V. 43, No 8, pp. 3331–3337.
18. Chu, X., et al., A new high-Q $\times$ f  $\text{Li}_4\text{NbO}_4\text{F}$  microwave dielectric ceramic for LTCC applications, *Ceramics International*, 2021, V. 47, No 3, pp. 4344–4351.

19. Zhai, S., Liu, P., Zhang, S., A novel high-Q oxyfluoride  $\text{Li}_4\text{Mg}_2\text{NbO}_6\text{F}$  microwave dielectric ceramic with low sintering temperature, *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, V. 41, No 8, pp. 4478–4483.
20. Zhai, S., et al., Novel series of high-Q oxyfluoride microwave dielectric ceramics for LTCC applications, *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, V. 899, p. 163145.
21. Wei, M., et al., Solid-solution assisted densification and microwave/millimeter-wave dielectric properties of  $\text{BaF}_2\text{-SrF}_2$  ceramics for high-reliability LTCC applications, *Ceramics International*, 2025, V. 51, No 1, pp. 1055–1062.
22. Li, R., et al., Ultra-low loss  $\text{Li}_{4+x}\text{Ti}_2\text{Mg}_7\text{O}_{13}\text{F}_x$  ( $0 \leq x \leq 1.75$ ) system microwave dielectric ceramics for LTCC applications, *Ceramics International*, 2025, V. 51, No 7, pp. 8824–8831.
23. Mei, H., et al., Compositional design, structure stability, and microwave dielectric properties in  $\text{Ca}_3\text{MgBGe}_3\text{O}_{12}$  (B= Zr, Sn) garnet ceramics with tetravalent cations on B-site, *Ceramics International*, 2022, V. 48, No 4, pp. 4658–4664.
24. Xiang, H., et al., Low-firing and microwave dielectric properties of  $\text{Na}_2\text{YMg}_2\text{V}_3\text{O}_{12}$  ceramic, *Ceramics International*, 2016, V. 42, No 2, pp. 3701–3705.
25. Li, C., et al., Ultralow-temperature synthesis and densification of  $\text{Ag}_2\text{CaV}_4\text{O}_{12}$  with improved microwave dielectric performances, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, V. 9, No 43, pp. 14461–14469.
26. Hu, Y., et al., Crystal structure, Raman spectra and microwave dielectric properties of a novel low-fired garnet-type ceramic  $\text{NaCa}_2\text{Zn}_2\text{V}_3\text{O}_{12}$ , *Ceramics International*, 2025, V. 51, No 18 (B), pp. 25944–25950.
27. Zhai, S., et al., Novel series of high-Q oxyfluoride microwave dielectric ceramics for LTCC applications, *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, V. 899, p. 163145.
28. Sun, Z., et al., Effects of  $0.5\text{B}_2\text{O}_3\text{-}0.5\text{CuO}$  on the microwave dielectric properties of low-temperature sintered ZZNT ceramics, *Ceramics International*, 2022, V. 48, No 5, pp. 7153–7158.
29. Du, J., et al., Low temperature sintered  $\text{Ca}_{1-x}(\text{Li}_{0.5}\text{Bi}_{0.5})_x\text{WO}_4$  ceramics with enhanced microwave dielectric properties for LTCC applications, *Ceramics International*, 2022, V. 48, No 23, pp. 34446–34453.
30. Huang, B., et al., Microwave dielectric properties of  $\text{Li}_2\text{WO}_4$ -added  $\text{SrWO}_4$  ceramics for LTCC applications, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2022, V. 33, No 27, pp. 21925–21934.
31. Liu, Y., et al., LiF-Modulated Sintering Behavior and Microwave Dielectric Performance of Scheelite-Type  $\text{NaLa}(\text{WO}_4)_2$  Ceramics for 5G-Oriented LTCC Applications, *Ceramics International*, 2025, V. 51, Is. 24, Part A, pp. 40841–40849.
32. Gupta, R., et al., Structural, microstructural, and microwave dielectric properties of  $(\text{Al}_{1-x}\text{B}_x)_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$  ceramics with low dielectric constant and low dielectric loss for LTCC applications, *Ceramics International*, 2023, V. 49, Is. 14, Part A, pp. 22690–22701.
33. Ramarao, S.D., Kiran, S.R., Murthy, V.R.K., Structural, lattice vibrational, optical and microwave dielectric studies on  $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MoO}_4$  ceramics with scheelite structure, *Materials Research Bulletin*, 2014, V. 56, pp. 71–79.
34. Mullens, B.G., et al., Long-range A-site cation disorder in  $\text{NaA}(\text{MO}_4)_2$  (M=Mo, W) double scheelite oxides, *Journal of Solid State Chemistry*, 2023, V. 321, Art. 123871.
35. Pang, L.X., et al., Microwave dielectric properties of  $(\text{Li}_{0.5}\text{Ln}_{0.5})\text{MoO}_4$  (Ln=Nd, Er, Gd, Y, Yb, Sm, and Ce) ceramics, *Journal of the American Ceramic Society*, 2015, V. 98, No 1, pp. 130–135.
36. Xi, H., et al., Microwave dielectric properties of low firing scheelite-related  $(\text{Na}_{0.5}\text{La}_{0.5})\text{MoO}_4$  ceramic, *Materials Letters*, 2015, V. 142, pp. 221–224.

37. Zhou, D., et al., Low temperature firing microwave dielectric ceramics ( $K_{0.5}Ln_{0.5}$ )MoO<sub>4</sub> (Ln= Nd and Sm) with low dielectric loss, *Journal of the European Ceramic Society*, 2011, V. 31, No 15, pp. 2749–2752.
38. Liu, W., Zuo, R., A novel low-temperature firable La<sub>2</sub>Zr<sub>3</sub>(MoO<sub>4</sub>)<sub>9</sub> microwave dielectric ceramic, *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, V. 38, No 1, pp. 339–342.
39. Gao, P., et al., Sintering behavior, phase structure and microwave dielectric properties of novel glass-free low-temperature cofiring NaCaLn(MoO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> (Ln = Nd, Sm) ceramics, *Ceramics International*, 2024, V. 50, No 4, pp. 6508–6516.
40. Yao, G.G., et al., Synthesis and microwave dielectric properties of Li<sub>2</sub>MgTiO<sub>4</sub> ceramics, *Ceramics International*, 2015, V. 41, pp. S563–S566.
41. Li, C., et al., Ultra-low loss microwave dielectric ceramic Li<sub>2</sub>Mg<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> and low-temperature firing via B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition, *Journal of Electronic Materials*, 2018, V. 47, No 11, pp. 6383–6389.
42. Fu, Z., et al., Novel series of ultra-low loss microwave dielectric ceramics: Li<sub>2</sub>Mg<sub>3</sub>BO<sub>6</sub> (B= Ti, Sn, Zr), *Journal of the European Ceramic Society*, 2016, V. 36, No 3, pp. 625–629.
43. Bi, J.X., et al., Crystal structure, infrared spectra and microwave dielectric properties of ultra low-loss Li<sub>2</sub>Mg<sub>4</sub>TiO<sub>7</sub> ceramics, *Materials Letters*, 2017, V. 196, pp. 128–131.
44. Bi, J., Niu, Y., Wu, H., Li<sub>4</sub>Mg<sub>3</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>9</sub>: a novel low-loss microwave dielectric ceramic for LTCC applications, *Ceramics International*, 2017, V. 43, No 10, pp.7522–7530.
45. Zhang, Y., et al., Phase Composition and Microwave Dielectric Properties of Li<sub>2</sub>(1+x)Mg<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> Ceramics with Inverse Spinel Structure, *Journal of Electronic Materials*, 2024, V. 53, No 10, pp. 6553–6562.
46. Ohashi, M., et al., Microwave dielectric properties of low-temperature sintered Li<sub>3</sub>AlB<sub>2</sub>O<sub>6</sub> ceramic, *Journal of the European Ceramic Society*, 2005, V. 25, No 12, pp. 2877–2881.
47. Zhang, R.Z., Reece, M.J., Review of high entropy ceramics: design, synthesis, structure and properties, *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, V. 7, No 39, pp. 22148–22162.
48. Xiang, H., et al. Microwave dielectric high-entropy ceramic Li(Gd<sub>0.2</sub>Ho<sub>0.2</sub>Er<sub>0.2</sub>Yb<sub>0.2</sub>Lu<sub>0.2</sub>)GeO<sub>4</sub> with stable temperature coefficient for low-temperature cofired ceramic technologies, *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, V. 93, pp. 28–32.
49. Shao, P., et al., Synthesis, microstructure, and dielectric properties of novel dual-phase high-entropy (Ba<sub>0.2</sub>Ca<sub>0.2</sub>Sr<sub>0.2</sub>Na<sub>0.2</sub>Bi<sub>0.2</sub>)WO<sub>4</sub> ceramics for LTCC applications, *Journal of the European Ceramic Society*, 2024, V. 44, Iss. 8, pp. 5203–5210.
50. Liu, H., et al., High-entropy processed high quality and low-temperature cofired LiMgPO<sub>4</sub>-based dielectric ceramics for low-loss packaged millimeter-wave filters, *Journal of the European Ceramic Society*, 2025, V. 45, No 2.

UDC 621.793.7:[669.71+669.14.018.8]

## STUDIES OF ALUMINUM-STAINLESS STEEL BONDING BY COLD GAS-DYNAMIC SPRAYING

A.A. IVANOV, M.E. SHESTAKOV, I.I. AKIMOV, Cand Sc. (Eng),

I.N. TRUNKIN, Cand Sc. (Phys-Math)

National Research Center “Kurchatov Institute”,

1 Akademika Kurchatova Sq 123182 Moscow, Russian Federation. E-mail: Ivanov\_AAL@nrcki.ru

Received October 28, 2025

Revised January 21, 2026

Accepted February 12, 2026

**Abstract**—In this work, the characteristics of a permanent joint of A5M grade aluminum plates and 08Kh18N10T stainless steel, made by cold gas-dynamic spraying (CGDS), were investigated. To form the cold weld, a powder of the following composition was used: 45 wt.% aluminum (high purity), 45 wt.% titanium (high purity), and 10 wt.% corundum  $Al_2O_3$ , with a particle size median of 30–50  $\mu m$ . Analysis of the microstructure of the resulting weld showed a low porosity level of 1–2%, the absence of microcracks after cyclic thermal loads, and a uniform distribution of the sprayed material's components. Mechanical tests of lap-joint samples demonstrated sufficient shear strength. An experimental study of a steel tube-aluminum fin structure showed that the thermal conductivity of the joint obtained by CGDS is approximately 25% higher than that of a joint made by clamping with KPT-8 thermal paste.

**Keywords:** cold gas-dynamic spraying (CGDS), permanent connection, thermal contact, porosity, thermal conductivity

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2026-126-2-108-115

## REFERENCES

1. Knyazev, S.N., Tepin, N.V., Smagin, N.M., *Tekhnologii izgotovleniya bimallicheskikh trub [Bimetallic pipe manufacturing technologies]*, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2022, No 4, pp. 116–123. URL: <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2022-24-4-116-123>
2. Afanasieva, I.V., *Sushchestvuyushchie tekhnologii orebreniya trub [Existing pipe finning technologies]*, *Inzhenerny vestnik Dona*, 2019, No 1. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5677>
3. Kuntyshev, V.B., Sukhotsky, A.B., Sankovikh, E.S., Mulin, V.P., *Trubchatye rebristyye poverkh-nosti s intensivirovannym teploobmenom i tekhnologiya ikh izgotovleniya dlya apparatov vozdušnogo okhlazhdeniya toplivno-energeticheskogo kompleksa [Tubular ridge surfaces with intensified heat exchange and technology of their manufacturing for air coolers of fuel and energy complex]*, *Energetika. Izvestiya vys-shykh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obiedineniy SNG*, 2013, No 3, pp. 34–44. URL: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2013-0-3-80-84>
4. Kocurek, R., Adamiec, J., *Manufacturing technologies of finned tubes*, *Advances in Materials Sciences*, 2013, V. 13 (3), pp. 26–35. DOI: 10.2478/adms-2013-0009
5. Akimov, I.I., Titov, A.O., Mitin, V.S., Shkolin, S.A., Kryukov, D.A., Taratorkin, P.N., *Funktsionalnye i zashchitnye pokrytiya dlya izdeliy atomnoy tekhniki [Functional and protective coatings for nuclear products]*, *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser.: Materialovedenie i novye materialy*, 2016, No 2(85), pp. 4–15.
6. Akimov, I.I., Lobyntsev, V.V., Shcherbakov, V.I., Titov, A.O., *Ispolzovanie KHGN-pokrytiy v poluprovodnikovoy preobrazovatelnoy tekhnike [The use of CGDS coatings in semiconductor converter technology]*, *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser.: Materialovedenie i novye materialy*, 2015, No 2 (81), pp. 32–40.
7. Kozlov, I.A., Fomina, M.A., Demin S.A., Vasiliev A.S., *Tendentsii razvitiya poroshko-vykh materialov dlya naneseniya zashchitnykh i funktsionalnykh pokrytiy metodom KHGN [Trends in the development of powder materials for applying protective and functional coatings by the CGDS method]*, *Trudy VIAM*, 2023, No 8 (126), pp. 100–112. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-100-112
8. Kozlov, I.A., Leshchev, K.A., Nikiforov, A.A., Demin, S.A., *Kholodnoe gazodinamicheskoe napylenie pokrytiy [Cold gas dynamic coating]: review*, *Trudy VIAM*, 2020, No 8 (90), pp. 77–93. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-77-93
9. Basov, A.A., Klochkova, M.A., Makhin, I.D., *O vozmozhnosti ispolzovaniya tekhnologii kholodnogo gazodinamicheskogo napyleniya teploprovodnogo poroshkovogo materiala dlya obespecheniya teplovogo kontakta mezhdu elementami konstruksii [On the possibility of using the technology of cold gas dynamic spraying of thermally*

conductive powder material to ensure thermal contact between structural elements], *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2014, No 3 (6), pp. 64–70.

10.Appel, F., Brossmann, U., Christoph, U., et al. Recent progress in the development of gamma titanium aluminide alloys, *Advanced Engineering Materials*, 2000, No 2 (11), pp. 699–720.

11.Kashirin, A.I., Shkodkin, A.V., Metod gazodinamicheskogo napyleniya metallicheskih pokry-tiy: razvitie i sovremennoe sostoyanie [The method of gas dynamic spraying of metal coatings: development and current state], *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2007, No 12, pp. 22–33.

UDC 621.793

## COMBINED COATINGS PRODUCED BY ELECTROSPARK DEPOSITION

S.N. KHIMUKHIN, Dr Sc. (Eng), K.P. EREMINA, Cand Sc. (Eng), V.K. KHE

*Institute of Materials Science, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 153 Tikhookeanskaya St, Khabarovsk, 680042 Russian Federation.*

*E-mail: im.febras.net@mail.ru; bkseyena\_p@bk.ru*

Received January 26, 2026

Revised February 27, 2026

Accepted March 17, 2026

**Abstract**—Multilayer and two-layer coatings with increased crack resistance ( $K_{Ic}$ ) and reduced damageability ( $Hv/K_{Ic}$ ) were obtained by the electric spark deposition (ESD) on 20Kh13 steel (cathode). NiAl-based alloys doped with complex additives and steel 20 were used as anodes to obtain multilayer and two-layer coatings. The multilayer coatings (4–7 layers) were formed by using alternating anodes made of compositionally complex alloys (CCAs) and steel 20. This made it possible to increase the concentration of Fe in layers of coating up to 80–14 at.% versus 8–5 at.% in the single-layer coatings. In the multilayer coatings  $K_{Ic}$  increases by 16%, and  $Hv/K_{Ic}$  decreases by 30%. Two-layer coatings increase  $K_{Ic}$  by ~33%, and decrease  $Hv/K_{Ic}$  by 50%. The work demonstrates the possibility of obtaining two-layer and multilayer coatings from VK 20 and CCAs solid alloys.

**Keywords:** multilayer and two-layer coatings, electrospark deposition (ESD), coating structure and properties

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2026-126-2-116-124

## ACKNOWLEDGEMENTS

*The work was carried out as part of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No 075-00399-25-03.*

## REFERENCES

1. Konovalov, S., Chen, X., Sarychev, V., et al., Mathematical modeling of the concentrated energy flow effect on metallic materials, *Metals*, 2017, V. 7, Is. 1, p. 4. DOI: 10.3390/met7010004
2. Barile, C., Casavola, C., Pappalettera, G., et al., Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review, *Coatings*, 2022, V. 12, Is. 10, p. 1536. DOI: 10.3390/coatings12101536
3. Khimukhin, S.N., Eremina, K.P., Structure of coatings produced on steel by Ni-Al based alloys after thermal cycling, *Metallurgist*, 2024, V. 68, No 3, pp. 418–426. DOI: 10.1007/s11015-024-01743-0
4. Awotunde, M.A., Ayodele, O.O., Adegbenjo, A.O., et al., NiAl intermetallic composites – a review of processing methods, reinforcements and mechanical properties, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, V. 104, pp. 1733–1747. DOI: 10.1007/s00170-019-03984-9

5. Sampath, S., Ravi, V.P., Sundararajan, S., An Overview on Synthesis, Processing and Applications of Nickel Aluminides: From Fundamentals to Current Prospects, *Crystals*, 2023, V. 13, Is. 3, p. 435. DOI: 10.3390/cryst13030435
6. Khimukhin, S.N, Eremina, K.P., Khe, V.K., Struktura kombinirovannykh intermetallidnykh elektroiskrovykh pokryty na stali 45 [Structure of combined intermetallic electrospark coatings on steel 45], *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2024, No 11, pp. 20–27.
7. Ogneva, T.S.; Ruktuev, A.A., Lazurenko, D.V., et al., Structure and oxidation behavior of NiAl-based coatings produced by non-vacuum electron beam cladding on low-carbon steel, *Metals*, 2022, V. 12, Is. 10, p. 1679. DOI: 10.3390/met12101679
8. Nikolenko, S.V., Verkhoturov, A.D., *Novye elektrodnye materialy dlya elektroiskrovogo legirovaniya* [New electrode materials for electric spark alloying], Vladivostok: Dalnauka, 2005.
9. Gostishchev, V., Khimukhin, S., Ri, E., et al., Synthesis of complex alloyed aluminides from oxides compounds by aluminothermic method, *Metals*, 2018, V. 8, No 6.
10. Khimukhin, S.N., Teslina, M.A., Ri, H., Ri, E.H., Formirovanie, mikrostruktura i svoistva belogo sloya stali pri nizkovoltnom elektroiskrovom legirovanii [Formation, microstructure, and properties of the white layer of steels during low-voltage electric spark alloying], *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2011, No 4 (76), pp. 7–11.
11. Lapitskaya, V.A., Kuznetsova, T.A., Chizhik, S.A., et al., Issledovanie treshchino-stoikosti pokryty mikrodogovogo oksidirovaniya posle lazernogo legirovaniya oksidom tsirkoniya [Study of the fracture resistance of microarc oxidation coatings after laser doping with zirconium oxide], *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2019, V. 89, Is. 11, pp. 1699–1704. DOI: 10.21883/JTF.2019.11.48331.117-19
12. Yuan, J., Wang, Q., Liu, X., et al., Microstructures and high-temperature wear behavior of NiAl/WC-Fex coatings on carbon steel by plasma cladding, *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, V. 842, Art. 155850, pp. 1–7. DOI:10.1016/j.jallcom.2020.155850
13. Dvornik, M.I., Mikhailenko E.A., Sozdanie ultramelkozernistogo tverdogo splava VK-15 iz poroshka, poluchennogo elektroerozionnym dispergirovaniem otkhodov splava VK15 v vode [Creation of ultra-fine-grained VK15 hard alloy from powder obtained by electrical discharge dispersion of VK15 alloy waste in water], *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya*, 2020, No 3, pp. 4–16\

## POLYMER STRUCTURAL MATERIALS

UDC 678.073:621.785:621.891

### EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURAL, MECHANICAL, AND TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF PEEK PRODUCED BY FUSION DEPOSITION MANUFACTURING (FDM)

G.V. IVANOVA, Cand Sc. (Eng), G.V. TSVETKOVA, A.I. KOLOTIY, A.M. LEVITSKY, Cand Sc. (Eng),  
V.D. ANDREEVA

*Peter the Great St Petersburg Polytechnic University, 29 Polytekhnicheskaya St, 195251 St Petersburg,  
Russian Federation. E-mail: galura@yandex.ru*

Received November 27, 2025

Revised December 17, 2025

Accepted January 15, 2026

**Abstract**—This paper examines the effect of heat treatment on the structural and phase state, mechanical, and tribological properties of polyetheretherketone (PEEK) produced by fused deposition modeling (FDM). A comprehensive study, including X-ray phase analysis on a BRUKER D8 ADVANCE diffractometer, static tensile tests, and tribological

testing on an Rtec MFT-5000 friction machine, demonstrated that heat treatment improves the mechanical and tribological properties. As a result, the tensile strength increased by 58%, and Young's modulus by 32%. A key result is a significant increase in tribological service life: the critical factor  $p_v$ , which characterizes wear resistance, increased from 0.9 MPa m/s for the original material to 1.3 MPa m/s for the heat-treated material. The results of this study demonstrate the necessity of heat treatment to ensure high stability and durability of PEEK 3D-printed parts operating under sliding friction conditions.

**Keywords:** PEEK, heat treatment, fused deposition modeling (FDM), structure, mechanical properties, wear, friction

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-126-2-125-136

## REFERENCES

1. Mashkov, Yu.K., Baybaratskaya, M.Yu., Grigorevsky, B.V., *Konstruksionnye plastmassy i polimernye kompozitsionnye materialy* [Structural Plastics and Polymer Composite Materials]: Textbook, Omsk: OmGTU, 2002.
2. Myshkin, N.K., Petrokovets, M.I., *Trenie, smazka, iznos* [Friction, lubrication, wear], Moscow: Fizmatlit, 2007.
3. Myshkin, N.K., Pesetsky, S.S., Grigoriev, A.Ya., *Trenie i iznos polimernykh kompozitov* [Friction and wear of polymer composites], *Inzhener-mekhanik*, 2012, No 2, pp. 24–31.
4. Stukach, A.V., *Issledovanie svoystv metallopolimernykh i fullerensoderzhashchikh kompozitov pri trenii* [Study of the properties of metal-polymer and fullerene-containing composites under friction], *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa*, 2010, No 3 (13), pp. 10–19.
5. Wang, L., Yang, Ch., Sun, Ch., Yan, X., He, J., Shi, Ch., Liu, Ch., Li, D., Jiang, T., Huang, L. Fused Deposition Modeling PEEK Implants for Personalized Surgical Application: From Clinical Need to Biofabrication // *Int J Bioprint.*, 2022, V. 8, Is. 4, pp. 225–243. DOI: 10.18063/ijb.v8i4.615.
6. Vishal, K., Rajkumar, K., Dry sliding wear behavior of Poly Ether Ether Ketone (PEEK) reinforced with graphite and synthetic diamond particles, *Diamond and Related Materials*, 2022, V. 130, Art. 109404. URL: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109404>
7. Zhang, H., Liang, M., Yao, J., et al., Effect of Annealing on Structure and Mechanical Properties of 3D-Printed Polymer Composites, *Polymer Composites*, 2025, V. 47, Is. 3, pp. 1953–1969. URL: <https://doi.org/10.1002/pc.70286>
8. Golbang, A., Crawford, R.J., Al Ali, S., Additive Manufacturing and Injection Moulding of High-Performance Polymers: A Comparative Study Including PEEK, *Frontiers in Materials*, 2021, V. 8, Art. 745088. DOI: 10.3389/fmats.2021.745088
9. Zhen, H., Zhao, B, Quan, L., Fu, J., Effect of 3D-Printing Process Parameters and Heat Treatment Conditions on the Mechanical Properties and Microstructure of PEEK Parts, *Polymers*, 2023, V. 15, Is. 9. URL: <https://doi.org/10.3390/polym15092209>
10. He, Y., Shen, M., Wang, Q., et al., Effects of FDM parameters and annealing on the mechanical and tribological properties of PEEK, *Composite Structures*, 2023, V. 313, Art. 116901. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.116901
11. Adamson, M., Eslami, B., Post-Processing PEEK 3D-Printed Parts: Experimental Investigation of Annealing on Microscale and Macroscale Properties, *Polymers*, 2025, V. 17, Is. 6, Art. 744. URL: <https://doi.org/10.3390/polym17060744>
12. Sedakova, E.B., Kozyrev, Yu.P., Li Syanshun, Zharov, V.E., Analiz prichin snizheniya iznosostoikosti polimernykh materialov v parakh treniya s legirovannoi staliyu [Analysis of the reasons for the decrease in the wear resistance of polymer materials in friction pairs with alloyed steel], *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeny. Priborostroenie*, 2020, V. 63, No 4, pp. 302–309.

## POLYMERIC MATERIALS BASED ON ULTRA-HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE AND BEESWAX

A.V. OKONESHNIKOVA, S.N. DANILOVA, Cand Sc. (Eng),

N.N. LAZAREVA, Cand Sc. (Eng), A.A. OKHLOPKOVA, Dr Sc. (Eng)

*Ammosov North-Eastern Federal University, 58 Belinskogo St, 677000 Yakutsk,  
Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation. E-mail: anasema2003@mail.ru*

Received November 24, 2025

Revised December 16, 2025

Accepted January 15, 2026

**Abstract**—This paper examines the effect of beeswax (BW) as a plasticizing additive on the properties and structure of polymer composite materials (PCMs) based on ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE). A comprehensive characterization of composites based on two UHMWPE grades (GUR 4150 and 4022) with different molecular weights was carried out. The influence of low beeswax concentrations (0.5–2 wt.%) on the mechanical, tribological, thermal and structural properties was studied. The beeswax demonstrates its effectiveness as a structural modifier, ensuring ordering of the supramolecular organization and increasing the degree of crystallinity of the polymer matrix. This effect can be explained by the formation of a denser granular UHMWPE structure, which strengthens the composite. The highest efficiency was observed with a beeswax content of 2 wt.%, resulting in a 59% increase in tensile strength and a 33% increase in elongation at break compared to the original polymer. Tribological studies showed a 44% reduction in the coefficient of friction and a seven fold decrease in the specific wear rate. Differential scanning calorimetry data confirmed the structural ordering of the composite upon beeswax introduction, which correlates with the improved mechanical and tribological properties.

*Keywords:* ultra-high molecular weight polyethylene, composite, plasticizer, beeswax

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-126-2-137-146

### ACKNOWLEDGMENTS

*The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Research Project FSRG-2026-0007.*

### REFERENCES

1. Kurdi, A., Chang, L., Recent advances in high performance polymers – tribological aspects, *Lubricants*, 2018, V. 7, No 1, p. 2. DOI: 10.3390/lubricants7010002
2. Sklifos, V.O., Ryzhko, A.A., Shcheglov, D.P., Nanochastitsy dlya polimernykh kompozitsionnykh materialov v stroitelstve [Nanoparticles for polymer composite materials in construction], *Perspektivy Nauki*, 2021, No 5, pp. 123–125.
3. Sherstyukov, B.G., Klimaticheskie usloviya Arktiki i novye podkhody k prognozu izmeneniya klimata [Climatic conditions of the Arctic and new approaches to climate change forecasting], *Arktika i Sever*, 2016, No 24, pp. 39–67. DOI: 10.17238/issn2221-2698.2016.24.39
4. Selyutin, G.E., Gavrilov, Y.U., Voskresenskaya, E.N., Zakharov, V.A., Nikitin, V.E., Poluboyarov, V.A., Composite materials based on ultra-high molecular polyethylene: properties, application prospects. *Chemistry for Sustainable Development*, 2010, V. 18, No 3, pp. 301–314.

5. Abdul Samad, M., Recent advances in UHMWPE/UHMWPE Nanocomposite/UHMWPE hybrid nanocomposite polymer coatings for tribological applications: a comprehensive review, *Polymers*, 2021, V. 13, No 4, p. 608. DOI: 10.3390/polym13040608
6. Chen, X., Wang, X., Feng, Y., Qu, J., Yu, D., Cao, C., Chen, X., Enhancing chain mobility of ultrahigh molecular weight polyethylene by regulating residence time under a consecutive elongational flow for improved processability, *Polymers*, 2021, V. 13, No 13, p. 2192. DOI: 10.3390/polym13132192
7. Liu, S., et al., Ultra-high molecular weight polyethylene with reduced fusion defects and improved mechanical properties by liquid paraffin, *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 2015, V. 20, No 2, pp. 138–149.
8. Wu, J.J., Buckley, C.P., O'Connor, J.J., Mechanical integrity of compression-moulded ultra-high molecular weight polyethylene: effects of varying process conditions, *Biomaterials*, 2002, V. 23, No 17, pp. 3773–3783.
9. Hu, S., et al., Structure and properties of UHMWPE products strengthened and toughened by pulse vibration molding at low temperature, *Polymer*, 2021, V. 229.
10. Dayyoub, T., Olifirov, L.K., Chukov, D.I., Kaloshkin, S.D., Kolesnikov, E., Nematulloev, S., The structural and mechanical properties of the UHMWPE films mixed with the PE-Wax, *Materials*, 2020, V. 13, Is. 15, p. 3422. DOI: 10.3390/ma13153422
11. Wood, W.J., Maguire, R.G., Zhong, W.H., Improved wear and mechanical properties of UHMWPE–carbon nanofiber composites through an optimized paraffin-assisted melt-mixing process, *Composites Part B: Engineering*, 2011, V. 42, No 3, pp. 584–591.
12. Hepburn, H.R., Pirk, C.W.W., Duangphakdee, O., The chemistry of beeswax, *honeybee nests: composition, structure, function*, Heidelberg: Springer, 2014, pp. 319–339.
13. Gul, R.M., et al., Effect of consolidation on adhesive and abrasive wear of ultra high molecular weight polyethylene, *Biomaterials*, 2003, V. 24, No 19, pp. 3193–3199.
14. Galeski, A., et al. Morphology and plastic yielding of ultrahigh molecular weight polyethylene, *Macromolecules*, 2020, V. 53, No 14, pp. 6063–6077.
15. Ito, A., et al., Additive Effects of Solid Paraffins on Mechanical Properties of High-Density Poly-ethylene, *Polymers*, 2023, V. 15, No 5. URL: <https://doi.org/10.3390/polym15051320>
16. Cai, T., et al., Study on the tribological properties of UHMWPE modified by UV-induced grafting under seawater lubrication, *Tribology International*, 2022, V. 168, No 3.
17. Tarasevich, B.N., *ИК спектры основных классов органических соединений: справочные материалы* [IR spectra of the main classes of organic compounds: reference materials], Moscow: MGU im. M.V. Lomonosova, 2012.
18. Mao, X., et al., The relationship between the crystallization of UHMWPE/HDPE injection-molded products and their frictional and mechanical properties, *Polymer*, 2025, V. 320.

UDC 678.743.41:621.891

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECT OF MICRO- AND NANOFIBROUS CARBON FILLERS ON THE TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF PTFE COMPOSITES DEPENDING ON FRICTION PATTERNS AND LOADING CONDITIONS**

P.N. PETROVA, Cand Sc. (Eng), T.A. ISAKOVA, M.A. MARKOVA, Cand Sc. (Eng), A.L. FEDOROV, Cand Sc. (Eng)  
*Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 677007, Yakutsk, St. Petrovsky, 2. E-mail: ppavlina@yandex.ru*

Received November 24, 2025

Revised February 10, 2026

Accepted February 12, 2026

**Abstract**—This article presents the results of comparative tribological tests of PTFE composites modified with carbon micro- and nanofibrous fillers under unidirectional sliding friction on different friction machines with varying friction patterns under varying loads. The test specimens were 5 mm diameter polymer cylinders. Tribological tests were conducted using pin-on-disk and pin-on-cylinder friction patterns, which differ in the geometry of the friction surfaces of the tribosystem elements. It was found that for the polymer composite materials under consideration, initial wear was 5–6 times greater with the pin-on-cylinder friction pattern than with the pin-on-disk friction pattern. Moreover, under dry sliding friction conditions, it was demonstrated that a composite modified with nanofibers offers more effective wear protection for the polymer component of a friction unit under varying loading conditions compared to a composite with microfibers.

*Keywords:* polytetrafluorethylene, carbon fiber, friction, wear, friction coefficient, contact geometry of a friction pair

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2026-126-2-147-159

#### ACKNOWLEDGEMENTS

*This work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (reg. No 126022417885-6) using the scientific equipment of the Shared core facilities of the Federal Research Center YSC SB RAS.*

#### REFERENCES

1. *Ftoroplastovye kompozitsii s bronzoi* [Fluoroplastic composites with bronze]. URL: <https://ftoroplast.com.ru/bronze-filled-ptfe-compounds/> (reference date 1/11/2025)
2. Wei, X.-F., Linde, E., Hedenqvist, M.S., Plasticizer loss from plastics or rubber products through diffusion and evaporation, *Materials Degradation*, 2019, V. 18, No 3, pp. 1–8.
3. Mashkov, Yu.K., Kropotin, O.V., Shilko, S.V., Egorova, V.A., Chemisenko, O.V., Formirovanie struktury i svoistv antifriktsionnykh kompozitov modifikatsiei politetraftoretilena polidispersnymi napolnitelyami [Formation of the structure and properties of antifriction composites by modifying polytetrafluoroethylene with polydisperse fillers], *Materialovedenie*, 2015, No 1, pp. 22–25.
4. Mashkov, Yu.K., Kurguzova, O.A., Ruban, A.S., Razrabotka i issledovanie iznosostoikikh polimernykh nanokompozitov [Development and research of wear-resistant polymer nanocomposites], *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta*, 2018, V. 15, No 1 (59), pp. 36–45.
5. MaLy, O.V., Problema povysheniya nadezhnosti avtobronetankovoi tekhniki v rabotakh nauchnoi shkoly tribologii i materialovedeniya [The problem of increasing the reliability of armored vehicles in the works of the scientific school of tribology and materials science], *Natsionalnye priority Rossii*, 2015, No 3 (17), pp. 29–32.
6. Kornopol'tsev, V.N., Mogonov, D.M., Ayurova, O.Zh., Dashitsyrenova, M.S., Subanakov, A.K., Issledovanie tribotekhnicheskikh svoistv listovykh metalloftoroplastovykh materialov [Study of tribological properties of sheet metal-fluoroplastic materials], *Pisma o materialakh*, 2018, V. 8, No 3(31), pp. 235–239. DOI: 10.22226/2410-3535-2018-3-235-239
7. Vasiliev, A.P., Okhlopkoval, A.A., Struchkova, T.S., Alekseev, A.G., Vliyanie modifitsirovannogo seritsita na svoistva i strukturu politetraftoretilena [The influence of modified sericite on the properties and structure of polytetrafluoroethylene], *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki*, 2020, V. 25 (2), pp. 147–156. DOI: 10.31242/2618-9712-2020-25-2-12

8. Miao, Y., Chen, Q., Li, Y., Zhuo, D., Wang, R., Tribological properties of carbon nanotube/polymer composites: a mini-review, *Frontiers in Materials*, 2023, V. 10, p. 1129676. DOI: 10.3389/fmats.2023.1129676
9. Mashkov, Yu.K., *Tribofizika i svoystva napolnennogo ftoroplasta* [Tribophysics and properties of filled fluoroplastic], Omsk: OmGTU, 1997.
10. Chand, N., Fahim, M., Introduction to tribology of polymer composites, *Tribology of Natural Fiber Polymer Composites*, Cambridge: Woodhead Publishing, 2008, pp. 59–83. DOI: 10.1533/9781845695057.59
11. Chichinadze, A.V., Brown, E.D., Bushe, N.A., et al., *Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka)* [Fundamentals of tribology (friction, wear, lubrication)]: study guide for tech. universities, 2nd ed., Moscow: Mashinostroenie, 2001.
12. *Spravochnik po tribotekhnike. V. 1: Teoreticheskie osnovy* [Handbook of tribology. V. 1: Theoretical foundations], Khebda, M., Chichinadze, A.V. (Eds.), Moscow: Mashinostroenie, 1989.
13. Friedrich, K., Chang, L., Hauptert, F., Current and future applications of polymer composites in the field of tribology, *Composite Materials*, London: Springer, 2011, pp. 129–167. DOI: 10.1007/978-0-85729-166-0\_6
14. Hussein, M.A., Mohammed, A.S., Al-Aqeeli, N., Wear characteristics of metallic biomaterials: a review, *Materials*, 2015, V. 8, Is. 5, pp. 2749–2768. DOI: 10.3390/ma8052749
15. Bogdanovich, P.N., Prushak, V.Ya., *Trenie i iznos v mashinakh: uchebnyk dlya vuzov* [Friction and wear in machines: a textbook for universities], Minsk, 1999.
16. Myshkin, N.K., Petrokovets, M.I., *Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i tekhnicheskie prilozheniya tribologii* [Friction, lubrication, and wear: physical principles and technical applications of tribology], Moscow: FIZMATLIT, 2007, p. 368.
17. Lancaster, J.K., Geometrical effects on wear of polymers and carbons, *Journal of Lubrication Technology*, 1997, V. 2, pp. 187–194.
18. Petrova, P.N., Markova, M.A., Fedorov, A.L., Issledovanie vliyaniya tekhnology polucheniya na svoystva i strukturu kompozitov na osnove PTFE [Study of the influence of production technologies on the properties and structure of PTFE-based composites], *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki*, 2024, V. 29 (1), pp. 162–171. DOI: 10.31242/2618-9712-2024-29-1-162-171
19. Markova, M.A., Petrova, P.N., Issledovanie vliyaniya uglerodnykh volokon i tekhnology polucheniya kompozitov na svoystva PKM na osnove politetraftoretilena [Study of the influence of carbon fibers and composite production technologies on the properties of polytetrafluoroethylene-based composite materials], *Perspektivnye materialy*, 2020, V. 11, pp. 59–68. DOI: 10.30791/1028-978X-2020-11-59-68
20. Mohamed, M.G., Kuo, S.W., Functional Polyimide/Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane Nanocomposites, *Polymers*, 2019, V. 11, pp. 26. DOI: 10.3390/polym11010026
21. Khare, H.S., Moore, A.C., Haidar, D.R., Gong, L., Ye, J., Rabolt, J.F., Burris, D.L., Interrelated effects of temperature and environment on wear and tribochemistry of an ultralow wear PTFE composite, *The Journal of Physical Chemistry C*, 2015, V. 119 (29), pp. 16518–16527. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b00947
22. Krick, B.A., Ewin, J.J., Blackman, G.S., Junk, C.P., Gregory Sawyer, W., Environmental dependence of ultralow wear behavior of polytetrafluoroethylene (PTFE) and alumina composites suggests tribochemical mechanisms, *Tribology International*, 2012, V. 51, pp. 42–46. DOI: 10.1016/j.triboint.2012.02.015
23. Harris, K.L., Pitenis, A.A., Sawyer, W.G., Krick, B.A., Blackman, G.S., Kasprzak, D.J., Junk, C.P., PTFE tribology and the role of mechanochemistry in the development of protective surface films, *Macromolecules*, 2015, V. 48, No 11, pp. 3739–3745. DOI: 10.1021/acs.macromol.5b00452

24. Onodera, T., Kawasaki, K., Nakakawaji, T., Higuchi, Y., Ozawa, N., Kurihara, K., Kubo, M., Effect of tribochemical reaction on transfer-film formation by poly (tetrafluoroethylene), *The Journal of Physical Chemistry C*, 2014, V. 118, No 22, pp. 11820–11826. DOI: 10.1021/jp503331e
25. Dehant, I., Danz, R., Kimmer, W., Schmolke, R., *Infrakrasnaya spektroskopiya polimerov* [Infrared spectroscopy of polymers], Moscow: Khimiya, 1976.

UDC 678.743.22:536.468

### REPLACING $\text{Sb}_2\text{O}_3$ WITH $\text{Mg}(\text{SbO}_3)_2$ IN THE FORMULATION OF PVC CABLE PLASTIC COMPOUND

T.A. BORUKAEV<sup>1</sup>, Dr Sc. (Chem), A.Kh. MALAMATOV<sup>1</sup>, Dr Sc. (Eng), A.Kh. SALAMOV<sup>2</sup>, Cand Sc. (Ped), L.I. KITIEVA<sup>2</sup>, Cand Sc. (Chem)

<sup>1</sup> *Kh.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University, 173 Chernyshevskogo Street, 360004 Nalchik, Russian Federation*

<sup>2</sup> *Ingush State University, 7 Zyazikova St, 386001 Magas, Russian Federation*

Received December 16, 2025

Revised February 3, 2026

Accepted February 12, 2026

**Abstract**—Magnesium antimonate ( $\text{Mg}(\text{SbO}_3)_2$ ) was synthesized and used to replace antimony oxide ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ) in PVC cable composites. The flammability and physical and mechanical properties of the resulting compound were studied. It was found that replacing  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  in the resulting PVC cable formulation with  $\text{Mg}(\text{SbO}_3)_2$  does not reduce the compound's flammability. At the same time, the key performance indicators (mechanical and thermal properties) of PVC composites with the addition of  $\text{Mg}(\text{SbO}_3)_2$  remain high.

**Keywords:** polyvinylchloride, plasticizer, change, antimony oxide (III), magnesium antimonate, properties

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2026-126-2-160-167

### REFERENCES

1. Martynov, A.V., Mazina, L.A., Klyuchnikov, O.R., Modifikatsiya kabelnykh polyvinilkhloridnykh plastikativ ponizhennoi goryuchesti [Modification of cable polyvinyl chloride plastics with reduced flammability], *Vestnik KNITU. Khimicheskaya tekhnologiya*, 2016, V. 19, No 15, pp. 73–75. EDN: WLPBUZ
2. Kamensky, M.K., Meshchanov, G.I., Frik, A.A., Kabeli i provoda posharobezopasnogo ispolneniya. Sovremennoe sostoyanie i tendentsii razvitiya [Fire-resistant cables and wires. Current state and development trends], *Kabely i provoda*, 2017, No 3, pp. 30–35. EDN: ZRNTWX
3. Borukaev, T.A., Martazanova, P.M., Teplofizicheskie i fiziko-mekhanicheskie svoistva modernizirovannogo PVKh plastykata [Thermophysical and physical-mechanical properties of modernized industrial PVC composite], *Voprosy materialovedeniya*, 2021, No 1 (105), pp. 84–93. DOI: 10.22349/1994-6716-2021-105-1-84-93
4. Zaripov, I.I., Vikhareva, I.N., Builova, E.A., Berestova, T.B., Mazitova, A.K., Dobavki dlya snizheniya goryuchesti polimerov [Additives to reduce the flammability of polymers], *Nanotekhnologii v stroitelstve*, 2022, V. 14, No 2, pp. 156–161. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-2-156-161
5. Eremeeva, A.V., Gotlib, E.V., Snizhenie goryuchesti PVKh lynoleuma [Reducing the flammability of PVC linoleum], *Vestnik KNITU. Khimicheskaya tekhnologiya*, 2015, V. 18, No 23, pp. 16–18. EDN: VHISSR
6. Borukaev, T.A., Salamov, A.Kh., Malamatov, M.Kh., Pashtova, L.R., Vliyanie dobavki  $(\text{Mg}(\text{OH}))_2\text{CO}_3$  na nekotorye kharakteristiki pozharnoi opasnosti i fiziko-mekhanicheskie svoistva PEND [Effect of the  $(\text{Mg}(\text{OH}))_2\text{CO}_3$

additive on some fire hazard characteristics and physical and mechanical properties of LDPE], *Materialovedenie*, 2024, No 12, pp. 30–37. EDN: HNRMKH

7. Antsupov, E.V., Rodivilov, S.M., Antipireny dlya poristyykh materialov [Flame retardants for porous materials], *Pozharovzryvobezopasnost*, 2011, V. 20, No 10, pp. 25–32. EDN: OHKWUL8. Aminova, G.K., Maskova, A.R., Builova, E.A., Anisimova, V.S., Akhmetova, I.I., Issledovanie termostabilnosti nekotorykh PVKh kompozitsiy [Investigation of the thermal stability of some PVC compositions], *Bashkirsky khimichesky zhurnal*, 2016, V. 23, No 2, pp. 16–19. EDN: WHFCLR

8. Nafikova, R.F., Fatkulin, R.N., Afanasev, F.I., Stepanova, L.B., Islamutdinova, A.A., Issledovanie vliyaniya plastifikatora DES M-2 na fiziko-mekhanicheskiye i tekhnologicheskiye svoystva PVKh plastikatoV [Study of the effect of DES M-2 plasticizer on the physical, mechanical, and technological properties of PVC plastics], *Plasticheskie massy*, 2020, No 3–4, pp. 33–36. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-3-4-33-36

9. Lavrov, N.A., Ksenofontov, G.V., Belukhichev, E.V., O mekhanizme stabilizatsii polyvinilkhlorida [About the mechanism of polyvinyl chloride stabilization]: a review, *Plasticheskie massy*, 2016, No 11–12, pp. 16–20. EDN: XUYNOP

10. Kuznetsov, S.M., Sagitova, E.A., Prokhorov, K.A., Nikolaeva, G.Y., Mendelev, D.I., Donfack, P., Materny, A., Raman spectroscopic detection of polyene-length distribution for high sensitivity monitoring of photo- and thermal degradation of polyvinylchloride, *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, 2021, V. 252, pp. 1–8. EDN: QYWFZR

11. Lavrov, N.A., Kolert, K., Ksenofontov, G.V., Lavrov, T.V., Belukhichev, E.V., O mekhanizme destruktсии polyvinilkhlorida [On the mechanism of polyvinylchloride destruction]: a review, *Izvestiya SPGTI(TU)*, 2012, V. 42, No 16, pp. 31–35. EDN: PKYQGD

12. Lutfullaev, S.Sh., Issledovanie vliyaniya napolnitelei na svoystva PVKh kompozitsii [Study of the effect of fillers on the properties of PVC compositions], *Universum: technicheskie nauki*, 2022, V. 105, No 12. URL: [https://7universum.com/pdf/tech/12\(105\)%20\[15.12.2022\]/Lutfullaev1.pdf](https://7universum.com/pdf/tech/12(105)%20[15.12.2022]/Lutfullaev1.pdf)

13. Galiguzov, A.A., Serdan, A.A., Yashin, N.V., Avdeev, V.V., Vliyanie sostava PVKh plastikata na ekspluatatsionnye svoystva i ognезashitnyuyu effektivnost polimernyykh materialov na ego osnove [Influence of PVC composite on the performance properties and fire protection effectiveness of polymer materials based on it], *Pozharovzryvobezopasnost*, 2023, V. 32, No 5, pp. 26–39. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.2639

## STRUCTURAL INTEGRITY AND SERVICEABILITY OF MATERIALS

UDC 669.14.018.293:539.421

### SCALE EFFECT IN FRACTURE TOUGHNESS TESTING OF HIGH-STRENGTH SHIPBUILDING STEELS

A.V. ILYIN, Dr Sc. (Eng), A.A. LAVRENTIEV, K.E. SADKIN, Cand Sc. (Eng), R.O. CHERCHIEV

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

Received February 2, 2026

Revised April 8, 2026

Accepted May 6, 2026

**Abstract**—The scale effect in fracture toughness determinations is well-known: the measured characteristic ( $K_{1c}$ , critical values of the J-integral or crack tip opening displacement) increases as the specimen size decreases. Quantitatively, this effect is accounted by a thickness correction incorporated into standards. This correction is theoretically derived

from the concept of brittle fracture as a random event in the metal's microstructure and the relationship between the probability of fracture and the process zone volume, based on the "weakest link" principle. However, during tests of standard specimens with high fracture toughness levels, significant deviations from the established corrections are observed. For brittle fractures the scale effect is more significant than predicted by corrections from standards. Conversely, for ductile fractures, an "inverse" scale effect is observed – increased fracture toughness with increasing specimen thickness. This study analyzes these test result features in relation to high-strength shipbuilding steels, for which fracture toughness tests are a mandatory element of the certification process.

*Keywords:* low-alloy steel, fracture toughness parameters, brittle and ductile fracture, scale effect

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-126-2-168-189

#### ACKNOWLEDGMENTS

*Experimental studies were carried out at the Center for Collective Use of the Equipment "Composition, structure and properties of structural and functional materials" of the NRC "Kurchatov Institute" – CRISM "Prometey".*

#### REFERENCES

1. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov. Ch. 13: Materialy* [Rules for the classification and construction of seaships. Part 13: Materials], St Petersburg: Rossiisky morskoi registr sudokhodstva, 2023.
2. BS 7910:2013+A1:2015: *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*.
3. ASTM E1820-18a: *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*.
4. ASTM E1921-18a: *Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range*.
5. BS 7448: *Fracture Mechanics Toughness Test. Part 1: Method for determination of  $K_{Ic}$ , critical CTOD and critical J-values of metallic materials*, 1991.
6. GOST R 59115.6-2021: *Obosnovanie prochnosti oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok. Metody opredeleniya kharakteristik treshchinostoikosti konstruktsionnykh materialov* [Justification of the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants. Methods for determining fracture toughness characteristic of structural materials].
7. Sych, O.V., Khlusova, E.I., *Vzaimosvyaz parametrov struktury s kharakteristikami rabotosposobnosti sudostroitelnykh staley razlichnogo legirovaniya* [Interrelation of microstructure parameters with the performance characteristics of differently alloyed shipbuilding steels], *Voprosy materialovedeniya*, 2020, No 4 (104), pp. 17–31.
8. Margolin, B.Z., Gulenko, A.G., Shevtsova, V.A., *Prognozirovaniye treschinostoikosti staley v veroyatnostnoy postanovke na osnove lokalnogo podkhoda* [Predicting the fracture toughness of reactor steels within a probabilistic framework based on the local approach], *Problems of strength*, 1999, Report 1: pp. 5–20; report 2: pp. 5–22.
9. Ilyin, A.V., Lavrentiev, A.A., Mizetsky, A.V., *On the formulation of the local brittle fracture criterion for predicting the crack resistance of high-strength steel*, *Inorganic Materials: Applied Research*, 2021, V. 12, No 6, pp. 1628–1641.
10. Larsson, S.G., Carlsson, A.J., *Influence of non-singular stress terms and specimen geometry on small-scale yielding at crack tips in elastic plastic material*, *J. Mech. Phys. Solids*. – 1973, V. 21, pp. 263–277. DOI: 10.1016/0022-5096(73)90024-0.
11. Du, Z.-Z., Hancock, J.-W., *The effect of non-singular stresses on crack-tip constraint*, *J. Mech. Phys. Solids*, 1991, V. 39, Is. 4, pp. 555–567.
12. O'Dowd, N.P., Shih, C.F., *Family of crack-tip fields characterized by a triaxiality parameter: 1. Structure of fields*, *J. Mech. Phys. Solids*, 1991, V. 39, Is. 8, pp. 989–1015. DOI: 10.1016/0022-5096(91)90049-T

13. Kim, Y.-J., Kim, J.-S., Cho, S.-M., Kim, Yo.-J., 3-D constraint effects on J-testing and crack tip constraint in M(T), SE(B), SE(T) and C(T) specimens: numerical study, *Engineering Fracture Mechanics*, 2004, V. 71, Is. 9, pp. 1203–1218. DOI: 10.1016/S0013-7944(03)00211-X
14. Kim, Y., Chao, Y.J., Zhu, X.K., Effect of specimen size and crack depth on 3D crack-front constraint for SENB specimens, *International Journal of Solids and Structures*, 2003, V. 40, pp. 6267–6284.
15. Murakami, Y., *Spravochnik po koefitsientam intensivnosti napryazheniy* [Handbook of stress intensity factors], Moscow: Mir, 2 vols., V. 1, pp. 51–56.
16. Ilyin, A.V., Lavrentiev, A.A., Mizetsky, A.V., Sadkin, K.E., Ob ispolzovanii lokalnogo kriteriya khрупкого razrusheniya dlya svyazi treschinostoikosti vysokoprochnykh staley s rezultatami ispytaniy obratsov s kontsektoratoram i strukturnymi kharakteristikami materiala [On the application of a local brittle fracture criterion to relate the fracture toughness of high-strength steels with test results of notched specimens and material structural characteristics], *Voprosy materialovedeniya*, 2024, No 4 (120), pp. 145–170.

## CORROSION AND PROTECTION OF METALS

UDC 621.762.5:669.14.018.8:620.193.27

### STUDY OF THE STRUCTURE, PROPERTIES, AND CORROSION RESISTANCE OF 12Kh18N10T STEEL PRODUCED BY DIRECT LASER GROWTH

T.V. UGLUNTS<sup>1,2</sup>, R.V. MENDAGALIEV<sup>1</sup>, M.A. UDOVICHENKO<sup>2</sup>, T.A. UGLUNTS<sup>2</sup>, T.B. NGO<sup>3</sup>, N.V. LEBEDEVA<sup>4</sup>,  
O.G. KLIMOVA-KORSMIK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *St Petersburg State Marine Technical University,*

*3 Lotsmanskaya St, St Petersburg, Russian Federation. E-mail: tuglunts@mail.ru*

<sup>2</sup> *Peter the Great St Petersburg Polytechnic University,*

*29 Politekhnicheskaya St, 195251 St Petersburg, Russian Federation*

<sup>3</sup> *Southern Branch of the Joint Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Center,  
Ho Chi Minh City, Vietnam, 3/2 St, District 10, Ho Chi Minh City*

<sup>4</sup> *NRC “Kurchatov Institute” – Central Research Institute of Structural Materials “Prometey”,  
49 Shpaleynaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation*

Received October 20, 2025

Revised January 16, 2026

Accepted April 1, 2026

**Abstract**—This article presents the results of a study of the microstructure and corrosion resistance of 12Kh18N10T stainless steel produced by direct laser growth (DLG). A comparative analysis was conducted for hot-rolled steel (HRS) and DLG samples in the initial state and after heat treatment (HT). Corrosion tests were conducted using electrochemical polarization and full-scale seawater testing (tests in Nha Trang, 2,544 hours). The data obtained showed that the grown samples after thermal treatment exhibited increased pitting resistance ( $\Delta E = 460$  mV) due to structural homogenization and reduced chemical heterogeneity. The obtained intergranular corrosion resistance test results demonstrate a significant increase in the resistance of the laser grown steel after thermal treatment compared to the initial condition. Laboratory tests confirmed the superior corrosion resistance of the grown samples compared to hot-rolled steel, which exhibited higher pitting resistance. However, under marine conditions, both materials demonstrated comparable corrosion rates (0.019–0.032 g/m<sup>2</sup> h) due to biofouling, which provokes crevice and pitting corrosion.

*Keywords:* direct laser deposition, microstructure, mechanical properties, corrosion resistance

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2026-126-2-190-203

#### ACKNOWLEDGEMENTS

*The study was conducted with financial support from the Priority 2030 Strategic Academic Leadership Program, Agreement No 075-15-2025-124 "Digital Industrial Technologies."*

*Corrosion testing was supported by the Ecolan T-2.2 research and development program of the Joint Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Center.*

#### REFERENCES

1. DebRoy, T., Wei, H.L., Zuback, J.S., Mukherjee, T., Elmer, J.W., Milewski, J.O., Beese, A.M., Wilson-Heid, A., De, A., Zhang, W., Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties, *Progress in Materials Science*, 2018, V. 92, pp. 112–224. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001
2. Li, Y., Su, Q., Sheng, G., Hosseini, S.R.E., Badran, B.E., Gong, P., Xin, C., Wang, H., Recent advances in artificial-intelligence enhanced additive manufacturing of heat exchangers for thermal management: a review, *Materials & Design*, 2025, V. 256, Art. 114339. DOI: 10.1016/j.matdes.2025.114339
3. Hemwat, J., Seenawat, M., Promoppatum, P., Pandee, P., Welding of additively and conventionally manufactured 316L stainless steel, *Materials Today Communications*, 2025, V. 46, Art. 112683. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2025.112683
4. Kim, J.-M., Chun, Y.-B., Kang, S.H., Lee, B.S., Effects of annealing temperature on cellular structure and mechanical properties of additively manufactured 304L stainless steel by directed energy deposition, *Materials Science and Engineering: A*, 2025, V. 924 (1), Art. 147821. DOI: 10.1016/j.msea.2025.147821
5. Zou, L., Huang, Y., Tan, Y., Wang, Y., Wang, T., Ma, Y., Yuan, T., Li, R., Anisotropy study of the microstructure, phase composition and properties of 321 stainless steel additively manufactured by laser powder bed fusion, *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, V. 141, pp. 1135–1150. DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.03.038
6. Korsmik, R., Tsybulskiy, I., Rodionov, A., Klimova-Korsmik, O., Gogolukhina, M., Ivanov, S., Zadykyan, G., Mendagaliev, R., The approaches to design and manufacturing of large-sized marine machinery parts by direct laser deposition, *Procedia CIRP*, 2020, V. 94, pp. 298–303. DOI: 10.1016/j.procir.2020.09.056
7. Shaysultanov, D., Povolyaeva, E., Semenyuk, A., Mendagaliev, R., Alymov, N., Zherebtsov, S., Stepanov, N., Laser direct energy deposition of gradient medium-entropy Fe<sub>45.0</sub>Co<sub>19.6</sub>Ni<sub>19.6</sub>Cr<sub>15.0</sub>C<sub>0.8</sub> (at%) / Fe material with tunable TRIP effect, *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, V. 1036, Art. 182025. DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.182025
8. Gushchina, M.O., Anisimov, D.M., Shabunina, Zh.S., Shalnova, S.A., Klimova-Korsmik, O.G., Topalov, I.K., Aleksandrov, V.L., Turichin, G.A., Features of the Ti-6Al-4V microstructure and phase composition formation by changing the thermal cycle during the process of direct energy deposition, *Materials Characterization*, 2025, V. 227, Art. 115330. DOI: 10.1016/j.matchar.2025.115330
9. Shalnova, S.A., Volosevich, D.V., Sannikov, M.I., Magidov, I.S., Mikhaylovskiy, K.V., Turichin, G.A., Klimova-Korsmik, O.G., Direct energy deposition of SiC reinforced Ti-6Al-4V metal matrix composites: Structure and mechanical properties, *Ceramics International*, 2022, V. 48, Is. 23, Part A, pp. 35076–35084. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.08.097
10. Britt, C., Liu, Z.-K., Beese, A.M., Keist, J., Martensitic to stainless steel gradient by laser-based directed energy deposition: Effect of thermal history on microstructure and hardness, *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, V. 150, pp. 662–669. DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.06.030

11. Seerangan, N.R., Chinnasamy, R., Natrajan, R., Ashok Kumar, A., Ranganathan, H., Stress corrosion cracking of friction stir welded AISI 304 and 316 L dissimilar steel alloys, *Materials Today: Proceedings*, 2022, V. 68, Part 5, pp. 1663–1666. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.08.125
12. Veysi, A., Roushani, M., Najafi, H., Synthesis and evaluation of CuNi-MOF as a corrosion inhibitor of AISI 304 and 316 stainless steel in 1N HCl solution, *Heliyon*, 2025, V. 11, Is. 1, Art. e41296. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e41296
13. Shtefan, V., Kanunnikova, N., Zuyok, V., Comparative evaluation of microstructure and electro-chemical, high-temperature corrosion rates of titanium- and aluminum-modified black chromium coatings on AISI 304 stainless steel, *Surface and Coatings Technology*, 2025, V. 497, Art. 131706. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.131706
14. Wang, M., Liu, C., Bai, G., Liu, H., Liu, Y., Fan, D., Wang, Z., Pang, G., Enhancement of surface quality and corrosion resistance in 321 stainless steel by electrochemical machining, *Vacuum*, 2025, V. 240, Art. 114487. DOI: 10.1016/j.vacuum.2025.114487
15. Tiamiyu, A.A., Eduok, U., Odeshi, A.G., Szpunar, J.A., Effect of prior plastic deformation and deformation rate on the corrosion resistance of AISI 321 austenitic stainless steel, *Materials Science and Engineering: A*, 2019, V. 745, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.msea.2018.12.093
16. Ramdane, H., Benaïoun, N., Guezoul, M., Moulayat, N., Craciun, V., Investigation of the corrosion-preventing properties of nickel-coated austenitic stainless steel (AISI 304) in NaOH and NaOH + 10% NaCl solutions, *Inorganic Chemistry Communications*, 2023, V. 152, Art. 110671. DOI: 10.1016/j.inoche.2023.110671

## RADIATION MATERIALS SCIENCE

UDC 621.039.531:669.15–194.56

### A METHOD FOR PREDICTING THE TEMPERATURE-DOSE DEPENDENCE OF RADIATION SWELLING UNDER NEUTRON IRRADIATION BASED ON ION IRRADIATION.

#### Part 1. Experimental study of radiation swelling of 08Kh18N10T steel after ion irradiation

A.A. SOROKIN, Cand Sc. (Eng), B.Z. MARGOLIN, Dr Sc. (Eng), M.S. MIKHAILOV,  
V.A. PECHENKIN, Cand Sc. (Phys.-Math).

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

Received January 30, 2026

Revised February 27, 2026

Accepted March 5, 2026

**Abstract**—Radiation-induced swelling of 08Kh18N10T austenitic steel was studied using scanning electron microscopy methods after irradiation with nickel and helium ions to a maximum damaging dose of 175 dpa in the temperature range of 500–650°C. An approach was developed to establish a correspondence between the swelling of the studied zone of the irradiated layer and the damaging dose value calculated for a solid body without vacancy voids. Dose and temperature dependences of radiation swelling for 08Kh18N10T steel in the damaging dose range of 60–160 dpa after ion irradiation were obtained. These dependences were compared with data on swelling of the studied steel after neutron irradiation. A discrepancy was found between swelling under ion and neutron irradiation, even when compensating for the effect of an increased dose rate by increasing the irradiation temperature. It is hypothesized that the observed discrepancy is caused not by the choice of ion irradiation parameters, but by the specific nature of swelling in a very thin ion-irradiated layer, which will be discussed in the second part of this article.

**Keywords:** ion irradiation, radiation swelling, vacancy porosity, scanning electron microscopy, SEM, austenitic steel, 08Kh18N10T

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2026-126-2-204-220

## REFERENCES

1. Margolin, B.Z., Sorokin, A.A., Kashtanov, A.D., Petrov, S.N., Dub, A.V., Pechenkin, V.A., Metodologiya otsenki radiatsionnoi stoikosti materialov, obluchennykh v ionnykh uskoritelyakh [Methodology for assessing the radiation resistance of materials irradiated in ion accelerators], *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser.: Yaderno-reaktornye konstanty*, 2025, No 4, pp. 164–204.
2. Grudzevich, O.T., Pechenkin, V.A., Kobets, U.A., et al., Issledovaniya radiatsionnoi stoikosti konstruktsionnykh materialov na uskoritelyakh ionov [Research on the radiation resistance of structural materials using ion accelerators], *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser.: Yaderno-reaktornye konstanty*, 2022, No 3, pp. 127–145.
3. Chernov, I.I., Staltsev, M.S., Kalin, B.A., et al., Osobennosti razvitiya mikrostruktury vanadiya pri obluchenii ionami  $Ni^{2+}$  energiei 7,5 MeV pri 650°C [Features of the development of vanadium microstructure during irradiation with  $Ni^{2+}$  ions with an energy of 7.5 MeV at 650°C], *Atomnaya energiya*, 2015, V. 118, Is. 6, pp. 321–324.
4. Jiao, Z., et al., Microstructure evolution of T91 irradiated in the BOR60 fast reactor, *J. Nucl. Mater.*, 2018, V. 504, pp. 122–134.
5. Li J., Miao S., Liuqing Y., et al., A comparison study of void swelling in additively manufactured and cold-worked 316L stainless steels under ion irradiation, *J. Nucl. Mater.*, 2019, V. 51, Art. 152946
6. Taller, S., Van Coevering, G., Wirth, B.D., et al., Predicting structural material degradation in advanced nuclear reactors with ion irradiation, *Sci Rep.*, 2021, V. 11, Art. 2949.
7. Kalchenko, A.S., Bryk, V.V., Lazarev, N.P., et al., Prediction of swelling of 18Cr10NiTi austenitic steel over a wide range of displacement rates, *J. Nucl. Mater.*, 2010, V. 399, Is. 1, pp. 114–121.
8. Liu, C., Ma, H., Fan, P., et al., Cavity swelling of 15-15Ti steel at high doses by ion irradiation, *Materials*, 2024, V. 17, Is. 4, Art. 925. URL: <https://doi.org/10.3390/ma17040925>
9. Lin, Y.-R., Bhattacharya, A., Chen D., Kai, J.-J., Henry, J., Zinkle, S.J., Temperature-dependent cavity swelling in dual-ion irradiated Fe and Fe-Cr ferritic alloys, *Acta Materialia*, 2021, V. 33, Art. 116660.
10. Garner, F.A., Toloczko, M.B., Sencer, B.H., Comparison of swelling and irradiation creep behavior of FCC-austenitic and BCC-ferritic/martensitic alloys at high neutron exposure, *J. Nucl. Mater.*, 2010, V. 276, pp. 123–142.
11. Garner, F.A. Radiation Damage in Austenitic Steels, *Comprehensive Nuclear Materials*, Amsterdam, Elsevier, 2012, Ch. 4, pp. 33–95.
12. Getto, E., Sun, K., Monterrosa, A.M., Jiao, Z., Hackett, M.J., Was, G.S., Void swelling and microstructure evolution at very high damage level in self-ion irradiated ferritic-martensitic steels, *J. Nucl. Mater.*, 2016, V. 480, pp. 159–176.
13. Mansur, L.K., Void Swelling in Metals and Alloys Under Irradiation: An Assessment of the Theory, *Nuclear Technology*, 1978, V 40, No 1, pp. 5–34. DOI: 10.13182/NT78-2
14. Johnston, W., Rosolowski, J., Turkalo, A., Lauritzen, T., Nickel Ion Bombardment of Types 304 and 316 Stainless Steels: Comparison with Fast-Reactor Swelling Data, *Effects of Radiation on Substructure and Mechanical Properties of Metals and Alloys*, ASTM International, 1973, pp. 213–228.
15. Was, G.S., Fundamentals of Radiation Materials Science, Springer-Verlag Berlin; Heidelberg, 2007.
16. Glasgow, B.B., Si-Ahmed, A., Wolfer, W.G., Garner, F.A., Helium bubble formation and swelling in Metals, *J. Nucl. Mater.*, 1981, V. 103–104, pp. 981–986.

17. Stoller, R.E., Odette, G.R., Effect of helium on swelling in stainless steel: influence of cavity density and morphology, *ASTM STP*, 1982, V. 782.
18. Woodley, D., Taller, S., Jiao, Z., Sun, K., Was, G.S., The Role of Co-injected Helium on Swelling and Cavity Evolution at High Damage Levels in Ferritic-Martensitic Steels, *J. Nucl. Mater.*, 2021, V. 550, Art. 152912.
19. Margolin, B.Z., Sorokin, A.A., Belyaeva, L.A., Modelirovanie radiatsionnogo uprochneniya nerzhaveyushchikh ferritno-martensitnykh i austenitnykh staley posredstvom oblucheniya v ionnom uskoritele. Ch. 1. Razrabotka metodologii vybora rezhima ionnogo oblucheniya ferritno-martensitnykh staley [Modeling of radiation hardening of stainless ferritic-martensitic and austenitic steels by irradiation in an ion accelerator. Part 1: Development of a methodology for selecting the mode of ion irradiation of ferritic-martensitic steels], *Voprosy materialovedeniya*, 2024, No 2 (118), pp. 187–211.
20. Rogozhkin, S.V., Iskandarov, N.A., Aleev, A.A., et al., Issledovanie vliyaniya oblucheniya ionami Fe na nanostrukturu ferritno-martensitnoi stali EK-181 [Study of the Effect of Fe Ion Irradiation on the Nanostructure of Ferritic-Martensitic Steel EK-181], *Perspektivnye materialy*, 2013, No 2, pp. 36–41.
21. Rogozhkin, S.V., Nikitin, A.A., Khomich, A.A., Iskandarov, N.A., Aleev, A.A., et al., Imitatsionnye eksperimenty na puchkakh tyazhelykh ionov dlya modelirovaniya radiatsionnykh povrezhdenii konstruktsionnykh materialov aktivnoi zony yadernykh i termoyadernykh energeticheskikh ustanovok [Simulation experiments on heavy ion beams for modeling radiation damage to structural materials in the core of nuclear and thermonuclear power plants], *Yadernaya fizika i inzhiniring*, 2018, V. 9, No 3, pp. 245–258.
22. Lear, C.R., Song, M., Wang, M., Was, G.S., Dual ion irradiation of commercial and advanced alloys: Evaluating microstructural resistance for high dose core internals, *J. Nucl. Mater.*, 2019, V. 51, pp. 125–134
23. SRIM, *Computer Code for Stopping and Range of Ions in Matter*. URL: <http://www.srim.org>
24. Pechenkin, V.A., Chernova, A.D., Molodtsov, V.L., Garner, F.A., Effect of internal sink strength on diffusion mass transport in alloys under high dose ion irradiation, *Proceedings of the 12th International Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerators* (November 10–13, 2015, Washington, USA), 2016, pp. 103–109.
25. Vasina, N.K., Margolin, B.Z., Gulenko, A.G., Kursevich, I.P., Radiatsionnoe raspukhanie austenitnykh staley: vliyanie razlichnykh faktorov. Obrabotka eksperimentalnykh dannykh i formulirovka opredelyayushchikh uravnenii [Radiation swelling of austenitic steels: the influence of various factors. Processing of experimental data and formulation of governing equations], *Voprosy materialovedeniya*, 2006, No 4 (48), pp. 69–88.
26. Margolin, B.Z., Murashova, A.I., Neustroev, V.S., Vliyanie napryazhenii na radiatsionnoe raspukhanie austenitnykh staley [Effect of Stresses on Radiation Swelling of Austenitic Steels], *Voprosy materialovedeniya*, 2011, No 4 (68), pp. 124–139.
27. GOST R 59429-2021: *Ustroystva vnutrikorpusnye vodo-vodyanogo energeticheskogo reaktora. Raschet na prochnost na stadii proektirovaniya* [Devices inside the water-water power reactor. Strength calculation at the design stage].