

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

- Кондратьев Н. А., Хлусова Е. И., Анисимов Д. М., Боровская О. Д.* Выбор параметров высокоскоростной термомеханической обработки стали Cr–Ni–Mo на основании имитационного моделирования 5
- Попова Н. А., Громов В. Е., Порфирьев М. А., Иванов Ю.Ф., Никоненко Е. Л., Невский С. А.* Механизмы упрочнения тяжело нагруженных рельсов из заэвтектидной стали при длительной эксплуатации 20
- Зисман А. А., Князюк Т. В., Петров С. Н.* Оценка структурного состояния бывшего аустенита в горячекатаной стали по ее текстуре после мартенситного превращения 40
- Лукьянова Н. А., Мельников П. В., Грибанова В. Б.* Влияние отпуска на структуру и свойства сварного соединения высокопрочной конструкционной стали, выполненного автоматической сваркой под флюсом 50
- Гангало А. Н., Бурховецкий В. В.* Влияние температуры горячего прессования составных медно-титановых заготовок на формирование интерметаллидного слоя на границе раздела материалов 60
- Ганиев И. Н., Холмуродов Ф., Сафаров А. Г., Нуров Н. Р., Якубов У. Ш.* Влияние добавки висмута на теплофизические свойства и термодинамические функции алюминиевого сплава AlFe5Si10. 67
- Зареченский Д. А., Воробьев В. В., Шевченко В. А.* Исследование зоны сплавления композиционного сплава релит – марганцевый мельхиор при наплавке деталей металлургического оборудования печным способом 79

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Леонов В. П., Малинкина Ю. Ю., Другачук С. Д., Хачатурян И. М., Чудаков Е. В.* Сравнительный анализ технологических свойств и микроструктуры порошков из титановых сплавов различных классов 86
- Гордеев С. К.* Алмазокарбидокремниевые композиционные материалы АКК «Скелетон» 99
- Жуков А. С., Кузнецов П. А.* Влияние гранулометрического состава порошков сталей и прецизионных сплавов и режимов их сплавления методом СЛС на пористость 117
- Шевченко В. Я., Долгин А. С., Сычев М. М., Балабанов С. В.* Обзор критериев и методов оценки свойств керамических материалов, предназначенных для защиты от воздействия ударных нагрузок 127
- Макаров А. М., Геращенко Д. А., Быстров Р. Ю., Попова Е. А., Бобырь В. В., Каширина А. А., Яковлева Н. В.* Исследование влияния параметров лазерного излучения на рост наноразмерного карбида вольфрама в покрытии системы Ni–Ti–WC 143
- Кузенов С. Р., Буснюк А. О., Алимов В. Н., Лившиц А. И., Передистов Е. Ю.* Влияние термической обработки ниобиевой подложки на термостабильность защитно-каталитического покрытия из палладия 149

ПОЛИМЕРНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Злобина И. В., Бекренев Н. В., Егоров А. С., Анисимов А. В.* Влияние ультразвуковой обработки отвержденного монослоя, сформированного путем трехмерной печати из препрега, армированного непрерывным углеродным волокном, на сопротивление воздействию потока твердых частиц .. 159

РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Швецова В. А., Юрченко Е. В.* Радиационное и термическое охрупчивание корпусных реакторных сталей: связь механизмов охрупчивания и разрушения с характеристиками зарождения и распространения микротрещин. Часть 1. Стратегия, программа и методы экспериментальных и расчетных исследований 174
- Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Швецова В. А., Юрченко Е. В.* Радиационное и термическое охрупчивание корпусных реакторных сталей: связь механизмов охрупчивания и разрушения с

характеристиками зарождения и распространения микротрещин. Часть 2. Характеристики прочности и пластичности	196
Марголин Б. З., Беляева Л. А., Сорокин А. А., Юрченко Е. В., Григорьев М. Н. Корреляционные зависимости между упрочнением в терминах предела текучести и микротвердости для аустенитных и ферритно-мартенситных сталей.....	211
Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов	228

УДК 621.771.016:669.15'26'24'28–194

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ Cr–Ni–Mo НА ОСНОВАНИИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Н. А. КОНДРАТЬЕВ, Е. И. ХЛУСОВА, д-р техн. наук, Д. М. АНИСИМОВ, О. Д. БОРОВСКАЯ

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

Поступила в редакцию 11.10.2023

После доработки 18.10.2023

Принята к публикации 24.10.2023

При производстве листового проката толщиной менее 10 мм на непрерывных станах горячей прокатки особо структурно-чувствительными параметрами для сталей бейнитного класса являются температура конца чистой стадии прокатки, скорость охлаждения и температура смотки рулонов. Проведено имитационное моделирование высокоскоростной термомеханической обработки образцов бейнитной Cr–Ni–Mo стали с целью выбора наиболее рациональных технологических режимов. Исследовано влияние скорости и температуры деформации, а также микролегирующих добавок ниобия и ванадия на фазовые превращения.

Ключевые слова: хромоникельмолибденовая сталь, листовая прокат, высокоскоростная термомеханическая обработка, имитационное моделирование, фазовые превращения

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-05-19

ЛИТЕРАТУРА

1. Kong J., Xie C. Effect of molybdenum on continuous cooling bainite transformation of low-carbon microalloyed steel / *Materials and Design*. – 2006. – V. 27, Is. 10. – P. 1169–1173.
2. Suzuki T., Ono Y., Miyamoto G., Furuhashi T. Effects of Si and Cr on bainite microstructure of medium carbon steels // *ISIJ International*. – 2010. – V. 50, Is. 10. – P. 1476–1482.
3. Kim S.J., Lee C. G., Lee T.H., Lee S. Effects of coiling temperature on microstructure and mechanical properties of high-strength hot-rolled steel plates containing Cu, Cr and Ni / *ISIJ International*. – May, 2000. – V. 40. – P. 692–698.
4. Challa V. S. A., Zhou W. H., Misra R. D. K., O'Malley R., Jansto S. G. The effect of Coiling Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of a Niobium–Titanium Microalloyed Steel Processed via Thin Slab Casting // *Materials Science and Engineering: A*. – 2014. – N 595. – P. 143–153.
5. Challa V. S. A., Misra R. D. K., O'Malley R., Jansto S. G. The Effect of Coiling Temperature on the Mechanical Properties of Ultrahigh-Strength 700 MPa Grade Processed via Thin-Slab Casting // *AISTech 2014 Proceedings*. – P. 2987–2997.
6. Bernier N., Bracke L., Malet L., Godet S. Crystallographic reconstruction study of the effects of finish rolling temperature on the variant selection during bainite transformation in C–Mn high-strength steels / *Metallurgical and Materials Transactions: A*. – September, 2014. – N 45. – P. 5937–5955.
7. Jun H. J., Kang J. S., Seo D. H., Kang K. B., Park C. G. Effects of deformation and boron on microstructure and continuous cooling transformation in low carbon HSLA steels // *Materials Science and Engineering: A*. – V. 422. – April, 2006. – P. 157–162.

© 2024

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»
<http://www.crism-prometey.ru>

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

8. Isasti N., Jorge-Badiola D., Taheri M. L., Uranga P. Phase Transformation Study in Nb–Mo Microalloyed Steels Using Dilatometry and EBSD Quantification // *Metallurgical and Materials Transactions*. – August, 2013. – V. 44A. – P. 3552–3563.
9. Коротовская С. В., Нестерова Е. В., Орлов В. В., Хлусова Е. И. Влияние параметров пластической деформации на формирование ультрамелкозернистой структуры в низколегированных бейнитных сталях // *Вопросы материаловедения*. – 2011. – № 1 (56). – С. 100–109.
10. Misra R. D. K., Nathani H., Hartmann J. E., Siciliano F. Microstructural evolution in a new 770 MPa hot rolled Nb–Ti microalloyed steel / *Materials Science and Engineering: A*. – N 394. – 2005. – P. 339–352.
11. Петров С. Н., Пташник А. В. Экспресс-метод определения границ бывшего аустенитного зерна в сталях бейнитно-мартенситного класса на основе картирования кристаллографических ориентировок превращенной структуры // *МиТОМ*. – 2019. – № 5.
12. Sun G., Ding Z. Effects of heating rate and strain rate on phase transformation in micro-grinding / *EPJ Web of Conferences*. – 2019. – N 224. – P. 1–5.
13. Dey I., Ghosh S. K. Saha R. Effects of cooling rate and strain rate on phase transformation, microstructure and mechanical behaviour of thermomechanically processed pearlitic steel // *Materials research and technology*. – 2019. – № 8(3). – P. 2685–2698.
14. Урцев В. Н., Окишев К. Ю., Мирзаев Д. А., Дегтярев В. Н., Яковлева И. Л. Кинетические закономерности образования перлита из аустенита, подвергнутого деформации // *Вестник ЮУрГУ*. – 2006. – N 10. – С. 90–95.
15. Калетин А. Ю., Рыжков А. Г., Калетина Ю. В. Повышение ударной вязкости конструкционных сталей при образовании бескарбидного бейнита // *Физика металлов и металловедение*. – 2015. – Т. 116, № 1. – С. 114–120.
16. Капуткина Л. М., Мармулев А. В., Поляк Е. И., Эрман Г. Влияние условий охлаждения рулонов на неравномерность структуры и механических свойств горячекатаных высокопрочных автолистовых сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – № 12 (690). – 2012. – С. 14–18.
17. Капуткина Л. М., Мармулев А. В., Щетинин И. В., Эрман Г., Поляк Е. И. Исследование формирования неравномерности структуры и свойств в горячекатаной рулонной высокопрочной низкоуглеродистой стали // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2013. – № 9. – С. 4–47.
18. Чашин В. В., Куклев А. В., Попов Е. С., Славов Е. С. Регулируемое охлаждение полосы в рулоне – ответственный этап формирования тонкой структуры стали // *Сталь*. – 2007. – № 3. – С. 79–82.
19. Чашин В. В. Технология регулируемого охлаждения рулонов на транспортном конвейере полосового стана горячей прокатки // *Сталь*. – 2018. – № 6. – С. 27–31.
20. Стабилизация механических свойств горячекатаных полос по длине путем совершенствования условий их охлаждения в рулонах / Ю. В. Липухин, В. В. Чашин, А. Ф. Пименов и др. // *Бюл. НТИ. Черная металлургия*. – 1983. – № 5. – С. 44–45.
21. Улучшение качества горячекатаных полос регулируемым охлаждением рулонов / В. В. Чашин, В. Н. Хлопонин, В. А. Пешков и др. // *Сталь*. – 1990. – № 3. – С. 77–81.
22. Орлов М. Р., Терехин А. М., Морозова Л. В., Журавлева П. Л., Наприенко С. А. Исследование влияния пластической деформации стали 20Х3МВФ со структурой феррита на механические свойства и характер разрушения // *Авиационные материалы и технологии*. – 2014. – № S4. – С. 118–124.
23. Хлусова Е. И., Сыч О. В., Орлов В. В. Хладостойкие стали. Структура, свойства, технологии // *Физика металлов и металловедение*. – 2021. – Т. 122, № 6. – С. 621–657.

МЕХАНИЗМЫ УПРОЧНЕНИЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ РЕЛЬСОВ ИЗ ЗАЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Н. А. ПОПОВА¹, канд. техн. наук, В. Е. ГРОМОВ², д-р физ.-мат. наук, М. А. ПОРФИРЬЕВ²,
Ю.Ф. ИВАНОВ³, д-р физ.-мат. наук, Е. Л. НИКОНЕНКО¹, канд. физ.-мат наук,
С. А. НЕВСКИЙ², д-р техн. наук

¹ ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»,
634003, Томск, Соляная пл., 2. E-mail: natalya-popova-44@mail.ru

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

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

Поступила в редакцию 23.08.2023

После доработки 11.11.2023

Принята к публикации 17.11.2023

С использованием методов просвечивающей электронной микроскопии изучены структурно-фазовые состояния и дефектная субструктура на расстояниях 0, 2 и 10 мм от поверхности по центральной оси и радиусу скругления выкружки головки дифференцированно закаленных длинномерных рельсов категории ДТ400ИК из заэвтектоидной стали после эксплуатации на Забайкальской железной дороге (пропущенный тоннаж 234,7 млн. т брутто). Установлено, что прочностные характеристики стали определяются действием ряда физических механизмов. Проведена качественная оценка вкладов, обусловленных трением кристаллической решетки, твердорастворным упрочнением, упрочнением перлитной составляющей, некогерентными частицами цемента, границами и субграницами зерен, дислокационной субструктурой и внутренними полями напряжений, установлена их иерархия. Выполнена количественная оценка аддитивного предела текучести стали по разным направлениям в зависимости от расстояния от поверхности катания. Показано, что основными механизмами упрочнения являются упрочнение некогерентными частицами, дальнедействующими полями напряжений и субструктурное упрочнение. Аддитивный предел текучести на поверхности выкружки значительно больше, чем на поверхности катания головки по центральной оси.

Ключевые слова: электронная микроскопия, рельсы, заэвтектоидная сталь, механизмы упрочнения, аддитивный предел текучести

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-20-39

ЛИТЕРАТУРА

1. Юрьев А. А., Кузнецов Р. В., Громов В. Е., Иванов Ю. Ф., Шлярова Ю. А. Длинномерные рельсы: структура и свойства после сверхдлительной эксплуатации. Изд. 2-е. – Новокузнецк: Полиграфист–, 2022. – 311 с.
2. Шур Е. А. Повреждения рельсов. – М.: Интекст, 2012. – 153 с.
3. Иванов Ю. Ф., Морозов К. В., Перегудов О. А., Громов В. Е. Эксплуатация рельсовой стали: деградация структуры и свойств поверхностного слоя // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59, № 8. – С. 576–580. DOI: 10.17073/0368-0797-2016-8-576-580.
4. Steenberg M. Rolling contact fatigue: Spalling versus transverse fracture of rails // Wear. – 2017. – V. 380–381. – P. 96–105. DOI: 10.1016/j.wear.2017.03.003.
5. Иванов Ю. Ф., Кормышев В. Е., Громов В. Е., Юрьев А. А., Глезер А. М., Рубанникова Ю. А. Механизмы упрочнения металла рельсов при длительной эксплуатации // Вопросы материаловедения. 2020. – № 3 (103). – С. 17–28. DOI: 10.22349/1994-6716-2020-103-3-17-28.
6. Miranda R. S., Rezende A. B., Fonseca S. T., Fernandes F. M., Sinatora A., Mei P. R. Fatigue and wear behavior of pearlitic and bainitic microstructures with the same chemical composition and hardness using twin-disc tests // Wear. – 2022. – V. 494–495. – P. 204253. DOI: 10.1016/j.wear.2022.204253.

7. Pereira H. B., Alves L. H. D., Rezende A. B., Mei P. R., Goldenstein H. Influence of the microstructure on the rolling contact fatigue of rail steel: Spheroidized pearlite and fully pearlitic microstructure analysis // *Wear*. – 2022. – V. 498–499. – P. 204299. DOI: 10.1016/j.wear.2022.204299.
8. Zhang S.-Y., Spiryagin M., Lin Q., Ding H.-H., Wu Q., Liu Q.-Y., Wang W.-J. Study on wear and rolling contact fatigue behaviours of defective rail under different slip ratio and contact stress conditions // *Tribology International*. – 2022. – V. 169. – P. 107491. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107491.
9. Ma L., Guo J., Liu Q.Y., Wang W.J. Fatigue crack growth and damage characteristics of high-speed rail at low ambient temperature // *Engineering Failure Analysis*. – 2017. – V. 82. – P. 802–815. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.07.026
10. Hu Y., Zhou L., Ding H. H., Tan G. X., Lewis R., Liu Q. Y., Guo J., Wang W. J. Investigation on wear and rolling contact fatigue of wheel-rail materials under various wheel/rail hardness ratio and creepage conditions // *Tribology International*. – 2020. – V. 143. – P. 106091. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.106091.
11. Rong K., Xiao Ye., Shen M., Zhao H., Wang W., Xiong G. Influence of ambient humidity on the adhesion and damage behavior of wheel–rail interface under hot weather condition // *Wear*. – 2021. – V. 486–487. – P. 204091. DOI: 10.1016/j.wear.2021.204091.
12. Zhou L., Ding H., Han Z., Chen C., Liu Q., Guo J., Wang W. Study of rolling-sliding contact damage and tribo-chemical behaviour of wheel-rail materials at low temperatures // *Engineering Failure Analysis*. – 2022. – V. 134. – P. 106077. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106077.
13. Al-Juboori A., Zhu H., Li H., McLeod J., Panella S., Barnes J. Microstructural investigation on a rail fracture failure associated with squat defects // *Engineering Failure Analysis*. – 2023. – V. 151. – P. 107411. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107411.
14. Порфирьев М. А., Громов В. Е., Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А., Крюков Р.Е. Прочностные, трибологические свойства и структурно-фазовые состояния рельсовых сталей // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2023. – Т. 2, № 2. – С. 176–183. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.02.004.
15. Кузнецов Р. В., Громов В. Е., Иванов Ю. Ф., Юрьев А. А., Кормышев В. Е., Полевой Е. В. Эволюция структурно-фазовых состояний и свойств дифференцированно закаленных 100-метровых рельсов при экстремально длительной эксплуатации. Сообщение 5: Градиентные структурно-фазовые состояния по радиусу скругления головки рельсов после сверхдлительной эксплуатации // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. – 2022. – №. 1. – С. 56–64. DOI: 10.54826/19979258_2022_1_56.
16. Иванов Ю. Ф., Громов В. Е., Кузнецов Р. В., Шлярова Ю. А., Юрьев А. А., Кормышев В. Е. Структура рельсов после экстремально длительной эксплуатации // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2022. – Т. 65, № 3. – С. 160–165. DOI: 10.17223/00213411/65/3/160.
17. Громов В. Е., Иванов Ю. Ф., Кузнецов Р. В., Глезер А. М., Шлярова Ю. А., Перегудов О. А. Деформационное преобразование структуры и фазового состава поверхности рельсов при сверхдлительной эксплуатации // *Деформация и разрушение материалов*. – 2022. – № 1. – С. 35–39. DOI: 10.31044/1814-4632-2022-1-35-39.
18. Черняк С. С., Бройдо В. Л., Тужилина Л. В. Разработка состава и технологии изготовления износостойких рельсов из заэвтектоидной стали // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2017. – Т. 56, № 4. – С. 197–206. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).
19. Полевой Е. В., Юнин Г. Н., Юнусов А. М., Добужская А. Б., Галицын Г. А. К вопросу износостойкости рельсов // *Сталь*. – 2019. – № 7. – С. 62–65.
20. Добужская А.Б., Галицын Г.А., Юнин Г.Н., Полевой Е.В., Юнусов А.М. Исследование влияния химического состава, микроструктуры и механических свойств на износостойкость рельсовой стали // *Сталь*. – 2020. – № 12. – С. 52–55.
21. Кормышев В. Е., Юрьев А. А., Рубанникова Ю. А., Аксёнова К. В. Распределение структурно-фазовых состояний по сечению головки рельсов при длительной эксплуатации // *Вестник СибГИУ*. – 2020. – № 4 (34). – С. 20–24.
22. Wen J., Marteau J., Bouvier S., Risbet M., Cristofari F., Secorde P. Comparison of microstructure changes induced in two pearlitic rail steels subjected to a full-scale wheel/rail contact rig test // *Wear*. – 2020. – V. 456–457. – P. 203354. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203354.

23. Hu Y., Guo L.C., Maiorino M, Liu J. P., Ding H. H., Lewis R., Meli E., Rindi A., Liu Q. Y., Wang W. J. Comparison of wear and rolling contact fatigue behaviours of bainitic and pearlitic rails under various rolling-sliding conditions // *Wear*. – 2020. – V. 460–461. – P. 203455. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203455.
24. Hu Y., Zhou L., Ding H.H., Lewis R., Liu Q.Y., Guo J., Wang W.J. Microstructure evolution of railway pearlitic wheel steels under rolling-sliding contact loading // *Tribology International*. – 2021. – V. 154. – P. 106685. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106685.
25. Zhou L., Bai W., Han Z., Wang W., Hu Yu., Ding H., Lewis R., Meli E., Liu Q., Guo J. Comparison of the damage and microstructure evolution of eutectoid and hypereutectoid rail steels under a rolling-sliding contact // *Wear*. – 2022. – V. 492–493. – P. 204233. DOI: 10.1016/j.wear.2021.204233.
26. Bai W, Zhou L., Wang P., Hu Y., Wang W., Ding H., Han Z., Xu X., Zhu M. Damage behavior of heavy-haul rail steels used from the mild conditions to harsh conditions // *Wear*. – 2022. – V. 496–497. – P. 204290. DOI: 10.1016/j.wear.2022.204290.
27. Pan R., Chen Yu., Lan H., E S., Ren R. Investigation into the microstructure evolution and damage on rail at curved tracks // *Wear*. – 2022. – V. 504–505. – P. 204420. DOI: 10.1016/j.wear.2022.204420.
28. Порфирьев М.А., Громов В.Е., Крюков Р.Е. Эволюция структурно-фазового состояния и свойств рельсов из заэвтектоидной стали при длительной эксплуатации // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 2023. – Т. 66, № 3. – С. 327–329. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-3-327-329.
29. Иванов Ю. Ф., Громов В. Е., Порфирьев М. А., Крюков Р. Е., Шляров В. В., Полевой Е. В. Эволюция тонкой структуры рельсов из заэвтектоидной стали при эксплуатации // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. – 2023. – №2. – С.63–68.
30. Wang W. J., Lewis R., Yang B., Guo L. C., Liu Q. Y., Zhu M. H. Wear and damage transitions of wheel and rail materials under various contact conditions // *Wear*. – 2016. – V. 362–363. – P. 146–152. DOI: 10.1016/j.wear.2016.05.021.
31. Pan R., Ren R., Zhao X., Chen C. Influence of microstructure evolution during the sliding wear of CL65 steel // *Wear*. – 2018. – V. 400–401. – P. 169–176. DOI: 10.1016/j.wear.2018.01.005.
32. Nguyen B.H., Al-Juboori A., Zhu H., Zhu Q., Li H., Tieu K. Formation mechanism and evolution of white etching layers on different rail grades // *International Journal of Fatigue*. 2022. – V. 163. – P. 107100. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107100.
33. Mojumder S., Mishra K., Singh K., Qiu C., Mutton P., Singh A. Effect of track curvature on the microstructure evolution and cracking in the longitudinal section of lower gauge corner flow lips formed in rails // *Engineering Failure Analysis*. – 2022. – V. 135. – P. 106177. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106177.
34. Хирш П., Хови А., Николсон П., Пэшли Д., Уэлан М. Электронная микроскопия тонких кристаллов. – М.: Мир, 1968. – 574 с.
35. Чернявский В.С. Стереология в металлведении. – М.: Металлургия, 1977. – 280 с.
36. Гольдштейн М. И., Фарбер В. М. Дисперсионное упрочнение стали. – М.: Металлургия, 1979. – 208 с.
37. Козлов Э. В., Конева Н. А. Природа упрочнения металлических материалов // *Изв. вузов. Физика (приложение)*. – 2002. – Т. 45, № 3. – С. 52–71.
38. Гуляев А. П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1977. – 647 с.
39. Тушинский Л. И., Батаев А. А., Тихомирова Л. Б. Структура перлита и конструктивная прочность стали. – Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1993. – 280 с.
40. Козлов Э. В., Глезер А. М., Конева Н. А., Попова Н. А., Курзина И. А. Основы пластической деформации наноструктурных материалов / Под ред. А. М. Глезера. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2016. – 304 с.

УДК 621.771.016:669.15–194.55:539.22:620.187

ОЦЕНКА СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ БЫВШЕГО АУСТЕНИТА В ГОРЯЧЕКАТАНОЙ СТАЛИ ПО ЕЕ ТЕКСТУРЕ ПОСЛЕ МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ

А. А. ЗИСМАН, д-р физ.-мат. наук, Т. В. КНЯЗЮК, канд. техн. наук, С. Н. ПЕТРОВ, д-р техн. наук,
М. Л. ФЕДОСЕЕВ, Н. С. НОВОСКОЛЬЦЕВ

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

Поступила в редакцию 12.10.2023

После доработки 2.11.2023

Принята к публикации 20.11.2023

Методом дифракции обратно рассеянных электронов (ДОРЭ) определены текстуры среднеуглеродистой мартенситной стали после горячей прокатки по разным режимам и последующей закалки. Для обеспечения представительности текстурного анализа сканировали относительно крупные области, вмещающие примерно по тысяче бывших зерен, в каждом из которых проводили несколько тысяч измерений. С учетом межфазного ориентационного соотношения, характерного для мартенситных сталей, по текстурам превращения оценивали текстуры высокотемпературной фазы (аустенита), что позволило различить ее деформированное и рекристаллизованное состояния, зависящие от условий прокатки. Для верификации результатов ДОРЭ текстуры мартенсита определяли независимым методом рентгеновской дифракции, а форму и размеры бывших зерен аустенита выявляли с помощью химического травления.

Ключевые слова: мартенсит, аустенит, бывшие зерна, текстура, метод дифракции обратно рассеянных электронов (ДОРЭ)

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-40-49

ЛИТЕРАТУРА

1. Metallographic techniques for the determination of the austenite grain size in medium-carbon microalloyed steels / C. Garcí'a de Andre's, M. J. Bartolome, C. Capdevila et al. // *Materials Characterization*. – 2001. – V. 46. – P. 389–398.
2. Benschoter A. O., Perricone M. J. Marshall's Reagent: Origins, Modifications, and new Applications // *Microsc. Microanal.* – 2005. – V. 11. – P. 76–77.
3. Garcí'a de Andre's C., Caballero F.G., Capdevila C., San Martin D. Revealing austenite grain boundaries by thermal etching: advantages and disadvantages // *Materials Characterization*. – 2003. – N 49. – P. 121–127.
4. Perttula J.S., Karjalainen L.P. Recrystallization in austenite measured by double compression and stress relaxation methods // *Mater. Sci. Technol.* – 1998. – N 14. – P. 626–630.
5. Bianchi J.G., Karjalainen L.P. Modeling of dynamic and metadynamic recrystallization during bar rolling of a medium carbon spring steel // *J. Mater. Proc. Technol.* – 2005. – V. 160. – P. 267–277.
6. Kniaziuk T.V., Zisman A.A. Abnormal effect of strain rate on dynamic recrystallization of austenite in medium carbon steel alloyed by boron // *Letters on Materials*. – 2022. – V. 12. – P. 71–75.
7. Brown E.L., Deardo A.J. On the origin of equiaxed austenite grains that result from the hot rolling of steel // *Metall. Trans.* – 1981. – N 12A. – P. 39–47.
8. Jonas J. J. Transformation textures associated with steel processing, in *Microstructure and Texture in Steels* / Eds: A. Haldar, S. Suwas, D. Bhattacharjee. –New York, USA: Springer, 2009. – P. 3–17.
9. Adams B. L., Wright S. I., Kunze K. Orientation imaging: The emergence of a new microscopy // *Metall. Mater. Trans.* – 1993. – A24. – P. 819–831.
10. Winkelmann A., Nolze G., Cios G., Tokarski T., Bala P. Refined calibration model for improving the orientation precision of electron backscatter diffraction maps // *Materials*. – 2020. – N 13. – Art. 3122816.
11. Khlusova E. I., Zisman A. A., Knyazyuk T. V., Novoskoltsev N. S. Effect of the rate of hot compressive deformation on kinetics of dynamic and static recrystallization of novel medium-carbon medium-alloy steel // *Met. Sci. Heat Treat.* – 2018. – V. 59. – P. 682–688.
12. Bain E. C. The nature of martensite // *Trans. AIME*. – 1924. – N 70. – P. 25–35.

13. Niessen F., Nyssönen T., Gazder A., Hielscher R. Parent grain reconstruction from partially or fully transformed microstructures in MTEX // J. Appl. Crystallogr. – 2022. – N 55. – P. 180–194.

14. Cayron C., Bour A., Logé R. Intricate morphologies of laths and blocks in low-carbon martensitic steels // Mater. Design. – 2018. – N 154. – P. 81–95.

УДК 621.791.753.5:621.785

ВЛИЯНИЕ ОТПУСКА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ, ВЫПОЛНЕННОГО АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКОЙ ПОД ФЛЮСОМ

Н. А. ЛУКЬЯНОВА, П. В. МЕЛЬНИКОВ, канд. техн. наук, В. Б. ГРИБАНОВА

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

Поступила в редакцию 30.10.2023

После доработки 14.11.2023

Принята к публикации 22.11.2023

Проведен сравнительный анализ механических свойств и микроструктуры металла шва сварных соединений высокопрочной конструкционной стали АБЗК, выполненных автоматической сваркой под флюсом с К-образной разделкой кромок с использованием проволоки марки Св-07ХНЗМД и флюса марки 48АЗ, подвергнутых термической обработке по четырем различным режимам.

Ключевые слова: высокопрочная конструкционная сталь, автоматическая сварка под флюсом, сварные соединения, термическая обработка, отпуск, снятие внутренних напряжений, структура, механические свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-50-59

ЛИТЕРАТУРА

1. Гладштейн Л. И., Литвиненко Д. А. Высокопрочная строительная сталь. – М.: Металлургия, 1972. – 240 с.
2. Теория сварочных процессов / Под ред. В. В. Фролова. – М.: Высшая школа, 1988. – 559 с.
3. Хлусова Е. И., Сыч О. В., Орлов В. В. Хладостойкие стали. Структура, свойства, технологии // Физика металлов и металловедение. – 2021. – Т. 122, № 6. – С. 621–657.
4. Никифоров Г. Д., Бобров Г. В., Никитин В. М., Дьяченко В. В. Технология и оборудование сварки плавлением. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
5. Ефименко Л. А., Прыгаев А. К., Елагина О. Ю. Металловедение и термическая обработка сварных соединений. – М.: Логос, 2007. – 456 с.
6. Большаков В.И., Стародубов К. Ф., Тылкин М. А. Термическая обработка строительной стали повышенной прочности. – М.: Металлургия, 1977. – 200 с.
7. Хорн Ф. Атлас структур сварных соединений. – М: Металлургия, 1977. – 288 с.
8. Геллер Ю. А., Рахштадт А. Г. Материаловедение. – М.: Металлургия, 1989. – 387 с.
9. Рогачев С. О., Белов В. А., Турилина В. Ю., Шплис Н. В., Никулин С. А., Высокотемпературные механические свойства металла шва сварного соединения малоуглеродистых сталей // X Евразийская научно-практическая конференция «Прочность неоднородных структур», Москва. НИТУ «МИСиС», 20–22 апреля 2021 г.
10. Скульский В. Ю., Царюк А. К., Гаврик А. Р., Нимко М. А., Стрижиус Г. Н. Выбор режимов высокотемпературного отпуска сварных соединений теплоустойчивых сталей, выполненных электродами THERMANIT MTS616 // Автоматическая сварка. – 2016. – № 9. – С. 52–55.

11. Shajan N., Arora K. S., Asati B., Sharma V., Shome M. Effects of post-weld heat treatment on the microstructure and toughness of flash butt welded high-strength low-alloy steel // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2018. – V. 49. – P. 1276–1286.

УДК 669.295'35:621.777.8

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ СОСТАВНЫХ МЕДНО-ТИТАНОВЫХ ЗАГОТОВОК НА ФОРМИРОВАНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СЛОЯ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА МАТЕРИАЛОВ

А. Н. ГАНГАЛО, канд. техн. наук, В. В. БУРХОВЕЦКИЙ

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

Поступила в редакцию 11.10.2023

После доработки 7.11.2023

Принята к публикации 13.11.2023

Методом горячего прессования с коэффициентом вытяжки $\mu = 16$ получены заготовки под волочение микропроволоки из титана Grade 4 с покрытием защитной оболочкой из меди М1 при различных температурах. Показано влияние температуры нагрева заготовок на давление прессования, конфигурацию границы раздела материалов биметалла и толщину образовавшегося интерметаллидного слоя. Проанализировано влияние давления упругого сжатия составных медно-титановых заготовок в диапазоне 350–1400 МПа на образование интерметаллида на границе раздела материалов при температуре 850°C.

Ключевые слова: горячее прессование, давление, температура, медь, титан, биметалл, интерметаллидный слой

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-60-66

ЛИТЕРАТУРА

1. Казанцев А. А., Паршиков В. В., Шемятовский К. А., Алехин А. И., Титаров Д. Л., Колпаков А. А., Осадченко С. В. Титансодержащие сетчатые эндопротезы как перспективная группа имплантатов для пластики брюшной стенки // Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова. – 2016. – № 4. – С. 86–95.
2. Бадалян А. А., Петров И. А., Чернавский А. Ф. Клинико-психологические основы формирования качества жизни при восстановлении биологического рельефа кости с помощью титанового шелка // Проблемы стоматологии. – 2018. – Т. 14, № 3. – С.56–63.
3. Казанцев А. А., Туляков С. С., Алехин А. И., Хонинов Б. В., Казакова А. В., Козлов Н. А., Батарай Б., Бабиченко И. И. Перспективы использования полифиламентного титанового шовного материала в травматологии // Русский медицинский журнал. – 2017. – Т. 25. – С. 533–538.
4. Пат RU 2146975 С1. Способ изготовления микропроволоки из труднодеформируемых материалов / Залазинский А. Г., Соколов М. В., Шабашов А. А., Новожинов В. И. – 2000.
5. Пат RU 2315674 С2. Способ изготовления микропроволоки из труднодеформируемых материалов / Колмогоров В. Л., Залазинский А. Г., Колмыков В. Л., Глазунова М. Ю. – 2008.
6. Гангало А. Н., Сенникова Л. Ф., Бурховецкий В. В., Янчев А.И. Разработка методики получения микропроволоки из титана ВТ1-0 для медицины. // ФТВД. – 2021. – Т. 31, № 2. С. 5–11.
7. Гангало А. Н., Прокофьева О. В., Бурховецкий В. В., Янчев А. И., Тютенко В. С. Анализ качества боковой поверхности титановой микропроволоки // ФТВД. – 2022. – Т. 32, № 3. – С. 108–113.
8. Bateni M. R., Szpunar J. A., Ashrafizadeh F., Zandrahimiet M. The effect of novel Ti – Cu intermetallic compound coatings on tribological properties of copper // National Tribology Conference, The annals of University «Dunărea de Jos» of GALAȚIFASCICLE VIII (2003). – P. 55–62.
9. Elrefaey A. Tillmann W. Solid state diffusion bonding of titanium to steel using a copper base alloy as interlayer // Journal of materials processing technology. – 2009. – Т. 209, №. 5. – P. 2746–2752.
10. Перлин И. Л. Теория прессования металлов. – М.: Металлургия, 1964.

11. Евстропов Д. А. Формирование структуры и свойств композиционных покрытий системы Cu–Ti на поверхности медных деталей // Дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 2016. –199 с.

12. Пат RU 2 691 656 С1. Шихта и способ получения износостойкого материала с ее использованием методом СВС / Филиппенков А. А. – 2018.

УДК 669.715:536.631

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ВИСМУТА НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА AlFe5Si10

И. Н. ГАНИЕВ¹, д-р хим. наук, Ф. ХОЛМУРОДОВ², канд. физ.-мат. наук,
А. Г. САФАРОВ², д-р техн. наук, Н. Р. НУРОВ³, У. Ш. ЯКУБОВ¹, PhD

¹Институт химии им. В. И. Никитина НАН Таджикистана, 734063 г. Душанбе, ул. Айни, 299/2, Республика Таджикистан. E-mail ganievisatullo48@mail.ru

²Физико-технический институт им. С. У. Умарова НАН Таджикистана, 734063 г. Душанбе, ул. Айни, 299/2, Республика Таджикистан,

³Таджикский технический университет им. М. С. Осими, Республика Таджикистан, 734042, г. Душанбе, проспект академиков Раджабовых, 10

Поступила в редакцию 3.02.2023

После доработки 22.11.2023

Принята к публикации 27.11.2023

В режиме «охлаждения» исследована температурная зависимость теплоемкости алюминиевого сплава AlFe5Si10, содержащего висмут. Показано, что с повышением температуры теплоемкость, энтальпия и энтропия сплава увеличиваются, а значение энергии Гиббса уменьшается. С увеличением содержания висмута в исходном сплаве теплоемкость, энтальпия и энтропия сплава AlFe5Si10 снижаются, при этом значение энергии Гиббса повышается.

Ключевые слова: алюминиевый сплав AlFe5Si10, теплоемкость, режим «охлаждения», коэффициент теплоотдачи, энтальпия, энтропия, энергия Гиббса

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-67-78

ЛИТЕРАТУРА

1. Taylor J. A. The effect of Iron in Al–Si Casting Alloys // 35th Australian Foundry Institute National Conference. Adelaide. Australia. 2004. – P. 148–157.

2. Kral M. V., Nakashima P. N. H., Mitchell D. R. G. Electron microscope studies of Al–Fe–Si intermetallics in an Al–11 percent alloy // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2006. – V. 37 (6). – P. 1987–1997.

3. Ravi C., Wolverton C. Comparison of thermodynamic databases for 3XX and 6XXX aluminum alloys // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2005. – V. 36. – P. 2013–2023.

4. Belov N. A., Aksenov A. A. Iron in Aluminium Alloys. Impurity and Alloying Element. – London – N. Y., 2002. – P. 3–7.

5. Белов Н. А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов. – М.: МИСиС, 2010.

6. Dominik B., Stefan P., Marc H., Werner F., Peter J.U., Mathias G., Heinz W. H. Secondary Al–Si–Mg High-pressure Die Casting Alloys with Enhanced Ductility // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2015. – V. 46. – P. 1035–1045.

7. Мальцев М. В. Модифицирование структуры металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 246 с.

8. Golovko O., Mamuzić I., Grydino O. Method for Pocket Die Design on the Basis of Numerical Investigation of Aluminium Extrusion Process // Metalurgija. – 2006. – V. 45, N 3. – P. 155–161.

9. Markoli B., Spaić S., Zupanić F. Aluminium. – 2004. – V. 80, N ½. – P. 84–88.

10. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 624 с.

© 2024

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

11. Kaufman J. G., Rooy E. L. Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications. – Materials Park: ASM International, 2004.
12. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справ. изд. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
13. Ганиев И. Н., Якубов У. Ш., Хакимов А. Х. Свойства алюминиевого сплава АЖ5К10 с щелочноземельными металлами. – Душанбе: Дониш, 2021 – 155 с.
14. Иванцов Г. П. Нагрев металла (теория и методы расчета). – Свердловск – М.: Металлургиздат, 1948. – 158 с.
15. Багницкий В. Е. Обратные связи в физических явлениях. – Изд. дом. LAP (Lambert Acad. Publ.), 2014. – 167 с.
16. Киров С. А., Козлов А. В., Салецкий А. М., Харабадзе Д. Э. Измерение теплоемкости и теплоты плавления методом охлаждения. Учебное пособие – М.: ООП Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, 2012. – 52 с.
17. Тарсин А. В., Костерин К. С. Определение теплоемкости металлов методом охлаждения. Лабораторные занятия – Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2014. – 34 с.
18. Рогачев Н. М., Гусева С. И. Определение удельной теплоемкости твердых тел. – Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева, 2012.
19. Старк Б. В. Явления нагрева в муфельных печах // Журн. русского металлургического общества. – 1926. – № 2. – С. 184–198.
20. Умаров М. А. Ганиев И. Н. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций свинца марки С2 // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 23–29.
21. Ганиев И. Н., Сафаров А. Г., Одинаев Ф. Р., Якубов У. Ш., Кабутов К. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций сплава АЖ 4.5 с оловом // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. – 2019. – № 1. – С. 50–58.
22. Ганиев, И. Н. Сафаров А. Г., Одинаев Ф. Р., Якубов У. Ш., Кабутов К. Температурная зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций сплава АЖ 4.5 с висмутом // Металлы. – 2019. – № 1. – С. 21–29.
23. Ganiev I. N., Safarov A. G., Odinaev F. R., Yakubov U. Sh., Kabutov K. Temperature Dependence of the Specific Heat and the Changes in the Thermodynamic Functions of a Bismuth-Bearing AZh4.5 Alloy // Russian Metallurgy (Metally). – 2020. – V. 1. – P. 17–24.
24. Ganiev I. N., Nazarova M. T., Yakubov U. Sh., Safarov A. G., Kurbonova M. Z. Influence of Lithium on Specific Heat Capacity and Changes in the Thermodynamic Functions of Aluminum Alloy AB1 // High Temperature. – 2020. – V. 58, N 1. – P. 58–63.
25. Глазов В. М., Пашинкин А. С. Теплофизические свойства (теплоемкость и термическое расширение) монокристаллического кремния // ТВТ. – 2001. – Т. 39, № 3. – С. 443–449.
26. Глазов В. М., Пашинкин А. С., Михайлова М. С., Тимошина Г. Г. Аномальное изменение теплоемкости при нагревании монокристаллов кремния в связи с протеканием структурных превращений // Докл. РАН. – 1997. – Т. 334, № 1. – С. 59.
27. Глазов В. М., Михайлова М. С. Изменение характеристик прочности межатомной связи и характера температурной зависимости теплоемкости при легировании кремния ниобием // Докл. РАН. – 1998. – Т. 360, № 2. – С. 209.
28. Глазов В. М., Михайлова М. С. Характеристики межатомной связи и температурная зависимость теплоемкости кремния, легированного ниобием // ЖФХ. – 1998. – Т. 72, № 11. – С. 1931.
29. Девярых Г. Г., Гусев А. В., Гибин Л. М. и др. Теплоемкость высокочистого кремния // Доклады РАН. – 1997. – Т. 353, № 6. – С. 768.
30. Девярых Г. Г., Гусев А. В., Гибин Л. М. и др. Теплоемкость высокочистого кремния // Неорг. материалы. – 1997. – Т. 33, № 12. – С. 1425.
31. Тимофеев О. В. Теплоемкость высокочистого кремния // Автореф. дис. ... канд. хим. наук. Нижний Новгород: ИХВВ РАН. 1999. – 22 с.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОНЫ СПЛАВЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО СПЛАВА
РЕЛИТ – МАРГАНЦЕВЫЙ МЕЛЬХИОР ПРИ НАПЛАВКЕ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ПЕЧНЫМ СПОСОБОМ**

Д. А. ЗАРЕЧЕНСКИЙ, канд. техн. наук, В. В. ВОРОБЬЕВ, В. А. ШЕВЧЕНКО

ФГБОУ ВО «Приазовский государственный технический университет»,
Мариуполь, ул. Университетская, д. 7. E-mail: office-pstu@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.09.2023

После доработки 20.10.2023

Принята к публикации 21.10.2023

При печном способе наплавки получают композиционный сплав, состоящий из упрочняющих частиц карбидов вольфрама и мельхиора, которые после выдержки при температуре плавления сплава-связки образуют на упрочняемой поверхности износостойкий слой. Установлено, что в зоне соединения композиционного сплава релит – мельхиор со стальной поверхностью детали при отсутствии условий, гарантирующих автовакуумную очистку поверхности от оксидов, образуется прослойка с несовершенной кристаллической структурой, что приводит к отслоению наплавленного сплава. Экспериментально показано, что применение дополнительного контроля на газонепроницаемость наплавочного пространства позволяет повысить качество наплавленной поверхности при упрочнении печным способом деталей металлургического оборудования композиционным сплавом релит–мельхиор.

Ключевые слова: композиционный сплав релит – мельхиор, автовакуумная пайка, печная наплавка, диффузионная зона сплавления, контроль герметичности

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-79-85

ЛИТЕРАТУРА

1. Суховая Е. В. Квазикристаллические сплавы-наполнители для композиционных слоев, полученных методами печной наплавки // Автоматическая сварка. – 2014. – № 1. – С. 24–28.
2. Данилов Л. И., Ровенских Ф. М. Наплавка деталей засыпных устройств доменных печей композиционным сплавом // Металлург. – 1979. – № 1. – С. 12–15.
3. Быстров В. А. Условия эксплуатации и высокотемпературного износа засыпного устройства доменной печи // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2013. – № 10. – С. 35–39.
4. Воробьев В. В., Малинов В. Л. Сплавы и материалы для наплавки контактных поверхностей уравнительных клапанов // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2010. – № 2(19). – С. 64–68.
5. Melnichenko A. S., Kudrya A. V., Akhmedova T. S., Sokolovskaya E. A., Melnichenko A. S. Predicting the risk of destruction of hard-facing alloys based on the morphology of their structure // Metallurgist. – 2018. – V. 60, N 11–12. – P. 1130–1134.
6. Кантер А. Вакуумная пайка – залог качественного паянного соединения // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – № 6. – С. 30–33.
7. Кудинов В. Д., Филимонов Б. В., Степанов Б. В., Саламатин В. Е., Дудко Д. А., Максимович Б. И., Нетеса Н. В. Наплавка композиционных сплавов релит + марганцевый мельхиор с использованием автовакуумного эффекта // Сварочное производство. – 1977. – № 8. – С. 21–23.
8. Пат. на полезную модель 95100239 RU, МПК (1995.01) B23K9/04. Способ износостойкой наплавки / А. В. Гребенюков; Н. М. Скороход; В. А. Соловьев; Р. Б. Тракшинский. – Заявл. 1995.01.10; опубл. 1996.11.10.
9. Бохоров И. О., Карабанов В. В. Пайка крупных массивных конструкций // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2015. – № 2. – С. 25–38.
10. Радзиевский В. Н., Гарцунов Ю. Ф. Газовыделение из железных порошков при пайке по широкому зазору в процессе нагрева в вакууме // Сварочное производство. – 1991. – № 12. – С. 15–17.

11. Рымарь В. И., Радзиевский В. Н. Высокотемпературная автовакуумная пайка с использованием сорбентов // Сварочное производство. – 1978. – № 2. – С. 12–13.
12. Жудра А. П. Наплавочные материалы на основе карбидов вольфрама // Автоматическая сварка. – 2014. – № 6–7. – С. 69–75.
13. Зареченский Д. А., Воробьев В. В., Чигарев В. В. Ремонт дефектов типа «скол» композиционного сплава релит – мельхиор деталей металлургического оборудования // Захист металургійних машин від поломок: Збірник наукових праць. – Маріуполь: ПДТУ, 2006. – № 9. – С. 87–90.
14. Бодрова Л. Е., Гойда Э. Ю., Мельчаков С. Ю., Шубин А. Б., Федорова О. М. Взаимодействие карбидов WC и Cr₃C₂ при термообработке сплавов WC – Cr₃C₂ – Cu // Перспективные материалы. – 2021. – № 12. – С. 59–68.
15. Наумова Е. Н., Калинин А. Ю., Кострижицкий А. И. Пассивные пленки на поверхности конструкционных материалов и их защитные свойства // Холодильна техніка і технологія. – 2001. – № 5 (74). – С. 46–51.
16. Файнштейн А. И., Литовченко Н. А. Изменение свойств оксидной пленки на железе в процессе роста // Журнал физической химии. – 1980. – № 3. – С. 801–803.
17. Рымарь В. И., Лоцманов С. Н., Радзиевский В. Н. Особенности смачивания сталей припоями при нагреве в вакууме // Сварочное производство. – 1975. – № 5. – С. 35–36.
18. Кучук-Яценко С. И., Харченко Г. К., Фальченко Ю. В., Никитин А. С., Григоренко С. Г. Самоочистка от оксидов стыкуемых поверхностей при сварке в твердой фазе с нагревом (аналитический обзор) // Автоматическая сварка. – 1998. – № 2. – С. 16–23.
19. Матвеев Ю. М., Ощепков Ю. П., Зубарева В. А., Кузнецов Э. М., Закирова Ф. Н., Дегтярева В. Ф. О природе светлой полосы сварного шва труб, выполненного печной сваркой // Сварочное производство. – 1970. – № 8. – С. 9–10.
20. Пат. на корисну модель 39659 UA, МПК (2009) B22D 19/08. Спосіб наплавлення деталей / Д. О. Зареченський, В. В. Воробйов. – u200810437; заявл. 15.08.2008; опубл. 10.03.2009.

УДК 669.295:621.762.4

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И МИКРОСТРУКТУРЫ ПОРОШКОВ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ

В. П. ЛЕОНОВ, д-р техн. наук, Ю. Ю. МАЛИНКИНА, канд. техн. наук, С. Д. ДРУГАЧУК,
И. М. ХАЧАТУРЯН, Е. В. ЧУДАКОВ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 3.10.2023

После доработки 11.10.2023

Принята к публикации 13.10.2023

Представлены результаты исследования технологических свойств порошков из титановых псевдо- α - и псевдо- β - сплавов. Проведен сравнительный анализ характеристик порошковых материалов, полученных методом центробежного распыления. Определен гранулометрический состав порошков, а также применен расчет пространственной упаковки частиц в рамках модели твердых сфер для различных фракционных составов. Для сравнения микроструктуры и механических свойств методом горячего изостатического прессования по выбранным режимам были получены тестовые образцы из титановых псевдо- α - и псевдо- β -сплавов.

Ключевые слова: титановые сплавы, горячее изостатическое прессование, порошки титановых сплавов, технологические свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-86-98

ЛИТЕРАТУРА

© 2024

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

1. Падалко А. Г. Практика горячего изостатического прессования неорганических материалов. – М.: ИКЦ Академкнига, 2007.
2. Froes F. H., Suryanarayana C. Powder processing of titanium alloys / A. Bose, R.M. German, A. Lawley (Eds.). – Rev. Particulate Materials, MPIF 1. – NJ, Princeton, 1993. – P. 233–275.
3. Peebles R.E., Kelto C.A. Manufacturing Methods for the Production of High Quality Low Cost Titanium Alloy Powders // Powder Metallurgy of Titanium Alloys / Ed. by F.H. Froes and J.E. Smugeresky. – The Metallurgical Society of AIME, Warrendale, Pa., 1980.
4. Кошелев В. Я., Гарибов Г. С., Сухов Д. И. Основные закономерности процесса получения гранул жаропрочных никелевых сплавов методом плазменного распыления вращающейся заготовки // Технология легких сплавов. – 2015. – № 3. – С. 97–103.
5. Востриков А. В., Сухов Д. И. Производство гранул методом PREP для аддитивных технологий – текущий статус и перспективы развития // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2016. – № 8 (44). Ст. 03.
6. Samarov V., Haykin R., Nepomnyatschy V., Koshelev V., Khomyakov E. Out gassing of powders before HIP: problems and solutions, in: Proceedings of the International Conference HIP 2002, VILS, Moscow, May 20–22, 2002.
7. European Powder Metallurgy Association. URL: www.epma.com (reference date 19/02/2024).
8. Агеев С. В., Гиршов В. Л. Горячее изостатическое прессование в порошковой металлургии // Металлообработка. – 2015. – № 4 (88). – С. 56–60.
9. Александров А. А., Александров А. В., Демченков Г. Г., Кузнецов С. Ю., Осипов С. А. Использование металлургии гранул титановых сплавов для получения новых материалов и изделий с повышенными характеристиками // Титан. – 2017. – № 1. – С. 28–33.
10. Kansai A.R., Torquato S., Stillinger F.H. Computer generation of dense polydisperse sphere packings // J. Chem. Phys. – 2002. – V. 117. – P. 8212.
11. Borkovec M., De Paris W., Peikert R. The fractal dimension of the appolonian sphere packing // Fractals. – 1994. – V. 2(4). – P. 521.
12. Ушаков С.С., Кудрявцев А.С., Карасев Э.А., Береславский А.Л., Мачишина Л.А. Металлургические аспекты технологии производства крупногабаритных слитков титановых сплавов // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 3 (59). – С. 96–106.
13. Козлова И. Р., Чудаков Е. В., Третьякова Н. В., Маркова Ю. М., Васильева Е. А. Влияние термической обработки на формирование структуры и уровень механических свойств высоколегированного титанового сплава // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 4 (100). – С. 28–39.
14. Каблов Е. Н., Евгенов А. Г., Рыльников В. С., Афанасьев-Ходыкин А. Н. Исследование мелкодисперсных порошков припоев для диффузионной вакуумной пайки, полученных методом атомизации расплава // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. – 2011. – № SP2. – С. 79–87.
15. Samarov V., Seliverstov D., Raissou G., Goloveshkin V. Physical Principles of Shape and Densification Control during HIP // Proceedings of the 2011 International Conference on Hot Isostatic Pressing, Kobe, Japan, 2011.
16. Глазунов С. Г., Борзцовская К. М. Порошковая металлургия титановых сплавов. – М.: Металлургия, 1989. – 136 с.

УДК 666.792.32'233

АЛМАЗОКАРБИДОКРЕМНИЕВЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ АКК «СКЕЛЕТОН»

С. К. ГОРДЕЕВ, д-р техн. наук

АО «Центральный научно-исследовательский институт материалов имени Д. И. Менделеева»,
191014, Санкт-Петербург, Парадная ул., д.8, info@cniim.uvz.ru

Поступила в редакцию 18.09.2023
После доработки 5.12.2023

Принята к публикации 8.12.2023

Приведен обзор поисковых и прикладных исследований, выполненных в России начиная с 1990-х годов, в области алмазкарбидокремниевых композиционных материалов. Создан новый класс изотропных керамических материалов – алмазкарбидокремниевые композиты, получившие наименование АКК «Скелетон». Обсуждены физические, механические, теплофизические и функциональные свойства материалов в зависимости от их состава. Показано, что в исследованных материалах сочетаются одновременно механические, теплофизические и функциональные свойства на уровне, не достигнутом в других материалах, что позволяет применять материал «АКК «Скелетон» в различных областях техники.

Ключевые слова: алмазкарбидокремниевые композиционные материалы, АКК «Скелетон», свойства, обзор исследований

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-99-116

ЛИТЕРАТУРА

1. Шевченко В. Я., Ковальчук М. В., Орыщенко А. С. Синтез нового класса материалов с регулярной (периодической) взаимосвязанной микроструктурой // Физика и химия стекла. – 2020. – Т. 46, № 1. – С. 3–11.
2. Перевислов С. Н., Шевченко В. Я. Реакционно-диффузионный механизм синтеза в системе алмаз – карбид кремния // Сб. материалов 6-го междисциплинарного научн. форума с междунар. участием «Новые материалы и перспективные технологии», Москва, 23–27.11.2020. Т. 1. – С. 200–203.
3. Шевченко В. Я., Ковальчук М. В., Орыщенко А. С., Перевислов С. Н. Новые химические технологии на основе реакционно-диффузионных процессов Тьюринга // Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах. – 2021. – Т. 496. – С. 25–29.
4. Шевченко В. Я., Перевислов С. Н. Реакционно-диффузионный механизм синтеза в системе алмаз – карбид кремния // Журнал неорганической химии. – 2021. – Т. 66, № 8. – С. 1107–1114.
5. Шевченко В. Я., Сильников М. В., Долгин А. С., Сычев М. М., Перевислов С. Н., Михайлин А. И., Сильников Н. М. Исследование защитных свойств нового керамического материала «Идеал» // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2021. – Вып. 119. – С. 87–96.
6. Шевченко В. Я., Сильников М. В. Непробиваемый «Идеал» // Защита и безопасность. – 2022. – № 3. – С. 24–25.
7. Шевченко В. Я., Перевислов С. Н. Микроструктура и свойства композиционных материалов алмаз – карбид кремния // Новые огнеупоры. – 2021. – № 9. – С. 48–54.
8. Gordeev S. K. Advanced composite materials on the diamond base // Diamond Based Composite Materials and Related Materials. – NATO ASI, Ser. 3, Kluwer Acad. pub. – 1997. – V. 38. – P. 1–11.
9. Ekstrom T., Gordeev S. New carbide composites with extraordinary properties // Proceedings of the 2nd Int. Symp. On the science of engineering ceramics II, 6–9 Sept. 1998, Osaka, Japan. – P. 75–79.
10. Larsson P., Axen N., Ekstrom T., Gordeev S., Hogmark S. Wear of new type of diamond composites // International Journal of Refractory Materials and Hard Metals. – 1999. – V. 7. – P. 453–460.
11. Gordeev S., Zhukov S., Danchukova L., Ekstrom T., Zheng J. SiC-Skeleton cemented diamond – novel engineering material with unique properties // Ceramic Engineering and Science Proceedings. – 2000. – V. 21, is. 3. – P. 753–760.
12. Гордеев С. К., Жуков С. Г., Данчукова Л. В., Экстрем Т. Особенности получения композиционных материалов алмаз – карбид кремния – кремний при низких давлениях // Неорганические материалы. – 2001. – Т. 37, № 6. – С. 691–696.
13. Гордеев С. К., Экстрем Т. Новое применение алмаза: алмазные конструкционные материалы // Материалы междунар. конф. «Сверхтвердые инструментальные материалы на рубеже тысячелетий: получение, свойства, применения». Киев, 4–6 июля 2001. – С. 66–68.
14. Жуков С. Г., Бологов П. И., Химач О. В., Гордеев С. К., Экстрем Т. Стойкость материала «Скелетон-Д» в условиях абразивного износа // Материалы междунар. конф. «Сверхтвердые инструментальные материалы на рубеже тысячелетий: получение, свойства, применения». Киев, 4–6 июля 2001. – С. 181–183.

15. Гордеев С. К. Композиты алмаз – карбид кремния – новые сверхтвердые конструкционные материалы для машиностроения // Вопросы материаловедения. – 2001. – № 3 (27). – С. 31–40.
16. Гордеев С. К. Новые углеродные и карбидные композиционные материалы: получение, свойства, перспективы применения // ЦНИИ Материалов – 90 лет в материаловедении. – СПб., 2002. – С. 45–62.
17. Гордеев С. К., Жуков С. Г., Данчукова Л. В. Новые возможности применения износостойких алмазных композиционных материалов // Инструментальный світ. – 2003. – № 2. – С. 4–6.
18. Гордеев С. К. Алмазные композиционные конструкционные материалы // Тр. междунар. конф. «Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов», 27–30 августа 2003. – М.: Знание, 2004. – С. 37–41.
19. Gordeev S., Guglin D., Danchukova L., Zhukov S. Erosion resistance of “SiC-skeleton cemented diamond materials” // Proc. 2nd Int. Conf. “Materials and coatings for extreme performances”, 16–20 Sept. 2002, Crimea, Ukraine. – P. 540–541.
20. Gordeev S. Diamond / SiC composites produced at low pressure: structure, properties, prospects of application // Proc. of NATO ARW “Innovative superhard materials and sustainable coatings” Kiev, Ukraine, 12–15 May 2004. – P. 23.
21. Гордеев С. К., Жуков С. Г., Новиков Н. В., Никитин Ю. И., Полторацкий В. Г. Получение и исследование зерен композиционного материала алмаз – карбид кремния // Сверхтвердые материалы. – 2005. – № 2. – С. 9–14.
22. Гордеев С. К., Жуков С. Г., Корчагина С. Б., Каримбаев Т. Д., Петров Ю. А., Тарасов С. А. Алмазные композиционные материалы для конструкционных применений // Сб. тез. 2-й Междунар. науч.-техн. конф. «Авиадвигатели ХХ1 века», ЦИАМ, Москва, 6–9.12, 2005 г. Т. 2. – С. 283–286.
23. Гордеев С. К. Композиционные материалы алмаз / карбид кремния: структура, свойства, перспективы применения // Материалы докл. 7-й междунар. конф. «Новые материалы и технологии», Минск, 16–17 мая 2006 г. – С. 142–143.
24. Попович А. Ф., Ральченко В. Г., Гордеев С. К., Корчагина С. Б. Исследование теплопроводности поликристаллических алмазных пленок и композитов алмаз – карбид кремния лазерным флэш-методом // Нелинейный мир. – 2008. – № 4. – С. 275–276.
25. Гордеев С. К., Корчагина С. Б. Высокотеплопроводные композиционные материалы алмаз – карбид кремния для теплоотводов электронных приборов и блоков СВЧ-техники // Тр. 19-й междунар. крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 14–18.09.2009.
26. Гордеев С. К., Заричняк Ю. П., Корчагина С. Б., Ральченко В. Г., Попович А. Ф. Керамика с теплопроводностью выше, чем у меди – миф или реальность? // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ», 30.11–2.12.2010, Санкт-Петербург. – С. 39.
27. Каримбаев Т. Д., Мезенцев М. А., Алферов А. И., Гордеев С. К. Керамические тела качения перспективных шарикоподшипников: материал, технология изготовления и механическая обработка, расчеты, испытания // Композиты и наноструктуры. – 2010. – № 2. – С. 12–27.
28. Каримбаев Т. Д., Мезенцев М. А., Алферов А. И., Гордеев С. К. Исследование керамических тел качения перспективных шарикоподшипников // Тр. 3-й междунар. науч.-техн. конф. «Авиадвигатели ХХ1 века», Москва. 30.11–3.12.2010.
29. Витязь П. А., Ильющенко А. Ф., Баран А. А., Судник Л. В., Барай С. Г., Шевченко А. А., Ковалевский В. Н., Гордеев С. К. Сверхтвердые и керамические материалы и изделия из них // 50 лет порошковой металлургии Беларуси. История, достижения, перспективы. – Минск, 2010. – С. 365–422.
30. Катаев С. А., Сидоров В. А., Гордеев С. К. Алмаз – карбидный композиционный материал «Скелетон» для теплоотводов в изделиях электронной техники // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2011. – № 3. – С. 60–64.
31. Gordeev S. Diamond composites for electronics and biotechnologies // Proc. of symposium «Nano and giga challenges in electronics, photonics and renewable technologies», Moscow, 12–15.09.2011. – P. 84.

32. Гордеев С. К., Корчагина С. Б., Латышев Д. Ю., Лепеш Г. В. Применение высокомолекулярных керамических композиционных материалов для перспективных оптоэлектронных устройств. // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2012. – Т. 1, № 19. – С. 36–41.
33. Гольдштейн Р. В., Гордеев С. К., Ермолаев В. А., Корчагина С. Б., Устинов К. Б. Моделирование упругих свойств композитов на основе алмаза и карбида кремния // Препринт № 1079. – М.: Институт проблем механики им. А.И. Ильющенского РАН, 2014. – 10 с.
34. Гордеев С. К., Корчагина С. Б., Каримбаев Т. Д., Мезенцев М. А. Алмазкарбидокремниевый композит «Скелетон»: структура, свойства, перспективы применения в авиационном двигателестроении // Тез. докл. конф. «Авиадвигатели XXI век», Москва, 24–27.11.2015.
35. Гордеев С. К., Корчагина С. Б. Композиционные материалы алмаз – карбид кремния для теплопроводов электронной техники // Сб. тр. «Актуальные проблемы технологии производства современных керамических материалов». – СПб.: Изд-во Политехнического ин-та, 2015. – С. 71–83.
36. Гордеев С. К., Ежов Ю. А., Каримбаев Т. Д., Корчагин С. Б., Мезенцев М. А. Дисперсно-упрочненные композиции алмаз – карбид кремния – новые материалы для машиностроения // Композиты и наноструктуры. – 2015. – Т.7, № 2. – С. 2–12.
37. Шаболдо О. П., Гордеев С. К., Вихман В. Б., Трубин Д. А. Материалы и технологии разработки АО «ЦНИИМ» для изделий авиационной и космической техники // Материалы V Всероссийской научно-технической конференции «Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники», Москва, 2021. – С. 8–22.
38. Гордеев С. К., Корчагина С. Б., Запевалов В. Е., Паршин В. В., Серов Е. А. Алмазкарбидокремниевый композит в качестве эффективного поглотителя микроволн // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2021. – Т. 1. – Т. 30–34.
39. Зорина М. В., Михайленко М. С., Пестов А. Е., Торопов М. Н., Чернышев А. К., Чхало Н. И., Гордеев С. К., Виткин В. В. Алмазкарбидокремниевый композит «Скелетон» как перспективный материал для подложек рентгенооптических элементов // Журнал технической физики. – 2022. – Т. 92, вып. 8. – С. 1238–1242.
40. Запевалов В. Е., Паршин В. В., Серов Е. А. Корчагина С. Б., Гордеев С. К. Алмазкарбидокремниевый композит – перспективный материал для микроэлектроники и электроники больших мощностей // Изв вузов: Радиофизика. – 2022. – Т. 65, № 5–6. – С. 475–483.
41. Воронин Г. А., Осипов А. С. Механизм формирования структуры и физико-механические свойства композита алмаз – карбид кремния // Поликристаллические материалы на основе синтетического алмаза и кубического нитрида бора. – Киев: Наукова думка, 1990. – С. 31–34.
42. Курдюмов А. В., Пилянкевич А. Н. Фазовые превращения в углероде и нитриде бора. – Киев: Наукова думка, 1979. – 188 с.
43. Гриневич А. В., Лавров А. В. Оценка баллистических характеристик керамических материалов – Труды ВИАМ. – 2018. – № 3 (63). – С. 96–102.
44. Технические условия ТУ 23.91.11.190-050-07529945–2021. Алмазкарбидокремниевый композит АКК «Скелетон»®.
45. Технические условия ТУ 23.91.11.190-039-07529945–2018. Детали из алмазкарбидокремниевый композита АКК «Скелетон».

УДК 621.762.5:669.14:539.217.1

ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОРОШКОВ СТАЛЕЙ И ПРЕЦИЗИОННЫХ СПЛАВОВ И РЕЖИМОВ ИХ СПЛАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ СЛС НА ПОРИСТОСТЬ

А. С. ЖУКОВ, П. А. КУЗНЕЦОВ, Д-Р ТЕХН. НАУК

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

Поступила в редакцию 11.10.2023

После доработки 20.10.2023

Принята к публикации 24.10.2023

© 2024

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

Приведены результаты экспериментального исследования металлических порошковых материалов различных марок и классов (нержавеющие стали, прецизионные магнитомягкие и магнитотвердые сплавы). Оценено влияние на плотность получаемого СЛС-материала таких параметров, как гранулометрический состав, текучесть и насыпная плотность. Исследовано влияние режимов сплавления на пористость аддитивных образцов.

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление, металлический порошок, частица, смесь, газовая атомизация

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-117-126

ЛИТЕРАТУРА

1. Vock S., Klöden B., Kirchner A., Weißgärber T., Kieback B. Powders for Powder Bed Fusion: a Review // *Progress in Additive Manufacturing*. – 2019. – V. 4. – P. 383–397.
2. Katz-Demyanetz A., Popov V.V.-jr., Kovalevsky A., Safranchik D. and Koptug A. Powder-bed Additive Manufacturing for Aerospace Application: Techniques, Metallic and Metal/Ceramic Composite Materials and Trends // *Manufacturing Rev.* – 2019. – V. 6. – P. 1–13.
3. Olakanmi E. O. Selective Laser Sintering / Melting (SLS/SLM) of Pure Al, Al–Mg, and Al–Si Powders: Effect of Processing Conditions and Powder Properties // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2013. – V. 213, Is. 8. – P. 1387–1405.
4. Boisselier D., Sankaré S. Influence of Powder Characteristics in Laser Direct Metal Deposition of SS316L for Metallic Parts Manufacturing // *Physics Procedia*. – 2012. – V. 39. – P. 455–463.
5. Simchi A. The Role of Particle Size on the Laser Sintering of Iron Powder // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 2004. – V. 35. – P. 937–948.
6. Sedlak J., Rican D., Piska M., Rozkosny L. Study of Materials Produced by Powder Metallurgy Using Classical and Modern Additive Laser Technology // *Procedia Engineering*. – 2015. – V. 100. – P. 1232–1241.
7. Herderick E. D. Additive Manufacturing in the Minerals, Metals, and Materials Community: Past, Present, and Exciting Future // *JOM*. – 2016. – V. 68. – P. 721–723.
8. Шишковский И. В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий. – М.: Физматлит, 2009. – 419 с.
9. Hanzl P., Zetek M., Bakša T., Kroupa T. The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of SLM Parts // *Procedia Engineering*. – 2015. – V. 100. – P. 1405-1413.
10. Рудской А. И., Волков К. Н., Кондратьев С. Ю., Соколов Ю. А. Физические процессы и технологии получения металлических порошков из расплава. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 610 с.
11. ГОСТ 20899–98. Порошки металлические. Определение текучести с помощью калиброванной воронки (прибора Холла). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
12. ГОСТ 19440–94. Порошки металлические. насыпной плотности. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1996.
13. Zhukov A., Deev A., Kuznetsov P. Effect of Alloying on the 316L and 321 Steels Samples Obtained by Selective Laser Melting // *Physics Procedia*. – 2017. – V. 89. – P. 172–178.

14. Жуков А. С., Шакиров И. В., Маркова Ю. М., Анисимов Д. М. Выбор режимов селективного сплавления порошков сталей различных марок // Динамика систем, механизмов и машин. – 2021. – Т. 9, № 2. – С. 9–14.

УДК 666.7: 620.178.7

ОБЗОР КРИТЕРИЕВ И МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ УДАРНЫХ НАГРУЗОК

В. Я. ШЕВЧЕНКО¹, акад. РАН, А. С. ДОЛГИН¹, д-р техн. наук, М. М. СЫЧЕВ^{1, 2, 3}, С. В. БАЛАБАНОВ¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт» — Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН, 199034, Санкт-Петербург, Биржевой проезд, 6

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

³ Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 24, 26/49

Керамика нашла широкое применение в качестве материала для защиты от воздействия ударных нагрузок благодаря механическим свойствам и плотности, обеспечивающим высокую удельную прочность преград. Основная функция преград, заключается в предотвращении разрушения конструкции защищаемого объекта. Выбор конкретной керамики для преград зависит от массы, способности поглощать энергию удара, устойчивости к множественным ударам и т. д. Приведен обзор критериев и методов оценки свойств керамических материалов, предназначенных для защиты от воздействия ударных нагрузок. Существующие критерии отбора можно разделить на две группы: фундаментальные, которые основаны на физических свойствах материала, и критерии оценки служебных свойств. Также существуют экспериментальные методы оценки качества преград. Показано, что критерий В. Я. Шевченко является универсальным, учитывающим свойства проникающего тела (ударника) и позволяющим построить надежный представительный ряд для большинства керамических материалов при хрупком разрушении.

Ключевые слова: керамические материалы, ударное воздействие, служебные свойства, критерии оценки

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-127-142

ЛИТЕРАТУРА

1. Grigoryan V. A. Materialy i zashchitnye struktury dlya lokal'nogo i individual'nogo bronirovaniya. [Materials and protective structures for local and individual booking] // Izd. Radio Soft. – 2008. – 406 p.
2. Шевченко В. Я., Ковальчук М. В., Орыщенко А. С. Синтез нового класса материалов с регулярной (периодической) взаимосвязанной микроструктурой // Физика и химия стекла. – 2020. – Т. 46, № 1. – С. 3–11.
3. Brandon D. G. Armor. Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials. – Pergamon, 1991. – P. 22–25.
4. Yadav R., Naebe M., Wang X., Kandasubramanian B. Body armour materials: from steel to contemporary biomimetic systems // RSC Adv. – 2016. – N 6. – Art. 115145–115174. <https://doi.org/10.1039/c6ra24016j>.
5. Medvedovski E. Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1: Ceram. Int. – 2010. – N 36. – Art. 2103–2115. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.05.021>.
6. Medvedovski E. Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 2: Ceram. Int. – 2010. – N 36. – Art. 2117–2127. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.05.022>.
7. Tepeduzu B., Karakuzu R. Ballistic performance of ceramic/composite structures // Ceram. Int. 45 (2019) 1651–1660. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.042>.
8. Rosenberg Z., Dekel E. Terminal Ballistics. – Springer Berlin Heidelberg, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25305-8>.

9. Popa I.-D., Dobrița F. Considerations on Dop (depth of penetration) Test for Evaluation of Ceramics Materials Used in Ballistic Protection // ACTA Univ. Cibiniensis. – 2018. – V. 69. – P. 162–166. <https://doi.org/10.1515/aucts-2017-0021> (повтор № 27)
10. Ashby M. F., Cebon D. Materials selection in mechanical design // Le Journal de Physique IV. – 1993. – V. 3, N C7. – P. 1–9.
11. Viechnicki D. J., Slavin M. J., Kliman M. I. Development and current status of armor ceramics // Am. Ceram. Soc. Bul. – 1991. – V.70, N 6. – P. 1035–1039.
12. Шевченко В. Я., Изотов А. Д., Лазарев В. Б., Жаворонков Н. М. Энергия диссоциации и предельная упругая деформация в модели двухчастичного взаимодействия // Неорганические материалы. – 1984. – Т. 20, № 6. – С. 1047–1052.
13. Шевченко В. Я., Орыщенко А. С., Перевислов С. Н., Сильников М. В. О критериях выбора материалов преград механическому динамическому нагружению // Физика и химия стекла. – 2021. – Т. 47, № 4. – С. 365–375.
14. Физико-химические свойства окислов: Справочник / Г. В. Самсонов и др. – М.: Металлургия, 1978. – 471 с.
15. Hallam D., Heaton A., James B., Smith P., Yeomans J. The correlation of indentation behaviour with ballistic performance for spark plasma sintered armour ceramics // J. Eur. Ceram. Soc. – 2015. – Art. 352243–2252. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.11.035>.
16. Karandikar P. G., Evans G., Wong S., Aghajanian M. K., Sennett M. – A Journal Pre-proof Review of Ceramics for Armor Application, 2009. – P. 163–175. <https://doi.org/10.1002/9780470456286.ch16>.
17. Shaktivesh, Nair N. S., Sessa Kumar Ch.V., Naik N. K. Ballistic impact performance of composite targets // Materials and Design. – 2013. – V. 51. – P. 833–846.
18. Гаршин А. П., Гропянов В. М., Зайцев Г. П., Семенов С. С. Керамика для машиностроения. – М.: Наука, 2003.
19. Woodward R.L., Gooch jr W.A., O'Donnel I R.G., Perciballi W.J., Baxter B.J., Pattie S.D. A study of fragmentation in the ballistic impact of ceramics // International Journal of Impact Engineering. – 1994. – V. 15, N 5. – P. 605–618.
20. Neshpor V. C.; Zaitsev G .P., Dovgal E .J. Armour ceramics ballistic efficiency evaluation. In Ceramics: Charting the Future // Proceedings of the 8th. CIMTEC, Florence, Italy, 28 June – 4 July 1994 / Vincenzini, P., Ed. – Techna S.R.L.: Milano, Italy, 1995. – P. 2395–2401.
21. Tate A. A theory for the deceleration of long rods after impac // Journal of The Mechanics and Physics of Solids. – 1967. – V. 15, N 6. – P. 387–399.
22. Forrestal M. J., Longcope D. B. Target strength of ceramic materials for high-velocity penetration // Journal of Applied Physics. – 1990. – V. 67, N 8. – P. 3669–3672.
23. Гриневич А. В., Лавров А. В. Оценка баллистических характеристик керамических материалов. [dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2018-0-3-95-102](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-3-95-102).
24. Игнатова А.М., Сильников Н.М. Принципы и методы оценки баллистических характеристик неметаллических материалов и изделий // Вестник ПНИПУ. – 2015. – Т. 17, № 1.
25. Пат. РФ № 2394222. Способ определения типа и характера разрушения конструкционных материалов при ударно-волновом нагружении / Вшивков О. Ю., Рыбаков А. П., Погудин А. Л., Ланцов В. М., Гладков А. Н.
26. Normandia M.J., Gooch W.A. An Overview of Ballistic Testing Methods of Ceramic Materials. – Ceram. Armor Mater. by Des., 2002. – P. 113–138.
27. I.-D. Popa, F. Dobrița, Considerations on Dop (Depth Of Penetration) Test for Evaluation of Ceramics Materials Used in Ballistic Protection, ACTA Univ. Cibiniensis. 69 (2018) 162–166. <https://doi.org/10.1515/aucts-2017-0021>.(повтор № 9)
28. Crouch I.G., Eu B. Ballistic testing methodologies, 2017. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100704-4.00011-6>.
29. Rozenberg Z., Yeshurun Y., The relation between ballastic efficiency and compressive strength of ceramic tiles // Int. J. Impact Eng. – 1988. – N 7. – P. 357–362. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(88\)90035-8](https://doi.org/10.1016/0734-743X(88)90035-8).

30. Dancygier A. N., Yankelevsky D. Z. Penetration mechanisms of nondeforming projectiles into reinforced concrete barriers // *Struct. Eng. Mech.* – 2002. – N 13. – P. 171–186. <https://doi.org/10.12989/sem.2002.13.2.171>.
31. Forrestal M. J. Penetration into dry porous rock // *Int. J. Solids Struct.* – 1986. – V. 22. – P. 1485–1500. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(86\)90057-0](https://doi.org/10.1016/0020-7683(86)90057-0).
32. Orphal D. L., Franzen R. R. Penetration of confined silicon carbide targets by tungsten long rods at impact velocities from 1.5 to 4.6 km/s // *Int. J. Impact Eng.* – 1997. – N 19. – P. 1–13. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(95\)00064-H](https://doi.org/10.1016/0734-743X(95)00064-H).
33. Subramanian R., Bless S. J. Penetration of semi-infinite AD995 alumina targets by tungsten long rod penetrators from 1.5 to 3.5 km/s // *Int. J. Impact Eng.* – 1995. – N 17. – P. 807–816. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(95\)99901-3](https://doi.org/10.1016/0734-743X(95)99901-3).
34. Orphal D.L., Franzen R.R., Piekutowski A.J., Forrestal M.J. Penetration of confined aluminum nitride targets by tungsten long rods at 1.5–4.5 km/s // *Int. J. Impact Eng.* – 1996. – N 18. – P. 355–368. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(95\)00045-C](https://doi.org/10.1016/0734-743X(95)00045-C).
35. Hohler V., Stilp A.J., Weber K. Hypervelocity penetration of tungsten sinter-alloy rods into aluminum // *Int. J. Impact Eng.* – 1995. – N 17. – P. 409–418. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(95\)99866-P](https://doi.org/10.1016/0734-743X(95)99866-P).
36. Sotskiy M. Y., Veldanov V. A., Sotskiy Y. M., Dauriskikh A. Y. Experimental and theoretical estimate of impact conditions effects on projectiles deceleration history in target // 26th Int. Symp. Ballist. 2011, Miami, USA, 2011. – P. 1468–1476. <https://doi.org/https://doi.org/10.1115/1.4004308>.
37. Zhai Y.X., Wu H., Fang Q. Interface defeat studies of long-rod projectile impacting on ceramic targets // *Def. Technol.* – 2020. – N 16. – P. 50–68. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.05.021>.
38. Lundberg P., Renström R., Andersson O. Influence of confining prestress on the transition from interface defeat to penetration in ceramic targets // *Def. Technol.* – 2016. – N 12. – P. 263–271. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2016.02.002>.
39. Zhang X., Serjouei A., Sridhar I. Criterion for interface defeat to penetration transition of long rod projectile impact on ceramic armor // *Thin-Walled Struct.* – 2018. – N 126. – P. 266–284. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.04.016>.
40. Bavdekar S., Subhash G., Satapathy S., A unified model for dwell and penetration during long rod impact on thick ceramic targets // *Int. J. Impact Eng.* – 2019. – N 131. – P. 304–316. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.05.014>.
41. Dehn J. Modeling armor that uses interface defeat // *AIP Conf. Proc.*, 1996. – P. 1139–1142. <https://doi.org/10.1063/1.50783>.
42. Anderson C.E., Walker J.D. An analytical model for dwell and interface defeat // *Int. J. Impact Eng.* – 2005. – N 31. – P. 1119–1132. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.07.013>.
43. Aydelotte B., Schuster B. Impact and Penetration of SiC: The Role of Rod Strength in the Transition from Dwell to Penetration // *Procedia Eng.* – 2015. – N 103. – P. 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.04.004>.
44. Partom Y., Modeling interface defeat and dwell in long rod penetration into ceramic targets // *AIP Conf. Proc.*, 2012. – P. 76–79. <https://doi.org/10.1063/1.3686225>.
45. Holmquist T. J., Anderson C. E., Behner T., Orphal D.L. Mechanics of dwell and post-dwell penetration // *Adv. Appl. Ceram.* – 2010. – N 109. – P. 467–479. <https://doi.org/10.1179/174367509X12535211569512>.
46. Yuan J., Tan G. E. B., Goh W. L. Simulation of Dwell-to-Penetration Transition for SiC Ceramics Subjected to Impact of Tungsten Long Rods, 2017. – P. 65–73. <https://doi.org/10.1002/9781119321682.ch8>.
47. Holland C. C., Gamble E. A., Zok F. W., Deshpande V. S., McMeeking R. M. Effect of design on the performance of steel-alumina bilayers and trilayers subject to ballistic impact // *Mech. Mater.* – 2015. – N 91. – P. 241–251. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2015.05.002>.
48. Rajagopal A., Naik N. K., Oblique ballistic impact behavior of composites // *Int. J. Damage Mech.* – 2014. – N 23. – P. 453–482. <https://doi.org/10.1177/1056789513499268>.

49. Hohler V., Weber K., Tham R., James B., Barker A., Pickup I. Comparative analysis of oblique impact on ceramic composite systems // *Int. J. Impact Eng.* – 2001. – V. 26. – P. 333–344. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(01\)00102-6](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(01)00102-6).
50. Yaziv D., Chocron S., Anderson C. E., Grosch D. J. Oblique penetration in ceramic targets // 19th Int. Symp. Ballist., 2001. – P. 7–11.
51. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T., Frage N. Optimization of two component ceramic armor for a given impact velocity // *Theor. Appl. Fract. Mech.* – 2000. – N 33. – P. 185–190. [https://doi.org/10.1016/S0167-8442\(00\)00013-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8442(00)00013-6).
52. Savio S. G., Madhu V. Methodology to measure the protective areal density of ceramic tiles against projectile impact // *Def. Sci. J.* – 2018. – N 68. – P. 76–82. <https://doi.org/10.14429/dsj.68.11136>.
53. Cui F., Wu G., Ma T., Li W. Effect of ceramic properties and depth-of penetration test parameters on the ballistic performance of armour ceramics // *Def. Sci. J.* – 2017. – N 67. – P. 260–268. <https://doi.org/10.14429/dsj.67.10664>.
54. Roberson C., Hazell P. J. Resistance of Different Ceramic Materials to Penetration by a Tungsten Carbide Cored Projectile / Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.) // *Phys. Sci. Basis.* – Cambridge University Press, Cambridge, 2012. – P. 153–163. <https://doi.org/10.1002/9781118406793.ch13>.
55. Swab J. J. *Advances in Ceramic Armor // A Collection of Papers Presented at the 29th International Conference on Advanced Ceramics and Composites, January 23-28, 2005, Cocoa Beach, Florida.* – Ceramic Engineering and Science Proceedings, V. 26, N 7. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2005. <https://doi.org/10.1002/9780470291276>.
56. Roberson C., Hazell P. J. Resistance of Silicon Carbide to Penetration by a Tungsten Carbide Cored Projectile // *Ceram. Trans.* – 2012. – P. 165–174. <https://doi.org/10.1002/9781118406793.ch14>.
57. Lach E. Mechanical behaviour of ceramics and their ballistic properties // *CFI Ceram. Forum Int.* 70, 1993. – P. 486–490.
58. Savio S. G., Ramanjaneyulu K., Madhu V., Bhat T. B. An experimental study on ballistic performance of boron carbide tiles // *Int. J. Impact Eng.* – 2011. – V. 38. – P. 535–541. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.01.006>.
59. Huang F., Zhang L. DOP test evaluation of the ballistic performance of armor ceramics against long rod penetration // *AIP Conf. Proc.* – 2006. – P. 845 II. – P. 1383–1386. <https://doi.org/10.1063/1.2263582>.

УДК 621.793.7:621.9.048.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ИЗМЕНЕНИЕ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА В ПОКРЫТИИ СИСТЕМЫ Ni–Ti–WC

А. М. МАКАРОВ, канд. техн. наук, Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, д-р техн. наук, Р. Ю. БЫСТРОВ,
Е. А. ПОПОВА, В. В. БОБЫРЬ, А. А. КАШИРИНА, Н. В. ЯКОВЛЕВА

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

Поступила в редакцию 18.10.2023

После доработки 2.11.2023

Принята к публикации 3.11.2023

Исследовано влияние лазерной обработки покрытий системы Ni–Ti–WC, полученных методом «холодного» газодинамического напыления, на их микротвердость. Образующиеся при лазерной обработке ромбовидные беспористые включения WC размером 500 нм положительно влияют на микротвердость конечного покрытия (она достигает 1200 HV). Даны рекомендации для промышленного производства изделий с покрытиями системы Ni–Ti–WC, подвергаемых термической обработке.

Ключевые слова: «холодное» газодинамическое напыление, Ni–Ti–WC, наночастицы, микротвердость, лазерная обработка, ХГДН

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-143-148

© 2024

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»
<http://www.crism-prometey.ru>

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

ЛИТЕРАТУРА

1. Орыщенко А. С., Леонов В. П., Михайлов В. И. Титановые сплавы для глубоководной морской техники // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 3(107). – С. 238–246.
2. Орыщенко А. С., Леонов В. П., Михайлов В. И. 60 лет по пути создания титановых сплавов для морской техники и энергетики // Титан. – 2016. – № 4(54). – С. 4–8.
3. Новые материалы для выполнения наплавов на детали судовой арматуры из титановых сплавов глубоководных транспортных средств / В. П. Леонов, В. И. Михайлов, А. Л. Грошев и др. // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 1(81). – С. 263–268.
4. Investigation of the influence of laser treatment modes on coatings of aluminum, nickel, nickel-titanium systems / A. M. Makarov, D. A. Gerashchenkov, P. A. Kuznetsov и др. // Journal of Physics: Conference Series: 8, Suzdal, 5–9 октября 2020 года. – Суздаль, 2021. – С. 012024.
5. Investigation of the intermetallic coating of the Ni–Fe system obtained by surface laser treatment on a steel substrate / D.A. Gerashchenkov, P.A. Kuznetsov, A.M. Makarov et al. // Journal of Physics: Conference Series: 8, Suzdal, 5–9 октября 2020 г. – Суздаль, 2021. – С. 012011.
6. Геращенко Д. А., Ивановский А. А., Макаров А. М., Евдокимов С. Ю. Создание и исследование интерметаллидного покрытия системы Ni–Ti, армированного карбидом вольфрама, для повышения износостойкости титанового сплава // Вопросы материаловедения. – 2022. – № 4(112). – С. 50–61.
7. Layer-by-Layer Analysis of the Cr–Ni–Ti coating substructure obtained via selective laser melting / A. A. Golubeva, S. V. Konovalov, K. A. Osintsev и др. // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2020. – № 5(14) – С. 1022–1028.
8. Богачев И. А., Сульянова Е. А., Сухов Д. И., Мазалов П. Б. Исследование микроструктуры и свойств коррозионно-стойкой стали системы Fe–Cr–Ni, полученной методом селективного лазерного сплавления // Труды ВИАМ. – 2019. – № 3(75). – С. 3–13.
9. Tam K. F., Cheng F. T., Man H. C. Laser surfacing of brass with Ni–Cr–Al–Mo–Fe using various laser processing parameters // Materials Science and Engineering: A. – 2002. – №1–2(325) – С. 365–374.
10. Михайлов М. Д. Химические методы получения наночастиц и наноматериалов. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2012. – 259 с.

УДК 669.234:539.23:621.78.011

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НИОБИЕВОЙ ПОДЛОЖКИ НА ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ ЗАЩИТНО-КАТАЛИТИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ ПАЛЛАДИЯ

С. Р. КУЗЕНОВ, А. О. БУСНЮК, канд. физ.-мат. наук, В. Н. АЛИМОВ, канд. физ.-мат. наук,
А. И. ЛИВШИЦ, д-р. физ.-мат. наук, Е. Ю. ПЕРЕДИСТОВ, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д 22/1.

E-mail: skuzenov@ya.ru

Поступила в редакцию 6.10.2023

После доработки 13.11.2023

Принята к публикации 13.11.2023

Исследовано влияние рекристаллизационного отжига ниобиевой подложки на термостабильность защитно-каталитического покрытия из палладия. В результате исследования было установлено, что покрытие на рекристаллизованной подложке обладает большей термостойкостью по сравнению с покрытием на холоднокатаной подложке. Полученные результаты позволяют решить проблему ограниченной термостабильности защитно-каталитического покрытия из палладия для композитных мембран из металлов 5-й группы в условиях их эксплуатации.

Ключевые слова: металлические тонкопленочные покрытия, палладий, термостабильность, рекристаллизационный отжиг, взаимная диффузия, композитные мембраны, металлы 5-й группы

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-149-158

ЛИТЕРАТУРА

© 2024

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

1. Watanabe T., Funke H., Torres R., Raynor M., Vininski J. Contamination control in gas delivery systems for MOCVD // *Journal of Crystal Growth*. – 2003. – V. 248. – P. 67–71.
2. Tong J., Shirai R., Kashima Y., Matsumura Y. Preparation of a pinhole-free Pd–Ag membrane on a porous metal support for pure hydrogen separation // *J. Membr. Sci.* – 2005. – V. 260. – P. 84–89.
3. Kuraoka K., Zhao H., Yazawa T. Pore-filled palladium-glass composite membranes for hydrogen separation by novel electroless plating technique // *J. Mat. Sci.* – 2004. – N 39. – P. 1879–1881.
4. Yan S., Maeda H., Kusakabe K., Morooka S. Thin palladium membrane formed in support pores by metal organic chemical vapor deposition method and application to hydrogen separation // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1994. – V. 33 (3). – P. 616–622.
5. Shi Z., Wu S., Szpunar A., Rosh M. An observation of palladium membrane formation on a porous stainless steel substrate by electroless deposition // *J. Membr. Sci.* – 2006. – V. 280. – P. 705–711.
6. Livshits A., Sube F., Notkin M., Soloviev M., Bacal M. Plasma Driven Suprerpermeation of Hydrogen through Group Va Metals // *J. Appl. Phys.* – 1998. – V. 84. – P. 2558–2564.
7. Zhang G. X., Yukawa H., Watanabe N., Saito Y., Fukaya H., Morinaga M., Nambu T., Matsumoto Y. Analysis of hydrogen diffusion coefficient during hydrogen permeation through pure niobium // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2008. – V. 33. – P. 4419–4423.
8. Dolan M. D., Viano D. M., Langley M. J., Lamb K. E. Tubular vanadium membranes for hydrogen purification // *J. Membr. Sci.* – 2018. – V. 549. – P. 306–311.
9. Buxbaum R.E., Kinney A.B. Hydrogen Transport through Tubular Membranes of Palladium-Coated Tantalum and Niobium // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 1996. – V. 35. – P. 530–537. (Название статьи?)
10. Moss T. S., Peachey N. M., Snow R. C., Dye R. C. Multilayer metal membranes for hydrogen separation // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 1998. – V. 23. – N 2. – P. 99–106.
11. Alimov V.N., Busnyuk A.O., Notkin M.E., Livshits A.I. Pd–V–Pd composite membranes: Hydrogen transport in a wide pressure range and mechanical stability // *J. Memb. Sci.* – 2014. – V. 457. – P. 103–112.
12. Alimov V.N., Bobylev I.V., Busnyuk A.O., Kolgatin S.N., Kuzenov S.R., Peredistov E. Yu., Livshits A.I. Extraction of ultrapure hydrogen with V-alloy membranes: From laboratory studies to practical applications // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2018. – V. 29. – P. 13318–13327.
13. Huang F., Xinzhong L., Shan X., Guo J., Gallucci F., Sint M., Liu D. Hydrogen transport through the V–Cr–Al alloys: Hydrogen solution, permeation and thermal-stability // *Separation and Purification Technology*. – 2020. – V. 240. – P. 116654.
14. Gahr S., Birnbaum H.K. hydrogen embrittlement of niobium – high temperature behavior // *Acta Metall.* – 1978. – V. 26. – P. 1781–1788.
15. Nambu T., Shimizu K., Matsumoto Y., Rong R., Watanabe N., Yukawa H., Morinaga M., Yasuda I., Enhanced hydrogen embrittlement of Pd-coated niobium metal membrane detected by in situ small punch test under hydrogen permeation // *J. Alloys Compd.* – 2007. –V. 446–447. – P. 588–592.
16. Yukawa H., Nambu T., Matsumoto Y. V–W alloy membranes for hydrogen purification // *J. Alloys Compd.* – 2011. – V. 509. – P. 881–884.
17. Edlund D. J., McCarthy J. The relationship between intermetallic diffusion and flux decline in composite-metal membranes: implications for achieving long membrane lifetime // *J. Membr. Sci.* – 1995. – V. 107. – P. 147–153.
18. Hatano Y., Ishiyama K., Homma H., Watanabe K. Improvement in high temperature stability of Pd coating on Nb by Nb₂C intermediate layer // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2007. – V. 32. – P. 615–619.
19. Буснюк А.О., Ноткин М.Е., Григориади И.П., Алимов В.Н., Лившиц А.И. Термическая деградация палладиевого покрытия водородопроницаемых мембран из ниобия // *ЖТФ*. – 2010. – №80(1). – С. 117–124.
20. Nozaki T., Hatano Y., Yamakawa E., Hachikawa A., Ichinose. K. Improvement of high temperature stability of Pd coating on Ta by HfN intermediate layer. // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2010. – V. 35. – P.12454 – 12460

21. Fuerst T., Zhang Z., Hentges A., Lundin S., Wolden C., Way D. Fabrication and operational considerations of hydrogen permeable Mo₂C/V metal membranes and improvement with application of Pd // J. Membr. Sci. – 2018. – V. 549. – P. 559–566.
22. Alimov V.N., Hatano Y., Busnyuk O. A., Livshits D.A., Notkin M. E., Livshits A. I. Hydrogen permeation through the Pd–Nb–Pd composite membrane: Surface effects and thermal degradation // Int. J. Hydrog. Energy. – 2011. – V. 36, No 13. – P. 7737–7746.
23. Fluri A., Pergolesi D., Wokaun A., Lippert T. Stress generation and evolution in oxide heteroepitaxy // Phys. Rev. – 2018. – V. 97. – Art. 125412–20.
24. Hovsepian P. E., Sugumaran A. A., Purandare Y., Loch D. A.L., Ehiasarian A. P.. Effect of the degree of high power impulse magnetron sputtering utilisation on the structure and properties of TiN films // Thin Solid Films. – 2014. – V. 562. – P. 132.
25. Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 293 с.
26. Шугуров А. Р., Панин А. В. Механизмы возникновения напряжений в тонких пленках и покрытиях // ЖТФ. – 2020. – № 90 (12).
27. Fisher J. C. J. Calculation of Penetration Curves of Surface and Grain Boundary Diffusion // Appl. Phys. – 1951. – V. 22. – P. 74–80.
28. Kaur I., Mishin Y., Gust W. Fundamentals of Grain and Interphase Boundary Diffusion. – Wiley: Chichester West Sussex, 1995.

УДК 678.073:621.9.048.6:539.536

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРЖДЕННОГО МОНОСЛОЯ, СФОРМИРОВАННОГО ПУТЕМ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ ИЗ ПРЕПРЕГА, АРМИРОВАННОГО НЕПРЕРЫВНЫМ УГЛЕРОДНЫМ ВОЛОКНОМ, НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЮ ПОТОКА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

И. В. ЗЛОБИНА^{1,2}, канд. техн. наук, Н. В. БЕКРЕНЕВ¹, д-р техн. наук, А. С. ЕГОРОВ², канд. хим. наук, А. В. АНИСИМОВ³, д-р техн. наук

¹Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина, 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77. E-mail: irinka_7@mail.ru

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

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

Поступила в редакцию 31.10.2023

После доработки 7.11.2023

Принята к публикации 9.11.2023

Исследовано влияние ультразвуковой обработки на резонансных частотах 22 и 44 кГц монослоя, сформированного путем трехмерной печати из препрегов, армированных непрерывным углеродным волокном, на сопротивление воздействию потока твердых частиц. Установлено, что при имитации потока твердых частиц струйно-абразивной обработкой происходит приращение массы как контрольных, так и опытных образцов по сравнению с исходным состоянием. Показано, что силовое воздействие ультразвука на рациональных режимах способствует снижению приращения массы на 31,4% при обработке на частоте 22 кГц и на 9% при обработке на частоте 44 кГц. Снижение приращения массы определяется повышением плотности структуры монослоя и приводит к повышению твердости поверхности в единицах Щора-Д на 13,5% при частоте воздействия 22 кГц и на 10% при частоте 44 кГц.

Ключевые слова: аддитивные технологии, композиционные материалы, препрег, армирование непрерывным углеродным волокном, терморезактивное и термопластичное связующее, поток твердых частиц, изменение массы, твердость, прочность, ультразвук, амплитуда, частота, время воздействия

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-159-173

© 2024

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»
<http://www.crism-prometey.ru>

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлин Ю. А. Специальные полимерные композиционные материалы. – СПб.: Научные основы и технологии, 2008. – 660 с.
2. Михайлин Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 822 с.
3. Студенцов В. Н., Кузнецов В.А., Зубцова Н.В., Черемухина И.В. Армированные композиционные материалы строительного назначения // Материалы 29-й междунар. конф. «Композиционные материалы в промышленности», 1–5 июня 2009 г., г. Ялта – Киев. Ч.1. – С. 357–359.
4. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 1. – С. 3–33.
5. Каблов Е. Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. – 2012. – Т. 82, № 6. – С. 520–530.
6. Мировой рынок производства композитов // Персональный сайт завода композиционных материалов Армпласт. URL: <https://arm-plast.ru/o-zavode/novosti/mirovoj-ryinok-proizvodstva-kompozitov.html>. (Дата обращения: 20.10.2023)
7. Дориомедов М. С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. – 2020. – № 6–7. – С. 29–37.
8. Коваленко В. А., Кондратьев А. В. Применение полимерных композиционных материалов в изделиях ракетно-космической техники как резерв повышения ее массовой и функциональной эффективности. Аналитический обзор // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 5. – С. 14–20.
9. Деев И. С., Никишин Е. Ф. Модель космоса. Т. 2. – М.: КДУ, 2007. – 1144 с.
10. Letin V. A., Gatchenko L. S., Deev I. S. et al. Proc. of Sixth International Space Conference «Protection of Materials and Structures from Space Environment», Toronto, Canada. May 1–3. 2002. P. 461–474.
11. Kablov E. N., Minakov V. T., Deev I. S., Nikishin E. F. Protection of Materials and Structures from Space Environment. Space Technology Proceedings / Eds. J.I. Kleiman, Z. Iskanderova. – Kluwer Acad. Publ., 2003. – P. 217–233.
12. Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Взгляд в будущее. Т. 1: Прогнозирование и анализ экстремальных воздействий / Ю. В. Полежаев, С. В. Резник, Э. Б. Василевский и др.; Под ред. С. В. Резника. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 224 с.
13. Горынин И. В. Конструкционные материалы – важный элемент надежности и экологической безопасности инфраструктуры Арктики // Арктика: экология и экономика. – 2011. – № 3. – С. 82–87.
14. Бузник В. М., Каблов Е. Н., Кошурина А. А. Материалы для сложных технических устройств арктического применения // Сб. тр. конф. «Научно-технические проблемы освоения Арктики». Москва, 16 декабря 2014 г. – 2015. – С. 275–285.
15. Публичный аналитический доклад по развитию новых производственных технологий / И. Г. Дежина, А. К. Пономарев, А. С. Фролов и др. – М.: Сколковский институт науки и технологий, 2015. – 210 с.
16. Новые производственные технологии: Публичный аналитический доклад / А. К. Пономарев, А. С. Фролов, Д. Н. Зорин, С. Г. Псахье, и др. – М.: Издательский дом «Дело», 2015. – 210 с.
17. The European Construction, built environment and energy efficient building Technology Platform. URL: <http://www.ectp.org> (Дата обращения: 20.10.2023)
18. European Technology Platform for Advanced Engineering Materials and Technologies. URL: <http://www.eumat.eu> (Дата обращения: 20.10.2023)
19. The European Space Agency. URL: <http://estp.esa.int>. (Дата обращения: 20.10.2023)
20. Пройдаков Э. М. 3D-печать как новое научно-техническое направление // Научно-технические исследования. – 2014. – № 1. – С. 146–154.

21. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 656 с.
22. Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G. Additive Manufacturing methods and modeling approaches: a critical review // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – V. 83. – P. 389–405. DOI: 10.1007/s00170-015-7576-2.
23. Рынок технологий 3D-печати в России и мире: перспективы внедрения аддитивных технологий в производство // CAD/CAM/CAE Observer. – 2021. – № 1. – С. 42–51.
24. Балашов А. В., Маркова М. И. Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 1. – С. 66.
25. Петров В. М., Безпальчук С. Н., Яковлев С. П. О влиянии структуры на прочность изделий из пластиков, получаемых методом 3D-печати // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2017. – Т. 9, № 4. – С. 765–776. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776.
26. Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation / R. Matsuzaki, M. Ueda, M. Namiki, T. K. Jeong et al. // Sci Rep. – 2016. – V. 6(1). DOI: 10.1038/srep23058.
27. Ning F., Cong W., Qiu J., Wei J., Wang S. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling // Composites Part B-engineering. – 2015. – N 80. – P. 369–378.
28. Invernizzi M., Natale G., Levi M., Turri S., Griffini G. UV-Assisted 3D Printing of Glass and Carbon Fiber-Reinforced Dual-Cure Polymer Composites // Materials. – 2016. – N 9(7). – P. 583. DOI: 10.3390/ma9070583.
29. Polyzos E., Katalagarianakis A., Van Hemelrijck D., Pyl I., Polyzos D. A Multi Scale Analytical Methodology for the Prediction of Mechanical Properties of 3D-printed Materials with continuous Fibres // Additive Manufacturing. – 2020. – V. 36. – P. 101394. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101394
30. Wang F., Wang G., Zhang Z., Ning F. Fiber-matrix Impregnation Behavior During Additive Manufacturing of Continuous Carbon Fiber Reinforced Polylactic Acid Composites // Additive Manufacturing. – 2021. – V. 37. – P. 101661. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101661
31. Кулезнев В. С., Шершнева А. С. Химическая и физическая модификация полимеров. – М.: Химия, 1990. – 207 с.
32. Студенцов В. Н. Физическая модификация армированных реактопластов // Вестник СГТУ. – 2011. – № 4, вып. 3. – 243 с.
33. Негров Д. А. Влияние энергии ультразвуковых колебаний на структуру и свойства полимерного композиционного материала на основе политетрафторэтилена // Дис. ... канд. техн. наук, Омск, 2009. – 123 с.
34. Lionetto F., Dell'Anna R., Montagna F., Maffezzoli A. Ultrasonic assisted consolidation of commingled thermoplastic/glass fiber rovings // Frontiers in Materials. – 2015. – V. 2. – P. 1–9. DOI: 10.3389/fmats.2015.00032.

УДК 621.039.531:539.422.22

**РАДИАЦИОННОЕ И ТЕРМИЧЕСКОЕ ОХРУПЧИВАНИЕ КОРПУСНЫХ РЕАКТОРНЫХ СТАЛЕЙ:
СВЯЗЬ МЕХАНИЗМОВ ОХРУПЧИВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
ЗАРОЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ МИКРОТРЕЩИН**

**Часть 1. Стратегия, программа и методы экспериментальных
и расчетных исследований**

Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, В. Н. ФОМЕНКО, канд. техн. наук,
В. А. ШВЕЦОВА, канд. физ.-м. наук, Е. В. ЮРЧЕНКО, канд. техн. наук

Поступила в редакцию 25.07.2023

После доработки 21.11.2023

Принята к публикации 22.11.2023

Развитие моделей хрупкого разрушения рассмотрено с точки зрения связей характеристик хрупкого разрушения на микроуровне с механизмами охрупчивания и разрушения корпусных реакторных сталей. Разработана стратегия и представлена программа экспериментальных и расчетных исследований, которые позволяют установить, как различные механизмы охрупчивания и разрушения связаны с условиями зарождения и распространения микротрещин, приводящих к хрупкому разрушению корпусных реакторных сталей. Экспериментальные и расчетные исследования выполняются для сталей 15X2НМФА и А533, которые используются для корпусов реакторов типа ВВЭР и PWR соответственно. Эти материалы исследованы в следующих состояниях: 1) исходное (состояние поставки); 2) термически охрупченное, которое моделирует упрочняющий механизм охрупчивания; 3) термически охрупченное, которое моделирует неупрочняющий механизм охрупчивания; 4) облученное. Экспериментальные исследования включали испытания образцов разной геометрии (гладкие цилиндрические образцы, цилиндрические образцы с кольцевым надрезом, образцы с трещиной), что позволило получить характеристики хрупкого разрушения при разной жесткости напряженного состояния. Расчетные исследования выполняли на основе вероятностной модели хрупкого разрушения Prometey, что позволило получить количественные оценки характеристик разрушения на микро- и макроуровнях для каждого состояния материала.

В части 1 настоящей работы представлена информация об исследуемых материалах, процедурах и методах исследований. В части 2 приведены результаты испытаний гладких цилиндрических образцов и истинные кривые деформирования, которые необходимы для расчета напряженно-деформированного состояния различных образцов. В части 3 будут представлены экспериментальные и расчетные исследования для образцов разной геометрии из исследуемых материалов в различных состояниях и результаты прогнозирования на основе модели Prometey.

Ключевые слова: хрупкое разрушение, локальный подход, вероятностная модель, радиационное охрупчивание, корпусные реакторные стали

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-174-195

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 59115.14–2021. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчет на сопротивление хрупкому разрушению корпуса водо-водяного энергетического реактора. – М.: Российский институт стандартизации. 2021.
2. Alekseenko N. N., Amaev A. D., Gorynin I. V., Nikolaev V. A. Radiation damage of nuclear power plant pressure vessel steels. Illinois USA: La Grange Park, 1997.
3. Хоуторн Дж. Р. Радиационное охрупчивание // Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов / Под ред. К. Л. Брайента, С. К. Бенерджи. – М.: Металлургия, 1988.
4. Nikolaev V. A., Rybin V. V. Mechanisms controlling the composition influence on radiation hardening and embrittlement of iron-base alloy // Effect of radiation on materials: 17th International Symposium, ASTM STP 1270, 1996. – P. 3–24.
5. Intergranular and intragranular phosphorus segregation in Russian pressure vessel steels due to neutron irradiation / B. A. Gurovich, E. A. Kuleshova, Y. I. Shtrombakh et al. // J. Nucl. Mater. – 2000. – V. 279. – P. 259–272.
6. English C. A., Ortner S. R., Gage G., Server W. L., Rosinski S. T. Review of phosphorus segregation and intergranular embrittlement in reactor pressure vessel steels // Effect of radiation on Materials: 20th Int. Symposium, ASTM STP 1405; ASTM; 2001. – P. 152–173.
7. Kryukov A., Debarberis L., Von Estorff U., Gillemot F., Oszvald F. Irradiation Embrittlement of Reactor Pressure Vessel Steel at Very High Neutron Fluence // J. Nucl. Mater. – 2012. – N 422 (1). – P. 173–177. JRC66610
8. Guojun Wei, Chenlong Wang, Xingwang Yang, Zhenfeng Tong, Weinwang Wu. Non-hardening embrittlement mechanism of pressure vessel steel Ni–Cr–Mo–V welds during thermal aging // Advances in Mechanical Engineering. – 2020. – N 12 (2). – P. 1–7.

9. Marini B., Averty X., Wident P., Forget P., Barcelo F. Effect of the bainitic and martensitic microstructures on the hardening and embrittlement under neutron irradiation of a reactor pressure vessel steel // *J. Nucl. Mater.* 2015. – N 465. – P. 20–27.
10. Margolin B. Z., Yurchenko E. V., Morozov A. M., Pirogova N. E., Brumovsky M. Analysis of a link of embrittlement mechanisms and neutron flux effect as applied to reactor pressure vessel materials of WWER. *J. Nucl. Mater.* – 2013. – N 434. – P. 347–356.
11. Margolin B., Yurchenko E., Potapova V., Pechenkin V. On the Modelling of Thermal Aging through Neutron Irradiation and Annealing. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018, Article ID 7175083. <https://doi.org/10.1155/2018/7175083>
12. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G. Radiation embrittlement modelling in multi-scale approach to brittle fracture of RPV steels // *Int. J. Fract.* – 2013. – N 179. – P. 87–108.
13. Beremin F. M. A local criterion for cleavage fracture of a nuclear pressure vessel steel // *Metall Trans A.* – 1983. – N 14. – P. 2277–2287.
14. Pisarenko G. S., Krasowsky A. J. Analysis of kinetics of quasibrittle fracture of crystalline materials // *Proc. Int. Conf. Mech. Behav. Mater. "Mechanical Behaviour of Materials"*, Kyoto, 1971. V. I. – P. 421–432.
15. Ritchie R. O., Knott J. F., Rice J. R. On the relation between critical tensile stress and fracture toughness in mild steel // *J. Mech. Phys. Solids.* – 1973. – N 21. – P. 395–410.
16. Копельман Л. А. Сопrotивляемость сварных швов хрупкому разрушению. – Л.: Машиностроение, 1978.
17. Мешков Ю. Я. Физические основы разрушения металлических конструкций. – Киев: Наукова Думка, 1981.
18. Mudry F. A local approach to cleavage fracture // *Nuclear Engineering and Design.* – 1987. – V. 105. – P. 65–76.
19. Margolin B. Z., Gulenko A. G., Shvetsova V. A. Improved probabilistic model for fracture toughness prediction for nuclear pressure vessel steels // *Int. J. Pres. Ves. & Piping.* – 1998. – B. 75. – P. 843–55.
20. Bordet S. R., Karstensen A. D., Knowles D. M., Wiesner C. S. A new statistical local criterion for cleavage fracture in steel // *Eng. Fract. Mech.* – 2005. – V. 72. – P. 435–74.
21. Pineau A. Development of the local approach to fracture over the past 25 years: theory and application / Carpinteri A., Mai Y.-W., Ritchie R., ed. // *ICF11 2005. Honour and Plenary Lectures Presented at the 11th International Conference on Fracture (ICF11), Held in Turin, Italy, on March 20–25, 2005.* – Springer, 2006. – P. 139–166.
22. Tanguy B., Bouchet C., Bordet S. R., Besson J., Pineau A. Toward a better understanding of a cleavage in RPV steels: Local mechanical conditions and evaluation of a nucleation enriched Weibull model and of the Beremin model over large temperature range / Besson J., Moineau D., Steglich D., ed. // *EUROMECH-MECAMAT 2006: local approach to fracture.* – Paris: Presse des Mines, 2006. – P. 129–134.
23. Parrot A., Dahl A., Forget P., Marini B. Evaluation of fracture toughness from instrumented Charpy impact tests for a reactor pressure vessel steel using local approach to fracture / Besson J., Moineau D., Steglich D., ed. // *EUROMECH-MECAMAT 2006: local approach to fracture.* – Paris: Presse des Mines, 2006. – P. 291–296.
24. Tanguy B., Bouchet C., Bugat S., Besson J. Local approach to fracture based prediction of the ΔT_{56J} and $\Delta T_{IC,100}$ shifts due to irradiation for an A508 pressure vessel steel // *Eng. Fract. Mech.* – 2006. – V. 73. – P. 191–206.
25. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G., Kostylev V. I. Prometey local approach to brittle fracture: development and application // *Eng. Fract. Mech.* – 2008. – V. 75. – P. 483–498.
26. Ruggieri C., Dodds H. An engineering methodology for correction of elastic-plastic fracture toughness – Part I: A review on probabilistic models and exploration of plastic strain effects // *Eng. Fract. Mech.* – 2015. – V. 134. – P. 368–390.
27. Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Гуленко А. Г., Костылев В. И. Швецова В. А. Дальнейшее развитие модели Prometey и метода Unified Curve. Часть 1. Развитие модели Prometey // *Вопросы материаловедения.* – 2016. – № 4(88). – С. 120–150.

28. Wallin K. The scatter in K_{IC} results // Eng. Fract. Mech. – 1984. – V. 19. – P. 1085–1093.
29. Wallin K. The size effect in K_{IC} results // Eng. Fract. Mech. – 1985. – V. 22. – P. 149–163.
30. ASTM E 1921–13. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range. West Conshohocken PA USA: Annual Book of ASTM Standards. ASTM International, 2013.
31. Margolin B. Z., Gulenko A. G., Nikolaev V. A., Ryadkov L. N. A new engineering method for prediction of the fracture toughness temperature dependence for RPV steels // Int. J. Pres. Ves. & Piping. – 2003. – V. 80. – P. 817–829.
32. Margolin B. Z., Fomenko V. N., Gulenko A. G., Kostylev V. I., Shvetsova V. A. On issue of comparison of the Unified Curve and Master Curve methods and application for RPV structural integrity assessment // Strength of Materials. – 2016. – N 48 (2). – P. 227–250.
33. Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Гуленко А. Г., Костылев В. И. Дальнейшее развитие модели Prometey и метода Unified Curve. Часть 2. Развитие метода Unified Curve // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 4(88). – С. 151–178.
34. Марголин Б. З., Швецова В. А. Критерий хрупкого разрушения: структурно-механический подход // Проблемы прочности. – 1992. – № 2. – С. 3–16.
35. Margolin B. Z., Shvetsova V. A. Local criterion for cleavage fracture: structural and mechanical approach // J. Phys. IV. – 1996. – N 6. – P. 225–234.
36. Di Fant M., Carius H., Carollo G., Cleizergues O., Le Cog V., Mudry F. Local approach to brittle fracture: Discussion on the effects of temperature and strain on the critical cleavage stress // 2nd Griffiths Conf. on Mechanisms of Fracture and their Structural Significance, Sheffield, 13–15 Sept. 1995.
37. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G., Kostylev V. I. Application of a new cleavage fracture criterion for fracture toughness prediction for RPV steels // Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. – 2006. – V. 29(9). – P. 697–713.
38. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G., Kostylev V. I. Development of Prometey local approach and analysis of physical and mechanical aspects of brittle fracture of RPV steels // Int. J. Pres. Ves. & Piping. – 2007. – N 84. – P. 320–36.
39. Владимиров В. И. Физическая природа разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984.
40. Computational Methods in the Mechanics of Fracture / Ed. S. N. Atluri. – Elsevier Science Publishers: New Holland, 1986.
41. Cherepanov G. P. Mechanics of Brittle Fracture. – New York: McGraw-Hill, 1979. – 950 p.
42. Margolin B., Fomenko V., Shvetsova V., Shishkov F., Yurchenko E. The plastic strain effect on cleavage microcracks propagation // Eng. Fract. Mech. – 2023. – V. 290. – Art. 109446.
43. ГОСТ 59115.6–2021 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Методы определения характеристик трещиностойкости конструкционных материалов. – М.: Российский институт стандартизации, 2021.
44. ASTM E 1820–05. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, Annual Book of ASTM Standards, Section 3, V. 03.01. – P. 1040–1067.
45. Margolin B. Z., Karzov G. P., Shvetsova V.A., Keim E., Chaouadi R. Application of local approach concept of cleavage fracture to VVER materials // Proc. of PVP 2002 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, August 4–8, 2002, Vancouver, BC, Canada.
46. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение.
47. ГОСТ 11150–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение при низких температурах.
48. ГОСТ 9651–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение при высоких температурах.

УДК 621.039.531:539.422.22

**РАДИАЦИОННОЕ И ТЕРМИЧЕСКОЕ ОХРУПЧИВАНИЕ КОРПУСНЫХ РЕАКТОРНЫХ СТАЛЕЙ:
СВЯЗЬ МЕХАНИЗМОВ ОХРУПЧИВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЗАРОЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ МИКРОТРЕЩИН**

Часть 2. Характеристики прочности и пластичности

Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, В. Н. ФОМЕНКО, канд. техн. наук,
В. А. ШВЕЦОВА, канд. физ.-мат. наук, Е. В. ЮРЧЕНКО, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 25.07.2023

После доработки 21.11.2023

Принята к публикации 22.11.2023

Представлены результаты испытаний в широком диапазоне температур гладких цилиндрических образцов на одноосное растяжение из корпусных реакторных сталей 15X2НМФА и А533, из которых изготавливаются корпуса реакторов типа ВВЭР и PWR. Указанные стали исследованы в следующих состояниях: 1) исходное; 2) термически охрупченное по упрочняющему механизму; 3) термически охрупченное по неупрочняющему механизму; 4) облученное.

Получены истинные кривые деформирования, которые необходимы для расчета напряженно-деформированного состояния в различных образцах. Кривые деформирования для исследуемых материалов в исходном и в термически охрупченных состояниях получены на основании стандартных механических характеристик. Для облученных материалов процедура получения кривых деформирования основана на данных видеорегистрации, поскольку процедура на основе стандартных характеристик не дает надежных результатов из-за очень малой пластической деформации. Выполнена верификация процедуры получения кривых деформирования по данным видеорегистрации путем сравнения кривых деформирования, полученных на основе стандартных характеристик и по данным видеорегистрации для исследуемых материалов в исходном и термически охрупченных состояниях.

Ключевые слова: кривые деформирования, корпусные реакторные стали, радиационное охрупчивание, термическое охрупчивание

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-196-210

ЛИТЕРАТУРА

1. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G., Ilyin A. V. Cleavage fracture toughness for 3Cr–Ni–Mo–V reactor pressure vessel steel: theoretical prediction and experimental investigation // Int. J. Pres. Ves. & Piping. – 2001. – N 78. – P. 429–441.

2. Марголин Б. З., Швецова В. А., Сорокин А. А., Минкин А. И., Пирогова Н. Е. Исследование состояния металла внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР после эксплуатации в течение 45 лет. Часть 4. Характеристики прочности и пластичности и механизмы разрушения // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 1 (105). – С. 116–144.

3. Reference manual on the IAEA JRQ correction monitor steel for irradiation damage studies. IAEA-TECDOC-1230. – Vienna: IAEA, 2001.

4. Бриджмен П. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1955.

УДК 621.039.531:669.15–194:539.389

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ УПРОЧНЕНИЕМ В ТЕРМИНАХ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ И МИКРОТВЕРДОСТИ ДЛЯ АУСТЕНИТНЫХ И ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ

Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, Л. А. БЕЛЯЕВА, канд. техн. наук,
А. А. СОРОКИН, канд. техн. наук, Е. В. ЮРЧЕНКО, канд. техн. наук, М. Н. ГРИГОРЬЕВ

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

Поступила в редакцию 2.10.2023

После доработки 13.11.2023

© 2024

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»
<http://www.crism-prometey.ru>

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

Выполнены инструментальные измерения микротвердости с помощью индентора Виккерса при постоянной скорости деформирования и определены значения предела текучести для аустенитных хромоникелевых сталей 08X18H10T, 10X18H9 и 08X16H20M2T в исходном (необлученном) состоянии, после нейтронного облучения по различным режимам, а также после предварительной пластической деформации. Аналогичные измерения проведены для хромистых нержавеющей сталей ферритно-мартенситного класса 07X12HMФБ и 16X12MBCФБР (ЭП-823) в исходном (необлученном) состоянии и после термообработки, приводящей к упрочнению материала. Определены зависимости, связывающие микротвердость и предел текучести для всех исследованных состояний всех исследованных сталей. Установлена единая корреляционная зависимость между упрочнением в терминах предела текучести и упрочнением в терминах микротвердости по Виккерсу, не зависящая от природы упрочняющего фактора и класса стали.

Ключевые слова: аустенитные стали, ферритно-мартенситные стали, микротвердость, предел текучести, корреляционные зависимости

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-211-227

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р ИСО 6507-1–2007. Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерения. – М.: Стандартинформ, 2008. – 35 с.
2. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
3. Tabor D. The Hardness of Metals. – Oxford: Clarendon press, 1951. – 171 p.
4. Busby J. T., Hash M. C., Was G. S. The relationship between hardness and yield stress in irradiated austenitic and ferritic steels // Journ. Nucl. Materials. – 2005. – N 336. – P. 267–278.
5. Gusev M.N., Maksimkin O.P., Tivanova O.V., Silnaygina N.S., Garner F.A. Correlation of yield stress and microhardness in 08Cr16Ni11Mo3 stainless steel irradiated to high dose in BN-350 fast reactor // Journ. Nucl. Materials. – 2006. – N 359. – P. 258–262.
6. Маркелов Д. Е., Крюков Ф. Н., Неустроев В. С., Обухов А. В., Соколовский Д. А., Яковлев В. В., Скупов М. В., Леонтьева-Смирнова М. В. Структура и механические свойства оболочек твэлов из стали ЭП823-Ш после облучения в реакторе БН-600 // ВАИТ. – № 2 (103). – С. 70–81.
7. Zhu P., Zhao Ya., Agarwal Sh., Henry J., Zinkle S. J. Toward accurate evaluation of bulk hardness from nanoindentation testing at low depths // Materials and Design. – 2022. – N 213. – Art. 110317
8. ISO 14577-4:2016 (E). Metallic Materials – Instrumented Indentation Test for Hardness and Materials Parameters – Part 4: Test Method for Metallic and Nonmetallic Coatings.
9. Adams B. L., Wright S. I., Kunze K. Orientation Imaging. The Emergence of a New Microscopy // Metallurgical and Materials Transactions. – 1993. – 24 A. – P. 819–831.
10. TSL OIM analysis user manual. Version 5.2. – TexSEM Laboratories Inc., 2007.
11. Метод дифракции отраженных электронов в материаловедении / Под ред. А. Шварца, М. Кумара, Б. Адамса, Д. Филда. – М.: Техносфера, 2014. – 544 с.
12. Марголин Б. З., Варовин А. Я., Минкин А. И., Гурин Д. А., Глухов В. А. Исследование состояния металла внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР после эксплуатации в течение 45 лет. Часть 1. Программа исследований и вырезка трепанов из ВКУ // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 3 (103). – С. 135–143.
13. Марголин Б. З., Сорокин А. А., Бучатский А. А., Швецова В. А., Прокошев О. Ю., Пирогова Н. Е. Характеристики и механизмы разрушения облученных аустенитных сталей в области повышенных температур и формулировка критерия разрушения. Часть 1: Экспериментальные исследования // Вопросы материаловедения. – 2022. – № 2 (110). – С. 185–202.
14. Курсевич И. П., Марголин Б. З., Прокошев О. Ю., Кохонов В. И. Механические свойства аустенитных сталей при нейтронном облучении: влияние различных факторов // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 4 (48). – С. 55–68.
15. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G. Radiation embrittlement modeling in multiscale approach to brittle fracture of RPV steels // Int. J. of Fracture. – 2013. – V. 179, Is. 1. – P. 87–108.

16. Effect of neutron irradiation on tensile properties of materials for pressure vessel internals of WWER type reactors // A. A. Sorokin, B. Z. Margolin, I. P. Kursevich et al. // J. Nucl. Mat. – 2014. – V. 444 – P. 373–384.

17. Douthwaite R. M., Petch N. J. A microhardness study relating to the flow stress of polycrystalline mild steel // Acta Metallurgica. – 1970. – V. 18, February. – P. 211–216.

18. Иванов А. А., Шулепин С. В., Дворяшин А. М., Конобеев Ю. В., Иванов С. Н., Алексеев Ю. В., Поролло С. И. Структура и механические свойства стали ЭП-823, 20Х12МН и опытных вариантов 12%-ных хромистых сталей после нейтронного облучения в реакторе БН-350 // Сб. докл. IX Российской конференции по реакторному материаловедению, Дмитровград, 2009. – С. 560–573.

19. Margolin B. Z., Gulenko A. G., Fomenko V. N., Kostylev V. I. Further improvement of the Prometey model and unified curve method. Part 2. Improvement of the unified curve method // Eng. Fracture Mech. – 2018. – V. 191. – P. 383–402.

CONTENTS

METALS SCIENCE. METALLURGY

- Kondratiev N.A., Khlusova E.I., Anisimov D.M., Borovskaya O.D.* Selection of parameters of high-speed thermodeformation of Cr–Ni–Mo steel processing on the basis of imitation modeling 5
- Popova N.A., Gromov V.E., Porfiriev M.A., Ivanov Yu.F., Nikonenko E.L., Nevsky S.A.* Mechanisms of hardening of heavy-loaded rails made of hypereutectoid steel during long-term operation 20
- Zisman A.A., Kniazyuk T.V., Petrov S.N., Fedoseev M. L., Novoskoltsev N. S.* Assessment of former austenite structure in hot rolled steel in terms of its texture after martensitic transformation 40
- Lukyanova N.A., Melnikov P.V., Gribanova V.B.* Influence of tempering on structure and properties of welded joints of high-strength structural steel achieved by submerged arc welding 50
- Gangalo A.N., Burkhovetsky V.V.* Influence of hot pressing temperature of composite copper-titanium billets on the formation of intermetallide layer at the material interface 60
- Ganiev I.N., Kholmurodov F., Safarov A.G., Nurov N.R., Yakubov U.Sh.* Effect of bismuth additives on the thermophysical properties and thermodynamic functions of aluminum alloy AlFe5Si10 67
- Zarechensky D.A., Vorobyov V.V., Shevchenko V.A.* Research of the melting zone of the relit – cupronicel composite alloy when surfacing metallurgical equipment parts using the furnace method 79

FUNCTIONAL MATERIALS

- Leonov V.P., Malinkina Yu.Yu., Drugachuk S.D., Khachatryan I.M., Chudakov E.V.* Comparative analysis of technological properties and microstructure of titanium powders of different classes of alloys 86
- Gordeev S.K.* "Skeleton", diamond-silicon carbide composite material 99
- Zhukov A.S., Kuznetsov P.A.* The influence of the granulometric composition of powders of steels and precision alloys and their melting modes by LPBF ON porosity 117
- Shevchenko V.Ya., Dolgin A.S., Sychev M.M., Balabanov S.V.* Review of criteria and methods for evaluating properties of ceramic materials designed for impact load protection 127
- Makarov A.M., Gerashchenkov D.A., Popova E.A., Bobyr V.V., Kashirina A.A., Yakovleva N.V., Bystrov R.Yu.* Implications of the impact of laser explosion parameters on the growth of nano-sized wolfram carbide in Ni–Ti–WC system coatings 143
- Kuzenov S.R., Busnyuk A.O., Alimov V.N., Livshits A.I., Peredistov E. Yu.* Influence of thermal treatment of niobium substrate on thermal stability of palladium protective-catalytic coating 149

POLYMER STRUCTURAL MATERIALS

- Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Egorov A.S., Anisimov A.V.* The effect of ultrasonic treatment of a cured monolayer formed by three-dimensional printing from a prepreg reinforced with continuous carbon fiber on the resistance to the flow of solid particles 159

RADIATION MATERIALS SCIENCE

- Margolin B.Z., Fomenko V.N., Shvetsova V.A., Yurchenko E.V.* Radiation and thermal embrittlement of RPV steels: the links of embrittlement mechanisms, fracture modes and microcrack nucleation and propagation properties. Part 1. Strategy, program and methods of experimental and numerical studies 174
- Margolin B.Z., Fomenko V.N., Shvetsova V.A., Yurchenko E.V.* Radiation and thermal embrittlement of RPV steels: the links of embrittlement mechanisms, fracture modes and microcrack nucleation and propagation. Part 2. Strength and plasticity properties 196
- Margolin B.Z., Belyaeva L.A., Sorokin A.A., Yurchenko E.V., Grigoriev M.N.* Correlation dependences between hardening in terms of yield strength and microhardness for austenitic and ferritic-martensitic steels 211

- Guidelines for authors of the scientific and technical journal "Voprosy Materialovedeniya". Manuscript requirements** 228

SELECTION OF PARAMETERS OF HIGH-SPEED THERMODEFORMATION OF CR–NI–MO STEEL PROCESSING ON THE BASIS OF IMITATION MODELING

N.A. KONDRATIEV, E.I. KHLUSOVA, Dr Sc. (Eng), D.M. ANISIMOV, O.D. BOROVSKAYA

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

Received October 11, 2023

Revised October 18, 2023

Accepted October 24, 2023

Abstract—The temperature of the end of finishing stage, cooling rate and coil winding temperature are structure-sensitive parameters for bainite-grade steels in the production of plate less than 10 mm thick. Simulation modeling of high-speed thermo-deformation processing of Cr–Ni–Mo bainitic steel samples has been carried out in order to select the most rational technological modes in continuous hot rolling mills. The influence of strain rate and temperature as well as niobium and vanadium microalloying additives on phase transformations has been investigated.

Keywords: chromium-nickel-molybdenum steel, rolled sheets, high-speed thermo-deformation treatment, simulation modeling, phase transformations

ACKNOWLEDGMENTS

Experimental studies were performed on the equipment of the Center for Collective Use “Composition, Structure and Properties of Structural and Functional Materials” of the NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey” with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the RF, Agreement 13.TsKP.21.0014 (075-11-2021-068), unique identifier RF-2296.61321X0014.

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-05-19

REFERENCES

1. Kong, J., Xie, C., Effect of molybdenum on continuous cooling bainite transformation of low-carbon microalloyed steel, *Materials and Design*, 2006, V. 27, Is. 10, pp. 1169–1173.
2. Suzuki, T., Ono, Y., Miyamoto, G., Furuhashi, T., Effects of Si and Cr on bainite microstructure of medium carbon steels, *ISIJ International*, 2010, V. 50, Is. 10, pp. 1476–1482.
3. Kim, S.J., Lee, C.G., Lee, T.H., Lee, S., Effects of coiling temperature on microstructure and mechanical properties of high-strength hot-rolled steel plates containing Cu, Cr and Ni, *ISIJ International*, 2000, V. 40, pp. 692–698.
4. Challa, V.S.A., Zhou, W.H., Misra, R.D.K., O'Malley, R., Jansto, S.G., The effect of Coiling Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of a Niobium-Titanium Microalloyed Steel Processed via Thin Slab Casting, *Materials Science and Engineering: A*, 2014, No 595, pp. 143–153.
5. Challa, V.S.A., Misra, R.D.K., O'Malley, R., Jansto, S.G., The Effect of Coiling Temperature on the Mechanical Properties of Ultrahigh-Strength 700 MPa Grade Processed via Thin-Slab Casting, *AISTech 2014 Proceedings*, pp. 2987–2997.
6. Bernier, N., Bracke, L., Malet, L., Godet, S., Crystallographic reconstruction study of the effects of finish rolling temperature on the variant selection during bainite transformation in C–Mn high-strength steels, *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2014, No 45, pp. 5937–5955.
7. Jun, H.J., Kang, J.S., Seo, D.H., Kang, K.B., Park, C.G., Effects of deformation and boron on microstructure and continuous cooling transformation in low carbon HSLA steels, *Materials Science and Engineering: A*, V. 422, 2006, pp. 157–162.
8. Isasti, N., Jorge-Badiola, D., Taheri, M.L., Uranga, P., Phase Transformation Study in Nb–Mo Microalloyed Steels Using Dilatometry and EBSD Quantification, *Metallurgical and Materials Transactions*, 2013, V. 44A, pp. 3552–3563.

9. Korotovskaya, S.V., Nesterova, E.V., Orlov, V.V., Khlusova, E.I., Vliyanie parametrov plasticheskoi deformatsii na formirovanie ultramelkozernistoi struktury v nizkolegirovannykh beinitnykh stalyakh [The influence of plastic deformation parameters on the formation of an ultrafine-grained structure in low-alloy bainite steels], *Voprosy materialovedeniya*, 2011, No 1 (56), pp. 100–109.
10. Misra, R.D.K., Nathani, H., Hartmann, J.E., Siciliano, F., Microstructural evolution in a new 770 MPa hot rolled Nb–Ti microalloyed steel, *Materials Science and Engineering: A*, 2005, No 394, pp. 339–352.
11. Petrov, S.N., Ptashnik, A.V., Ekspress-metod opredeleniya granits byvshego austenitnogo zerna v stalyah beinitno-martensitnogo klassa na osnove kartirovaniya kristallograficheskikh orientirovok prevrashchennoi struktury [Express method for determining the boundaries of the former austenitic grain in steels of the bainite-martensitic class based on mapping the crystallographic orientations of the transformed structure], *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2019, No 5.
12. Sun, G., Ding, Z., Effects of heating rate and strain rate on phase transformation in micro-grinding, *EPJ Web of Conferences*, 2019, No 224, pp. 1–5.
13. Dey, I., Ghosh, S.K., Saha, R., Effects of cooling rate and strain rate on phase transformation, microstructure and mechanical behaviour of thermomechanically processed pearlitic steel, *Materials research and technology*, 2019, No 8 (3), pp. 2685–2698.
14. Urtsev, V.N., Okishev, K.Yu., Mirzaev, D.A., Degtyarev, V.N., Yakovleva, I.L., Kineticheskie zakonmernosti obrazovaniya perlita iz austenita, podvergnutogo deformatsii [Kinetic patterns of formation of perlite from austenite subjected to deformation], *Vestnik YuUrGu*, 2006, No 10, pp. 90–95.
15. Kaletin, A.Yu., Ryzhkov, A.G., Kaletina, Yu.V., Povyshenie udarnoi vyazkosti kon-struksionnykh stalei pri obrazovanii beskarbidnogo beinita [Increasing the impact strength of structural steels during the formation of carbide-free bainite], *Fizika metallov i metallovedenie*, 2015, V. 116, No 1, pp. 114–120.
16. Kaputkina, L.M., Marmulev, A.V., Polyak, E.I., Erman, G., Vliyanie uslovii okhlazhdeniya rulonov na neravnomernost struktury i mekhanicheskikh svoystv goryachekatanykh vysokoprochnykh avtolistovykh stalei [The influence of roll cooling conditions on the unevenness of the structure and mechanical properties of hot-rolled high-strength sheet steels], *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, No 12 (690), 2012, pp. 14–18.
17. Kaputkina, L.M., Marmulev, A.V., Shchetinin, I.V., Erman, G., Polyak, E.I., Issledovanie formirovaniya neravnomernosti struktury i svoystv v goryachekatanoi rulonnoi vysokoprochnoi nizkouglerodistoi stali [Investigation of the formation of unevenness of structure and properties in hot-rolled high-strength low-carbon steel], *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya*, 2013, No 9, pp. 4–47.
18. Chashchin, V.V., Kuklev, A.V., Popov, E.S., Slavov, E.S., Reguliruemoe okhlazhdenie polosy v rulone – otvetstvennyy etap formirovaniya tonkoi struktury stali [Adjustable cooling of the strip in the roll, a crucial stage in the formation of a thin steel structure], *Stal*, 2007, No 3, pp. 79–82.
19. Chashchin, V.V., Tekhnologiya reguliruemogo okhlazhdeniya rulonov na transportnom konveyere polosovogo stana goryachei prokatki [Technology of controlled cooling of rolls on the transport conveyor of a strip hot rolling mill], *Stal*, 2018, No 6, pp. 27–31.
20. Lipukhin, Yu.V., Chashchin, V.V., Pimenov, A.F., et al., Stabilizatsiya mekhanicheskikh svoystv goryachekatanykh polos po dlinae putem sovershenstvovaniya uslovii ikh okhlazhdeniya v rulonakh [Stabilization of the mechanical properties of hot-rolled strips along the length by improving their cooling conditions in rolls], *Bul. NTI: Chernaya metallurgiya*, 1983, No 5, pp. 44–45.
21. Chashchin, V.V., Khloponin, V.N., Peshkov, V.A., et al., Uluchshenie kachestva goryachekatanykh polos reguliruemym okhlazhdeniem rulonov [Improving the quality of hot-rolled strips by controlled cooling of rolls], *Stal*, 1990, No 3, pp. 77–81.
22. Orlov, M.R., Terekhin, A.M., Morozova, L.V., Zhuravleva, P.L., Naprienko, S.A., Issledovanie vliyaniya plasticheskoi deformatsii stali 20Kh3MVF so strukturoi ferrita na mekhanicheskie svoystva i kharakter razrusheniya [Investigation of the effect of plastic deformation of 20Kh3MVF steel with ferrite structure on mechanical properties and fracture pattern], *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2014, No S4, pp. 118–124.
23. Khlusova, E.I., Sych, O.V., Orlov, V.V., Khladostoi kie stali. Struktura, svoystva, tekhnologii [Cold-resistant steels. Structure, properties, technologies], *Fizika metallov i metallovedenie*, 2021, V. 122, No 6, pp. 621–657.

MECHANISMS OF HARDENING OF HEAVY-LOADED RAILS MADE OF HYPEREUTECTOID STEEL DURING LONG-TERM OPERATION

N.A. POPOVA¹, Cand Sc. (Eng), V.E. GROMOV², Dr. Sc. (Phys-Math), M.A. PORFIRIEV²,
Yu.F. IVANOV³, Dr. Sc. (Phys-Math), E.L. NIKONENKO¹, Cand Sc. (Phys-Math),
S.A. NEVSKY², Dr Sc (Eng)

¹ Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering,
2 Solyanaya Sq, 634003 Tomsk, Russian Federation. E-mail: natalya-popova-44@mail.ru

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

³ Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
2/3 Akademicheskoy Ave, 634055 Tomsk, Russian Federation. E-mail: yufi55@mail.ru

Received August 23, 2023

Revised November 11, 2023

Accepted November 17, 2023

Abstract—Using transmission electron microscopy methods, the structural-phase states and defective substructure were studied at distances of 0; 2 and 10 mm from the surface along the central axis and rounding radius of rails head fillet. Differentially hardened long rails of the DT400IK category made of hypereutectoid steel have been studied after operation on the Trans-Baikal Railway (passed tonnage equal to 234.7 million tons gross). It has been established that steel strength characteristics are determined by certain physical mechanisms. A qualitative assessment of the contributions from crystal lattice friction, solid-solution strengthening, strengthening of the pearlite component, incoherent cementite particles, grain boundaries and subboundaries, dislocation substructure and internal stress fields was carried out, and their hierarchy was established. A quantitative assessment of the additive yield strength of steel in different directions was carried out depending on the distance from the rolling surface. It is shown that the main mechanisms of strengthening are strengthening by incoherent particles, long-range stress fields and substructural strengthening. The additive yield strength on the fillet surface is significantly greater than on the rolling surface of the head along the central axis.

Keywords: electron microscopy, rails, eutectoid steel, hardening mechanisms, additive yield strength

ACKNOWLEDGMENTS

The work was performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. FEMN-2023-0003).

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-20-39

REFERENCES

1. Yuriev, A.A., Kuznetsov, R.V., Gromov, V.E., Ivanov, Yu.F., Shlyarova, Yu.A., *Dlinnomernye relsy: struktura i svoystva posle sverkhdlitelnoy ekspluatatsii* [Long rails: structure and properties after long-term operation], Novokuznetsk: Poligrafist, 2022.
2. Shur, E.A, *Povrezhdeniya relsov* [Rail damage], Moscow: Intekst, 2012.
3. Ivanov, Yu.F., Morozov, K.V., Peregudov, O.A., Gromov, V.E., *Ekspluatatsiya relsovoi stali: degradatsiya struktury i svoystv poverkhnostnogo sloya* [Operation of rail steel: degradation of the structure and properties of the surface layer], *Izv. vuzov. Chernaya Metallurgiya*, 2016, V. 59, No 8, pp. 576–580. DOI: 10.17073/0368-0797-2016-8-576-580.
4. Steenbergen, M., Rolling contact fatigue: Spalling versus transverse fracture of rails, *Wear*, 2017, V. 380–381, pp. 96–105. DOI: 10.1016/j.wear.2017.03.003.
5. Ivanov, Yu.F., Kormyshev, V.E., Gromov, V.E., Yuriev, A.A., Glezer, A.M., Rubannikova, Yu.A., *Mekhanizmy uprochneniya metalla relsov pri dlitelnoi ekspluatatsii* [Mechanisms of hardening of metal rails during long-term operation], *Voprosy materialovedeniya*, 2020, No 3 (103), pp. 17–28. DOI: 10.22349/1994-6716-2020-103-3-17-28.

6. Miranda, R.S., Rezende, A.B., Fonseca, S.T., Fernandes, F.M., Sinatora, A., Mei, P.R., Fatigue and wear behavior of pearlitic and bainitic microstructures with the same chemical composition and hardness using twin-disc tests, *Wear*, 2022, V. 494–495, p. 204253. DOI: 10.1016/j.wear.2022.204253.
7. Pereira, H.B., Alves, L.H.D., Rezende, A.B., Mei, P.R., Goldenstein, H., Influence of the microstructure on the rolling contact fatigue of rail steel: Spheroidized pearlite and fully pearlitic microstructure analysis, *Wear*, 2022, V. 498–499, p. 204299. DOI: 10.1016/j.wear.2022.204299.
8. Zhang, S.-Y., Spiryagin, M., Lin, Q., Ding, H.-H., Wu, Q., Liu, Q.-Y., Wang, W.-J., Study on wear and rolling contact fatigue behaviours of defective rail under different slip ratio and contact stress conditions, *Tribology International*, 2022, V. 169, p. 107491. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107491.
9. Ma, L., Guo, J., Liu, Q.Y., Wang, W.J., Fatigue crack growth and damage characteristics of high-speed rail at low ambient temperature, *Engineering Failure Analysis*, 2017, V. 82, pp. 802–815. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.07.026.
10. Hu, Y., Zhou, L., Ding, H.H., Tan, G.X., Lewis, R., Liu, Q.Y., Guo, J., Wang, W.J., Investigation on wear and rolling contact fatigue of wheel-rail materials under various wheel/rail hardness ratio and creepage conditions, *Tribology International*, 2020, V. 143, p. 106091. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.106091.
11. Rong, K., Xiao, Ye., Shen, M., Zhao, H., Wang, W., Xiong, G., Influence of ambient humidity on the adhesion and damage behavior of wheel–rail interface under hot weather condition, *Wear*, 2021, V. 486–487, p. 204091. DOI: 10.1016/j.wear.2021.204091.
12. Zhou, L., Ding, H., Han, Z., Chen, C., Liu, Q., Guo, J., Wang, W., Study of rolling-sliding contact damage and tribo-chemical behaviour of wheel-rail materials at low temperatures, *Engineering Failure Analysis*, 2022, V. 134, p. 106077. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106077.
13. Al-Juboori, A., Zhu, H., Li, H., McLeod, J., Panella, S., Barnes, J., Microstructural investigation on a rail fracture failure associated with squat defects, *Engineering Failure Analysis*, 2023, V. 151, p. 107411. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107411.
14. Porfiriev, M.A., Gromov, V.E., Ivanov, Yu.F., Shlyarova, Yu.A., Kryukov, R.E., Prochnostnye, tribologicheskie svoystva i strukturno-fazovye sostoyaniya relsovykh staley [Strength, tribological properties and structural-phase states of rail steels], *Fundamentalnye problemy sovremennogo materialovedeniya*, 2023, V. 2, No 2, pp. 176–183. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.02.004.
15. Kuznetsov, R.V., Gromov, V.E., Ivanov, Yu.F., Yuriev, A.A., Kormyshev, V.E., Polevoi, E.V., Evolyutsiya strukturno-fazovykh sostoyanij i svoystv differentsirovanno zakalennykh 100-metrovykh relsov pri ekstremalno dlitelnoi ekspluatatsii. Soobshchenie 5: Gradientnye strukturno-fazovye sostoyaniya po radiusu skrugleniya golovki relsov posle sverkhdlitelnoi ekspluatatsii [Evolution of structural and phase states and properties of differentially hardened 100-meter rails during extremely long-term operation. Report 5: Gradient structural-phase states along the radius of rounding of the rail head after ultra-long operation], *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*, 2022, No 1, pp. 56–64. DOI: 10.54826/19979258_2022_1_56.
16. Ivanov, Yu.F., Gromov, V.E., Kuznetsov, R.V., Shlyarova, Yu.A., Yuriev, A.A., Kormyshev, V.E., Struktura relsov posle ekstremalno dlitelnoi ekspluatatsii [Rail structure after extremely long-term operation], *Izvestiya vysshnykh uchebnykh zavedeny. Fizika*, 2022, V. 65, No 3, pp. 160–165. DOI: 10.17223/00213411/65/3/160.
17. Gromov, V.E., Ivanov, Yu.F., Kuznetsov, R.V., Glezer, A.M., Shlyarova, Yu.A., Peregudov, O.A., Deformatsionnoe preobrazovanie struktury i fazovogo sostava poverkhnosti relsov pri sverkhdlitelnoi ekspluatatsii [Deformation transformation of the structure and phase composition of the rail surface during ultra-long operation], *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2022, No 1, pp. 35–39. DOI: 10.31044/1814-4632-2022-1-35-39.
18. Chernyak, S.S., Broido, V.L., Tuzhilina, L.V., Razrabotka sostava i tekhnologii izgotovleniya iznosostoikikh relsov iz zaevtektoidnoi stali [Development of the composition and manufacturing technology of wear-resistant rails made of hypereutectoid steel], *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovaniye*, 2017, V. 56, No 4, pp. 197–206. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).
19. Polevoi, E.V., Yunin, G.N., Yunusov, A.M., Dobuzhskaya, A.B., Galitsyn, G.A., K voprosu iznosostoikosti relsov [On the issue of wear resistance of rails], *Stal*, 2019, No 7, pp. 62–65.
20. Dobuzhskaya, A.B., Galitsyn, G.A., Yunin, G.N., Polevoi, E.V., Yunusov, A.M., Issledovanie vliyaniya khimicheskogo sostava, mikrostruktury i mekhanicheskikh svoystv na iznosostoikost relsovoi stali

[Investigation of the influence of chemical composition, microstructure and mechanical properties on the wear resistance of rail steel], *Stal*, 2020, No 12, pp. 52–55.

21. Kormyshev, V.E., Yuriev, A.A., Rubannikova, Yu.A., Aksyonova, K.V., Raspredelenie strukturno-fazovykh sostoyany po secheniyu golovki relsov pri dlitelnoi ekspluatatsii [Distribution of structural and phase states over the cross section of the rail head during long-term operation], *Vestnik SibGIU*, 2020, No 4 (34), pp. 20–24.

22. Wen, J., Marteau, J., Bouvier, S., Risbet, M., Cristofari, F., Secorde, P., Comparison of microstructure changes induced in two pearlitic rail steels subjected to a full-scale wheel/rail contact rig test, *Wear*, 2020, V. 456–457, p. 203354. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203354.

23. Hu, Y., Guo, L.C., Maiorino, M., Liu, J.P., Ding, H.H., Lewis, R., Meli, E., Rindi, A., Liu, Q.Y., Wang, W.J., Comparison of wear and rolling contact fatigue behaviours of bainitic and pearlitic rails under various rolling-sliding conditions, *Wear*, 2020, V. 460–461, p. 203455. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203455.

24. Hu, Y., Zhou, L., Ding, H.H., Lewis, R., Liu, Q.Y., Guo, J., Wang, W.J., Microstructure evolution of railway pearlitic wheel steels under rolling-sliding contact loading, *Tribology International*, 2021, V. 154, p. 106685. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106685.

25. Zhou, L., Bai, W., Han, Z., Wang, W., Hu, Yu., Ding, H., Lewis, R., Meli, E., Liu, Q., Guo, J., Comparison of the damage and microstructure evolution of eutectoid and hypereutectoid rail steels under a rolling-sliding contact, *Wear*, 2022, V. 492–493, p. 204233. DOI: 10.1016/j.wear.2021.204233.

26. Bai, W., Zhou, L., Wang, P., Hu, Y., Wang, W., Ding, H., Han, Z., Xu, X., Zhu, M., Damage behavior of heavy-haul rail steels used from the mild conditions to harsh conditions, *Wear*, 2022, V. 496–497, p. 204290. DOI: 10.1016/j.wear.2022.204290.

27. Pan, R., Chen, Yu., Lan, H., E, S., Ren, R., Investigation into the microstructure evolution and damage on rail at curved tracks, *Wear*, 2022, V. 504–505, p. 204420. DOI: 10.1016/j.wear.2022.204420.

28. Porfiriev, M.A., Gromov, V.E., Kryukov, R.E., Evolyutsiya strukturno-fazovogo sostoyaniya i svoystv relsov iz zaevtektoidnoi stali pri dlitelnoi ekspluatatsii [Evolution of the structural-phase state and properties of hypereutectoid steel rails during long-term operation], *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya*, 2023, V. 66, No 3, pp. 327–329. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-3-327-329.

29. Ivanov, Yu.F., Gromov, V.E., Porfiriev, M.A., Kryukov, R.E., Shlyarov, V.V., Polevoi, E.V., Evolyuciya tonkoj struktury rel'sov iz zaevtektoidnoj stali pri ekspluatatsii [Evolution of the fine structure of hypereutectoid steel rails during operation], *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*, 2023, No 2, pp. 63–68.

30. Wang, W.J., Lewis, R., Yang, B., Guo, L.C., Liu, Q.Y., Zhu, M.H., Wear and damage transitions of wheel and rail materials under various contact conditions, *Wear*, 2016, V. 362–363, pp. 146–152. DOI: 10.1016/j.wear.2016.05.021.

31. Pan, R., Ren, R., Zhao, X., Chen, C., Influence of microstructure evolution during the sliding wear of CL65 steel, *Wear*, 2018, V. 400–401, pp. 169 – 176. DOI: 10.1016/j.wear.2018.01.005.

32. Nguyen, B.H., Al-Juboori, A., Zhu, H., Zhu, Q., Li, H., Tieu, K., Formation mechanism and evolution of white etching layers on different rail grades, *International Journal of Fatigue*, 2022, V. 163, p. 107100. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107100.

33. Mojumder, S., Mishra, K., Singh, K., Qiu, C., Mutton, P., Singh, A., Effect of track curvature on the microstructure evolution and cracking in the longitudinal section of lower gauge corner flow lips formed in rails, *Engineering Failure Analysis*, 2022, V. 135, p. 106177. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106177.

34. Hirsh, P., Hovi, A., Nikolson, P., Peshli, D., Uelan, M., *Elektronnaya mikroskopiya tonkikh kristallov* [Electron microscopy of thin crystals], Moscow: Mir, 1968.

35. Chernyavsky, V.S., *Stereologiya v metallovedenii* [Stereology in metal science], Moscow: Metallurgiya, 1977.

36. Goldshtein, M.I., Farber, V.M., *Dispersionnoe uprochnenie stali* [Dispersion hardening of steel], Moscow: Metallurgiya, 1979.

37. Kozlov, E.V., Koneva, N.A., Piroda uprochneniya metallicheskich materialov [The nature of hardening of metal materials], *Izv. vuzov. Fizika*, 2002, V. 45, No 3, pp. 52–71.

38. Gulyaev, A.P., *Metallovedenie* [Metal science], Moscow: Metallurgiya, 1977.

39. Tushinskij, L.I., Bataev, A.A., Tihomirova, L.B., *Struktura perlita i konstruktivnaya prochnost stali* [Pearlite structure and structural strength of steel], Novosibirsk: Nauka, 1993.

40. Kozlov, E., Glezer, A.M., Koneva, N.A., Popova, N.A., Kurzina, I.A., *Osnovy plasticheskoi deformatsii nanostrukturnykh materialov* [Fundamentals of plastic deformation of nanostructured materials], A.M. Glezer (Ed.), Moscow: FIZMATLIT, 2016.

UDC 621.771.016:669.15–194.55:539.22:620.187

ASSESSMENT OF FORMER AUSTENITE STRUCTURE IN HOT ROLLED STEEL IN TERMS OF ITS TEXTURE AFTER MARTENSITIC TRANSFORMATION

A.A. ZISMAN, Dr. Sc. (Phys-Math), T.V. KNIAZYUK, Cand Sc. (Eng), S.N. PETROV, Dr. Sc. (Eng),
M. L. FEDOSEEV, N. S. NOVOSKOLTSEV

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

Received October 12, 2023
Revised November 2, 2023
Accepted November 20, 2023

Abstract—Textures of medium carbon steel, hot rolled and then quenched, have been determined by Electron backscatter diffraction (EBSD). To ensure representativeness of results, a rather large treated scan covered about a thousand of prior grains, each containing several thousands of measurement points. Considering inter-phase orientation relationships peculiar to martensitic steels, textures of the high temperature phase (austenite) have been assessed in terms of the transformation textures. Thus, deformed and recrystallized states of austenite dependent on the rolling conditions can be distinguished. To verify EBSD data, martensite textures were measured by an independent method of EBSD whereas morphology of the prior grains was revealed by means of chemical etching.

Keywords: martensite, austenite, prior grains, texture, EBSD

ACKNOWLEDGMENTS

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

Computer processing of the obtained EBSD data was carried out at the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Peter the Great St Petersburg Polytechnic University using the MTEX program with the financial support of the Russian Science Foundation, project No 22-19-00627.

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-40-49

REFERENCES

1. Garcia de Andres, C., Bartolome, M.J., Capdevila, C., et al., Metallographic techniques for the determination of the austenite grain size in medium-carbon microalloyed steels, *Materials Characterization*, 2001, V. 46, pp. 389–398.
2. Bencotter, A.O., Perricone, M.J., Marshall's Reagent: Origins, Modifications, and new Applications, *Microsc. Microanal.*, 2005, V. 11, pp. 76–77.
3. Garcia de Andres, C., Caballero, F.G., Capdevila, C., San Martin, D., Revealing austenite grain boundaries by thermal etching: advantages and disadvantages, *Materials Characterization*, 2003, No 49, pp. 121–127.
4. Perttula, J.S., Karjalainen, L.P., Recrystallization in austenite measured by double compression and stress relaxation methods, *Mater. Sci. Technol.*, 1998, No 14, No. 626–630.
5. Bianchi, J.G., Karjalainen, L.P., Modeling of dynamic and metadynamic recrystallization during bar rolling of a medium carbon spring steel, *J. Mater. Proc. Technol.*, 2005, V. 160, pp. 267–277.
6. Kniazyuk, T.V., Zisman, A.A., Abnormal effect of strain rate on dynamic recrystallization of austenite in medium carbon steel alloyed by boron, *Letters on Materials*, 2022, V. 12, pp. 71–75.
7. Brown, E.L., Deardo, A.J., On the origin of equiaxed austenite grains that result from the hot rolling of steel, *Metall. Trans. A*, 1981, V. 12, pp. 39–47.
8. Jonas, J.J., Transformation textures associated with steel processing, *Microstructure and Texture in Steels*, Haldar, A., Suwas, S., Bhattacharjee, D. (Eds.), New York: Springer, 2009, pp. 3–17.

9. Adams, B.L., Wright, S.I., Kunze, K., Orientation imaging: The emergence of a new microscopy, *Metall. Mater. Trans A*, 1993, V. 24, pp. 819–831.
10. Winkelmann, A., Nolze, G., Cios, G., Tokarski, T., Bala, P., Refined calibration model for improving the orientation precision of electron backscatter diffraction maps, *Materials*, 2020, No 13, Art. 3122816.
11. Khlusova, E.I., Zisman, A.A., Knyazyuk, T.V., Novoskoltsev, N.S., Effect of the rate of hot compressive deformation on kinetics of dynamic and static recrystallization of novel medium-carbon medium-alloy steel, *Met. Sci. Heat Treat.*, 2018, V. 59, pp. 682–688.
12. Bain, E.C., The nature of martensite, *Trans. AIME*, 1924, No 70, pp. 25–35.
13. Niessen, F., Nyysönen, T., Gazder, A., Hielscher, R., Parent grain reconstruction from partially or fully transformed microstructures in MTEX, *J. Appl. Crystallogr.*, 2022, No 55, pp. 180–194.
14. Cayron, C., Bour, A., Logé, R., Intricate morphologies of laths and blocks in low-carbon martensitic steels, *Mater. Design.*, 2018, No 154, pp. 81–95.

UDC 621.791.753.5:621.785

INFLUENCE OF TEMPERING ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF HIGH-STRENGTH STRUCTURAL STEEL ACHIEVED BY SUBMERGED ARC WELDING

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

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

Received October 30, 2023

Revised November 14, 2023

Accepted November 22, 2023

Abstract—The paper describes mechanical properties and microstructure of weld metal of welded joints of high-strength structural steel AB3K made by automatic submerged arc welding with K-shaped edge cutting. The comparative analysis of the process using Sv-07KhN3MD wire and 48A3 flux subjected to heat treatment under four different modes is carried out.

Keywords: high-strength structural steel, automatic submerged arc welding, welded joints, heat treatment, tempering, internal stress relief, structure, mechanical properties

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-50-59

REFERENCES

1. Gladshstein, L.I., Litvinenko, D.A., *Vysokoprochnaya stroitel'naya stal* [High-strength construction steel], Moscow: Metallurgiya, 1972.
2. *Teoriya svarochnyh processov* [Theory of welding processes], Frolov, V.V. (Ed.), Moscow: Vysshaya shkola, 1988.
3. Khlusova, E.I., Sych, O.V., Orlov, V.V., Khladostoikie stali. Struktura, svoistva, tekhnologii [Cold-resistant steels. Structure, properties, technologies], *Fizika metallov i metallovedenie*, 2021, V. 122, No 6, pp. 621–657.
4. Nikiforov, G.D., Bobrov, G.V., Nikitin, V.M., Dyachenko, V.V., *Tekhnologiya i oborudovanie svarki plavleniem* [Fusion welding technology and equipment], Moscow: Mashinostroenie, 1986.
5. Efimenko, L.A., Prygaev, A.K., Elagina, O.Yu., *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka svarnykh soedinenii* [Metallurgy and heat treatment of welded joints], Moscow: Logos, 2007.
6. Bolshakov, V.I., Starodubov, K.F., Tylkin, M.A., *Termicheskaya obrabotka stroitelnoi stali povyshennoi prochnosti* [Heat treatment of high-strength construction steel], Moscow: Metallurgiya, 1977.
7. Horn, I.V., *Atlas struktur svarnykh soedinenii* [Atlas of welded joint structures], Moscow: Metallurgiya, 1977.
8. Geller, Yu.A., Rakhshadt, A.G., *Materialovedenie* [Materials Science], Moscow: Metallurgiya, 1989.

9. Rogachev, S.O., Belov, V.A., Turilina, V.Yu., Shplis, N.V., Nikulin, S.A., *Vysokotemperaturnye mekhanicheskie svoystva metalla shva svarnogo soedineniya malouglerodistykh stali* [High-temperature mechanical properties of the weld metal of low-carbon steels], proceedings of the 10th Eurasian conference “Prochnost neodnorodnykh struktur”, Moscow, NITU “MISiS”, 20–22 April 2021.

10. Skulsky, V.Yu., Karyuk, A.K., Gavrik, A.R., Nimko, M.A., Strizhius, G.N., Vybora rezhimov vysokotemperaturnogo otpuska svarnykh soedinenii teploustoichivyykh stali, vypolnennykh elektrodami THERMANIT MTS616 [Selection of high-temperature tempering modes for welded joints of heat-resistant steels made with THERMANIT MTS616 electrodes], *Avtomaticheskaya svarka*, 2016, No 9, pp. 52–55.

11. Shajan, N., Arora, K.S., Asati, B., Sharma, V., Shome, M., Effects of post-weld heat treatment on the microstructure and toughness of flash butt welded high-strength low-alloy steel, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018, V. 49, pp. 1276–1286.

UDC 669.295'35:621.777.8

INFLUENCE OF HOT PRESSING TEMPERATURE OF COMPOSITE COPPER-TITANIUM BILLETS ON THE FORMATION OF INTERMETALLIDE LAYER AT THE MATERIAL INTERFACE

A.N. GANGALO, Cand Sc. (Eng), V.V. BURKHOVETSKY

Donetsk Institute of Physics and Technology named after A. A. Galkin, 72 Rosa Luxemburg, 283114 Donetsk, Russian Federation. E-mail: al-gangalo@yandex.ru

Received November 11, 2023

Revised November 7, 2023

Accepted November 13, 2023

Abstract—Billets for drawing of microwires based on Grade 4 titanium and protective sheath of M1 copper have been obtained at different temperatures by hot pressing method with drawing coefficient $\mu = 16$. The influence of the billet heating temperature on the pressing pressure, configuration of the interface of bimetal materials and thickness of the intermetallide layer is shown. The influence of elastic compression pressure of composite copper-titanium billets in the range of 350–1400 MPa on the formation of intermetallide at the interface of materials at 850°C has been analyzed.

Keywords: hot pressing, pressure, temperature, copper, titanium, bimetal, intermetallic layer

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-60-66

REFERENCES

1. Kazantsev, A.A., Parshikov, V.V., Shemyatovsky, K.A., Alekhin, A.I., Titarov, D.L., Kolpakov, A.A., Osadchenko, S.V., Titansoderzhashchie setchatye endoprotezy kak perspektivnaya gruppa implantatov dlya plastiki bryushnoi stenki [Titanium-containing mesh endoprotheses as a promising group of implants for abdominal wall plastic surgery], *Khirurgiya. Zhurnal im. N. I. Pirogova*, 2016, No 4, pp. 86–95.

2. Badalyan, A.A., Petrov, I.A., Chernavsky, A.F., Kliniko-psikhologicheskie osnovy formirovaniya kachestva zhizni pri vosstanovlenii biologicheskogo reliefa kosti s pomoshchyu titanovogo shelka [Clinical and psychological foundations of the formation of the quality of life in the restoration of the biological relief of bone using titanium silk], *Problemy stomatologii*, 2018, V. 14, No 3, pp. 56–63.

3. Kazantsev, A.A., Tulyakov, S.S., Alekhin, A.I., Khoninov, B.V., Kazakova, A.V., Kozlov, N.A., Batarai, B., Babichenko, I.I., Perspektivy ispolzovaniya polifilamentnogo titanovogo shovnogo materiala v travmatologii [Prospects for the use of polyfilament titanium suture material in traumatology], *Russky meditsinsky zhurnal*, 2017, V. 25, pp. 533–538.

4. Patent RU 2146975 C1: *Sposob izgotovleniya mikroprovodki iz trudnodeformiruemyykh materialov* [A method for manufacturing microwires from hard-to-form materials] / Zalazinsky, A.G., Sokolov, M.V., Shabashov, A.A., Novozhonov, V.I., 2000.

5. Patent RU 2315674 C2: *Sposob izgotovleniya mikroprovodki iz trudnodeformiruemyykh materialov* [A method for manufacturing microwires from hard-to-form materials], Kolmogorov, V.L., Zalazinsky, A.G., Kolmykov, V.L., Glazunova, M.Yu., 2008.

6. Gangalo, A.N., Sennikova, L.F., Burkhovetsky, V.V., Yanchev, A.I., Razrabotka metodiki polucheniya mikroprovodki iz titana VT1-0 dlya meditsiny [Development of a technique for obtaining microwire from titanium VT1-0 for medicine], *FTVD*, 2021, V. 31, No 2, pp. 5–11.

7. Gangalo, A.N., Prokofieva, O.V., Burkhovetsky, V.V., Yanchev, A.I., Tyutenko, V.S., Analiz kachestva bokovoi poverkhnosti titanovoi mikroprovodki [Quality analysis of the side surface of titanium microwire], *FTVD*, 2022, V. 32, No 3, pp. 108–113.

8. Bateni, M.R., Szpunar, J.A., Ashrafizadeh, F., Zandrahimiet, M., The effect of novel Ti – Cu intermetallic compound coatings on tribological properties of copper, *National Tribology Conference, The annals of University “Dunărea de Jos” of GALAȚIFASCICLE VIII*, 2003, pp. 55–62.

9. Elrefaey, A., Tillmann, W., Solid state diffusion bonding of titanium to steel using a copper base alloy as interlayer, *Journal of materials processing technology*, 2009, V. 209, No 5, pp. 2746–2752.

10. Perlin, I.L., *Teoriya pressovaniya metallov* [Theory of metal pressing], Moscow: Metallurgiya, 1964.

11. Evstropov, D.A., *Formirovanie struktury i svoistv kompozitsionnykh pokrytii sistemy Cu–Ti na poverkhnosti mednykh detalei* [Formation of the structure and properties of composite coatings of the Cu–Ti system on the surface of copper parts]: Thesis for the degree of Candidate of Sciences (Eng), Volgograd, 2016.

12. Patent RU 2 691 656 C1: *Shikhta i sposob polucheniya iznosostoikogo materiala s ee ispolzovaniem metodom SVS* [The charge and the method of obtaining a wear-resistant material using the SHS method], Filippenkov, A.A., 2018.

UDC 669.715:536.631

EFFECT OF BISMUTH ADDITIVES ON THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES AND THERMODYNAMIC FUNCTIONS OF ALUMINUM ALLOY AlFe5Si10

I.N. GANIEV¹, Dr Sc. (Chem), F. KHOLMURODOV², Cand Sc. (Phys-Math),
A.G. SAFAROV², Dr Sc. (Eng), N.R. NUROV³, U.Sh. YAKUBOV¹, PhD

¹*Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin, National Academy of Sciences of Tajikistan, 299/2 Aini St, 734063 Dushanbe, Republic of Tajikistan. E-mail ganievizatullo48@gmail.com*

²*Physical-Technical Institute named after S.U. Umarov, National Academy of Sciences of Tajikistan, 299/2 Aini St, 734063 Dushanbe, Republic of Tajikistan*

³*Khujand State University named after Academician Bobojon Gafurov, 1 Mavlonbekov Ave, 735700 Khujand, Republic of Tajikistan*

Received February 3, 2023

Revised November 22, 2023

Accepted November 27, 2023

Abstract—The temperature dependence of the heat capacity of the aluminum alloy AlFe5Si10 with bismuth was studied in the “cooling” mode. It is shown that with increasing temperature, the heat capacity, enthalpy and entropy of alloys increase, and the value of the Gibbs energy decreases. As the amount of bismuth in the initial alloy increases, the heat capacity, enthalpy and entropy of the AlFe5Si10 alloy decrease, while the value of the Gibbs energy increases.

Keywords: alloys of the AlFe5Si10 system, heat capacity, “cooling” mode, heat transfer coefficient, enthalpy, entropy, Gibbs energy

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-67-78

REFERENCES

1. Taylor, J.A., *The effect of Iron in Al–Si Casting Alloys*, 35th Australian Foundry Institute National Conference, Adelaide, Australia, 2004, pp. 148–157.

2. Kral, M.V., Nakashima, P.N.H., Mitchell, D.R.G., Electron microscope studies of Al–Fe–Si intermetallics in an Al–11 percent alloy, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2006, V. 37 (6), pp. 1987–1997.

3. Ravi, C., Wolverton, C., Comparison of thermodynamic databases for 3XX and 6XXX aluminum alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2005, V. 36, pp. 2013–2023.

4. Belov, N.A., Aksenov, A.A., *Iron in Aluminium Alloys. Impurity and Alloying Element*, London; New York, 2002, pp. 3–7.
5. Belov, N.A., *Fazovy sostav promyshlennykh i perspektivnykh aluminievykh splavov* [Phase composition of industrial and promising aluminum alloys], Moscow: MISiS, 2010.
6. Dominik, B., Stefan, P., Marc, H., Werner, F., Peter, J.U., Mathias, G., Heinz, W.H. Secondary Al–Si–Mg High-pressure Die Casting Alloys with Enhanced Ductility, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015, V. 46, pp. 1035–1045.
7. Maltsev, M.V., *Modifitsirovanie struktury metallov i splavov* [Modification of the structure of metals and alloys], Moscow: Metallurgiya, 1984.
8. Golovko, O., Mamuzić, I., Grydino, O., Method for Pocket Die Design on the Basis of Numerical Investigation of Aluminium Extrusion Process, *Metalurgiya*, 2006, V. 45, No 3, pp. 155–161.
9. Markoli, B., Spaić, S., Zupanič, F., *Aluminium*, 2004, V. 80, No ½, pp. 84–88.
10. Mondolfo, L.F., *Struktura i svoistva alyuminievykh splavov* [Structure and properties of aluminum alloys], Moscow: Metallurgiya 1979.
11. Kaufman, J.G., Rooy, E.L., *Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications*, Materials Park: ASM International, 2004.
12. Zinoviev, V.E., *Teplofizicheskie svoistva metallov pri vysokikh temperaturakh* [Thermophysical properties of metals at high temperatures]: reference book, Moscow: Metallurgiya, 1989.
13. Ganiev, I.N., Yakubov, U.Sh., Khakimov, A.H., *Svoistva alyuminievogo splava AZh5K10 s shche-lochnozemelnyimi metallami* [Properties of aluminum alloy AZH5K10 with alkaline earth metals], Dushanbe: Donish, 2021.
14. Ivantsov, G.P., *Nagrev metalla (teoriya i metody rascheta)* [Metal heating (theory and calculation methods)], Sverdlovsk; Moscow: Metallurgizdat, 1948.
15. Bagnitsky, V.E., *Obratnye svyazi v fizicheskikh yavleniyakh* [Feedbacks in physical phenomena], LAP (Lambert Acad. Publ.), 2014.
16. Kirov, S.A., Kozlov, A.V., Saletsky, A.M., Kharabadze, D.E., *Izmerenie teploemkosti i teploty plavleniya metodom okhlazhdeniya* [Measurement of heat capacity and melting heat by cooling method]: study guide, Moscow: Fizichesky fakultet MGU im. M. V. Lomonosova, 2012.
17. Tarsin, A.V., Kosterin, K.S., *Opredelenie teploemkosti metallov metodom okhlazhdeniya* [Determination of the heat capacity of metals by the cooling method]: laboratory classes, Ukhta: Ukhtinsky gosudarstvenny tekhnicheskyy universitet, 2014.
18. Rogachev, N.M., Guseva, S.I., *Opredelenie udelnoi teploemkosti tverdykh tel* [Determination of the specific heat capacity of solids], Samara: Samarsky gosudarstvenny aerokosmichesky universitet im. akad. S.P. Koroleva, 2012.
19. Stark, B.V., Yavleniya nagreva v mufelnykh pechakh [Heating phenomena in muffle furnaces], *Zhurn. russkogo metallurgicheskogo obshchestva*, 1926, No 2, pp. 184–198.
20. Umarov, M.A. Ganiev, I.N., Temperatur'naya zavisimost' teploemkosti i izmeneniye termodinamicheskikh funktsii svintsa marki S2 [Temperature dependence of the heat capacity and changes in the thermodynamic functions of C2 lead], *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2018, V. 20, No 1, pp. 23–29.
21. Ganiev, I.N., Safarov, A.G., Odinaev, F.R., Yakubov, U.Sh., Kabutov, K., Temperatur'naya zavisimost' teploemkosti i izmeneniye termodinamicheskikh funktsii splava AZh 4.5 s olovom [The temperature dependence of the heat capacity and the change in the thermodynamic functions of the alloy AS much as 4.5 with tin], *Izv. VUZov: Tsvetnaya metallurgiya*, 2019, No 1, pp. 50–58.
22. Ganiev, I.N., Safarov, A.G., Odinaev, F.R., Yakubov, U.Sh., Kabutov, K., Temperatur'naya zavisimost' teploemkosti i izmeneniy termodinamicheskikh funktsiy splava AZh4,5 s vismutom [Temperature dependence of the heat capacity and changes in the thermodynamic functions of the alloy AZh4.5 with bismuth], *Metally*, 2019, No 1, pp. 21–29.
23. Ganiev, I.N., Safarov, A.G., Odinaev, F.R., Yakubov, U.Sh., Kabutov, K., Temperature Dependence of the Specific Heat and the Changes in the Thermodynamic Functions of a Bismuth-Bearing AZh4.5 Alloy, *Russian Metallurgy (Metally)*, 2020, V. 1, pp. 17–24.

24. Ganiev, I.N., Nazarova, M.T., Yakubov, U.Sh., Safarov, A.G., Kurbonova, M.Z., Influence of Lithium on Specific Heat Capacity and Changes in the Thermodynamic Functions of Aluminum Alloy AB1, *High Temperature*, 2020, V. 58, No 1, pp. 58–63.
25. Glazov, V.M., Pashinkin, A.S., Teplofizicheskie svoystva (teploemkost i termicheskoe rasshirenie) monokristallicheskogo kremniya [Thermophysical properties (heat capacity and thermal expansion) of monocrystalline silicon], *TVT*, 2001, V. 39, No 3, pp. 443–449.
26. Glazov, V.M., Pashinkin, A.S., Mikhailova, M.S., Timoshina, G.G., Anomalnoe izmenenie teploemkosti pri nagrevanii monokristallov kremniya v svyazi s protekaniem strukturnykh prevrashchenii [Abnormal change in heat capacity during heating of silicon single crystals due to the course of structural transformations], *Doklady RAN*, 1997, V. 334, No 1, pp. 59.
27. Glazov, V.M., Mikhailova, M.S., Izmenenie kharakteristik prochnosti mezhatomnoi svyazi i kharaktera temperaturnoi zavisimosti teploemkosti pri legirovanii kremniya niobiem [Changes in the characteristics of the strength of the interatomic bond and the nature of the temperature dependence of the heat capacity when silicon is doped with niobium], *Doklady RAN*, 1998, V. 360, No 2, pp. 209.
28. Glazov, V.M., Mikhailova, M.S., Kharakteristiki mezhatomnoi svyazi i temperaturnaya zavisimost teploemkosti kremniya, legirovannogo niobiem [Characteristics of the interatomic bond and temperature dependence of the heat capacity of niobium-doped silicon], *ZhFCh*, 1998, V. 72, No 11, pp. 1931.
29. Deviatykh, G.G., Gusev, A.V., Gibin, L.M., et al., Teploemkost vysokochistogo kremniya [Heat capacity of high-purity silicon], *Doklady RAN*, 1997, V. 353, No 6, p. 768.
30. Deviatykh, G.G., Gusev, A.V., Gibin, L.M., et al., Teploemkost vysokochistogo kremniya [Heat capacity of high-purity silicon], *Neorgan. Materialy*, 1997, V. 33, No 12, p. 1425.
31. Timofeev, O.V., *Teploemkost vysokochistogo kremniya* [Heat capacity of high-purity silicon]: Thesis for the degree of Candidate of Chemistry, Nizhny Novgorod: Institute of High-Purity Chemistry RAS, 1999.

UDC 621.791.92:621.763

RESEARCH OF THE MELTING ZONE OF THE RELIT – CUPRONICEL COMPOSITE ALLOY WHEN SURFACING METALLURGICAL EQUIPMENT PARTS USING THE FURNACE METHOD

D.A. ZARECHENSKY, Cand Sc. (Eng), V.V. VOROBYOV, V.A. SHEVCHENKO

Priazovsky (Azov) State Technical University, 7 Universitetskaya St, Mariupol, Russian Federation.

E-mail: office-pstu@yandex.ru

Received September 12, 2023

Revised October 20, 2023

Accepted October 21, 2023

Abstract—With the furnace surfacing method, a composite alloy is obtained, consisting of reinforcing particles of tungsten and cupronickel carbides, which, after exposure to the melting temperature of the binder alloy, form a wear-resistant layer on the surface being hardened. It has been established that in the zone of connection of the composite alloy relit – cupronickel with the steel surface of the part, in the absence of conditions that guarantee auto-vacuum cleaning of the surface from oxides, an interlayer with an imperfect crystal structure is formed, which leads to delamination of the deposited alloy. It has been experimentally shown that the use of additional control for the gas tightness of the surfacing space makes it possible to improve the quality of the deposited surface when furnace hardening of metallurgical equipment parts with the composite alloy relit – cupronickel.

Keywords: composite alloy, relit – cupronickel, auto-vacuum soldering, furnace surfacing, diffusion zone, leak control

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-79-85

REFERENCES

1. Sukhovaya, E.V., Kvazikristallicheskie splavy – napolniteli dlya kompozitsionnykh sloev, poluchennykh metodami pechnoi naplavki [Quasi-crystalline alloys-fillers for composite layers obtained by furnace surfacing methods], *Avtomaticheskaya svarka*, 2014, No 1, pp. 24–28.
2. Danilov, L.I., Rovenskikh, F.M., Naplavka detalei zasypnykh ustroystv domennykh pechei kompozitsionnym splavom [Surfacing of details of backfill devices of blast furnaces with composite alloy], *Metallurg*, 1979, No 1, pp. 12–15.
3. Bystrov, V.A., Usloviya ekspluatatsii i vysokotemperaturnogo iznosa zasypnogo ustroystva domenoj pechi [Operating conditions and high-temperature wear of the blast furnace filling device], *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 2013, No 10, pp. 35–39.
4. Vorobyov, V.V., Malinov, V.L., Splavy i materialy dlya naplavki kontaktnykh poverkhnostei uravnitelnykh klapanov [Alloys and materials for surfacing contact surfaces of equalizing valves], *Visnik Donbasskoi derzhavnoi mashinobudivnoi akademii*, 2010, No 2 (19), pp. 64–68.
5. Melnichenko, A.S., Kudrya, A.V., Akhmedova, T.S., Sokolovskaya, E.A., Melnichenko, A.S., Predicting the risk of destruction of hard-facing alloys based on the morphology of their structure, *Metallurgist*, 2018, V. 60, No 11–12, pp. 1130–1134.
6. Kanter, A., Vakuumnaya paika – zalog kachestvennogo payanogo soedineniya [Vacuum soldering is the key to a high-quality soldered connection], *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti*, 2013, No 6, pp. 30–33.
7. Kudinov, V.D., Filimonov, B.V., Stepanov, B.V., Salamatin, V.E., Dudko, D.A., Maksimovich, B.I., Netesa, N.V., Naplavka kompozitsionnykh splavov relit + margantsevy melkhior s ispolzovaniem avtovakuumnogo effekta [Surfacing of composite alloys “relit+manganese cupronickel” using the autovacuum effect], *Svarochnoe proizvodstvo*, 1977, No 8, pp. 21–23.
8. Patent for utility model 95100239 RU, MPK (1995.01) V23K9/04: *Sposob iznosostoikoi naplavki* [Method of wear-resistant surfacing], Grebenyukov, A.V., Skorokhod, N.M., Solovyov, V.A., Trakshinsky, R.B., 95100239/02; Appl. 10.01.1995; Publ. 10.11.1996.
9. Bokhorov, I.O., Karabanov, V.V., Paika krupnykh massivnykh konstruksiy [Soldering of large massive structures], *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*, 2015, No 2, pp. 25–38.
10. Radzievsky, V.N., Gartsunov, Yu.F., Gazovydelenie iz zheleznykh poroshkov pri paike po shirokomu zazoru v protsesse nagreva v vakuume [Gas release from iron powders during soldering over a wide gap during heating in vacuum], *Svarochnoe proizvodstvo*, 1991, No 12, pp. 15–17.
11. Rymar, V.I., Radzievsky, V.N., Vysokotemperaturnaya avtovakuumnaya paika s ispolzovaniem sorbentov [High-temperature auto-vacuum soldering using sorbents], *Svarochnoe proizvodstvo*, 1978, No 2, pp. 12–13.
12. Zhudra, A.P., Naplavochnye materialy na osnove karbidov volframa [Surfacing materials based on tungsten carbides], *Avtomaticheskaya svarka*, 2014, No 6–7, pp. 69–75.
13. Zarechensky, D.A., Vorobyov, V.V., Chigarev, V.V., Remont defektov tipa “skol” kompozitsionnogo splava relit – melkhior detalei metallurgicheskogo oborudovaniya [Repair of defects of the “chip” type of composite alloy “relit–melchior” parts of metallurgical equipment], *Zahist metalurgiinykh mashin vid polo-mok*: Science articles collection, Mariupol: PDTU, 2006, No 9, pp. 87–90.
14. Bodrova, L.E., Goida, E.Yu., Melchakov, S.Yu., Shubin, A.B., Fedorova, O.M., Vzaimodeistvie karbidov WC i Cr₃C₂ pri termoobrabotke splavov WC – Cr₃C₂ – Cu [Interaction of WC and Cr₃C₂ carbides during heat treatment of WC – Cr₃C₂ – Cu alloys], *Perspektivnye materialy*, 2021, No 12, pp. 59–68.
15. Naumova, E.N., Kalinkov, A.Yu., Kostrizhitsky, A.I., Passivnye plenki na poverkhnosti konstruksionnykh materialov i ikh zashchitnye svoystva [Passive films on the surface of structural materials and their protective properties], *Kholodilna tekhnika i tekhnologiya*, 2001, No 5 (74), pp. 46–51.
16. Feinstein, A.I., Litovchenko, N.A., Izmenenie svoystv oksidnoi plenki na zheleze v protsesse rosta [Changing the properties of an oxide film on iron during growth], *Zhurnal fizicheskoi khimii*, 1980, No 3, pp. 801–803.
17. Rymar, V.I., Lotsmanov, S.N., Radzievsky, V.N., Osobennosti smachivaniya stalei pripoyami pri nagreva v vakuume [Features of wetting steels with solders when heated in vacuum], *Svarochnoe proizvodstvo*, 1975, No 5, pp. 35–36.

18. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Kharchenko, G.K., Falchenko, Yu.V., Nikitin, A.S., Grigorenko, S.G., Sa-moochistka ot oksidov stykuemykh poverkhnostei pri svarke v tverdoi faze s nagrevom [Self-cleaning from oxides of joined surfaces when welding in a solid phase with heating]: analytical review, *Avtomaticheskaya svarka*, 1998, No 2, pp. 16–23.

19. Matveev, Yu.M., Oshchepkov, Yu.P., Zubareva, V.A., Kuznetsov, E.M., Zakirova, F.N., Degt-yareva, V.F., O prirode svetloi poloski svarnogo shva trub, vypolnennogo pechnoi svarkoi [On the nature of the light strip of the welded seam of pipes made by furnace welding], *Svarochnoe proizvodstvo*, 1970, No 8, pp. 9–10.

20. Patent na korisnu model 39659 UA, MPK (2009) V22D 19/08: *Sposib naplavlennya detalei* [Method of surfacing parts], Zarechensky, D.O., Vorobiov, V.V., u200810437; Appl. 15.08.2008; Publ. 10.03.2009.

UDC 669.295:621.762.4

COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF TITANIUM POWDERS OF DIFFERENT CLASSES OF ALLOYS

V.P. LEONOV, Dr. Sc. (Eng), Yu.Yu. MALINKINA, Cand. Sc. (Eng), S.D. DRUGACHUK, I.M. KHACHATURYAN, E.V. CHUDAKOV, Cand. Sc. (Eng)

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

Received October 3, 2023

Revised October 11, 2023

Accepted October 13, 2023

Abstract—The results of a study of the technological properties of titanium powders of pseudo- α and pseudo- β alloys are presented. A comparative analysis of the characteristics of powder materials obtained by centrifugal spraying has been carried out. The results of the granulometric composition of the powders were obtained, and the calculation of the spatial packing of particles was applied within the framework of the hard sphere model for various fractional compositions. To compare the microstructure and mechanical properties, test samples from pseudo- α and pseudo- β titanium alloys were obtained using the hot isostatic pressing method according to selected modes.

Keywords: titanium alloys, hot isostatic pressing, titanium alloy powders, technological properties

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-86-98

REFERENCES

1. Padalko, A.G., *Praktika goryachego izostaticheskogo pressovaniya neorganicheskikh materialov* [The practice of hot isostatic pressing of inorganic materials], Moscow: Akademkniga, 2007.

2. Froes, F.H., Suryanarayana, C., Powder processing of titanium alloys, A. Bose, R.M. German, A. Lawley (Eds.), *Rev. Particulate Materials*, 1993, No 1, pp. 233–275.

3. Proceedings of the Conference on “Powder Metallurgy of Titanium Alloys,” Froes, F.H., Smugeresky, J., (Eds.), Warrendale, PA, USA, 1980.

4. Koshelev, V.Ya., Garibov, G.S., Sukhov, D.I., Osnovnye zakonomernosti protsessa polucheniya granul zharoprochnykh nikelovykh splavov metodom plazmennogo raspyleniya vrashchayushchisya zagotovki [The main regularities of the process of obtaining granules of heat-resistant nickel alloys by plasma spraying of a rotating workpiece], *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2015, No 3, pp. 97–103.

5. Vostrikov, A.V., Sukhov, D.I., Proizvodstvo granul metodom PREP dlya additivnykh tekhnologii – tekushchii status i perspektivy razvitiya [Production of pellets by PREP method for additive technologies – current status and development prospects], *Trudy VIAM*, 2016, No 8 (44), Art. 03.

6. Samarov, V., Khaykin, R., Nepomnyatschy, V., Koshelev, V., Khomyakov, E., Out gassing of powders before HIP: problems and solutions, *HIP 2002: Proceedings of the International Conference on Hot Isostatic Pressing*, Moscow, May 20–22, 2002.

7. European Powder Metallurgy Association. URL: www.epma.com (reference date 19/02/2024)

8. Ageev, S.V., Girshov, V.L., Goryachee izostaticheskoe pressovanie v poroshkovo metallurgii [Hot isostatic pressing in powder metallurgy], *Metalloobrabotka*, 2015, No 4 (88), pp. 56–60.
9. Aleksandrov, A.A., Aleksandrov, A.V., Demchenkov, G.G., Kuznetsov, S.Yu., Osipov, S.A., Ispol-zovanie metallurgii granul titanovykh splavov dlya polucheniya novykh materialov i izdelii s povyshennymi kharakteristikami [The use of metallurgy of titanium alloy granules to obtain new materials and products with improved characteristics], *Titan*, 2017, No 1, pp. 28–33.
10. Kansai, A.R., Torquato, S., Stillinger, F.H., Computer generation of dense polydisperse sphere packings, *J. Chem. Phys.*, 2002, V. 117.
11. Borkovec, M., De Paris, W., Peikert, R., The fractal dimension of the appolonian sphere packing, *Fractals*, 1994, V. 2 (4).
12. Ushakov, S.S., Kudryavtsev, A.S., Karasev, E.A., Bereslavsky, A.L., Machishina, L.A., Metallur-gicheskie aspekty tekhnologii proizvodstva krupnogabaritnykh slitkov titanovykh splavov [Metallurgical aspects of the production technology of large-sized titanium alloy ingots], *Voprosy materialovedeniya*, 2009, No 3 (59), pp. 96–106.
13. Kozlova, I.R., Chudakov, E.V., Tretyakova, N.V., Markova, Yu.M., Vasilieva, E.A., Vliyanie termicheskoi obrabotki na formirovanie struktury i uroven mekhanicheskikh svoystv vysokolegirovannogo titanovogo splava [The effect of heat treatment on the formation of the structure and the level of mechanical properties of a high-alloy titanium alloy], *Voprosy materialovedeniya*, 2019, No 4 (100), pp. 28–39.
14. Kablov, E.N., Evgenov, A.G., Rylnikov, V.S., Afanasiev-Khodykin, A.N., Issledovanie melkodies-persnykh poroshkov pripoev dlya diffuzionnoi vakuumnoi paiki, poluchennykh metodom atomizatsii rasplava [Investigation of finely dispersed solder powders for diffusion vacuum soldering obtained by melt atomization], *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser.: Mashinostroenie*, 2011, No SP2, pp. 79–87.
15. Samarov, V., Seliverstov, D., Raisson, G., Goloveshkin, V., *Physical Principles of Shape and Densification Control during HIP*, Proceedings of the 2011 International Conference on Hot Isostatic Pressing, Kobe, Japan, 2011.
16. Glazunov, S.G., Borzetsovskaya, K.M., *Poroshkovaya metallurgiya titanovykh splavov* [Powder metallurgy of titanium alloys], Moscow: Metallurgiya, 1989.

UDC 666.792.32'233

“SKELETON”, DIAMOND-SILICON CARBIDE COMPOSITE MATERIAL

D. Mendeleev Central Research Institute of Materials, 8 Paradnaya St., 191014 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: info@cniim.uvz.ru

S.K. GORDEEV, Dr Sc. (Eng)

Received September 18, 2023

Revised December 5, 2023

Accepted December 8, 2023

Abstract—The paper presents a review of exploratory and applied research carried out in Russia since the 1990s in the field of diamond-silicon carbide composite materials. A new class of isotropic ceramic materials has been created—diamond-silicon carbide composites, which have received the name Skeleton. The physical, mechanical, thermophysical and functional properties of materials depending on their composition are discussed. It is shown that the studied materials simultaneously combine mechanical, thermo-physical and functional properties at a level not achieved in other materials, which allows the use of the Skeleton material in various fields of engineering.

Keywords: diamond-silicon carbide composite, SiC “Skeleton”, properties, isotropic ceramic materials

ACKNOWLEDGMENTS

The author is grateful to his colleagues, with whom research has been carried out for more than 30 years on the production, study of the properties and use of the diamond-silicon carbide composite material ACC “Skeleton”.

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-99-116

REFERENCES

1. Shevchenko, V.Ya., Kovalchuk, M.V., Oryshchenko, A.S., Sintez novogo klassa materialov s regul'arnoj (periodicheskoj) vzaimosv'язannoj mikrostrukturoj, *Fizika i khimiya stekla*, 2020, V. 46, No 1, pp. 3–11.
2. Perevislov, S.N., Shevchenko, V.Ya., Reaktsionno-diffuzionny mekhanizm sinteza v sistemealmaz – karbid kremniya [Reaction-diffusion mechanism of synthesis in the diamond-silicon carbide system]: *Sb. materialov VI mezhdistsiplinarnogo nauchnogo foruma s mezhdunarodnym uchastiem "Novye materialy i perspektivnye tekhnologii"*, Moscow, 23–27.11.2020, V. 1, pp. 200–203.
3. Shevchenko, V.Ya., Kovalchuk, M.V., Oryshchenko, A.S., Perevislov, S.N., Novye khimicheskie tekhnologii na osnove reaktsionno-diffuzionnykh protsessov Tyuringa [New chemical technologies based on reaction-diffusion Turing processes]: *Doklady Rossijskoi akademii nauk. Khimiya, nauki o materialakh*, 2021, V. 496, pp. 25–29.
4. Shevchenko, V.Ya., Perevislov, S.N., Reaktsionno-diffuzionny mekhanizm sinteza v sistemealmaz – karbid kremniya [Reaction-diffusion mechanism of synthesis in the diamond-silicon carbide system], *Zhurnal neorganicheskoi khimii*, 2021, V. 66, No 8, pp. 1107–1114.
5. Shevchenko, V.Ya., Silnikov, M.V., Dolgin, A.S., Sychev, M.M., Perevislov, S.N., Mikhailin, A.I., Silnikov, N.M., Issledovanie zashchitnykh svoystv novogo keramicheskogo materiala "Ideal" [Investigation of the protective properties of the new ceramic material "Ideal"], *Izvestiya Rossijskoi akademii raketnykh i artillerijskikh nauk*, 2021, Is. 1, pp. 87–96.
6. Shevchenko, V.Ya., Silnikov, M.V., Neprobivaemy "Ideal" [The impenetrable "Ideal"], *Zashchita i bezopasnost*, 2022, No 3, pp. 24–25.
7. Shevchenko, V.Ya., Perevislov, S.N., Mikrostruktura i svoystva kompozitsionnykh materialovalmaz – karbid kremniya [Microstructure and properties of diamond-silicon carbide composite materials], *Novye ognepory*, 2021, No 9, pp. 48–54.
8. Gordeev, S.K., Advanced composite materials on the diamond base, *Diamond Based Composite Materials and Related Materials*, NATO ASI, Ser. 3, Kluwer Acad. pub., 1997, V. 38, pp. 1–11.
9. Ekstrom, T., Gordeev, S., *New carbide composites with extraordinary properties*, *Proceedings of the 2nd Int. Symp. On the Science of Engineering Ceramics II*, 6–9 Sept. 1998, Osaka, Japan, pp. 75–79.
10. Larsson, P., Axen, N., Ekstrom, T., Gordeev, S., Hogmark, S., Wear of new type of diamond composites, *International Journal of Refractory Materials and Hard Metals*, 1999, V. 7, pp. 453–460.
11. Gordeev, S., Zhukov, S., Danchukova, L., Ekstrom, T., Zheng, J., SiC-Skeleton cemented diamond – novel engineering material with unique properties, *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 2000, V. 21, Is. 3, pp. 753–760.
12. Gordeev, S.K., Zhukov, S.G., Danchukova, L.V., Ekstrem, T., Osobennosti polucheniya kompozitsionnykh materialovalmaz – karbid kremniya – kremny pri nizkikh davleniyakh [Features of obtaining composite materials diamond – silicon carbide – silicon at low pressures], *Neorganicheskie materialy*, 2001, V. 37, No 6, pp. 691–696.
13. Gordeev, S.K., Ekstrem, T., Novoe primeneniye almaza: almaznye konstruktsionnye materialy [A new application of diamond: diamond construction materials], *Materialy mezhdunar. konf. "Sverkhverdye instrumentalnye materialy na rubezhe tysyacheletii: poluchenie, svoystva, primeneniye"*, Kiev, 4–6 July 2001, pp. 66–68.
14. Zhukov, S.G., Bologov, P.I., Khimach, O.V., Gordeev, S.K., Ekstrem, T., Stoikost materiala "Skeleton-D" v usloviyakh abrazivnogo iznosa [Durability of the Skeleton-D material in conditions of abrasive wear], *Materialy mezhdunar. konf. "Sverkhverdye instrumentalnye materialy na rubezhe tysyacheletii: poluchenie, svoystva, primeneniya"*, Kiev, 4–6 July 2001, pp. 181–183.
15. Gordeev, S.K., Kompozityalmaz – karbid kremniya – novye sverkhverdye konstruktsionnye materialy dlya mashinostroeniya [Diamond – silicon carbide composites – new superhard structural materials for mechanical engineering], *Voprosy materialovedeniya*, 2001, No 3 (27), pp. 31–40.
16. Gordeev, S.K., Novye uglerodnye i karbidnye kompozitsionnye materialy: poluchenie, svoystva, perspektivy primeneniya [New carbon and carbide composite materials: preparation, properties, application prospects], *TsNII Materialov – 90 let v materialovedenii*, St Petersburg, 2002, pp. 45–62.

17. Gordeev, S.K., Zhukov, S.G., Danchukova, L.V., Novye vozmozhnosti primeneniya iznosostoikikhalmaznykh kompozitsionnykh materialov [New possibilities for the use of wear-resistant diamond composite materials], *Instrumentalny svit*, 2003, No 2, pp. 4–6.
18. Gordeev, S.K., Almaznye kompozitsionnye konstruktsionnye materialy [Diamond composite structural materials], *Trudy mezhdunar. konf. "Teoriya i praktika tekhnologii proizvodstva izdelii iz kompozitsionnykh materialov i novykh metallicheskikh splavov"*, 27–30 August 2003, Moscow: Znanie, 2004, pp. 37–41.
19. Gordeev, S., Guglin, D., Danchukova, L., Zhukov, S., *Erosion resistance of "SiC-skeleton cemented diamond materials"*, Proc. 2nd Int. Conf. "Materials and coatings for extreme performances", 16–20 Sept. 2002, Crimea, pp. 540–541.
20. Gordeev S. Diamond / SiC composites produced at low pressure: structure, properties, prospects of application, Proc. of NATO ARW "Innovative superhard materials and sustainable coatings" Kiev, 12–15 May 2004, p. 23.
21. Gordeev, S.K., Zhukov, S.G., Novikov, N.V., Nikitin, Yu.I., Poltoratsky, V.G., *Poluchenie i issledovanie zeren kompozitsionnogo materialaalmaz – karbid kremniya* [Obtaining and studying the grains of the diamond – silicon carbide composite material], *Sverkhtverdye materialy*, 2005, No 2, pp. 9–14.
22. Gordeev, S.K., Zhukov, S.G., Korchagina, S.B., Karimbaev, T.D., Petrov, Yu.A., Tarasov, S.A., Almaznye kompozitsionnye materialy dlya konstruktsionnykh primenenii [Diamond composite materials for structural applications], *Sb. tez. II Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Aviadvigateli 21 veka"*, TsIAM, Moscow, 6–9.12, 2005, V. 2, pp. 283–286.
23. Gordeev, S.K., *Kompozitsionnye materialyalmaz / karbid kremniya: struktura, svoistva, perspektivy primeneniya* [Composite materials diamond / silicon carbide: structure, properties, application prospects], *Materialy dokl. VII mezhdunar. konf. "Novye materialy i tekhnologii"*, Minsk, 16–17 maya, 2006, pp. 142–143.
24. Popovich, A.F., Ralchenko, V.G., Gordeev, S.K., Korchagina, S.B., *Issledovanie teploprovodnosti polikristallicheskikhalmaznykh plenok i kompozitovalmaz – karbid kremniya lazernym flesh-metodom* [Investigation of thermal conductivity of polycrystalline diamond films and diamond–silicon carbide composites by laser flash method], *Nelineiny mir*, 2008, No 4, pp. 275–276.
25. Gordeev, S.K., Korchagina, S.B., Vysokoteploprovodnye kompozitsionnye materialyalmaz – karbid kremniya dlya teplootvodov elektronnykh priborov i blokov SVCh-tekhniki [Highly heat-conducting composite materials diamond-silicon carbide for heat sinks of electronic devices and microwave equipment units], *Trudy XIX mezhdunar. krymskoi konf. "SVCh-tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii"*, Sevastopol, 14–18.09.2009.
26. Gordeev, S.K., Zarichnyak, Yu.P., Korchagina, S.B., Ralchenko, V.G., Popovich, A.F., *Keramika s teploprovodnostyu vyshe, chem u medi – mif ili realnost?* [Ceramics with a higher thermal conductivity than copper – myth or reality?], *Trudy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Sovremennyye metody i sredstva issledovaniiteplofizicheskikh svoistv veshchestv"*, 30.11–2.12.2010, St Petersburg.
27. Karimbaev, T.D., Mezentsev, M.A., Alferov, A.I., Gordeev, S.K., *Keramicheskie tela kacheniya perspektivnykh sharikopodshipnikov: material, tekhnologiya izgotovleniya i mekhanicheskaya obrabotka, raschety, ispytaniya* [Ceramic rolling bodies of promising ball bearings: material, manufacturing technology and mechanical processing, calculations, tests], *Kompozity i nanostrukturny*, 2010, No 2, pp. 12–27.
28. Karimbaev, T.D., Mezentsev, M.A., Alferov, A.I., Gordeev, S.K., *Issledovanie keramicheskikh tel kacheniya perspektivnykh sharikopodshipnikov*, *Trudy III mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Aviadvigateli 21veka"*, Moscow, 30.11–3.12.2010.
29. Vityaz, P.A., Ilyushchenko, A.F., Baran, A.A., Sudnik, L.V., Barai, S.G., Shevchenok, A.A., Kovalevsky, V.N., Gordeev, S.K., *Sverkhtverdye i keramicheskie materialy i izdeliya iz nikh* [Superhard and ceramic materials and products made from them], *50 let poroshkovoi metallurgii Belarusi. Istoriya, dostizheniya, perspektivy*, Minsk, 2010, pp. 365–422.
30. Kataev, S.A., Sidorov, V.A., Gordeev, S.K., *Almaz – karbidny kompozitsionny material Skeleton dlya teplootvodov v izdeliyakh elektronnoi tekhniki* [Diamond – carbide composite material Skeleton for heat sinks in electronic products], *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*, 2011, No 3, pp. 60–64.
31. Gordeev, S., *Diamond composites for electronics and biotechnologies*, Proc. of symposium "Nano and giga challenges in electronics, photonics and renewable technologies", Moscow, 12–15.09, 2011.

32. Gordeev, S.K., Korchagina, S.B., Latyshev, D.Yu., Lepesh, G.V., *Primenenie vysokomodulnykh keramicheskikh kompozitsionnykh materialov dlya perspektivnykh optoelektronnykh ustroystv* [Application of high-modulus ceramic composite materials for advanced optoelectronic devices], *Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa*, 2012, V. 1, No 19, pp. 36–41.
33. Goldshteyn, R.V., Gordeev, S.K., Ermolaev, V.A., Korchagina, S.B., Ustinov, K.B., *Modelirovanie uprugikh svoystv kompozitov na osnove almaza i karbida kremniya* [Modeling of elastic properties of composites based on diamond and silicon carbide], Preprint No 1079, Moscow: Institut problem mekhaniki im. A. I. Ilyushenskogo, RAN, 2014.
34. Gordeev, S.K., Korchagina, S.B., Karimbaev, T.D., Mezentsev, M.A., *Almazokarbidokremniy kompozit Skeleton: struktura, svoystva, perspektivy primeneniya v aviatsionnom dvigatelestroenii* [Diamond-carbide-silicon composite Skeleton: structure, properties, prospects of application in aircraft engine building], *Tez. dokl. konf. "Aviadvigateli 21 vek"*, Moscow, 24–27.11.2015.
35. Gordeev, S.K., Korchagina, S.B., *Kompozitsionnye materialy almaz – karbid kremniya dlya teplootvodov elektronnoi tekhniki* [Composite materials diamond – silicon carbide for heat sinks of electronic equipment], Sb. tr. "Aktualnye problemy tekhnologii proizvodstva sovremennykh keramicheskikh materialov", St Petersburg: Izd-vo Politekhnikeskogo in-ta, 2015, pp. 71–83.
36. Gordeev, S.K., Ezhov, Yu.A., Karimbaev, T.D., Korchagin, S.B., Mezentsev, M.A., *Dispersno-uprochnennyye kompozitsii almaz – karbid kremniya – novyye materialy dlya mashinostroeniya* [Dispersed-hardened diamond – silicon carbide compositions – new materials for mechanical engineering], *Kompozity i nanostruktury*, 2015, V. 7, No 2, pp. 2–12.
37. Shaboldo, O.P., Gordeev, S.K., Vikhman, V.B., Trubin, D.A., *Materialy i tekhnologii razrabotki AO "TsNIIM" dlya izdelii aviatsionnoi i kosmicheskoi tekhniki* [Materials and technologies developed by JSC "TSNIIM" for aviation and space technology products], *Materialy V Vserossiiskoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii "Materialy i tekhnologii novogo pokoleniya dlya perspektivnykh izdelii aviatsionnoi i kosmicheskoi tekhniki"*, Moscow, 2021, pp. 8–22.
38. Gordeev, S.K., Korchagina, S.B., Zapevalov, V.E., Parshin, V.V., Serov, E.A., *Almazokarbidokremniy kompozit v kachestve effektivnogo poglotitelya mikrovoln* [Diamond-silicon carbide composite as an effective microwave absorber], *Elektronika i mikroelektronika SVCh*, 2021, V. 1, pp. 30–34.
39. Zorina, M.V., Mikhailenko, M.S., Pestov, A.E., Toropov, M.N., Chernyshev, A.K., Chkhalo, N.I., Gordeev, S.K., Vitkin, V.V., *Almazokarbidokremniy kompozit "Skeleton" kak perspektivnyy material dlya podlozhek rentgenopticheskikh elementov* [Diamond-carbide-silicon composite "Skeleton" as a promising material for substrates of X-ray optical elements], *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2022, V. 92, Is. 8, pp. 1238–1242.
40. Zapevalov, V.E., Parshin, V.V., Serov, E.A., Korchagina, S.B., Gordeev, S.K., *Almazokarbidokremniy kompozit – perspektivnyy material dlya mikroelektroniki i elektroniki bolshikh moshchnostei* [Diamond-silicon carbide composite is a promising material for high-power microelectronics and electronics], *Izv. vuzov: Radiofizika*, 2022, V. 65, No 5–6, pp. 475–483.
41. Voronin, G.A., Osipov, A.S., *Mekhanizm formirovaniya struktury i fiziko-mekhanicheskie svoystva kompozita almaz – karbid kremniya* [The mechanism of formation of the structure and physico-mechanical properties of the diamond – silicon carbide composite], *Polikristallicheskie materialy na osnove sinteticheskogo almaza i kubicheskogo nitrida bora*, Kiev: Naukova dumka, 1990, pp. 31–34.
42. Kurdyumov, A.V., Pilyankevich, A.N., *Fazovyye prevrashcheniya v uglerode i nitride bora* [Phase transformations in carbon and boron nitride], Kiev: Naukova dumka, 1979.
43. Grinevich, A.V., Lavrov, A.V., *Otsenka ballisticheskikh kharakteristik keramicheskikh materialov* [Evaluation of ballistic characteristics of ceramic materials], *Trudy VIAM*, 2018, No 3 (63), pp. 96–102.
44. Technical Specifications TU 23.91.11.190-050-07529945–2021: *Almazokarbidokremniy kompozit AKK "Skeleton"* [Diamond-carbide-silicon composite AKK "Skeleton"].
45. Technical Specifications TU 23.91.11.190-039-07529945–2018: *Detali iz almazokarbidokremniyego kompozita AKK "Skeleton"* [Details made of diamond-carbide-silicon composite AKK "Skeleton"].

UDC 621.762.5:669.14:539.217.1

THE INFLUENCE OF THE GRANULOMETRIC COMPOSITION OF POWDERS OF STEELS AND PRECISION ALLOYS AND THEIR MELTING MODES BY LPBF ON POROSITY

A.S. ZHUKOV, P.A. KUZNETSOV, Dr Sc (Eng)

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

Received October 11, 2023

Revised October 30, 2023

Accepted October 24, 2023

Abstract—The results of the experimental study of powder materials of various brands and classes (stainless steel, precision soft and hard magnetic alloys) are presented, the influence of their parameters (particles, fracture, fluidity, bulk density) on the properties of finite additive samples is evaluated. The impact of melting parameters on the porosity of additive samples has been studied.

Keywords: laser powder bed fusion (LPBF); metal powder; particle; mixture; gas atomization

ACKNOWLEDGMENTS

Experimental studies were performed on the equipment of the Center for Collective Use “Composition, Structure and Properties of Structural and Functional Materials” of the NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey” with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the RF, Agreement 13.ЦКП.21.0014 (075-11-2021-068), unique identifier RF–2296.61321X0014.

The work was carried out with financial support from the Russian Science Foundation in the direction of “Research by world-class scientific laboratories” (project No 21-73-30019, <https://rscf.ru/project/21-73-30019/>) and with the support of scientific and educational world-class center “Russian Arctic: new materials, technologies and research methods”.

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-117-126

REFERENCES

1. Vock, S., Klöden, B., Kirchner, A., Weissgärber, T., Kieback, B., Powders for Powder Bed Fusion: a Review, *Progress in Additive Manufacturing*, 2019, V. 4, pp. 383–397.
2. Katz-Demyanetz, A., Popov, V.V., jr., Kovalevsky, A., Safranchik, D., Koptug, A., Powder-bed Additive Manufacturing for Aerospace Application: Techniques, Metallic and Metal/Ceramic Composite Materials and Trends, *Manufacturing Rev.*, 2019, V. 6, pp. 1–13.
3. Olakanmi, E.O., Selective Laser Sintering / Melting (SLS/SLM) of Pure Al, Al–Mg, and Al–Si Powders: Effect of Processing Conditions and Powder Properties, *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, V. 213, Is. 8, pp. 1387–1405.
4. Boisselier, D., Sankaré, S., Influence of Powder Characteristics in Laser Direct Metal Deposition of SS316L for Metallic Parts Manufacturing, *Physics Procedia*, 2012, V. 39, pp. 455–463.
5. Simchi, A., The Role of Particle Size on the Laser Sintering of Iron Powder, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2004, V. 35, pp. 937–948.
6. Sedlak, J., Rican, D., Piska, M., Rozkosny, L., Study of Materials Produced by Powder Metallurgy Using Classical and Modern Additive Laser Technology, *Procedia Engineering*, 2015, V. 100, pp. 1232–1241.
7. Herderick, E.D., Additive Manufacturing in the Minerals, Metals, and Materials Community: Past, Present, and Exciting Future, *JOM*, 2016, V. 68, pp. 721–723.
8. Shishkovsky, I.V., *Lazerny sintez funktsionalno-gradientnykh mezostruktur i obiemnykh izdeliy* [Laser synthesis of functional-gradient mesostructures and bulk products], Moscow: Fizmatlit, 2009.
9. Hanzl, P., Zetek, M., Bakša, T., Kroupa, T., The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of SLM Parts, *Procedia Engineering*, 2015, V. 100, pp. 1405–1413.
10. Rudskoy, A.I., Volkov, K.N., Kondratiev, S.Yu., Sokolov, Yu.A., *Fizicheskie protsessy i tekhnologii polucheniya metallicheskih poroshkov iz rasplava* [Physical processes and technologies for obtaining metal powders from melt], St Petersburg: Polytechnic University, 2018.

11. State Standard GOST 20899–98: *Poroshki metallicheskie. Opredelenie tekuchesti s pomoshchyu kalibrovannoi voronki (pribora Holla)* [Metallic powders. Determination of flow ability by means of a calibrated funnel (Hall flowmeter)], Moscow: IPK Izdatelstvo standartov, 2001.

12. State Standard GOST 19440-94: *Poroshki metallicheskie nasyanoi plotnosti* [Metallic powders. Determination of apparent density], Minsk: Mezhdgosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii.

13. Zhukov, A., Deev, A., Kuznetsov, P., Effect of Alloying on the 316L and 321 Steels Samples Obtained by Selective Laser Melting, *Physics Procedia*, 2017, V. 89, pp. 172–178.

14. Zhukov, A.S., Shakirov, I.V., Markova, Yu.M., Anisimov, D.M., Vybora rezhimov selektivnogo splavleniya poroshkov stalei razlichnykh marok [Optimal parameters for selective laser melting of various steel powders], *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin*, 2021, V. 9, Is. 2, pp. 9–14.

UDC 666.7: 620.178.7

ОБЗОР КРИТЕРИЕВ И МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ УДАРНЫХ НАГРУЗОК

В. Я. ШЕВЧЕНКО¹, акад. РАН, А. С. ДОЛГИН¹, д-р техн. наук, М. М. СЫЧЕВ^{1, 2, 3}, С. В. БАЛАБАНОВ¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт» — Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН, 199034, Санкт-Петербург, Биржевой проезд, 6

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

³ Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 24, 26/49

Керамика нашла широкое применение в качестве материала для защиты от воздействия ударных нагрузок благодаря механическим свойствам и плотности, обеспечивающим высокую удельную прочность преград. Основная функция преград, заключается в предотвращении разрушения конструкции защищаемого объекта. Выбор конкретной керамики для преград зависит от массы, способности поглощать энергию удара, устойчивости к множественным ударам и т. д. Приведен обзор критериев и методов оценки свойств керамических материалов, предназначенных для защиты от воздействия ударных нагрузок. Существующие критерии отбора можно разделить на две группы: фундаментальные, которые основаны на физических свойствах материала, и критерии оценки служебных свойств. Также существуют экспериментальные методы оценки качества преград. Показано, что критерий В. Я. Шевченко является универсальным, учитывающим свойства проникающего тела (ударника) и позволяющим построить надежный представительный ряд для большинства керамических материалов при хрупком разрушении.

Ключевые слова: керамические материалы, ударное воздействие, служебные свойства, критерии оценки

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-127-142

ЛИТЕРАТУРА

1. Grigoryan V. A. *Materialy i zashchitnye struktury dlya lokal'nogo i individual'nogo bronirovaniya*. [Materials and protective structures for local and individual booking] // Izd. Radio Soft. – 2008. – 406 p.

2. Шевченко В. Я., Ковальчук М. В., Орыщенко А. С. Синтез нового класса материалов с регулируемой (периодической) взаимосвязанной микроструктурой // *Физика и химия стекла*. – 2020. – Т. 46, № 1. – С. 3–11.

3. Brandon D. G. *Armor*. Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials. – Pergamon, 1991. – P. 22–25.

4. Yadav R., Naebe M., Wang X., Kandasubramanian B. Body armour materials: from steel to contemporary biomimetic systems // *RSC Adv*. – 2016. – N 6. – Art. 115145–115174. <https://doi.org/10.1039/c6ra24016j>.

5. Medvedovski E. Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1: *Ceram. Int*. – 2010. – N 36. – Art. 2103–2115. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.05.021>.

6. Medvedovski E. Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 2: Ceram. Int. – 2010. – N 36. – Art. 2117–2127. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.05.022>.
7. Tepeduzu B., Karakuzu R. Ballistic performance of ceramic/composite structures // Ceram. Int. 45 (2019) 1651–1660. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.042>.
8. Rosenberg Z., Dekel E. Terminal Ballistics. – Springer Berlin Heidelberg, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25305-8>.
9. Popa I.-D., Dobrița F. Considerations on Dop (depth of penetration) Test for Evaluation of Ceramics Materials Used in Ballistic Protection // ACTA Univ. Cibiniensis. – 2018. – V. 69. – P. 162–166. <https://doi.org/10.1515/aucts-2017-0021> (повтор № 27)
10. Ashby M. F., Cebon D. Materials selection in mechanical design // Le Journal de Physique IV. – 1993. – V. 3, N C7. – P. 1–9.
11. Viechnicki D. J., Slavin M. J., Kliman M. I. Development and current status of armor ceramics // Am. Ceram. Soc. Bul. – 1991. – V.70, N 6. – P. 1035–1039.
12. Шевченко В. Я., Изотов А. Д., Лазарев В. Б., Жаворонков Н. М. Энергия диссоциации и предельная упругая деформация в модели двухчастичного взаимодействия // Неорганические материалы. – 1984. – Т. 20, № 6. – С. 1047–1052.
13. Шевченко В. Я., Орыщенко А. С., Перевислов С. Н., Сильников М. В. О критериях выбора материалов преград механическому динамическому нагружению // Физика и химия стекла. – 2021. – Т. 47, № 4. – С. 365–375.
14. Физико-химические свойства окислов: Справочник / Г. В. Самсонов и др. – М.: Металлургия, 1978. – 471 с.
15. Hallam D., Heaton A., James B., Smith P., Yeomans J. The correlation of indentation behaviour with ballistic performance for spark plasma sintered armour ceramics // J. Eur. Ceram. Soc. – 2015. – Art. 352243–2252. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.11.035>.
16. Karandikar P. G., Evans G., Wong S., Aghajanian M. K., Sennett M. – A Journal Pre-proof Review of Ceramics for Armor Application, 2009. – P. 163–175. <https://doi.org/10.1002/9780470456286.ch16>.
17. Shaktivesh, Nair N. S., Sessa Kumar Ch.V., Naik N. K. Ballistic impact performance of composite targets // Materials and Design. – 2013. – V. 51. – P. 833–846.
18. Гаршин А. П., Гропянов В. М., Зайцев Г. П., Семенов С. С. Керамика для машиностроения. – М.: Наука, 2003.
19. Woodward R.L., Gooch jr W.A., O'Donnel I R.G., Perciballi W.J., Baxter B.J., Pattie S.D. A study of fragmentation in the ballistic impact of ceramics // International Journal of Impact Engineering. – 1994. – V. 15, N 5. – P. 605–618.
20. Neshpor V. C.; Zaitsev G .P.; Dovgal E .J. Armour ceramics ballistic efficiency evaluation. In Ceramics: Charting the Future // Proceedings of the 8th. CIMTEC, Florence, Italy, 28 June – 4 July 1994 / Vincenzini, P., Ed. – Techna S.R.L.: Milano, Italy, 1995. – P. 2395–2401.
21. Tate A. A theory for the deceleration of long rods after impac // Journal of The Mechanics and Physics of Solids. – 1967. – V. 15, N 6. – P. 387–399.
22. Forrestal M. J., Longcope D. B. Target strength of ceramic materials for high-velocity penetration // Journal of Applied Physics. – 1990. – V. 67, N 8. – P. 3669–3672.
23. Гриневич А. В., Лавров А. В. Оценка баллистических характеристик керамических материалов. [dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2018-0-3-95-102](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-3-95-102).
24. Игнатова А.М., Сильников Н.М. Принципы и методы оценки баллистических характеристик неметаллических материалов и изделий // Вестник ПНИПУ. – 2015. – Т. 17, № 1.
25. Пат. РФ № 2394222. Способ определения типа и характера разрушения конструкционных материалов при ударно-волновом нагружении / Вшивков О. Ю., Рыбаков А. П., Погудин А. Л., Ланцов В. М., Гладков А. Н.
26. Normandia M.J., Gooch W.A. An Overview of Ballistic Testing Methods of Ceramic Materials. – Ceram. Armor Mater. by Des., 2002. – P. 113–138.

27. I.-D. Popa, F. Dobrița, Considerations on Dop (Depth Of Penetration) Test for Evaluation of Ceramics Materials Used in Ballistic Protection, ACTA Univ. Cibiniensis. 69 (2018) 162–166. <https://doi.org/10.1515/aucts-2017-0021>. (повтор № 9)
28. Crouch I.G., Eu B. Ballistic testing methodologies, 2017. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100704-4.00011-6>.
29. Rozenberg Z., Yeshurun Y., The relation between ballastic efficiency and compressive strength of ceramic tiles // Int. J. Impact Eng. – 1988. – N 7. – P. 357–362. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(88\)90035-8](https://doi.org/10.1016/0734-743X(88)90035-8).
30. Dancygier A. N., Yankelevsky D. Z. Penetration mechanisms of nondeforming projectiles into reinforced concrete barriers // Struct. Eng. Mech. – 2002. – N 13. – P. 171–186. <https://doi.org/10.12989/sem.2002.13.2.171>.
31. Forrestal M. J. Penetration into dry porous rock // Int. J. Solids Struct. – 1986. – V. 22. – P. 1485–1500. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(86\)90057-0](https://doi.org/10.1016/0020-7683(86)90057-0).
32. Orphal D. L., Franzen R. R. Penetration of confined silicon carbide targets by tungsten long rods at impact velocities from 1.5 to 4.6 km/s // Int. J. Impact Eng. – 1997. – N 19. – P. 1–13. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(95\)00064-H](https://doi.org/10.1016/0734-743X(95)00064-H).
33. Subramanian R., Bless S. J. Penetration of semi-infinite AD995 alumina targets by tungsten long rod penetrators from 1.5 to 3.5 km/s // Int. J. Impact Eng. – 1995. – N 17. – P. 807–816. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(95\)99901-3](https://doi.org/10.1016/0734-743X(95)99901-3).
34. Orphal D.L., Franzen R.R., Piekutowski A.J., Forrestal M.J. Penetration of confined aluminum nitride targets by tungsten long rods at 1.5–4.5 km/s // Int. J. Impact Eng. – 1996. – N 18. – P. 355–368. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(95\)00045-C](https://doi.org/10.1016/0734-743X(95)00045-C).
35. Hohler V., Stilp A.J., Weber K. Hypervelocity penetration of tungsten sinter-alloy rods into aluminum // Int. J. Impact Eng. – 1995. – N 17. – P. 409–418. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(95\)99866-P](https://doi.org/10.1016/0734-743X(95)99866-P).
36. Sotskiy M. Y., Veldanov V. A., Sotskiy Y. M., Dauriskikh A. Y. Experimental and theoretical estimate of impact conditions effects on projectiles deceleration history in target // 26th Int. Symp. Ballist. 2011, Miami, USA, 2011. – P. 1468–1476. <https://doi.org/https://doi.org/10.1115/1.4004308>.
37. Zhai Y.X., Wu H., Fang Q. Interface defeat studies of long-rod projectile impacting on ceramic targets // Def. Technol. – 2020. – N 16. – P. 50–68. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.05.021>.
38. Lundberg P., Renström R., Andersson O. Influence of confining prestress on the transition from interface defeat to penetration in ceramic targets // Def. Technol. – 2016. – N 12. – P. 263–271. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2016.02.002>.
39. Zhang X., Serjouei A., Sridhar I. Criterion for interface defeat to penetration transition of long rod projectile impact on ceramic armor // Thin-Walled Struct. – 2018. – N 126. – P. 266–284. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.04.016>.
40. Bavdekar S., Subhash G., Satapathy S., A unified model for dwell and penetration during long rod impact on thick ceramic targets // Int. J. Impact Eng. – 2019. – N 131. – P. 304–316. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.05.014>.
41. Dehn J. Modeling armor that uses interface defeat // AIP Conf. Proc., 1996. – P. 1139–1142. <https://doi.org/10.1063/1.50783>.
42. Anderson C.E., Walker J.D. An analytical model for dwell and interface defeat // Int. J. Impact Eng. – 2005. – N 31. – P. 1119–1132. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.07.013>.
43. Aydelotte B., Schuster B. Impact and Penetration of SiC: The Role of Rod Strength in the Transition from Dwell to Penetration // Procedia Eng. – 2015. – N 103. – P. 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.04.004>.
44. Partom Y., Modeling interface defeat and dwell in long rod penetration into ceramic targets // AIP Conf. Proc, 2012. – P. 76–79. <https://doi.org/10.1063/1.3686225>.
45. Holmquist T. J., Anderson C. E., Behner T., Orphal D.L. Mechanics of dwell and post-dwell penetration // Adv. Appl. Ceram. – 2010. – N 109. – P. 467–479. <https://doi.org/10.1179/174367509X12535211569512>.

46. Yuan J., Tan G. E. B., Goh W. L. Simulation of Dwell-to-Penetration Transition for SiC Ceramics Subjected to Impact of Tungsten Long Rods, 2017. – P. 65–73. <https://doi.org/10.1002/9781119321682.ch8>.
47. Holland C. C., Gamble E. A., Zok F. W., Deshpande V. S., McMeeking R. M. Effect of design on the performance of steel-alumina bilayers and trilayers subject to ballistic impact // *Mech. Mater.* – 2015. – N 91. – P. 241–251. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2015.05.002>.
48. Rajagopal A., Naik N. K., Oblique ballistic impact behavior of composites // *Int. J. Damage Mech.* – 2014. – N 23. – P. 453–482. <https://doi.org/10.1177/1056789513499268>.
49. Hohler V., Weber K., Tham R., James B., Barker A., Pickup I. Comparative analysis of oblique impact on ceramic composite systems // *Int. J. Impact Eng.* – 2001. – V. 26. – P. 333–344. [https://doi.org/10.1016/S0734-743x\(01\)00102-6](https://doi.org/10.1016/S0734-743x(01)00102-6).
50. Yaziv D., Chocron S., Anderson C. E., Grosch D. J. Oblique penetration in ceramic targets // 19th Int. Symp. Ballist., 2001. – P. 7–11.
51. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T., Frage N. Optimization of two component ceramic armor for a given impact velocity // *Theor. Appl. Fract. Mech.* – 2000. – N 33. – P. 185–190. [https://doi.org/10.1016/S0167-8442\(00\)00013-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8442(00)00013-6).
52. Savio S. G., Madhu V. Methodology to measure the protective areal density of ceramic tiles against projectile impact // *Def. Sci. J.* – 2018. – N 68. – P. 76–82. <https://doi.org/10.14429/dsj.68.11136>.
53. Cui F., Wu G., Ma T., Li W. Effect of ceramic properties and depth-of penetration test parameters on the ballistic performance of armour ceramics // *Def. Sci. J.* – 2017. – N 67. – P. 260–268. <https://doi.org/10.14429/dsj.67.10664>.
54. Roberson C., Hazell P. J. Resistance of Different Ceramic Materials to Penetration by a Tungsten Carbide Cored Projectile / Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.) // *Phys. Sci. Basis.* – Cambridge University Press, Cambridge, 2012. – P. 153–163. <https://doi.org/10.1002/9781118406793.ch13>.
55. Swab J. J. Advances in Ceramic Armor // A Collection of Papers Presented at the 29th International Conference on Advanced Ceramics and Composites, January 23–28, 2005, Cocoa Beach, Florida. – Ceramic Engineering and Science Proceedings, V. 26, N 7. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2005. <https://doi.org/10.1002/9780470291276>.
56. Roberson C., Hazell P. J. Resistance of Silicon Carbide to Penetration by a Tungsten Carbide Cored Projectile // *Ceram. Trans.* – 2012. – P. 165–174. <https://doi.org/10.1002/9781118406793.ch14>.
57. Lach E. Mechanical behaviour of ceramics and their ballistic properties // *CFI Ceram. Forum Int.* 70, 1993. – P. 486–490.
58. Savio S. G., Ramanjaneyulu K., Madhu V., Bhat T. B. An experimental study on ballistic performance of boron carbide tiles // *Int. J. Impact Eng.* – 2011. – V. 38. – P. 535–541. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.01.006>.
59. Huang F., Zhang L. DOP test evaluation of the ballistic performance of armor ceramics against long rod penetration // *AIP Conf. Proc.* – 2006. – P. 845 II. – P. 1383–1386. <https://doi.org/10.1063/1.2263582>.

UDC 621.793.7:621.9.048.7

IMPLICATIONS OF THE IMPACT OF LASER EXPLOSION PARAMETERS ON THE GROWTH OF NANO-SIZED WOLFRAM CARBIDIUM IN Ni-Ti-WC SYSTEM COATINGS

A.M. MAKAROV, Cand Sc. (Eng), D.A. GERASHCHENKOV, Dr Sc (Eng), E.A. POPOVA, V.V. BOBYR, A.A. KASHIRINA, N.V. YAKOVLEVA, R.Yu. BYSTROV

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

Received October 18, 2023
Revised November 2, 2023
Accepted November 3, 2023

Abstract—The paper shows the influence of various laser processing modes of cold spray Ni-Ti-WC coatings. It has been shown that the microhardness of the resulting coatings reaches 1200 HV. The formation

of diamond-shaped, pore-free WC inclusions with a size of 500 nm has a positive effect on the microhardness. The article provides recommendations for the industrial production of Ni–Ti–WC system coatings.

Keywords: cold spray, Ni–Ti, WC, nanoparticles, microhardness, laser treatment

ACKNOWLEDGMENTS

The study was performed within the framework of the RNF project No 21-73-30019.

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-143-148

REFERENCES

1. Oryshchenko, A.S., Leonov, V.P., Mikhailov, V.I., Titanovye splavy dlya glubokovodnoi morskoi tekhniki [Titanium alloys for deep-sea marine engineering], *Voprosy materialovedeniya*, 2021, No 3 (107), pp. 238–246.
2. Oryshchenko, A.S., Leonov, V.P., Mikhailov, V.I., 60 let po puti sozdaniya titanovykh splavov dlya morskoi tekhniki i energetiki [60 let po puti sozdaniya titanovykh splavov dlya morskoi tekhniki i energetiki], *Titan*, 2016, No 4 (54), pp. 4–8.
3. Leonov, V.P., Mikhailov, V.I., Groshev, A.L., et al., Novye materialy dlya vypolneniya naplavok na detali sudovoi armatury iz titanovykh splavov glubokovodnykh transportnykh sredstv [New materials for surfacing parts of ship fittings made of titanium alloys of deep-sea vehicles], *Voprosy materialovedeniya*, 2015, No 1 (81), pp. 263–268.
4. Makarov, A.M., Gerashchenkov, D.A., Kuznetsov, P.A., et al., Investigation of the influence of laser treatment modes on coatings of aluminum, nickel, nickel-titanium systems, *Journal of Physics: Conference Series: 8, Suzdal, 05–09 October 2020*, Suzdal, 2021.
5. Gerashchenkov, D.A., Kuznetsov, P.A., Makarov, A.M., et al., Investigation of the intermetallic coating of the Ni–Fe system obtained by surface laser treatment on a steel substrate, *Journal of Physics: Conference Series: 8, Suzdal, 05–09 October 2020*, Suzdal, 2021.
6. Gerashchenkov, D.A., Ivanovsky, A.A., Makarov, A.M., Evdokimov, S.Yu., Sozdanie i issledovanie intermetallidnogo pokrytiya sistemy Ni–Ti, armirovannogo karbidom volframa dlya povysheniya iznosostoikosti titanovogo splava [Creation and research of an intermetallic coating of the Ni–Ti system reinforced with tungsten carbide to increase the wear resistance of a titanium alloy], *Voprosy materialovedeniya*, 2022, No 4 (112), pp. 50–61.
7. Golubeva, A.A., Konovalov, S.V., Osintsev, K.A., et al., Layer-by-Layer Analysis of the Cr–Ni–Ti coating substructure obtained via selective laser melting, *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2020, No 5 (14), pp. 1022–1028.
8. Bogachev, I.A., Sulyanova, E.A., Sukhov, D.I., Mazalov, P.B., Issledovanie mikrostruktury i svoystv korrozionno-stoikoi stali sistemy Fe–Cr–Ni, poluchennoi metodom selektivnogo lazernogo splavlenniya [Investigation of the microstructure and properties of corrosion-resistant steel of the Fe–Cr–Ni system obtained by selective laser fusion], *Trudy VIAM*, 2019, No 3 (75), pp. 3–13.
9. Tam, K.F., Cheng, F.T., Man, H.C., Laser surfacing of brass with Ni–Cr–Al–Mo–Fe using various laser processing parameters, *Materials Science and Engineering: A*, 2002, No 1–2 (325), pp. 365–374.
10. Mikhailov, M.D., *Khimicheskie metody polucheniya nanochastits i nanomaterialov* [Chemical methods for the production of nanoparticles and nanomaterials], St Petersburg: Polytechnic University, 2012.

UDC 669.234:539.23:621.78.011

INFLUENCE OF THERMAL TREATMENT OF NIOBIUM SUBSTRATE ON THERMAL STABILITY OF PALLADIUM PROTECTIVE-CATALYTIC COATING

S.R. KUZENOV, A.O. BUSNYUK, Cand Sc. (Phys-Math), V.N. ALIMOV, Cand Sc. (Phys-Math),
A.I. LIVSHITS, Dr. Sc. (Phys-Math), E.Yu. PEREDISTOV, Cand Sc. (Eng)

*Professor M.A. Bonch-Bruевич State University of Telecommunications, 22/1 Bolshhevikov Ave,
193232 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: skuzenov@ya.ru*

Received November 6, 2023

Revised November 13, 2023

Accepted November 13, 2023

Abstract—The influence of recrystallization annealing of niobium substrate on the thermal stability of palladium protective-catalytic coating has been studied. So, it was found that the coating on recrystallized substrate has higher thermal stability compared to the coating on cold-rolled substrate. The obtained results allow us to solve the problem of limited thermal stability of palladium protective-catalytic coating for composite membranes made of Group 5 metal under the conditions of their operation.

Keywords: metal thin film coatings, palladium, thermal stability, recrystallization annealing, mutual diffusion, composite membranes, Group 5 metal

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-149-158

REFERENCES

1. Watanabe, T., Funke, H., Torres, R., Raynor, M., Vininski, J., Contamination control in gas delivery systems for MOCVD, *Journal of Crystal Growth*, 2003, V. 248, pp. 67–71.
2. Tong, J., Shirai, R., Kashima, Y., Matsumura, Y., Preparation of a pinhole-free Pd–Ag membrane on a porous metal support for pure hydrogen separation, *J. Membr. Sci.*, 2005, V. 260, pp. 84–89.
3. Kuraoka, K., Zhao, H., Yazawa, T., Pore-filled palladium-glass composite membranes for hydrogen separation by novel electroless plating technique, *J. Mat. Sci.*, 2004, No 39, pp. 1879–1881.
4. Yan, S., Maeda, H., Kusakabe, K., Morooka, S., Thin palladium membrane formed in support pores by metal organic chemical vapor deposition method and application to hydrogen separation, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1994, V. 33 (3), pp. 616–622.
5. Shi, Z., Wu, S., Szpunar, A., Rosh, M., An observation of palladium membrane formation on a porous stainless steel substrate by electroless deposition, *J. Membr. Sci.*, 2006, V. 280, pp. 705–711.
6. Livshits, A., Sube, F., Notkin, M., Soloviev, M., Bacal, M., Plasma Driven Suprerpermeation of Hydrogen through Group Va Metals, *J. Appl. Phys.*, 1998, V. 84, pp. 2558–2564.
7. Zhang, G.X., Yukawa, H., Watanabe, N., Saito, Y., Fukaya, H., Morinaga, M., Nambu, T., Matsumoto, Y., Analysis of hydrogen diffusion coefficient during hydrogen permeation through pure niobium, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2008, V. 33, pp. 4419–4423.
8. Dolan, M.D., Viano, D.M., Langley, M.J., Lamb, K.E., Tubular vanadium membranes for hydrogen purification, *J. Membr. Sci.*, 2018, V. 549, pp. 306–311.
9. Buxbaum, R.E., Kinney, A.B., Hydrogen Transport through Tubular Membranes of Palladium-Coated Tantalum and Niobium, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1996, V. 35, pp. 530–537.
10. Moss, T.S., Peachey, N.M., Snow, R.C., Dye, R.C., Multilayer metal membranes for hydrogen separation, *Int. J. Hydrogen Energy*, 1998, V. 23, No 2, pp. 99–106.
11. Alimov, V.N., Busnyuk, A.O., Notkin, M.E., Livshits, A.I., Pd–V–Pd composite membranes: Hydrogen transport in a wide pressure range and mechanical stability, *J. Membr. Sci.*, 2014, V. 457, pp. 103–112.
12. Alimov, V.N., Bobylev, I.V., Busnyuk, A.O., Kolgatin, S.N., Kuzenov, S.R., Peredistov, E. Yu., Livshits, A.I., Extraction of ultrapure hydrogen with V-alloy membranes: From laboratory studies to practical applications, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2018, V. 29, pp. 13318–13327.
13. Huang, F., Xinzhong, L., Shan, X., Guo, J., Gallucci, F., Sint, M., Liu, D., Hydrogen transport through the V–Cr–Al alloys: Hydrogen solution, permeation and thermal-stability, *Separation and Purification Technology*, 2020, V. 240.
14. Gahr, S., Birnbaum, H.K., Hydrogen embrittlement of niobium – high temperature behavior *Acta Metall.*, 1978, V. 26, pp. 1781–1788.
15. Nambu, T., Shimizu, K., Matsumoto, Y., Rong, R., Watanabe, N., Yukawa, H., Morinaga, M., Yasuda, I., Enhanced hydrogen embrittlement of Pd-coated niobium metal membrane detected by in situ small punch test under hydrogen permeation, *J. Alloys Compd.*, 2007, V. 446–447, pp. 588–592.
16. Yukawa, H., Nambu, T., Matsumoto, Y., V–W alloy membranes for hydrogen purification, *J. Alloys Compd.*, 2011, V. 509, pp. 881–884.
17. Edlund, D.J., McCarthy, J., The relationship between intermetallic diffusion and flux decline in composite-metal membranes: implications for achieving long membrane lifetime, *J. Membr. Sci.*, 1995, V. 107, pp. 147–153.

18. Hatano, Y., Ishiyama, K., Homma, H., Watanabe, K., Improvement in high temperature stability of Pd coating on Nb by Nb₂C intermediate layer, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2007, V. 32, pp. 615–619.
19. Busnyuk, A.O., Notkin, M.E., Grigoriadi, I.P., Alimov, V.N., Livshits, A.I., Termicheskaya degradatsiya palladievogo pokrytiya vodorodopronitsaemykh membran iz niobiya [Thermal degradation of palladium coating of hydrogen permeable niobium membranes], *ZhTF*, 2010, No 80 (1), pp. 117–124.
20. Nozaki, T., Hatano, Y., Yamakawa, E., Hachikawa, A., Ichinose, K., Improvement of high temperature stability of Pd coating on Ta by HfN intermediate layer, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2010, V. 35, pp.12454–12460
21. Fuerst, T., Zhang, Z., Hentges, A., Lundin, S., Wolden, C., Way, D., Fabrication and operational considerations of hydrogen permeable Mo₂C/V metal membranes and improvement with application of Pd, *J. Membr. Sci.*, 2018, V. 549, pp. 559–566.
22. Alimov, V.N., Hatano, Y., Busnyuk, O.A., Livshits, D.A., Notkin, M.E., Livshits, A.I., Hydrogen permeation through the Pd–Nb–Pd composite membrane: Surface effects and thermal degradation, *Int. J. Hydrog. Energy*, 2011, V. 36, No 13, pp. 7737–7746.
23. Fluri, A., Pergolesi, D., Wokaun, A., Lippert, T., Stress generation and evolution in oxide heteroepitaxy, *Phys. Rev.*, 2018, V. 97, Art. 125412–20.
24. Hovsepian, P.E., Sugumaran, A.A., Purandare, Y., Loch, D.A.L., Ehiasarian, A.P., Effect of the degree of high power impulse magnetron sputtering utilisation on the structure and properties of TiN films, *Thin Solid Films*, 2014, V. 562.
25. Novikova, S.I., *Teplovoe rasshirenie tverdykh tel* [Thermal expansion of solids], Moscow: Nauka, 1974.
26. Shugurov, A.R., Panin, A.V., Mekhanizmy vozniknoveniya napryazhenij v tonkikh plenkakh i pokrytiyakh [Mechanisms of stress occurrence in thin films and coatings], *ZhTF*, 2020, No 90 (12).
27. Fisher, J.C.J., Calculation of Penetration Curves of Surface and Grain Boundary Diffusion, *Appl. Phys.*, 1951, V. 22, pp. 74–80.
28. Kaur, I., Mishin, Y., Gust, W., *Fundamentals of Grain and Interphase Boundary Diffusion*, Chichester West Sussex: Wiley, 1995.

UDC 678.073:621.9.048.6:539.536

THE EFFECT OF ULTRASONIC TREATMENT OF A CURED MONOLAYER FORMED BY THREE-DIMENSIONAL PRINTING FROM A PREPREG REINFORCED WITH CONTINUOUS CARBON FIBER ON THE RESISTANCE TO THE FLOW OF SOLID PARTICLES

I.V. ZLOBINA^{1,2}, Cand Sc. (Eng), N.V. BEKRENEV¹, Dr Sc. (Eng), A.S. EGOROV², Cand Sc. (Chem), A.V. ANISIMOV³, Dr Sc. (Eng)

¹*Yuri Gagarin Saratov State Technical University, 77 Polytekhnicheskaya St, Saratov 410054 Saratov, Russian Federation. E-mail: irinka_7_@mail.ru*

²*National Research Centre “Kurchatov Institute”, 1 Academician Kurchatov Square, 123182 Moscow, Russian Federation*

³*NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation*

Received October 14, 2023

Revised November 7, 2023

Accepted November 9, 2023

Abstract—The effect of ultrasonic processing at resonant frequencies of 22 and 44 kHz of a monolayer formed by three-dimensional printing from prepregs reinforced with continuous carbon fiber on the resistance to the flow of solid particles by imitating it by jet-abrasive treatment is investigated.

The increment of the weight of both control and experimental samples in comparison with the initial state was established. It is shown that the force effect of ultrasound in rational modes contributes to a decrease in weight gain by 31.4% when processed at a frequency of 22 kHz and by 9% when processed at a frequency of 44 kHz. The decrease in weight increment is determined by an increase in the density of

the monolayer structure after ultrasonic exposure, which leads to an increase in surface hardness in units of Schor-D by 13.5% at a frequency of 22 kHz and by 10% at a frequency of 44 kHz.

Keywords: additive technologies, composite materials, prepreg reinforced with continuous carbon fiber, thermosetting and thermoplastic binder, solid particle flow, weight change, hardness, strength, ultrasound, amplitude and frequency, exposure time

ACKNOWLEDGMENTS

The work was supported by the Russian Science Foundation grant 23-79-00039 "Substantiation of the methodology for complex modification of composite materials for extreme operating conditions based on the study of phase-structural transformations under the influence of electrophysical effects of various frequency ranges."

Analytical studies were carried out using the scientific equipment of the Research Chemical Analytical Center of the National Research Center "Kurchatov Institute".

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-159-173

REFERENCES

1. Mikhailin, Yu.A., *Spetsialnye polimernye kompozitsionnye materialy* [Special polymer composite materials], St Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2008.
2. Mikhailin, Yu.A., *Konstruksionnye polimernye kompozitsionnye materialy* [Structural polymer composite materials], St Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2010.
3. Studentsov, V.N., Kuznetsov, V.A., Zubtsova, N.V., Cheremukhina, I.V., *Armirovannye kompozitsionnye materialy stroitel'nogo naznacheniya* [Reinforced composite materials for construction purposes]: Composite materials in industry. Proceedings of the 29th International Conference on June 1–5, 2009, Yalta; Kiev, Part 1, pp. 357–359.
4. Kablov, E.N., *Innovatsionnye razrabotki FGUP VIAM GNTs RF po realizatsii Strategicheskikh napravlenii razvitiya materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda* [Innovative developments of FSUE VIAM of the State Research Center of the Russian Federation on the implementation of "Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030"], *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2015, No 1, pp. 3–33.
5. Kablov, E.N., *Materialy i khimicheskie tekhnologii dlya aviatsionnoi tekhniki* [Materials and chemical technologies for aviation equipment], *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*, 2012, V. 82, No 6, pp. 520–530.
6. *Mirovoi rynek proizvodstva kompozitov* [The global market for the production of composites]: Armplast site. URL: <https://arm-plast.ru/o-zavode/novosti/mirovoj-ryinok-proizvodstva-kompozitov.html> (reference date: 20.10.2023).
7. Doriomedov, M.S., *Rossiisky i mirovoi rynek polimernykh kompozitov* [Russian and global polymer composites market]: review, *Trudy VIAM*, 2020, No 6–7, pp. 29–37.
8. Kovalenko, V.A., Kondratiev, A.V., *Primenenie polimernykh kompozitsionnykh materialov v izdeliyakh raketno-kosmicheskoi tekhniki kak rezerv povysheniya ee massovoi i funktsionalnoi effektivnosti* [The use of polymer composite materials in rocket and space technology products as a reserve for increasing its mass and functional efficiency]: Analytical review, *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2011, No 5, pp. 14–20.
9. Deev, I.S., Nikishin, E.F., *Model kosmosa* [Space model], Moscow: KDU, 2007, V. 2.
10. Letin, V.A., Gatchenko, L.S., Deev, I.S., et al., *Proc. of Sixth International Space Conference "Protection of Materials and Structures from Space Environment"*, Toronto, Canada, May 1–3, 2002, pp. 461–474.
11. Kablov, E.N., Minakov, V.T., Deev, I.S., Nikishin, E.F., *Protection of Materials and Structures from Space Environment, Series: Space Technology Proceedings*, J.I. Kleiman, Z. Iskanderova, (Eds.), Kluwer Acad. Publ., 2003, pp. 217–233.
12. Polezhaev, Yu.V., Reznik, S.V., Vasilevsky, E.B., et al., *Materialy i pokrytiya v ekstremalnykh usloviyakh. Vzgl'yad v budushchee: V. 1: Prognozirovaniye i analiz ekstremalnykh vozdeystvii* [Materials and coatings in extreme conditions. A look into the future, V. 1: Forecasting and analysis of extreme impacts], Reznik, S.V. (Ed.), Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2002.

13. Gorynin, I.V., Konstruktsionnye materialy – vazhny element nadezhnosti i ekologicheskoi bezopasnosti infrastruktury Arktiki [Structural materials are an important element of reliability and environmental safety of the Arctic infrastructure], *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2011, No 3, pp. 82–87.
14. Buznik, V.M., Kablov, E.N., Koshurina, A.A., Materialy dlya slozhnykh tekhnicheskikh ustroystv arkticheskogo primeneniya [Materials for complex technical devices of Arctic application], *Proceedings of the conference “Scientific and technical problems of Arctic development”*, 16 December 2014, Moscow, 2015, pp. 275–285.
15. Dezhina, I.G., Ponomarev, A.K., Frolov, A.S., et al., *Publichny analitichesky doklad po razvitiyu novykh proizvodstvennykh tekhnologii* [Public analytical report on the development of new production technologies], Moscow: Skolkovsky institut nauki i tekhnologii, 2015.
16. Ponomarev, A.K., Frolov, A.S., Zorin, D.N., Psahe, S.G., et al., *Novye proizvodstvennye tekhnologii* [New production technologies]: Public analytical report, Moscow: Delo, 2015.
17. *The European Construction and sustainable built environment Technology Platform (ECTP)*. URL: <http://www.ectp.org> (reference date: 20.10.2023).
18. *European Technology Platform for Advanced Engineering Materials and Technologies*. URL: <http://www.eumat.eu> (reference date: 20.10.2023).
19. *The European Space Agency*. URL: <http://estp.esa.int> (reference date: 20.10.2023).
20. Proidakov, E.M., 3D-pechat kak novoe nauchno-tekhnicheskoe napravlenie [3D printing as a new scientific and technical direction], *Naukovedcheskie issledovaniya*, 2014, No 1, pp. 146–154.
21. Gibson, Ya., Rozen, D., Staker, B., *Tekhnologii additivnogo proizvodstva. Trekhmernaya pechat, bystroe prototipirovanie i pryamoe tsifrovoe proizvodstvo* [Additive manufacturing technologies. Three-dimensional printing, rapid prototyping and direct digital production], Moscow: Tekhnosfera, 2016.
22. Bikas, H., Stavropoulos, P., Chryssolouris, G., Additive Manufacturing methods and modeling approaches: a critical review, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, V. 83, pp. 389–405. DOI: 10.1007/s00170-015-7576-2.
23. Rynok tekhnologii 3D-pechati v Rossii i mire: perspektivy vnedreniya additivnykh tekhnologii v proizvodstvo [The market of 3D printing technologies in Russia and the world: prospects for the introduction of additive technologies into production], *CAD/CAM/CAE Observer*, 2021, No 1, pp. 42–51.
24. Balashov, A.V., Markova, M.I., Issledovanie struktury i svoystv izdelii, poluchennykh 3D-pechatyu [Investigation of the structure and properties of products obtained by 3D printing], *Inzhernyy vestnik Dona*, 2019, No 1, p. 66.
25. Petrov, V.M., Bezpalchuk, S.N., Yakovlev, S.P., O vliyani struktury na prochnost izdelii iz plastikov, poluchaemykh metodom 3D-pechati [On the effect of structure on the strength of plastic products produced by 3D printing], *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2017, V. 9, No 4, pp. 765–776. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776.
26. Matsuzaki, R., Ueda, M., Namiki, M., Jeong, T.K., et al., Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation, *Sci Rep.*, 2016. DOI: 10.1038/srep23058.
27. Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., Wang, S., Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling, *Composites Part B-engineering*, 2015, V. 80, pp. 369–378.
28. Invernizzi, M., Natale, G., Levi, M., Turri, S., Griffini, G., UV-Assisted 3D Printing of Glass and Carbon Fiber-Reinforced Dual-Cure Polymer Composites, *Materials*, 2016, No 9 (7), p. 583. DOI: 10.3390/ma9070583.
29. Polyzos, E., Katalagarianakis, A., Van Hemelrijck, D., Pyl, I., Polyzos, D., A Multi Scale Analytical Methodology for the Prediction of Mechanical Properties of 3D-printed Materials with continuous Fibres, *Additive Manufacturing*, 2020, V. 36, p. 101394. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101394.
30. Wang, F., Wang, G., Zhang, Z., Ning, F., Fiber-matrix Impregnation Behavior During Additive Manufacturing of continuous Carbon Fiber reinforced Poly(lactic Acid) Composites, *Additive Manufacturing*, 2022, V. 37, p. 101661. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101661.
31. Kuleznev, V.S., Shershnev, A.S., *Khimicheskaya i fizicheskaya modifikatsiya polimerov* [Chemical and physical modification of polymers], Moscow: Khimiya, 1990.

32. Studentsov, V.N., Fizicheskaya modifikatsiya armirovannykh reaktoplastov [Physical modification of reinforced thermoplastics], *Vestnik SGTU*, 2011, No 4, V. 3.

33. Negrov, D. A., *Vliyanie energii ultrazvukovykh kolebaniy na strukturu i svoystva polimernogo kompozitsionnogo materiala na osnove politetrafluoretilena* [The effect of ultrasonic vibration energy on the structure and properties of a polymer composite material based on polytetrafluoroethylene]: Thesis for the degree of Candidate of Sciences, Omsk, 2009.

34. Lionetto, F., Dell'Anna, R., Montagna, F., Maffezolli, A., Ultrasonic assisted consolidation of commingled thermoplastic/glass fiber rovings, *Frontiers in Materials*, 2015, V. 2, pp. 1–9. DOI: 10.3389/fmats.2015.00032.

UDC 621.039.531:539.422.22

RADIATION AND THERMAL EMBRITTLEMENT OF RPV STEELS: THE LINKS OF EMBRITTLEMENT MECHANISMS, FRACTURE MODES AND MICROCRACK NUCLEATION AND PROPAGATION PROPERTIES.

Part 1. Strategy, program and methods of experimental and numerical studies

B.Z. MARGOLIN, Dr Sc (Eng), V.N. FOMENKO, Cand Sc. (Eng), V.A. SHVETSOVA, Cand Sc. (Eng), E.V. YURCHENKO, Cand Sc. (Eng)

Received July 25, 2023

Revised November 21, 2023

Accepted November 22, 2023

Abstract—Further development of local approach models is considered from viewpoint of links of local brittle fracture properties with embrittlement mechanisms and fracture modes for RPV steels. Strategy and program of experimental and numerical investigations have been developed that allows one to find how various embrittlement mechanisms and fracture modes are connected with the conditions of nucleation and propagation of microcracks resulting in brittle fracture of RPV steels. The experimental and numerical investigations are performed for 2Cr-Ni-Mo-V steel and A533 steel used for RPVs of WWER and PWR types. RPV steels are studied in the following states: (1) initial (as-produced); (2) thermally embrittled by a hardening mechanism; (3) thermally embrittled by a non-hardening mechanism; (4) irradiated. Experimental studies include testing specimens of different geometry (smooth and notched round bars, and cracked compact tension specimens), which allows us to obtain characteristics of brittle fracture under various stress triaxialities. Numerical studies performed with the probabilistic brittle fracture model Prometey aim to obtain the brittle fracture properties on micro- and macroscales for all the investigated states of the materials.

Part 1 of the paper presents information concerning the investigated materials, the used procedures and methods. Part 2 gives the test results of smooth round bars of the investigated materials in various states and the stress-strain curves determined over wide temperature range. The experimental results for various specimens from the investigated steels in various states are represented and compared with the results predicted with the Prometey model in Part 3.

Keywords: brittle fracture, local approach, probabilistic model, radiation embrittlement, RPV steels
DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-174-195

REFERENCES

1. State Standard GOST 59115.14–2021: Obosnovanie prochnosti oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok. Raschet na soprotivlenie khрупкому razrusheniyu korpusa vodovodyanogo energeticheskogo reaktora [Substantiation of the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants. Calculation of the resistance to brittle fracture of the core of a water-water power reactor], Moscow: Rossiyskiy institut standartizatsii, 2021.

2. Alekseenko, N.N., Amaev, A.D., Gorynin, I.V., Nikolaev, V.A., Radiation damage of nuclear power plant pressure vessel steels, Illinois USA: La Grange Park, 1997.

3. Hawthorne J. R. Radiation embrittlement. In: Briant C, Banerji S. editor. Embrittlement of engineering alloys. New York: Academic Press, 1983.

4. Nikolaev, V.A., Rybin, V.V., Mechanisms controlling the composition influence on radiation hardening and embrittlement of iron-base alloy, Effect of radiation on materials: 17th International Symposium, ASTM STP 1270, 1996, pp. 3–24.
5. Gurovich, B.A., Kuleshova, E.A., Shtrombakh Y.I., et al., Intergranular and intragranular phosphorus segregation in Russian pressure vessel steels due to neutron irradiation, J. Nucl. Mater., 2000, V. 279, pp. 259–272.
6. English, C.A., Ortner, S.R., Gage, G., Server, W. L., Rosinski, S.T., Review of phosphorus segregation and intergranular embrittlement in reactor pressure vessel steels, Effect of radiation on Materials: 20th Int. Symposium, ASTM STP 1405; ASTM; 2001, pp. 152–173.
7. Kryukov, A., Debarberis, L., Von Estorff, U., Gillemot, F., Oszvald, F., Irradiation Embrittlement of Reactor Pressure Vessel Steel at Very High Neutron Fluence, J. Nucl. Mater., 2012, V. 422 (1), pp. 173–177, JRC66610.
8. Wei, G., Wang, C., Yang, X., Tong, Z., Wu, W., Non-hardening embrittlement mechanism of pressure vessel steel Ni–Cr–Mo–V welds during thermal aging, Advances in Mechanical Engineering, 2020, V. 12 (2), pp. 1–7.
9. Marini, B., Averty, X., Wident, P., Forget, P., Barcelo, F., Effect of the bainitic and martensitic microstructures on the hardening and embrittlement under neutron irradiation of a reactor pressure vessel steel, J. Nucl. Mater., 2015, No 465, pp. 20–27.
10. Margolin, B.Z., Yurchenko, E.V., Morozov, A.M., Pirogova, N.E., Brumovsky, M., Analysis of a link of embrittlement mechanisms and neutron flux effect as applied to reactor pressure vessel materials of WWER, J.Nucl.Mater., 2013, No 434, pp. 347–356.
11. Margolin, B., Yurchenko, E., Potapova, V., Pechenkin, V., On the Modelling of Thermal Aging through Neutron Irradiation and Annealing, Advances in Materials Science and Engineering, 2018, Article ID 7175083. DOI: 10.1155/2018/7175083
12. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Gulenko, A.G., Radiation embrittlement modelling in multi-scale approach to brittle fracture of RPV steels, Int. J. Fract., 2013, No 179, pp. 87–108.
13. Beremin, F.M., A local criterion for cleavage fracture of a nuclear pressure vessel steel, Metall Trans A, 1983, No 14, pp. 2277–2287.
14. Pisarenko, G.S., Krasowsky, A.J., Analysis of kinetics of quasibrittle fracture of crystalline materials, Mechanical Behaviour of Materials, Proc. Int. Conf. Mech. Behav. Mater., Kyoto, 1971, V. 1, pp. 421–432.
15. Ritchie, R.O., Knott, J.F., Rice, J.R., On the relation between critical tensile stress and fracture toughness in mild steel, J. Mech. Phys. Solids., 1973, No 21, pp. 395–410.
16. Kopelman, L.A., Soprotivlyaemost svarykh shvov khрупkomu razrusheniyu [Resistance of welds to brittle fracture], Leningrad: Mashinostroenie, 1978.
17. Meshkov, Yu.Ya., Fizicheskie osnovy razrusheniya metallicheskih konstruktsiy [The physical foundations of the destruction of metal structures], Kiev: Naukova Dumka, 1981.
18. Mudry, F., A local approach to cleavage fracture, Nuclear Engineering and Design, 1987, V. 105, pp. 65–76.
19. Margolin, B.Z., Gulenko, A.G., Shvetsova, V.A., Improved probabilistic model for fracture toughness prediction for nuclear pressure vessel steels, Int. J. Pres. Ves. and Piping, 1998, V. 75, pp. 843–855.
20. Bordet, S.R., Karstensen, A.D., Knowles, D.M., Wiesner, C.S., A new statistical local criterion for cleavage fracture in steel, Eng. Fract. Mech., 2005, V. 72, pp. 435–74.
21. Pineau, A., Development of the local approach to fracture over the past 25 years: theory and application, Honour and Plenary Lectures Presented at the 11th International Conference on Fracture (ICF11), held in Turin, Italy, on March 20–25, 2005, Springer, 2006, pp. 139–166.
22. Tanguy, B., Bouchet, Ch., Bordet, S.R., Besson, J., Pineau, A., Toward a better understanding of a cleavage in RPV steels: Local mechanical conditions and evaluation of a nucleation enriched Weibull model and of the Beremin model over large temperature range, EUROMECH-MECAMAT 2006: local approach to fracture, Paris: Presse des Mines, 2006, pp. 129–134.

23. Parrot, A., Dahl, A., Forget, P., Marini, B., Evaluation of fracture toughness from instrumented Charpy impact tests for a reactor pressure vessel steel using local approach to fracture, Besson J., Moinerau D., Steglich D. (Ed.), *EUROMECH-MECAMAT 2006: local approach to fracture*, Paris: Presse des Mines, 2006, pp. 291–296.
24. Tanguy, B., Bouchet, C., Bugat, S., Besson, J., Local approach to fracture based prediction of the ΔT_{56J} and $\Delta T_{IC,100}$ shifts due to irradiation for an A508 pressure vessel steel, *Eng. Fract. Mech.*, 2006, V. 73, pp. 191–206.
25. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Gulenko, A.G., Kostylev, V.I., Prometey local approach to brittle fracture: development and application, *Eng. Fract. Mech.*, 2008, V. 75, pp. 483–498.
26. Ruggieri, C., Dodds, H., An engineering methodology for correction of elastic-plastic fracture toughness. Part 1: A review on probabilistic models and exploration of plastic strain effects, *Eng. Fract. Mech.*, 2015, V. 134, pp. 368–390.
27. Margolin, B.Z., Fomenko, V.N., Gulenko, A.G., Kostylev, V.I. Shvetsova, V.A., Dalneishee razvitie modeli Prometey i metoda Unified Curve. Ch. 1: Razvitie modeli Prometey [Further development of the Prometey model and the Unified Curve method. Part 1: Development of the Prometey model], *Voprosy materialovedeniya*, 2016, No 4 (88), pp. 120–150.
28. Wallin, K., The scatter in KIC results, *Eng. Fract. Mech.*, 1984, V. 19, pp. 1085–1093.
29. Wallin K. The size effect in KIC results, *Eng. Fract. Mech.*, 1985, V. 22, pp. 149–163.
30. ASTM E 1921–13: Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range, West Conshohocken PA USA: Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, 2013.
31. Margolin, B.Z., Gulenko, A.G., Nikolaev, V.A., Ryadkov, L.N., A new engineering method for prediction of the fracture toughness temperature dependence for RPV steels, *Int. J. Pres. Ves. and Piping*, 2003, V. 80, pp. 817–829.
32. Margolin, B.Z., Fomenko, V.N., Gulenko, A.G., Kostylev, V.I., Shvetsova, V.A., On issue of comparison of the Unified Curve and Master Curve methods and application for RPV structural integrity assessment, *Strength of Materials*, 2016, No 48 (2), pp. 227–250.
33. Margolin, B.Z., Fomenko, V.N., Gulenko, A.G., Kostylev, V.I., Dalneishee razvitie modeli Prometey i metoda Unified Curve. Ch. 2: Razvitie metoda Unified Curve [Further development of the Prometey model and the Unified Curve method. Part 2: Development of the Unified Curve method], *Voprosy materialovedeniya*, 2016, No 4 (88), pp. 151–178.
34. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Kritery khрупkogo razrusheniya: strukturno-mekhanichesky podkhod [Brittle fracture criterion: a structural and mechanical approach], *Problemy prochnosti*, 1992, No 2, pp. 3–16.
35. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Local criterion for cleavage fracture: structural and mechanical approach, *J. Phys. IV*, 1996, No 6, pp. 225–234.
36. Di Fant, M., Carius, H., Carollo, G., Cleizergues, O., Le Cog, V., Mudry, F., Local approach to brittle fracture: Discussion on the effects of temperature and strain on the critical cleavage stress, 2nd Griffiths Conf. on Mechanisms of Fracture and their Structural Significance, Sheffield, 13–15 Sept., 1995.
37. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Gulenko, A.G., Kostylev, V.I., Application of a new cleavage fracture criterion for fracture toughness prediction for RPV steels, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, 2006, V. 29 (9), pp. 697–713.
38. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Gulenko, A.G., Kostylev, V.I., Development of Prometey local approach and analysis of physical and mechanical aspects of brittle fracture of RPV steels, *Int. J. Pres. Ves. and Piping*, 2007, No 84, pp. 320–36.
39. Vladimirov, V.I., *Fizicheskaya priroda razrusheniya metallov* [The physical nature of metal fracture], Moscow: Metallurgiya, 1984.
40. *Computational Methods in the Mechanics of Fracture*, Atluri, S.N. (Ed.), Elsevier Science Publishers, 1986.
41. Cherepanov, G.P., *Mechanics of Brittle Fracture*, New York: McGraw-Hill, 1979.
42. Margolin, B., Fomenko, V., Shvetsova, V., Shishkov, F., Yurchenko, E., The plastic strain effect on cleavage microcracks propagation, *Eng. Fract. Mech.*, 2023, V. 290, Art. 109446.

43. State Standard GOST 59115.6–2021: Obosnovanie prochnosti oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok. Metody opredeleniya kharakteristik treshchinostoikosti konstruksionnykh materialov [Substantiation of the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants. Methods for determining the characteristics of fracture toughness of structural materials], Moscow: Rossiisky institut standartizatsii, 2021.

44. ASTM E 1820–05: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, Annual Book of ASTM Standards, Section 3, V. 03.01, pp. 1040–1067.

45. Margolin, B.Z., Karzov, G.P., Shvetsova, V.A., Keim, E., Chaouadi, R., Application of local approach concept of cleavage fracture to VVER materials, Proc. of PVP 2002 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, August 4–8, 2002, Vancouver, BC, Canada.

46. State Standard GOST 1497–84: Metally. Metody ispytanij na rastyazhenie [Metals. Tensile testing methods].

47. State Standard GOST 11150–84: Metally. Metody ispytanij na rastyazhenie pri nizkikh temperaturakh [Metals. Low temperature tensile testing methods].

48. State Standard GOST 9651–84: Metally. Metody ispytany na rastyazhenie pri vysokikh temperaturakh [Metals. Methods of tensile testing at high temperatures].

UDC 621.039.531:539.422.22

RADIATION AND THERMAL EMBRITTLEMENT OF RPV STEELS: THE LINKS OF EMBRITTLEMENT MECHANISMS, FRACTURE MODES AND MICROCRACK NUCLEATION AND PROPAGATION PROPERTIES. PART 2. STRENGTH AND PLASTICITY PROPERTIES

B.Z. MARGOLIN, Dr Sc (Eng), V.N. FOMENKO, Cand Sc. (Eng),
V.A. SHVETSOVA Cand Sc. (Phys-Math), E.V. YURCHENKO, Cand Sc. (Eng)

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

Received July 25, 2023

Revised November 21, 2023

Accepted November 22, 2023

Abstract—The uniaxial tension test results are represented over wide temperature range for smooth round bars of 2Cr–Ni–Mo–V steel and A533 steel used for RPVs of WWER and PWR types. These steels are studied in the following states: (1) the initial (as-produced) state; (2) the thermally embrittled state modelling hardening mechanism of embrittlement; (3) the thermally embrittled state modelling non-hardening mechanism of embrittlement; (4) the irradiated state.

The true stress-strain curves are determined over wide temperature range that is required for calculation of the stress-and-strain fields for various specimens. The true stress-strain curves for the investigated steels in the initial and thermally embrittled states are obtained when using standard mechanical characteristics. For the irradiated steels the true stress-strain curves are obtained when using the data of the digital video recording under continuous in-testing monitoring of the cylindrical parts of tensile bars. For the irradiated materials the procedure based on standard characteristics cannot be used as it is connected with very small strain. The procedure based on the digital video recording data is verified by comparison of the stress-strain curves obtained for the initial and thermally embrittled states on the basis of the digital video recording data and standard characteristics.

Keywords: stress-and-strain curves, RPV steels, radiation embrittlement, thermal embrittlement

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-196-210

REFERENCES

1. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G., Ilyin A. V. Cleavage fracture toughness for 3Cr–Ni–Mo–V reactor pressure vessel steel: theoretical prediction and experimental investigation, *Int. J. Pres. Ves. and Piping.*, 2001, No 78. – pp. 429–441.

2. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Sorokin, A.A., Minkin, A.I., Pirogova, N.E., Issledovanie sostoyaniya metalla vnutrikorpusnykh ustroystv reaktora VVER posle ekspluatatsii v techenie 45 let. Ch. 4: Kharakteristiki prochnosti i plastichnosti i mekhanizmy razrusheniya [Investigation of the metal condition of

the internal devices of the VVER reactor after operation for 45 years. Part 4: Strength and ductility characteristics and fracture mechanisms], *Voprosy materialovedeniya*, 2021, No 1 (105), pp. 116–144.

3. *Reference manual on the IAEA JRQ correction monitor steel for irradiation damage studies*, IAEA-TECDOC-1230, Vienna: IAEA, 2001.

4. Bridgman, P.W., *Studies in Large Plastic Flow and Fracture*. New York: McGraw-Hill, 1952.

UDC 621.039.531:669.15–194:539.389

CORRELATION DEPENDENCES BETWEEN HARDENING IN TERMS OF YIELD STRENGTH AND MICROHARDNESS FOR AUSTENITIC AND FERRITIC-MARTENSITIC STEELS

B.Z. MARGOLIN, Dr Sc. (Eng), L.A. BELYAEVA, Cand Sc. (Eng), A.A. SOROKIN, Cand Sc. (Eng), E.V. YURCHENKO, Cand Sc. (EnG), M.N. GRIGORIEV

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

Received October 2, 2023

Revised November 13, 2023

Accepted February 14, 2023

Abstract—Instrumental measurements of microhardness were carried out using a Vickers indenter at a constant strain rate. The yield strength values were determined for austenitic chromium-nickel steels 08Kh18N10T, 10Kh18N9 and 08Kh16N20M2T in the initial (non-irradiated) state, after neutron irradiation at various regimes, as well as after plastic prestrain. Similar measurements were carried out for chromium stainless steels of the ferritic-martensitic class 07Kh12NMFb and 16Kh12MVSFBR (EP-823) in the initial (non-irradiated) state and after heat treatment, leading to hardening of the material and also after neutron irradiation. The relationships between microhardness and yield strength were determined for all studied states of all steels studied. A unified correlation has been established between hardening in terms of the yield strength and hardening in terms of Vickers micro-hardness, independently of the nature of the strengthening factor and the class of steel.

Keywords: austenitic steels, ferritic-martensitic steels, microhardness, yield strength, correlation dependencies

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out within the framework of the state contract IGK 17706413348220001050.

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-117-1-211-227

REFERENCES

1. GOST R ISO 6507-1–2007: *Metally i splavy. Izmerenie tverdosti po Vikkersu. Chast 1: Metod izmereniya* [Metals and alloys. Vickers hardness measurement. Part 1: Measurement method], Moscow: Standartinform, 2008.

2. Markovets, M.P., *Opredelenie mekhanicheskikh svoystv metallov po tverdosti* [Determination of mechanical properties of metals by hardness], Moscow: Mashinostroenie, 1979.

3. Tabor, D., *The Hardness of Metals*, Oxford: Clarendon press, 1951.

4. Busby, J.T., Hash. M.C., Was, G.S., The relationship between hardness and yield stress in irradiated austenitic and ferritic steels, *Journ. Nucl. Materials*, 2005, No 336, pp. 267–278.

5. Gusev, M.N., Maksimkin, O.P., Tivanova, O.V., Silnaygina, N.S., Garner, F.A., Correlation of yield stress and microhardness in 08Cr16Ni11Mo3 stainless steel irradiated to high dose in BN-350 fast reactor, *Journ. Nucl. Materials*, 2006, No 359, pp. 258–262.

6. Markelov, D.E., Kryukov, F.N., Neustroev, V.S., Obukhov, A.V., Sokolovsky, D.A., Yakovlev, V.V., Skupov, M.V., Leontieva-Smirnova, M.V., *Struktura i mekhanicheskie svoystva obolochek tvelov iz stali EP823-Sh posle oblucheniya v reaktore BN-600* [Structure and mechanical properties of fuel rod shells made of EP823-Sh steel after irradiation in the BN-600 reactor], *VANT*, No 2 (103), pp. 70–81.

7. Zhu, P., Zhao, Ya., Agarwal, Sh., Henry, J., Zinkle, S.J., Toward accurate evaluation of bulk hardness from nanoindentation testing at low depths, *Materials and Design*, 2022, No 213, Art. 110317.
8. ISO 14577-4:2016 (E). *Metallic Materials – Instrumented Indentation Test for Hardness and Materials Parameters*, Part 4: Test Method for Metallic and Nonmetallic Coatings.
9. Adams, B.L., Wright, S.I., Kunze, K., Orientation Imaging. The Emergence of a New Microscopy, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1993, V. 24, pp. 819–831.
10. *TSL OIM analysis user manual*, Version 5.2, TexSEM Laboratories Inc., 2007.
11. *Metod difraktsii otrazhennykh elektronov v materialovedenii* [The method of diffraction of reflected electrons in materials science], Shvarts, A., Kumar, M., Adams, B., Fild, D. (Eds.), Moscow: Tekhnosfera, 2014.
12. Margolin, B.Z., Varovin, A.Ya., Minkin, A.I., Gurin, D.A., Glukhov, V.A., Issledovanie sostoyaniya metalla vnutrikorpusnykh ustroystv reaktora VVER posle ekspluatatsii v techenie 45 let. Chast 1: Programma issledovaniya i vyrezka trepanov iz VKU [Investigation of the metal condition of the internal devices of the VVER reactor after operation for 45 years. Part 1: Research program and cutting of trepans from the reactor internals], *Voprosy materialovedeniya*, 2020, No 3 (103), pp. 135–143.
13. Margolin, B.Z., Sorokin, A.A., Buchatsky, A.A., Shvetsova, V.A., Prokoshev, O.Yu., Pirogova, N.E., Kharakteristiki i mekhanizmy razrusheniya obluchennykh austenitnykh staley v oblasti povyshennykh temperatur i formulirovka kriteriya razrusheniya. Chast 1: Eksperimentalnye issledovaniya [Characteristics and mechanisms of destruction of irradiated austenitic steels in the field of elevated temperatures and formulation of the fracture criterion. Part 1: Experimental studies], *Voprosy materialovedeniya*, 2022, No 2 (110), pp. 185–202.
14. Kursevich, I.P., Margolin, B.Z., Prokoshev, O.Yu., Kokhonov, V.I., Mekhanicheskie svoystva austenitnykh staley pri neitronnom obluchenii: vliyaniye razlichnykh faktorov [Mechanical properties of austenitic steels under neutron irradiation: the influence of various factors], *Voprosy materialovedeniya*, 2006, No 4 (48), pp. 55–68.
15. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Gulenko, A.G., Radiation embrittlement modeling in multiscale approach to brittle fracture of RPV steels, *Int. J. of Fracture*, 2013, V. 179, Is. 1, pp. 87–108.
16. Sorokin, A. A., Margolin, B. Z., Kursevich, I.P., et al., Effect of neutron irradiation on tensile properties of materials for pressure vessel internals of WWER type reactors, *Journ. Nucl. Materials*, 2014, V. 444, pp. 373–384.
17. Douthwaite, R.M., Petch, N.J., A microhardness study relating to the flow stress of polycrystalline mild steel, *Acta Metallurgica*, 1970, V. 18, pp. 211–216.
18. Ivanov, A.A., Shulepin, S.V., Dvoryashin, A.M., Konobeev, Yu.V., Ivanov, S.N., Alekseev, Yu.V., Porollo, S.I., *Struktura i mekhanicheskie svoystva stali EP-823, 20H12MN i opytnykh variantov 12%-nykh khromistykh staley posle neitronnogo oblucheniya v reaktore BN-350* [Structure and mechanical properties of EP-823, 20X12MN steel and experimental versions of 12% chromium steels after neutron irradiation in the BN-350 reactor]: Proceedings of the 9th conference of reactor materials science, Dimitrovgrad, 2009, pp. 560–573.
19. Margolin, B.Z., Gulenko, A.G., Fomenko, V.N., Kostylev, V.I., Further improvement of the Prometey model and unified curve method. Part 2: Improvement of the unified curve method, *Eng. Fracture Mech.*, 2018, V. 191, pp. 383–402.