



Белгородский
государственный
национальный
исследовательский
университет

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУРНЫХ И ЖАРОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ



ОГЛАВЛЕНИЕ

НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	3
КОЛЛЕКТИВ ЛАБОРАТОРИИ	4
ОСНОВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ.....	5

НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Тематика научно-исследовательских работ и реализуемых научных направлений
Лабораторией механических свойств наноструктурных и жаропрочных материалов:**

1. Ползучесть, сверхпластичность и механизмы пластической деформации металлических материалов.
2. Процессы и механизмы рекристаллизации, включая разработка физических моделей формирования нанокристаллических и субмикрокристаллических структур во время интенсивной пластической деформации металлических материалов.
4. Разработка и исследование методов сварки, том числе сварки трением с перемешиванием однородных и разнородных материалов.
5. Разработка и внедрение в промышленное производство новых технологий термической и термомеханической обработки металлов.
6. Разработка теплотехнических сталей нового поколения мартенситного и аустенитного классов, технологий их производства и обработки для угольных энергетических блоков, работающих на суперсверхкритических параметрах пара.
7. Разработка новых алюминиевых и медных сплавов и технологий их обработки, в том числе для авиакосмической промышленности.
8. Разработка технологии селективного лазерного плавления для производства деталей из сталей
9. Разработка новых низколегированных и среднелегированных сталей и аустенитного класса и технологий их термической обработки.
10. Разработка технологий термомеханической обработки аустенитных сталей.



КОЛЛЕКТИВ ЛАБОРАТОРИИ

Руководитель:

Заведующий лабораторией механических свойств наноструктурных и жаропрочных материалов,

Директор НИИ Материаловедения и инновационных технологий НИУ «БелГУ»,
Профессор кафедры материаловедения и нанотехнологий НИУ «БелГУ»,

Доктор физико-математических наук

Кайбышев Рустам Оскарлович



Основная информация о лаборатории

Численность научно-педагогических работников лаборатории – 21 человек, из них:

- 4 доктора наук
- 14 кандидатов наук



ОСНОВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ

За 15 лет работы лаборатория обеспечила присутствие БелГУ в предметных рейтингах:

- 76-100 – Shanghai Ranking's Global Ranking of Academic Subjects 2017-2021 – Metallurgical Engineering
- TOP400-TOP600 (5-8 место в РФ) – Times Higher Education World University Rankings by subject: Engineering с 2020 по 2022 годы

В 2022 году один из крупнейших научных издательских домов мира Elsevier, выпускающий около четверти всех статей издаваемых в мире научных журналов, опубликовал данные о самых цитируемых учёных, входящих в 2% самых цитируемых ученых. В списке из почти двухсот тысяч учёных со всего мира – 910 исследователей из России. Трое из них – представители лаборатории механических свойств наноструктурных и жаропрочных материалов НИУ «БелГУ», представляющие направление материаловедения:

- доктор физико-математических наук – Рустам Оскарович Кайбышев (212 место в РФ, место по специальности материаловедение),
- Андрей Николаевич Беляков (519 место в РФ, 24 место по специальности материаловедение),
- Сергей Юрьевич Миронов (608 место в РФ).

Коллектив ученых лаборатории (Федосеева Александра, Мишнев Роман, Ткачёв Евгений) в 2018 году был удостоен Золотой медали РАН за лучшую научную работу в номинации «Физико-технические проблемы энергетики».

За последние 5 лет коллективом лаборатории реализовано более 15 научных проектов.

ВЫПОЛНЕННЫЕ КРУПНЫЕ ПРОЕКТЫ

1. Совершенствование микроструктурного дизайна Re-содержащей 10%Cr-3%Co мартенситной стали для тепловых электростанций

Назначение:

Высокохромистые стали – перспективные материалы для изготовления лопаток и роторов паровых турбин для тепловых электростанций, работающих на суперсверхкритических параметрах (ССКП) пара ($T = 600-620^{\circ}\text{C}$, $P = 250-300$ атмосфер). В настоящее время угольные тепловые электростанции России, работающие при параметрах пара $545-560^{\circ}\text{C}$ и 140-240 атмосфер, выработали свой ресурс и подлежат замене. Они имеют низкий коэффициент полезного действия (34-37%) и большие вредные выбросы в атмосферу. За счет повышения параметров пара до ССКП планируется повысить КПД до 41-44% и сократить вредные тепловые выбросы.

Новизна:

- Изменение легирования высокохромистых сталей в направлении снижения содержания азота и увеличения содержания бора одновременно с увеличением содержания вольфрама и молибдена, добавлением рения и меди приводит к существенному увеличению времени до разрушения вплоть до рекордно высоких значений.
- Модификация термической обработки высокохромистых сталей дает значительное улучшение сопротивления ползучести, обеспечивая одновременное повышение, как предела длительной прочности, так и предела ползучести. Указывается пункт новизны проекта.
- Высокие значения сопротивления ползучести обеспечивают мелкодисперсные частицы $M_{23}(C,V)_6$ и фаз Лавеса, которые выделяются на первичной стадии ползучести по границам реек и блоков, которые выступают в качестве основных упрочняющих фаз.

Преимущества: Свойства разработанных 10% Cr сталей с низким содержанием азота и высоким содержанием бора, дополнительно легированных кобальтом, вольфрамом, молибденом, рением и/или медью, обработанные по режиму закалка с 1100°C с охлаждением на воздухе с последующим отпуском при 770°C в течение 3 часов с охлаждением на воздухе, соответствуют требованиям, предъявляемым к материалам для изготовления элементов котлов и паропроводов, работающих при суперсверхкритических параметрах пара, а сами стали могут быть рекомендованы к эксплуатации при температурах $600-630^{\circ}\text{C}$.

Уровень разработки технологии: TRL3

Патент № 2789958 от 14.02.2023 г. «Способ обработки жаропрочных низкоуглеродистых сталей мартенситного класса»

Патент № 2757923 от 25.10.2021 г. «Жаропрочная сталь мартенситного класса»

Патент № 2688017 от 17.05.2019 г. «Способ термомеханической обработки жаропрочной стали мартенситного класса»

Патент № 2585591 от 27.05.2016 г. «Жаропрочная сталь мартенситного класса»

2. Исследование влияния цинка и серебра на образование пластинчатых частиц с плоскостями габитуса $\{111\}_{Al}$ в Al-Cu-Mg(-Li) сплавах

Назначение: Предлагаемый проект посвящен исследованию влияния легирования цинком и серебром на структуру, распределение по размерам, термодинамику и кинетику образования рационально ориентированных пластинчатых частиц с плоскостями габитуса типа $\{111\}_{Al}$ в сплавах Al-Cu-Mg-Ag и Al-Cu-Mg-Ag-Li сплавах с целью улучшить/повысить механические (прочностные) свойства данных термически упрочняемых алюминиевых сплавов после термической и/или термомеханической обработки.

Новизна:

- Установлены закономерности и механизмы влияния цинка на термодинамику и кинетику выделения омега-фазы в сплаве системы Al-Cu-Mg-Ag, а также на прочностные свойства данного материала – долговременную прочность, предел ползучести, вязкость разрушения K_{IC} , скорость роста усталостной трещины и сопротивление коррозионному разрушению.
- Установлены закономерности и механизмы влияния цинка, а также степени промежуточной (перед старением) деформации прокаткой с обжатием до 80% на термодинамику и кинетику выделения T1-фазы в сплаве системы Al-Li-Cu-Mg-Ag, а также на прочностные свойства этого сплава, вязкость разрушения K_{IC} , скорость роста усталостной трещины и сопротивление коррозионному разрушению

Преимущества: Полученные в рамках предлагаемого проекта фундаментальные знания будут способствовать переходу к новым технологиям производства алюминиевых полуфабрикатов с улучшенным комплексом свойств для изготовления деталей и узлов воздушных транспортных средств нового поколения.

Внедрение: Полученные результаты, описывающие взаимосвязи между параметрами термической/термомеханической обработки, микроструктурой и свойствами, позволяют перейти к их практическому внедрению. Исследуемые сплавы найдут применение в качестве конструкционных материалов в различных отраслях промышленности.

Уровень разработки технологии: TRL3

3. Исследование влияния структуры и частиц вторых фаз на ударную вязкость и хрупко-вязкий переход в улучшенных теплотехнических сталях с повышенным содержанием бора

Назначение:

Одним из ключевых недостатков современных мартенситных сталей с повышенным содержанием бора и пониженным содержанием азота является их повышенная склонность к хрупкому разрушению. В качестве решения для повышения ударной рассмотрена низкотемпературная термомеханическая обработка стали (НТМО или аусформинг стали) заключающаяся в деформации переохлажденного аустенита с последующей закалкой.

Новизна:

- Установлены закономерности влияния низкотемпературной термомеханической обработки на ударную вязкость и соотношение зон стабильного и нестабильного распространения трещины в мартенситных сталях
- Определено влияние режимов термической обработки на ударную вязкость и температуру хрупко-вязкого перехода в 9%Cr сталях.
- Установлено что применение деформационно-термической обработки в общем случае приводит к формированию дисперсной структуры с повышенной прочностью и пластичностью.
- Установлены основные факторы повышения ударной вязкости в теплотехнических сталях после ТМО.

Преимущества: Продемонстрирована возможность повышения механических свойств без применения дополнительного дорогостоящего легирования.

Уровень разработки технологии: TRL3

4. Разработка технологии термической обработки рабочей детали валковых брикет прессов для получения ГБЖ (горяче-брикетированное железо)

Назначение:

Проект направлен на разработку технологии обработки штампов брикет-пресса для получения горяче-брикетированного железа (ГБЖ) основываясь на принципах обратного инжиниринга. В качестве исходной детали взят оригинальный штамп, ранее поставленный зарубежной компанией, для которого были определены свойства во взаимосвязи с наблюдаемой микроструктурой, на основе чего была воссоздана технология термической обработки данной детали с получением необходимого уровня механических свойств в условиях отечественной промышленности.

Новизна:

- Импортозамещение критически важных рабочих деталей путем разработки технологии обработки штампов роллер-пресса для получения ГБЖ основываясь на принципах обратного инжиниринга.

Преимущества:

Обеспечение отрасли горнодобывающей промышленности отечественными деталями валковых брикет-прессов для получения ГБЖ.

Внедрение: Договор о передаче прав на секрет производства находится в процессе заключения.

Уровень разработки технологии:

Ноу-хау № 629 от 12.11.2024 г. «Режим термической обработки рабочей детали валковых брикет прессов для получения ГБЖ с использованием солей расплава»;

Ноу-хау № 630 от 12.11.2024 г. «Режим термической обработки рабочей детали валковых брикет прессов для получения ГБЖ с использованием вакуумных печей»;

Ноу-хау № 631 от 12.11.2024 г. «Способ предварительной термической обработки отливок из быстрорежущих сталей для измельчения зеренной структуры при последующей закалке»

5. Микроструктурные механизмы повышения ударной вязкости и предела текучести высокопрочных низколегированных сталей

Назначение:

Проект посвящен фундаментальным исследованиям в области физического материаловедения конструкционных сталей, анализу механизмов формирования в них нанокристаллической волокнистой структуры в процессе деформационно-термической обработки, а также уточнению зависимостей предела текучести и ударной вязкости от микроструктурных параметров. Проект направлен на решение проблемы получения высокопрочных стальных полуфабрикатов и их соединений, обладающих высокой ударной вязкостью при пониженных температурах за счет формирования в сталях оптимальной слоистой микроструктуры.

Новизна:

- Установлена природа уникальных механических свойств, которые получены в высокопрочных низколегированных сталях после темпформинга.
- Разработаны инновационные способы получения полуфабрикатов из высокопрочных низколегированных сталей с пределом текучести более 1000 МПа при комнатной температуре и ударной вязкостью KCV более 100 Дж/см² при -90С.
- Установлены механизмы разрушения таких сталей с нанокристаллической волокнистой структурой при ударном нагружении при комнатной и пониженных температурах, особенности хрупко-вязкого перехода.
- Проведены исследования ударной вязкости сварных швов, полученных сваркой трением с перемешиванием, высокопрочных низколегированных сталей, а также анализ механизмов деградации нанокристаллической слоистой микроструктуры в процессе циклического нагружения высокопрочных низколегированных сталей, подвергнутых темпформингу.

Преимущества:

Разработанные способы деформационно-термической обработки высокопрочных низколегированных сталей, позволяющие существенно улучшить механические свойства стальных полуфабрикатов, в первую очередь ударную вязкость при пониженных температурах, могут быть использованы металлургическими предприятиями, занимающимися производством крепежа и элементов конструкций строительных,

добывающих и перерабатывающих сооружений. Использование стальных полуфабрикатов с повышенной ударной вязкостью существенно повысит надежность конструкций и сооружений, предназначенных для эксплуатации при пониженных температурах.

Уровень разработки технологии:

Выявлены и опубликованы фундаментальные принципы; Сформулирована идея решения той или иной физической или технической проблемы, произведено ее теоретическое и (или) экспериментальное обоснование (Первый УГТ).

Патент № 2788770 от 24.01.2023г. «Способ обработки хромомолибденовой стали перлитного класса»

Ноу-хау № 433 от 19.10.2022г. «Высокопрочная низколегированная сталь»

6. Высокохромистая мартенситная сталь нового поколения для лопаток турбин тепловых электростанций

Назначение:

Наличие ключевых современных технологий генерации электроэнергии на различных видах топлива определяет суверенитет и независимость государства и позволяет формировать топливно-энергетический комплекс страны. Проект посвящен фундаментальным исследованиям в области физического материаловедения и разработке на основе полученных научных результатов новых теплотехнических сталей для угольных энергоблоков нового поколения. Переход к сверхкритическим параметрам пара позволит существенно снизить вредные выбросы в атмосферу и получить экономический эффект за счет снижения объемов сжигаемого топлива. В рамках реализации проекта была разработана сталь, которая демонстрирует комплекс уникальных свойств при температуре 650°C. Следовательно ее использование позволит повысить КПД ТЭС примерно на 9%, что обеспечит экономию примерно 5 млн.рублей в сутки на одной электростанции и существенно сократит выбросы CO₂ в атмосферу. На сегодняшний день по основному свойству-сопротивлению ползучести сталь не имеет аналогов ни в РФ, ни за рубежом. Предел длительной прочности при температуре 650°C на базе 105 часов составляет 110 МПа, что превосходит все мартенситные стали, но и может конкурировать с аустенитными сталями и суперсплавом Inconel 617, стоимость которых выше в 18 и 40 раз соответственно. Комплексный подход исследования позволил не только провести детальное исследование основных механических свойств в условиях имитирующих реальные условия эксплуатации, но и разработать режимы сваривания нового материала и проработать другие технические и юридические вопросы, связанные с внедрением новых материалов в энергетический промышленный сектор.

Новизна:

- Разработана сталь нового поколения, демонстрирующая комплекс выдающихся механических свойств.
- Разработаны режимы сваривания новой стали различными методами, в том числе с материалами других химических составов.

- Детально изучено поведение материала в условиях ползучести и циклического нагружения, что позволит оптимизировать режимы работы будущих изделий и минимизировать риски аварий и разрушений.

Преимущества:

Новый материал обладает комплексом характеристик, позволяющих повысить КПД электростанций, снизить время простоя ТЭС за счет увеличения межсервисного интервала турбин.

Уровень разработки технологии: TRL3

Патент № RU 2805532 от 13.04.2024 г. «Способ получения сварных соединений мартенситной высокохромистой стали»

Патент № RU 2696302 от 31.07.2018 г. «Способ обработки жаропрочной мартенситной стали»

Ноу-Хау «Способ получения сварных соединений мартенситной высокохромистой стали». Свидетельство № 435 о регистрации в качестве ноу-хау результата интеллектуальной деятельности. Дата подачи 12.09.2022.

Ноу-Хау «Упрощенный алгоритм внедрения новых материалов для объектов использования атомной энергии». Свидетельство № 457 о регистрации в качестве ноу-хау результата интеллектуальной деятельности. Дата подачи 18.11.2022.

Ноу-Хау «Способ получения сварных соединений мартенситной высокохромистой стали лазерной сваркой». Свидетельство № 503 о регистрации в качестве ноу-хау результата интеллектуальной деятельности. Дата подачи 10.03.2023.

Ноу-Хау «Способ получения разнородных сварных соединений мартенситной и аустенитной сталей методом сварки трением с перемешиванием». Свидетельство № 510 о регистрации в качестве ноу-хау результата интеллектуальной деятельности. Дата подачи 13.04.2023.

Ноу-Хау. Способ получения разнородных сварных соединений лазерной сваркой. Свидетельство № 522 о регистрации в качестве ноу-хау результата интеллектуальной деятельности. Дата подачи 04.09.2023.

Ноу-Хау. Программа сертификации материалов, разработанных в рамках НИОКР. Свидетельство № 523 о регистрации в качестве ноу-хау результата интеллектуальной деятельности. Дата подачи 04.09.2023.

7. Получение высокопрочных соединений из разнородных алюминиевых сплавов посредством аддитивных технологий и сварки трением с перемешиванием

Назначение: Проект был направлен на совершенствование технологии получения неразъемных соединений в авиационных конструкциях на основе синтеза двух инновационных технологий – аддитивного производства и сварки трением с перемешиванием (СТП). Его основная идея заключалась в изготовлении СТП инструмента прогрессивного дизайна посредством аддитивной технологии. Предполагалось, что использование данного подхода оптимизирует характер пластического течения материала в ходе сварки и, таким образом, позволит получить равнопрочные соединения из разнородных алюминиевых сплавов авиационного назначения. Конечной целью проекта являлась выработка научно-обоснованных рекомендаций, которые могут быть использованы при производстве перспективной авиационной техники.

Новизна:

- Выявлены ключевые механизмы, управляющие процессами формирования микроструктуры в ходе селективного лазерного сплавления мартенситностареющей стали 17-4 PH. Показано, что формирующаяся микроструктура представляет собой сложную смесь фаз из дельта-феррита, аустенита и мартенсита. Образование этой микроструктуры является следствием как экстремально высокой скорости охлаждения, так и термоциклирования, присущих селективному лазерному сплавлению. Повышение тепловой энергии 3D печати ведет к увеличению доли мартенситной фазы. Предположено, что данный эффект связан со снижением скорости охлаждения, способствующей распаду дельта-феррита и аустенита.
- Показано, что использование «аддитивного» инструмента позволяет интенсифицировать процесс механического перемешивания свариваемых материалов в ходе СТП и, таким образом, способствует повышению прочности получаемых неразъемных соединений.

Преимущества:

Использование «аддитивного» СТП инструмента позволяет повысить прочность неразъемных соединений из разнородных алюминиевых сплавов.

Уровень разработки технологии: TRL3

Патенты и ноу-хау:

- (1) Способ изготовления цельного инструмента для сварки трением с перемешиванием с помощью аддитивных технологий (изобретение, регистрационный номер 2805731, дата регистрации 23.10.2023)
- (2) Способ получения сплавов на основе алюминия, содержащие тугоплавкие легирующие элементы (изобретение, регистрационный номер 2810405, дата регистрации 27.12.2023)
- (3) Способ контроля термического цикла в ходе сварки трением с перемешиванием (зарегистрировано в Региональной депозитарии ноу-хау при НИУ «БелГУ» 05.05.2023 г., свидетельство №505)
- (4) Сварка трением с перемешиванием разнородных алюминиевых сплавов АД33 и 2519 с использованием рабочего инструмента, полученного посредством 3D печати (зарегистрировано в Региональной депозитарии ноу-хау при НИУ «БелГУ» 24.10.2023 г., свидетельство №528)
- (5) Сварка трением с перемешиванием разнородных алюминиевых сплавов АД33 и 1933 с использованием рабочего инструмента, полученного посредством 3D печати (зарегистрировано в Региональной депозитарии ноу-хау при НИУ «БелГУ» 24.10.2023 г., свидетельство №529)
- (6) Способ изготовления термоупрочняемых алюминиевых сплавов бxxx серии (зарегистрировано в Региональной депозитарии ноу-хау при НИУ «БелГУ» 13.02.2023 г., свидетельство №494)
- (7) Способ изготовления сплавов системы Al-Zn (зарегистрировано в Региональной депозитарии ноу-хау при НИУ «БелГУ» 13.02.2023 г., свидетельство №495)
- (8) Способ подавления аномального роста зерен в ходе термической обработки неразъемных соединений алюминиевого сплава АД33, полученных сваркой трением с перемешиванием (зарегистрировано в Региональной депозитарии ноу-хау при НИУ «БелГУ» 13.02.2023 г., свидетельство №491)
- (9) Способ изготовления алюминиевых сплавов 2xxx серии (зарегистрировано в Региональной депозитарии ноу-хау при НИУ «БелГУ» 13.02.2023 г., свидетельство №493)

Россия, 308015, г. Белгород,
ул. Победы, 85
Департамент инновационной деятельности НИУ «БелГУ»
Тел. (4722) 30-10-30

