

УДК 669.1

П.А. ВИТЯЗЬ, акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.

начальник управления аэрокосмической деятельности Аппарата; научный руководитель подпрограммы «Металлургия»¹

E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

А.В. ТОЛСТОЙ, канд. физ.-мат. наук, доц.

заместитель заведующего лабораторией металлургии в машиностроении НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»²

E-mail: labmetal@rambler.ru

¹Национальная академия наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 17.09.2024.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ ПОДПРОГРАММЫ «МЕТАЛЛУРГИЯ» ГПНИ «МЕХАНИКА, МЕТАЛЛУРГИЯ, ДИАГНОСТИКА В МАШИНОСТРОЕНИИ» НА 2021–2025 ГОДЫ, ЗАВЕРШЕННЫХ В 2023 ГОДУ

Приведены основные результаты научно-исследовательских работ, выполненных организациями НАН Беларуси и Министерства образования Республики Беларусь в рамках подпрограммы «Металлургия», завершенных в 2023 году, определены наиболее перспективные направления, на базе которых могут быть сформированы задачи научных исследований в рамках подпрограммы «Металлургия», формируемой на 2025–2030 годы. Представлены разработанные Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси технологические требования и методики изготовления кольцевых заготовок применительно к условиям автоматизированного производства. Результаты данной разработки предназначены для использования на создаваемом в Республике Беларусь автоматизированном кольцераскатном комплексе в составе ОАО «БЕЛАЗ — управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ». Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси также разработана научная методология повышения надежности и ресурса цементированных и азотируемых деталей, а также литых элементов несущих конструкций машин, заключающаяся в обеспечении на стадиях микролегирования, кристаллизации и химико-термической обработки структурной и механической однородности приграничных объемов зерен стального материала. На ее основе разработаны новые конструкционные цементруемые и азотируемые стали 20ХНЗМА и 40ХМФА, а также литейная сталь 15НМФЛ. Белорусским национальным техническим университетом выполнен анализ типовых корпусных деталей для изготовления электрических средств транспорта. Разработаны рекомендации для внесения изменений в конструкцию с целью обеспечения их изготовления методами литья. Разработаны технологические принципы получения чугунов с шаровидным графитом высоких марок с использованием медь-магниевого лигатуры.

Ключевые слова: металлургия, литье, химико-термическая обработка, обработка давлением

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-1-70-84-94>

В наших публикациях [1–2] была приведена информация о результатах выполнения заданий подпрограммы «Металлургия», завершенных в предыдущие годы, показан их вклад в развитие металлургических производств предприятий республики. В данной работе рассмотрены результаты выполнения заданий подпрограммы, завершенные в 2023 году, сформулированы основные направления исследований в рамках программы научных исследований, формируемой на 2026–2030 годы.

В подпрограмму «Металлургия» на 2021–2025 годы включены 53 научно-исследовательские ра-

боты (НИР), 10 из которых имели срок выполнения 3 года и завершились в 2023 году. При выполнении этих заданий получены следующие основные результаты.

1. *Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси при выполнении НИР «Разработка технологических требований и методики проектирования технологических процессов изготовления кольцевых заготовок применительно к условиям автоматизированного производства» разработаны:*

- технологические требования к силовым параметрам оборудования кольцераскатного комплекса

применительно к условиям автоматизированного производства при заданной номенклатуре кольцевых заготовок (рисунки 1, 2);

- рекомендации по оптимизации загрузки автоматизированного производства по тактовому времени и группированию номенклатуры кольцевых заготовок;
- методика проектирования технологических процессов изготовления кольцевых заготовок на основе заданных параметров автоматизированного производства;
- параметры контроля изготовления кольцевых заготовок в условиях автоматизированного производства [3–5].

Полученные результаты предназначены для использования на создаваемом в Республике Беларусь автоматизированном кольцераскатном комплексе в составе ОАО «БЕЛАЗ — управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ».

2. Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси при выполнении НИР «Развитие научных основ повышения надежности, ресурса трансмиссий и несущих конструкций машин путем создания новых конструктивных сталей и технологий получения деталей при снижении энергетических и материальных затрат на технологических переделах производств: метал-

лургических, термических, механической обработки» установлено, что основным фактором, вызывающим макролокализованную пластическую деформацию (МЛПД) и последующее разрушение, является структурная и механическая неоднородность приграничных объемов зерен, определяемая присутствием примеси меди (0,15 % и более) в стали при ее неравномерном распределении по объему и концентрации по границам зерен. Разработана научная методология повышения надежности и ресурса цементированных и азотируемых деталей, а также литых элементов несущих конструкций машин, заключающаяся в обеспечении на стадиях микролегирования, кристаллизации и химико-термической обработки структурной и механической однородности приграничных объемов зерен стального материала. На ее основе разработаны новые конструкционные цементруемые и азотируемые стали 20ХНЗМА и 40ХМФА, а также литейная сталь 15НМФЛ.

Выполнен комплекс работ по замене упрочняющей обработки цементацией на ионно-плазменное азотирование (ИПА) для маломодульных зубчатых колес. Проведенные лабораторные исследования, сравнительные стендовые испытания и расчеты на прочность показали, что зубчатые колеса из азотируемой стали 40ХМФА после ИПА не уступают по прочности и долговечности цементруемым из стали 20ХНЗА при значительном снижении энергетических и материальных затрат на стадии термической и механической обработке.

Проведены исследования по повышению точности, надежности и ресурса крупногабаритных нешлифуемых конических зубчатых колес с круговым зубом ведущего моста (рисунок 3), а также крупногабаритных колец подшипников редукторов мотор-колес (РМК) карьерного самосвала. Для этого из полученной в условиях ОАО «БЕЛАЗ — управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» перспективной стали 20ХНЗФА (сталь 20ХНЗА микролегированная



Рисунок 1 — Кольцераскатный стан для колец диаметром до 3000 мм

Figure 1 — Ring rolling mill for rings up to 3,000 mm diameter

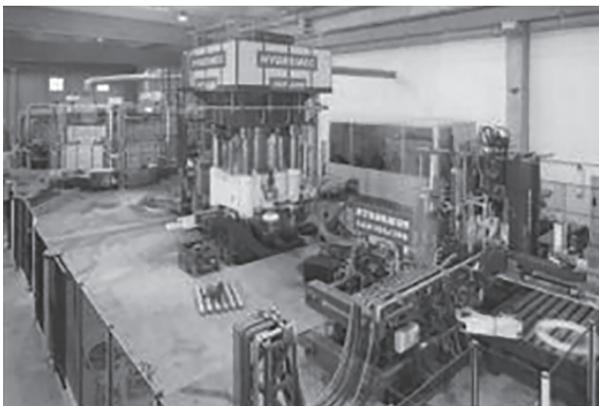


Рисунок 2 — Кольцераскатный стан для колец диаметром до 7000 мм

Figure 2 — Ring rolling mill for rings up to 7,000 mm diameter



Рисунок 3 — Партия деталей «Шестерня ведущая» главной передачи карьерного самосвала из перспективной стали 20ХНЗФА

Figure 3 — Batch of parts “Master gear” of the main transmission of a mining dump truck made of promising steel 20ХНЗФА (20KhN3FA)

ванадием) была изготовлена партия экспериментальных образцов (69 шт.) таких колес, а из новой стали 20ХНЗМА — образцов колец подшипников. Установлено, что применение этих сталей при обеспечении требуемых параметров упрочненного слоя и сердцевины значительно уменьшает коробление деталей после ХТО, что приводит к существенному снижению энергетических и материальных затрат при их изготовлении, повышает прочность и надежность в эксплуатации.

Проведены исследования по повышению надежности и ресурса крупногабаритных стальных отливок для деталей (элементов) несущих конструкций машин путем применения методов управляемой кристаллизации, а также литейной стали не склонной к МЛПД (сталь 15НМФЛ) с дополнительным термоупрочнением. Показано, что использование методов управляемой кристаллизации при получении в песчаных формах отливки наконечника балки передней оси карьерного самосвала из стали 15НМФЛ с последующим термоупрочнением приводит к формированию однородной, мелкозернистой микроструктуры, значительному повышению сопротивления усталостному и хрупкому разрушению (рисунок 4) [6–7].

Разработаны рекомендации по повышению надежности и ресурса крупногабаритных нешлифуемых конических зубчатых колес с круговым зубом ведущих мостов и колец крупногабаритных подшипников РМК карьерных самосвалов путем применения перспективной и новой цементируемых сталей (20ХНЗА с добавками ванадия — 20ХНЗФА и 20ХНЗМА); по замене цементации маломодульных зубчатых колес из стали 20ХНЗА на их ионно-плазменное азотирование из стали 40ХМФА. Полученные результаты могут быть использованы при создании новых материалов и технологий получения деталей на предприятиях машиностроения и металлургии Республики Беларусь (ОАО «МТЗ», ОАО «МАЗ», ОАО «ГОМСЕЛЬМАШ», ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК»).

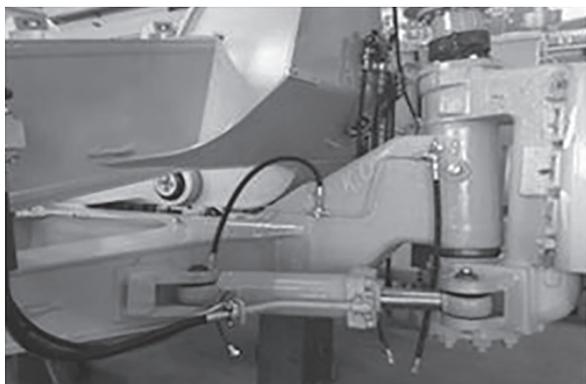


Рисунок 4 — Общий вид балки передней оси карьерного самосвала с термоупрочненными наконечниками из стали 15НМФЛ

Figure 4 — General view of the front axle beam of a dump truck with heat-strengthened lugs made of 15NMFL steel

3. Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси в ходе выполнения НИР «Исследование и разработка процесса индукционной наплавки покрытий из сплавов на основе алюминия и приемов их модифицирования для обеспечения высоких эксплуатационных показателей деталей тяжело нагруженных узлов трения» разработан процесс индукционной наплавки покрытий из алюминиевых сплавов и способы их модифицирования для обеспечения высоких эксплуатационных показателей деталей (рисунки 5, 6).

Установлено, что для обеспечения высоких прочностных свойств модифицированного сплава наиболее приемлемо использовать жидкофазные приемы введения армирующих частиц в расплавы алюминия. При реализации технологии наплавки покрытия из сплава на основе алюминия методом индукционного нагрева, совмещенного с центробежным вращением, необходимо вводить дополнительную операцию по перемешиванию шихтовых материалов перед наплавкой путем вращения заготовки на малых оборотах, что обеспечит равномерное распределение модифицирующих компонентов по объему шихтовой смеси.

Таким образом, в процессе нагрева с последующим расплавлением осуществляется принцип динамического сплавления частиц алюминиевого сплава с одновременной пропиткой керамически-



Рисунок 5 — Процесс индукционной наплавки
Figure 5 — Induction cladding process



Рисунок 6 — Образец с антифрикционным покрытием
Figure 6 — Sample with antifriction coating

ми частицами, которые под действием центробежных сил не отгесняются в шлаковую ванну и усваиваются расплавом.

Разработаны теоретические основы оптимального управления нестационарными температурными режимами получения композиционных порошковых покрытий центробежным индукционным методом при ограничениях на термоупругие напряжения. Показано, что оптимальное по быстродействию управление процессами формирования покрытий может быть достигнуто путем регулирования мощности нагрева либо скорости вращения заготовки. Для осуществления оптимального по быстродействию управления охлаждением заготовки в технологическом процессе индукционной наплавки предложено использование двухступенчатого режима [8–13].

Изготовлена и испытана опытная партия деталей путевых машин ЭРУП «Центр механизации путевых работ Белорусской железной дороги» (г. Пинск) с покрытиями, нанесенными из материалов и по технологии, разработанной в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси (акт изготовления от 17.07.2023 г., акт испытаний от 07.09.2023 г.). Срок службы биметаллических деталей с покрытиями из антифрикционной композиции в 1,22–1,30 раза выше, чем у серийных.

На ЭРУП «Центр механизации путевых работ Белорусской железной дороги» внедрены:

- технология индукционной наплавки;
- оборудование с оснасткой;
- составы материалов для нанесения модифицированных антифрикционных покрытий на детали исполнительных механизмов и ходовых сопряжений рабочих органов путевых машин (акт внедрения от 11.12.2023 г.).

Стоимость изделий с покрытиями из композиций на основе алюминиевых сплавов в 2,5–2,7 раза меньше по сравнению с аналогичными изделиями с покрытиями из сплавов на медной основе.

4. *Институтом технологии металлов НАН Беларуси* при выполнении НИР «Совершенствование технологии литья направленным затвердеванием для разработки метода получения заготовок из синтетических чугунов различной номенклатуры со специальными свойствами» проведены экспериментальные исследования режимов литья направленным затвердеванием и упрочняющей обработки (рисунок 7). Определены рациональные металлургические и технологические параметры литья экономнолегированного специального серого чугуна перлитного класса.

Получены опытные образцы отливок из синтетического чугуна (рисунок 8).

Установлено влияние термовременных параметров упрочняющей термообработки на твердость и износостойкость деталей из экономнолегированного серого чугуна, полученного методом намораживания. Разработан энергосберегающий

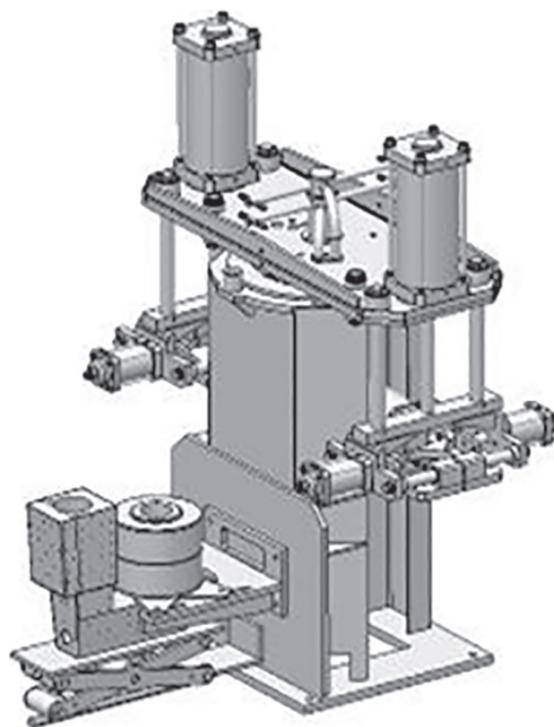


Рисунок 7 — Машина для непрерывно-циклического литья намораживанием
Figure 7 — Machine for continuous-cyclic freeze casting



Рисунок 8 — Полая цилиндрическая отливка из чугуна
Figure 8 — Hollow cylindrical cast iron casting

режим термообработки с использованием тепла первичной кристаллизации, заключающийся в охлаждении толстостенных отливок в термокамере до температур 780–760 °С, затем на воздухе для получения перлитной структуры [14].

Спроектирована и изготовлена термокамера и устройство для отжига отливок в вертикальном положении, обеспечивающем исключение возможности их деформации при термообработке.

Полученные результаты способствуют повышению эксплуатационных свойств отливок из серого специального экономнолегированного чугуна и расширению номенклатуры их применения. Результаты исследований позволяют при снижении затрат на производство расширить возможности метода литья направленным затвердеванием

и номенклатуру продукции, выпускаемой на производственном участке Института технологии металлов НАН Беларуси.

5. *Институтом технологии металлов НАН Беларуси* при выполнении НИР «Модифицирование структуры отливок из силуминов с высоким содержанием железа без применения модификаторов» исследовано влияние режимов термической обработки (заковки и искусственного старения) на дисперсность железосодержащих интерметаллидных включений (рисунок 9) и твердость (рисунок 10) опытных образцов диаметром 53 мм из сплава АК12М3 с содержанием железа более 2,0 % при литье в струйный кристаллизатор с вибрацией. Проведены триботехнические и прочностные исследования опытных образцов из силуминов с высоким содержанием железа. Антифрикционный силумин с высоким содержанием железа марки ЖАС-2, полученный по технологии Института технологии металлов НАН Беларуси, рекомендован в качестве материала втулок скольжения в насосах ALLWEILER взамен аналогичных из импортного

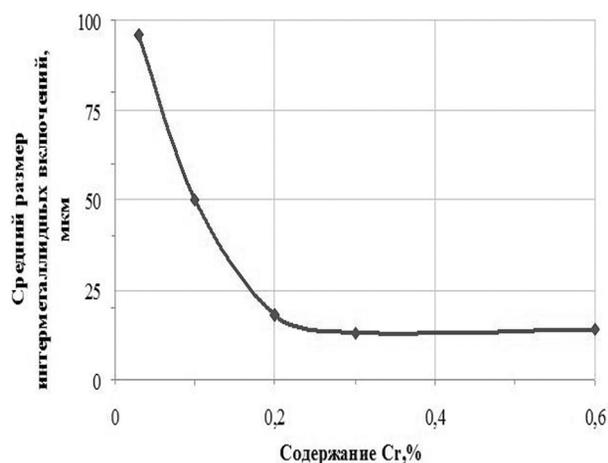


Рисунок 9 — Влияние содержания хрома на размеры интерметаллидных включений в образцах из силумина $AlSi_{12}Cu_3Fe_{2.0}Mn_{1.0}$

Figure 9 — Effect of chromium content on sizes of intermetallic inclusions in samples made of silumin $AlSi_{12}Cu_3Fe_{2.0}Mn_{1.0}$

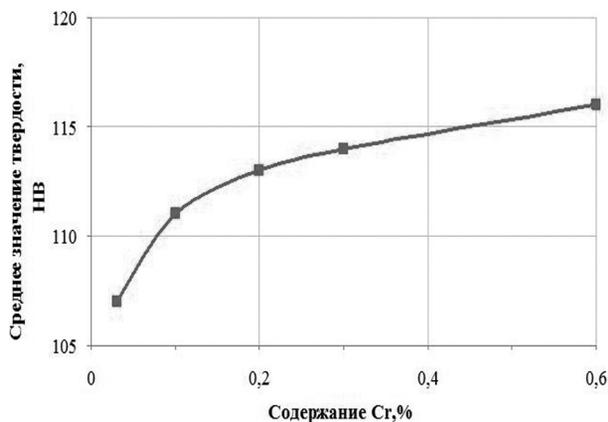


Рисунок 10 — Влияние содержания хрома на твердость образцов из силумина $AlSi_{12}Cu_3Fe_{2.0}Mn_{1.0}$

Figure 10 — Effect of chromium content on hardness of samples made of silumin $AlSi_{12}Cu_3Fe_{2.0}Mn_{1.0}$

материала. Экономический эффект от замены импортных втулок из силицированного графита, ориентировочной стоимостью 600 евро/шт., на втулки из антифрикционного силумина с высоким содержанием железа (ЖАС), ориентировочной стоимостью 25 евро/шт., составил 5750 евро.

Заготовки из силуминов с повышенными свойствами поставлялись на многие предприятия Беларуси и России. На опытном литейном участке Института технологии металлов НАН Беларуси создано производство получения вибрационно-литейным методом отливок из вторичных силуминов с высокими эксплуатационными свойствами.

6. *Белорусским национальным техническим университетом* при выполнении НИР «Исследование процессов улучшения структуры и повышения надежности литых изделий из сплавов черных и цветных металлов путем модифицирования и внепечной обработки расплавов» выполнен анализ типовых корпусных деталей для изготовления электрических средств транспорта. Разработаны рекомендации для внесения изменений в конструкцию с целью обеспечения их изготовления методами литья. Установлены температурно-временные параметры подготовки армирующих вставок, обеспечивающие условия образования прочного соединения между вставкой и основным материалом отливки. Выполнен анализ параметров литья, оказывающих влияние на герметичность отливок из алюминиевых сплавов [15].

Установлено, что при получении сложнопрофильных корпусных отливок из алюминиевых сплавов в условиях мелкосерийного производства эффективным является способ получения, основанный на использовании холоднотвердеющих песчано-смоляных смесей. Отработаны оптимальные технологические параметры изготовления форм для литья сложнопрофильных корпусных отливок из алюминиевых сплавов. Изготовлены опытные комплекты форм (рисунки 11, 12).

Разработаны рекомендации по применению сложнопрофильных корпусных отливок из алюминиевых сплавов в конструкции электрических средств транспорта. Результаты данной работы могут быть использованы на ОАО «Минский моторный завод», ОАО «Осиповичский завод автомобильных агрегатов» (г. Осиповичи), ОАО «Могилевлифтмаш» и других предприятий Республики Беларусь.

7. *Белорусским национальным техническим университетом* в ходе выполнения НИР «Разработка технологических принципов получения чугунов с шаровидным графитом высоких марок с использованием медь-магниевого лигатуры» обоснован выбор технологии получения чугуна с шаровидным графитом (ЧШГ) повышенной прочности, включая процесс десульфурации исходного расплава чугуна с использованием эффективных

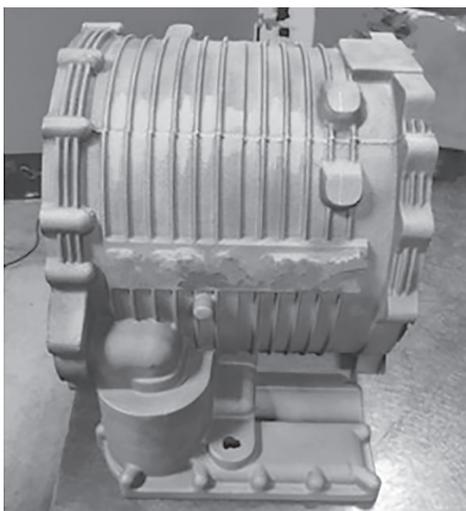


Рисунок 11 — Общий вид отливки «Корпус»
Figure 11 — General view of the “Crankcase” casting

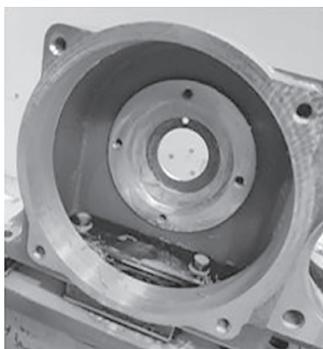


Рисунок 12 — Отливка «Корпус»
Figure 12 — Casting “Casing”

препаратов. Установлено, что предварительная обработка жидкого чугуна карбидом кальция обеспечивает снижение концентрации серы до 0,03%. Сфероидизирующая обработка чугуна в специальном ковше медь-магниевого лигатурой обеспечивает максимальное усвоение магния при минимальном ее расходе и позволяет гарантированно получать шаровидный графит, равномерно распределенный в объеме материала. Наличие в составе лигатуры меди приводит к формированию перлитной металлической основы, которая, в сочетании с шаровидной формой графита, обеспечивает механические свойства в литом состоянии на уровне марок ВЧ70-ВЧ80 [16, 17]. Проведены лабораторные и промышленные испытания технологии получения ЧШГ высоких марок и изготовлены опытные отливки (рисунки 13, 14).

Разработаны рекомендации по практическому применению технологии сфероидизирующей и термической обработки ЧШГ. Полученные результаты позволяют рекомендовать технологию получения ЧШГ ВЧ70-80 к практическому использованию в опытном производстве при получении отливок ответственного назначения.

8. *Белорусским национальным техническим университетом* при выполнении НИР «Совершен-

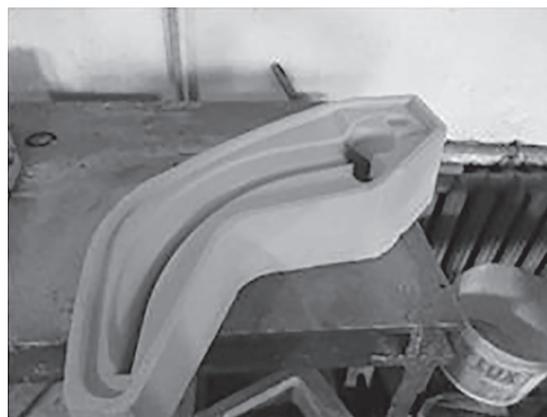


Рисунок 13 — Общий вид литейной формы
Figure 13 — General view of the casting mold



Рисунок 14 — Опытная отливка из высокопрочного чугуна
Figure 14 — Experimental casting made of high-strength cast iron

ствование структуры и повышение свойств легированных сталей внепечной обработкой комплексным модификатором» изучено влияние структуры стали 20ГЛ, модифицированной силицидами щелочноземельных металлов (Ca, Ba, Sr) с добавкой поверхностно-активного вещества висмута, на ее механические свойства. Введение поверхностно-активного вещества висмута оказывает положительное влияние на измельчение структуры стали. Опробован комплексный модификатор в производственных условиях для быстрорежущей инструментальной стали Р6М5. Модификатор состоит из FeSi, вторичного алюминия и висмута. Использование комплексного модификатора позволяет измельчить структуру литой стали Р6М5 (уменьшить размер зерна в 2–3 раза) (рисунок 15) [18]. Разработан проект технических условий «Модификатор комплексный» для двух видов модификаторов: для легированных углеродистых сталей и инструментальных быстрорежущих сталей типа Р6М5.

9. *Белорусским национальным техническим университетом* при выполнении НИР «Совершенствование структуры и повышение свойств легированных износостойких железоуглеродистых сплавов внепечной обработкой комплексным модификатором». Установлено, что использование комплексного модификатора, содержащего нано- и ультрадисперсные частицы, позволяет измельчить аустенитное зерно в марганцовистых сталях, стабилизировать свойства за счет термообработки и повысить ресурс работы деталей. Опробование экспериментального модификатора для износо-

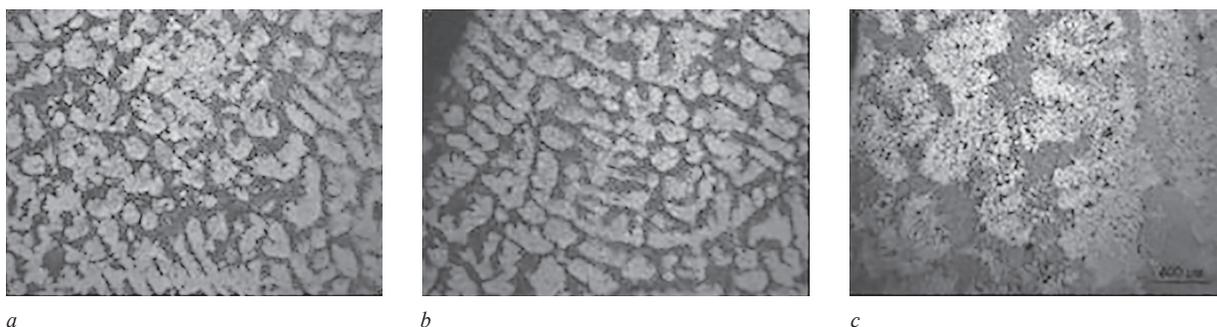


Рисунок 15 — Структура стали 20ГЛ ($\times 100$): *a* — без модифицирования; *b* — модификатор РС-7; *c* — модификатор РС-7 с висмутом
 Figure 15 — Structure of 20GL (20GL) steel ($\times 100$): *a* — without modification; *b* — PC-7 (RS-7) modifier; *c* — RS-7 modifier with bismuth



Рисунок 16 — Экспериментальная толстостенная отливка «Кольцо» из ИЧХ
 Figure 16 — Experimental thick-walled “Ring” casting made of the ИЧХ (IChKh) cast iron

стойкой марганцовистой стали проводилось на предприятии ОАО «Белоозерский энергомеханический завод» (г. Белоозерск) при изготовлении отливок из стали 110Г13Л (рисунок 16). В качестве носителя ультрадисперсных частиц использовался модификатор, дополнительно содержащий ультрадисперсные частицы в количестве до 2 %.

Проведенные эксперименты показали, что использование модификатора для толстостенных отливок позволяет измельчить структуру (уменьшить размер карбидов в 2 раза) (рисунок 17).

Модифицирование за счет измельчения структуры позволило увеличить твердость отливок до 56 HRC.

10. *Белорусским национальным техническим университетом* при выполнении НИР «Анализ свойств отходов, разработка технологии переработки металлосодержащих пылевидных отходов от плавильных печей и ее опробование в заводских условиях» установлено, что брикетирование пылевидных железосодержащих отходов газоочистки плавильных печей с целью достижения рекомендуемой прочности брикетов (23–25 МПа) необходимо осуществлять методом холодного прессования шихты следующего состава (масс.%): 70 — пылевидный железосодержащий отход газоочистки плавильных печей; 20 — отсев кокса;

10 — жидкое стекло. Показано, что получение брикетов из пылевидных железосодержащих отходов, накапливающихся в фильтрах газоочисток при изготовлении дробы, можно осуществлять без прессования с помощью трамбовки в форме для брикетов (рисунок 18) [19].

Необходимая прочность брикетов на сжатие (20 МПа), осыпаемость (5–7 %), плотность (4–4,5 г/см³) достигается разработанным составом брикетируемой шихты. Опробование использования брикетов из пылевидных железосодержащих отходов в составе шихты при проведении плавки в промышленной индукционной печи показало, что усвоение металла из брикетов составило 72 %. Изготовлена экспериментальная партия брикетов из пылевидных железосодержащих отходов (рисунок 19). Технология изготовления брикетов может быть использована на ОАО «Минский тракторный завод» и ОАО «Могилевский металлургический завод».

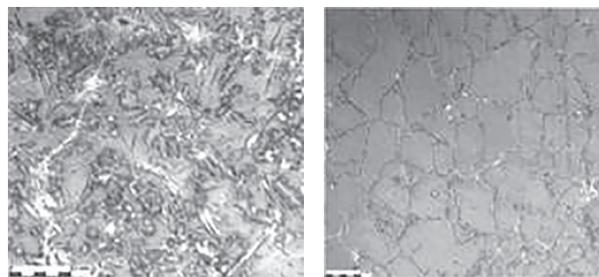


Рисунок 17 — Структуры образцов из марганцовистой стали 110Г13Л в литом состоянии
 Figure 17 — Structures of samples made of 110G13L (110G13L) manganese steel in the cast state



Рисунок 18 — Внешний вид оснастки для изготовления брикетов методом холодного формования
 Figure 18 — Appearance of tooling for briquette production by the cold molding method



Рисунок 19 — Чугунные отливки: «Корпус» и «Подкладка», полученные из пылевидных железосодержащих отходов
Figure 19 — Cast iron castings: “Casing” and “Lining” obtained from pulverized iron-containing waste

Разработки, выполненные в рамках программы, нашли широкое применение как в Республике Беларусь, так и в странах СНГ и дальнем зарубежье, что способствует интеграции научных связей и повышению имиджа белорусских ученых в мировом научном сообществе.

Перспективными точками роста и инновационными направлениями, на базе которых могут быть сформированы прорывные направления научных исследований в рамках подпрограммы «Металлургия», формируемой на 2025–2030 годы, являются:

- разработка новых конструкционных цементуруемых и азотируемых сталей, обеспечивающих снижение энергетических и материальных затрат на стадии термической и механической обработке;
- разработка экономнолегированных сталей;
- разработка высокопрочных аусферритных (бейнитных) чугунов;
- разработка модификаторов для чугунов с использованием ультрадисперсных частиц и вторичных материалов;
- исследование процессов формообразования, снижения деформаций;
- исследования и разработки в области инструментальных материалов;
- создание препаратов для рафинирующей и рафинирующе-модифицирующей обработки сплавов на основе алюминия, литые алюминиевые сплавы с использованием вторичных ресурсов и наноструктурированных керамических частиц.

Разработки в данных направлениях будут содействовать и выпуску новой промышленной продукции, улучшению ее качества и срока эксплуатации, содействовать модернизации производства.

Список литературы

1. Витязь, П.А. Итоги выполнения заданий подпрограммы «Металлургия» в 2016–2020 гг. и перспективы на 2021–2025 гг. / П.А. Витязь, А.В. Толстой // *Литье и металлургия*. — 2021. — № 1. — С. 155–165. — DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-155-165>.
2. Толстой, А.В. Разработки подпрограммы «Металлургия», выполненные в интересах промышленных предприятий / А.В. Толстой // *Механика машин, механизмов и материалов*. — 2023. — № 2(63). — С. 75–89. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-2-63-75-89>.
3. Разработка основных требований к автоматизированному участку термической обработки кольцеракатного комплекса / В.Е. Антонок, С.Г. Сандомирский, С.О. Никифорович [и др.] // *Литье и металлургия*. — 2022. — № 2. — С. 97–103. — DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-97-103>.
4. Требования к выбору массы и нагреву заготовок в автоматизированных кольцеракатных комплексах / В.Е. Антонок, С.Г. Сандомирский, В.В. Яворский [и др.] // *Литье и металлургия*. — 2022. — № 1. — С. 121–129. — DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-121-129>.
5. Антонок, В.Е. Технические особенности управляемого охлаждения кольцевых заготовок после кольцеракатки / В.Е. Антонок, С.Г. Сандомирский, В.В. Яворский // *Литье и металлургия*. — 2023. — № 1. — С. 106–111. — DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-106-111>.
6. Сравнительная оценка механических характеристик и сопротивления усталости литого металла серийного и термоупрочненного наконечника балки передней оси из стали 15НМФЛ карьерного самосвала / А.Ю. Масюков, А.Г. Сидоренко, М.В. Сотников [и др.] // *Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]*. — Минск, 2023. — Вып. 12. — С. 243–247.
7. Куделко, И.Ю. Исследование причин разрушения крупногабаритных подшипников карьерных автосамосвалов / И.Ю. Куделко, А.Г. Сидоренко, М.В. Сотников // *Механика машин, механизмов и материалов*. — 2023. — № 4(65). — С. 31–37. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-4-65-31-37>.
8. Релаксация остаточных напряжений при охлаждении заготовки с покрытием, нанесенным методом центробежной индукционной наплавки / И.А. Сосновский, М.А. Белоцерковский, А.А. Курилёнок [и др.] // *Механика машин, механизмов и материалов*. — 2023. — № 1(62). — С. 55–62. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-1-62-55-62>.
9. Сосновский, И.А. Оптимизация процесса наплавки покрытий на основе алюминиевых сплавов центробежным индукционным методом / И.А. Сосновский, М.А. Белоцерковский, А.А. Курилёнок // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр.: в 3 кн. / редкол.: В.Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]*. — Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2023. — Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. — С. 236–246.
10. Белоцерковский, М.А. Индукционный нагрев в процессах центробежного нанесения функциональных покрытий / М.А. Белоцерковский, И.А. Сосновский, А.А. Курилёнок // *Актуальные проблемы прочности / под ред. В.В. Рубаника*. — Минск, 2022. — Гл. 3. — С. 33–46.
11. К вопросу оптимизации процесса многослойной центробежной наплавки антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский, А.А. Курилёнок, К.Е. Белявин [и др.] // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междунар. сб. науч. тр. / ДОННТУ; редкол.: А.Н. Михайлов [и др.]*. — Донецк, 2022. — Вып. 1(76). — С. 3–12.
12. Sosnovsky, I.A. Study of laws of electromagnetic fluxes during induction surfacing powder layer / I.A. Sosnovsky, A.A. Kurilyonok, O.O. Kuznechik // *Aspects in Mining & Mineral Science*. — 2022. — Vol. 9, iss. 2. — P. 1032–1034. — DOI: <https://doi.org/10.31031/AMMS.2022.09.000710>.
13. Анализ структуры и триботехнических свойств легированных покрытий на основе сплава системы Zn-Al, полученных методом центробежной индукционной наплавки / А.И. Комаров, Д.В. Орда, И.А. Сосновский, А.А. Курилёнок // *Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]*. — Минск, 2023. — Вып. 12. — С. 340–345.

14. Альхимович, А.В. Моделирование процессов термообработки полых чугунных заготовок при литье намораживанием / А.В. Альхимович, И.В. Луговцов // Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения: сб. материалов VII Междунар. науч. конф. молодых ученых, г. Гродно, 12 мая 2023 г. / ГрГУ им. Янки Купалы. — Гродно, 2023. — С. 3–7.
15. Садоха, М.А. Особенности и практический опыт получения сложнопрофильных отливок из алюминиевых сплавов / М.А. Садоха, А.В. Кривцов // Литье и металлургия. — 2023. — № 1. — С. 41–46. — DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-41-46>.
16. Особенности получения чугуна с шаровидным графитом повышенной прочности / А.Г. Слуцкий, В.А. Шейнерт, И.Л. Кулинич [и др.] // Металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр. / БНТУ; редкол.: И.А. Иванов [и др.]. — Минск, 2023. — Вып. 43. — С. 125–133.
17. Барановский, К.Э. Увеличение ресурса работы деталей из износостойких хромистых чугунов за счет термообработки и конструкционных легированных сталей за счет модифицирования / К.Э. Барановский, Н.И. Урбанович, А.А. Жумаев // Научные основы использования информационных технологий нового уровня и современные проблемы автоматизации: сб. тр. II Междунар. науч. конф. «Научные основы использования информационных технологий нового уровня и современные проблемы автоматизации», г. Ташкент, 19–20 мая 2023 г. — Ташкент, 2023. — С. 132–136.
18. Барановский, К.Э. Влияние массы расплава в ковше на эффективность модифицирования конструкционной легированной стали комплексными модификаторами / К.Э. Барановский, Н.И. Урбанович // Современные технологии для заготовительного производства: сб. науч. работ Республ. науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов МТФ БНТУ (в рамках 76-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ), 27 апр. 2023 г. / БНТУ; сост.: А.П. Бежок, И.А. Иванов. — Минск, 2023. — С. 20–22. — URL: <https://606.su/V4qB> (дата обращения: 15.08.2024).
19. Корнеев, С.В. Характеристика продукта переработки железо и цинксодержащих пылевидных отходов при его переплаве / С.В. Корнеев, Н.И. Урбанович // Современные технологии для заготовительного производства: сб. науч. работ Республ. науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов МТФ БНТУ (в рамках 76-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ), 27 апр. 2023 г. / БНТУ; сост.: А.П. Бежок, И.А. Иванов. — Минск, 2023. — С. 145–147. — URL: <https://sul.su/x0kp> (дата обращения: 15.08.2024).

VITIAZ Petr A., Academician of the NAS of Belarus, D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Aerospace Activities Department of the Apparatus; Research Supervisor of the Subprogram “Metallurgy”¹

E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

TOLSTOY Aliaksandr V., Ph. D. in Phys. and Math., Assoc. Prof.

Deputy Head of the Laboratory of Metallurgy in Mechanical Engineering of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”²

E-mail: labmetal@rambler.ru

¹National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received September 17, 2024.

TASK FULFILLMENT RESULTS UNDER THE SUBPROGRAM “METALLURGY” OF THE STATE PROGRAM “MECHANICS, METALLURGY, DIAGNOSTICS IN MECHANICAL ENGINEERING” FOR 2021–2025, COMPLETED IN 2023

The main results of the research works are given which were carried out by the organizations of the National Academy of Sciences of Belarus and the Ministry of Education of the Republic of Belarus within the framework of the subprogram “Metallurgy”, completed in 2023. The most promising directions are defined, on the basis of which the tasks of scientific research within the framework of the subprogram “Metallurgy”, formed for 2025–2030, can be formed. The technological requirements and methods of ring billet manufacturing developed by the Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus are presented which are applicable to the conditions of automated production. The results of this development are intended for use at the automated ring rolling complex being created in the Republic of Belarus as part of OJSC “BELAZ” – Management Company of Holding “BELAZ-HOLDING”. The Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus developed a scientific methodology to improve the reliability and service life of cemented and nitrided parts, as well as cast elements of bearing structures of machine. The methodology consists in ensuring structural and mechanical homogeneity of the boundary volumes of grains of steel material at the stages of microalloying, crystallization and chemical-thermal treatment. On its basis new structural cemented and nitrided steels 20XH3MA (20KhN3MA) and 40XMΦA (40KhMFA), as well as casting steel 15HMΦЛ (15NMFL) were developed. The Belarusian National Technical Univer-

city were analyzed typical body parts for manufacturing of electric means of transport. Recommendations are developed for making changes in the design in order to ensure their manufacturing by casting methods. Technological principles were developed for obtaining cast iron with spheroidal graphite of high grades using copper-magnesium ligature.

Keywords: metallurgy, casting, chemical-thermal treatment, pressure treatment

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-1-70-84-94>

References

- Vityaz P.A., Tolstoy A.V. Itogi vypolneniya zadaniy podprogrammy "Metallurgiya" v 2016–2020 gg. i perspektivy na 2021–2025 gg. [The results of the tasks of the subprogram "Metallurgy" obtained in 2016–2020 and prospects for the years 2021–2025]. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp. 155–165. DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-155-165> (in Russ.).
- Tolstoy A.V. Razrabotki podprogrammy "Metallurgiya", vypolnennye v interesakh promyshlennykh predpriyatiy [Developments of the subprogram "Metallurgy" performed in the interests of industrial enterprises]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2023, no. 2(63), pp. 75–89. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-2-63-75-89> (in Russ.).
- Antonyuk V.E., Sandomirski S.G., Nikiforovich S.O., Rudyi V.V., Timoshenko N.P. Razrabotka osnovnykh trebovaniy k avtomatizirovannomu uchastku termicheskoy obrabotki koltseraskatnogo kompleksa [Development of basic requirements for an automated heat treatment site of a ring-rolling complex]. *Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 97–103. DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-97-103> (in Russ.).
- Antonyuk V.E., Sandomirski S.G., Yavorski V.V., Timoshenko N.P., Budzinskaya A.V. Trebovaniya k vyboru massy i nagrevu zagotovok v avtomatizirovannykh koltseraskatnykh kompleksakh [Requirements for the mass and heating of blanks selection in automated ring-rolling complexes]. *Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 1, pp. 121–129. DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-121-129> (in Russ.).
- Antonyuk V.E., Sandomirski S.G., Yavorski V.V. Tekhnicheskie osobennosti upravlyаемого okhlazhdeniya koltsevnykh zagotovok posle koltseraskatki [Technical features of controlled cooling of circular workpieces after ring rolling]. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 106–111. DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-106-111> (in Russ.).
- Masukov A.U., et al. Sravnitel'naya otsenka mekhanicheskikh kharakteristik i soprotivleniya ustalosti litogo metalla seriynogo i termouprochnennogo nakonechnika balki peredney osi iz stali 15NMFL karernogo samosvala [Comparative evaluation of mechanical characteristics and fatigue resistance of cast metal of serial and heat-strengthened front axle beams made of 15NMFL (15NMFL) steel of mining dump truck]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2023, iss. 12, pp. 243–247 (in Russ.).
- Kudelko I.U., Sidorenko A.G., Sotnikov M.V. Issledovanie prichin razrusheniya krupnogabaritnykh podshipnikov karernykh avtosamosvalov [Research of destruction causes of large-sized bearings of mining dump trucks]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2023, no. 4(65), pp. 31–37. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-4-65-31-37> (in Russ.).
- Sosnovsky I.A., Belotserkovsky M.A., Kurilyonok A.A., Komarov A.I., Orda D.V. Relaksatsiya ostatochnykh napryazheniy pri okhlazhdenii zagotovki s pokrytiem, nanesennym metodom tsentrobezhnoy induktsionnoy naplavki [Relaxation of residual stresses during cooling of a workpiece with a coating applied by centrifugal induction surfacing method]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2023, no. 1(62), pp. 55–62. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-1-62-55-62> (in Russ.).
- Sosnovsky I.A., Belotserkovsky M.A., Kurilyonok A.A. Optimizatsiya protsessa naplavki pokrytiy na osnove alyuminiyevykh splavov tsentrobezhnym induktsionnym metodom [Optimization of the surface process of coatings based on aluminum alloys by the centrifugal induction method]. *Advanced methods and technologies of materials development and processing. Volume 2. Technologies and equipment of mechanical and physical and technical processing*, 2023, pp. 236–246 (in Russ.).
- Belotserkovsky M.A., Sosnovsky I.A., Kurilyonok A.A. Induktsionnyy nagrev v protsessakh tsentrobezhnogo naneseniya funktsionalnykh pokrytiy [Induction heating in centrifugal functional coating processes]. *Aktualnye problemy prochnosti*, 2022, ch. 3, pp. 33–46 (in Russ.).
- Belotserkovsky M.A., et al. K voprosu optimizatsii protsessa mnogosloynnoy tsentrobezhnoy naplavki antifriktsionnykh pokrytiy [On the question of optimization of the process of multilayer centrifugal processing of antifriction coatings]. *Progressive technologies and systems of mechanical engineering*, 2022, iss. 1(76), pp. 3–12 (in Russ.).
- Sosnovsky I.A., Kurilyonok A.A., Kuznechik O.O. Study of laws of electromagnetic fluxes during induction surfacing powder layer. *Aspects in mining & mineral science*, 2022, vol. 9, iss. 2, pp. 1032–1034. DOI: <https://doi.org/10.31031/AMMS.2022.09.000710>.
- Komarov A.I., Orda D.V., Sosnovskiy I.A., Kurilyonok A.A. Analiz struktury i tribotekhnicheskikh svoystv legirovannykh pokrytiy na osnove splava sistemy Zn-Al, poluchennykh metodom tsentrobezhnoy induktsionnoy naplavki [Analysis of structure and tribotechnical properties of alloyed coatings on the basis of alloy of the Zn-Al system, created by centrifugal induction surfacing method]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2023, iss. 12, pp. 340–345 (in Russ.).
- Alkhimovich A.V., Lugovtsov I.V. Modelirovanie protsessov termooobrabotki polykh chugunnykh zagotovok pri lite namorazhivaniem [Modeling of heat treatment processes of hollow cast iron billets during freeze casting]. *7 Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Inzhenernoe i ekonomicheskoe obespechenie deyatel'nosti transporta i mashinostroeniya"* [7th International scientific and technical conference "Engineering and economic support of transport and machine building activities"], Grodno, 2023, pp. 3–7 (in Russ.).
- Sadokha M.A., Kryutsou A.V. Osobennosti i prakticheskiy opyt polucheniya slozhnoprofilnykh otlivok iz alyuminiyevykh splavov [Features and practical experience in obtaining complex profile castings from aluminum alloys]. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 41–46. DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-41-46> (in Russ.).
- Slutsky A.G., Sheynert V.A., Kulnich I.L., Huletski N.A., Fedorovich D.S. Osobennosti polucheniya chuguna s sharovidnym grafitom povyshennoy prochnosti [Peculiarities of obtaining cast iron with increased strength nodular graphite]. *Metallurgy*, 2023, iss. 43, pp. 125–133 (in Russ.).
- Baranovskiy K.E., Urbanovich N.I., Zhumaev A.A. Uvelichenie resursa raboty detaley iz iznosostoykikh khromistykh chugunov za schet termooobrabotki i konstruktivnykh legirovannykh staley za schet modifitsirovaniya [Increasing the service life of parts made of wear-resistant chromium cast irons by heat treatment and structural alloy steels by modification]. *2 Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya "Nauchnye osnovy ispolzovaniya informatsionnykh tekhnologiy novogo urovnya i sovremennye problemy avtomatizatsii"* [2nd International scientific conference "Scientific bases for the use of new level information technologies and modern problems of automation"], Tashkent, 2023, pp. 132–137 (in Russ.).
- Baranovskiy K.E., Urbanovich N.I. Vliyanie massy rasplava v kovshe na effektivnost modifitsirovaniya konstruktivnoy legirovannoy stali kompleksnymi modifikatorami [Influence of melt mass in the ladle on the efficiency of modification of structural alloy steel by complex modifiers]. *Respublikanskaya*

- nauchno-tehnicheskaya konferentsiya professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh rabotnikov, doktorantov i aspirantov MTF BNTU "Sovremennye tekhnologii dlya zagotovitel'nogo proizvodstva" (v ramkakh 76 nauchno-tehnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh rabotnikov, doktorantov i aspirantov BNTU)* [Republican scientific and technical conference of the teaching staff, researchers, doctoral students and postgraduates of the faculty of mechanical and technological engineering of BNTU "Modern technologies for customizing production" (as part of the 76th scientific and technical conference of BNTU faculty, researchers, doctoral students and postgraduates)], Minsk, 2023, pp. 20–22. Available at: <https://606.su/V4qB> (accessed August 15, 2024) (in Russ.).
19. Korneev S.V., Urbanovich N.I. Kharakteristika produkta pererabotki zhelezo i tsinksoderzhashchikh pylevidnykh otkhodov pri ego pereplave [Characterization of the product of iron and zinc-containing pulverized waste processing during its remelting]. *Respublikanskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh rabotnikov, doktorantov i aspirantov MTF BNTU "Sovremennye tekhnologii dlya zagotovitel'nogo proizvodstva" (v ramkakh 76 nauchno-tehnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh rabotnikov, doktorantov i aspirantov BNTU)* [Republican scientific and technical conference of the teaching staff, researchers, doctoral students and postgraduates of the faculty of mechanical and technological engineering of BSTU "Modern technologies for customizing production" (as part of the 76th scientific and technical conference of BSTU faculty, researchers, doctoral students and postgraduates)], Minsk, 2023, pp. 145–147. Available at: <https://sul.su/x0kp> (accessed August 15, 2024) (in Russ.).