



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-155-165>  
УДК 669.1

Поступила 07.02.2021  
Received 07.02.2021

## ИТОГИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ ПОДПРОГРАММЫ «МЕТАЛЛУРГИЯ» В 2016–2020 ГГ. И ПЕРСПЕКТИВЫ НА 2021–2025 ГГ.

П. А. ВИТЯЗЬ, А. В. ТОЛСТОЙ, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12. E-mail: labmetal@rambler.ru

*Представлены основные результаты выполнения заданий подпрограммы «Металлургия», полученные организациями Национальной академии наук Беларуси, Министерства образования и Министерства промышленности Республики Беларусь. Показан их вклад в решение научных и практических задач в области металлургии.*

*Приведены перспективные разработки, предлагаемые к выполнению в 2021–2025 гг., направленные на оптимизацию действующих литейных производств, повышение качества выпускаемой продукции, снижение производственных затрат, обеспечение максимальной загрузки литейных мощностей.*

**Ключевые слова.** Металлургия, литье, термообработка, поверхностное упрочнение, обработка давлением.

**Для цитирования.** 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. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-155-165>.

## THE RESULTS OF THE TASKS OF THE SUBPROGRAM “METALLURGY” OBTAINED IN 2016–2020 AND PROSPECTS FOR THE YEARS 2021–2025

P. A. VITYAZ, A. V. TOLSTOY, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaya str. E-mail: labmetal@rambler.ru

*The main results of the tasks of the subprogram “Metallurgy” obtained by the organizations of the National Academy of Sciences of Belarus, the Ministry of Education and the Ministry of Industry of the Republic of Belarus are presented. Their contribution to the solution of scientific and practical problems in the field of metallurgy is shown.*

*The article presents promising developments proposed for implementation in 2021–2025, aimed at optimizing existing foundries, improving the quality of products, reducing of production costs, and ensuring maximum utilization of foundry capacities.*

**Keywords.** Metallurgy, casting, heat treatment, surface hardening, pressure treatment.

**For citation.** Vityaz P. A., Tolstoy A. V. 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. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-155-165>.

В [1–5] были представлены результаты выполнения заданий подпрограммы «Металлургия» в 2005–2015 гг. В 2016–2020 гг. в рамках подпрограммы «Металлургия» ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении» были продолжены работы, направленные на разработку технологий литья черных и цветных металлов и сплавов; создание утеплительных смесей, специальных красок, модификаторов на базе ультрадисперсных частиц, моделирование процессов формообразования, разработку технологий обработки давлением, термической обработки металлов и сплавов.

Подпрограмма включала четыре раздела:

- Литье и металлургия железоуглеродистых сплавов.
- Литье цветных металлов и сплавов.
- Термическая обработка и упрочнение сталей и сплавов.
- Обработка металлов давлением.

В реализации заданий подпрограммы принимали участие 13 организаций, в том числе 6 – НАН Беларуси, 12 – Министерства образования Республики Беларусь, 1 – Министерства промышленности Республики Беларусь.

В ходе выполнения заданий подпрограммы получены следующие основные результаты.

### В области литья и металлургии железоуглеродистых сплавов

Белорусским национальным техническим университетом разработан экспериментальный состав теплоизоляционной экзотермической смеси с ультрадисперсными частицами и проведено его промышленное опробование. Показаны преимущества использования экзотермической смеси для открытых прибылей, которые заключаются в уменьшении брака отливок, вызванного дефектами усадочного характера, повышении качества отливок, уменьшении прибыльной части на 20–30%, что приводит к снижению себестоимости готовой продукции. Опробование в производственных условиях на ОАО «Белоозерский энергомеханический завод» и ОАО «Могилевлифтмаш» показало, что эффективность экспериментального модификатора выше, чем применяемых на заводе модификаторов производства Российской Федерации.

Разработана технология получения алюминиевых гранул из отходов алюминия. Подтверждена способность к разжижению рафинировочных шлаков у раскислительной смеси, полученной из отходов переработки вторичного алюминия, что позволяет отказаться от использования для этих целей плавикового шпата, повысить стойкость футеровки сталеразливочного ковша в районе шлакового пояса, снизить затраты на внепечную обработку стали и улучшить экологическую обстановку. В условиях Молдавского металлургического завода проведены испытания по использованию алюминиевых гранул, полученных из отходов производства по сухой технологии, для раскисления стали при выпуске из печи и проверена эффективность разработанных разжижителей рафинировочного шлака.

Выполнены моделирование гидродинамических процессов и анализ эффективности конструкции литниково-питающих систем, предназначенных для получения отливок-заготовок обрабатываемого инструмента и оснастки. Изготовлены экспериментальные образцы режущих вставок РКС-1 и ДВ-22 резцов горнопроходческих комбайнов из сталей ледебуритного класса Р6М5 и Р18, испытанных в производственных условиях ОАО «Белкалий» с положительным результатом. Полученные результаты позволяют существенно повысить качество и ресурс металлообрабатываемого инструмента и технологической оснастки.

Разработана технология ввода в композиционный материал упрочненных быстроохлажденных гранул. Разработана технологическая схема получения композитов и создан комплексный аппарат на основе индукционной установки для управления процессом получения композита. Он позволяет эффективно управлять процессом нагрева исходных компонентов до температуры плавления бронзы, осуществлять пропитку полученной жидкой фазой армирующих железоуглеродистых гранул, последующую выдержку, а также удалять образовавшиеся газы в процессе охлаждения композита по заданному режиму. Проведенные исследования позволили определить режимы синтеза износостойкого композиционного материала с макронеоднородной структурой для подшипников скольжения, который характеризуется высокими физико-механическими и триботехническими свойствами при работе в условиях удельных нагрузок до 450 МПа.

Сформулирована математическая модель процесса затвердевания заготовки в условиях МНЛЗ, включающая уравнения теплопроводности, движения расплава в жидком ядре заготовки, массообмена. Достоинством данной модели является возможность более точного учета особенностей конструкции МНЛЗ и технологии непрерывной разливки. С использованием разработанной методики определены границы интенсивности внешних динамических воздействий. При разливке стали на блюмовых МНЛЗ в зоне перемешивания температура перегрева расплава не должна превышать 30 °С. При этом максимально допустимая скорость циркуляции (интенсивность воздействия) составит около 0,4 м/с; для сортовых (мелкосортных) машин скорость циркуляции ограничена диапазоном 0,5–1,0 м/с.

Разработана экспериментальная методика определения угара легирующих элементов и примесей при проведении серии опытных плавов в индукционных тигельных печах повышенной частоты, проведены натурные исследования по определению угара элементов при выплавке многокомпонентных высоколегированных железоуглеродистых сплавов. Результаты исследований использованы при разработке технологических инструкций по выплавке износостойких чугунов в индукционной тигельной печи в производственных условиях. Исследованы факторы, влияющие на угар металлошихты и выход годного в электродуговых печах. Определены оптимальные технологические схемы получения легированной стали различных марок в цикле выплавка – внепечная обработка с целью получения максимальных качественных показателей и заданных качественных показателей при минимальной себестоимости продукции.

Разработан состав и выпущена опытная партия комплексного модификатора с ультрадисперсными тугоплавкими компонентами для внепечной обработки стали с целью совершенствования структуры и свойств слитков и отливок. Комплексное модифицирование смесью, содержащей химически активные

вещества (Са), карбидообразующие (В) и поверхностно-активные (Ві), позволяет устранить транскристаллизацию, значительно измельчить первичные зерна, не оказывая существенного влияния на прочность стали после термообработки, при этом повысить характеристики пластичности, уменьшает ликвацию серы по сечению отливок и слитков.

Разработаны и внедрены технологические инструкции диспергирования и модифицирования отходов твердого сплава ВК6 и изготовления из них электроконтактным спеканием режущих вставок, фильер. С учетом реальной стоимости сырья (модифицированный из отходов порошок ВК6 дешевле первичного (импортного) ВК6 более чем в 2,9 раза), более дешевой технологии изготовления (ЭКС против спекания в вакууме) очевидна перспективность технологий модифицирования твердосплавной стружки и ее электроконтактного спекания для получения режущих вставок токарных резцов, правящих и направляющих фильер (а также других изделий). Для 11 организаций-потребителей из модифицированных отходов твердого сплава методами электроконтактного спекания, газопламенного и плазменного напыления и наплавки изготовлены экспериментальные партии деталей машин и металлургического оборудования (18 типоразмеров). Объем поставок в 2020 г. составил 58 000,76 руб.

Разработана технологическая схема глубокой переработки оловянно-свинцовой изгари за счет использования предварительного избирательного размола с последующей фильтрацией жидкого расплава от примесей меди и получение качественной лигатуры на основе олова. В лабораторных условиях отработаны технологические процессы получения и применения лигатур при получении литейных сплавов. По разработанной технологии глубокой переработки оловянно-свинцовой изгари изготовлена промышленная партия лигатуры на основе олова в количестве 773 кг.

Исследовано влияние раскислительно-модифицирующих композиций для стали на базе вторичного алюминия и отсевов модификаторов, содержащих щелочноземельные металлы (Са, Ва, Sr) в условиях ОАО «МТЗ». Применение раскислительно-модифицирующих композиций, опробованных на ОАО «МТЗ» для стали 45Л и на УПП «Универсал-Лит» для стали 20ХНМФЛ, позволило повысить предел текучести в 1,2–1,3 раза, относительное удлинение – в 1,3–1,4 раза, ударную вязкость – более чем в 1,5 раза. Полученные свойства стали соответствуют уровню получаемой при обработке сталей более дорогой смесью «БАРС» производства РФ.

По результатам металлографического и дюрOMETрического методов анализа образцов из наномодифицированной стали ледебуритного класса зафиксирован эффект дисперсионного твердения при отпуске отливок непосредственно после литья, минуя операцию закалки. Изготовлены литые заготовки из наномодифицированной стали Р6М5 переплавом отходов инструментального производства, инструмент из них (фрезы) испытаны в производственных условиях ОАО «МЗШ» с положительным результатом. Технология изготовления цельнолитых резцов вместо комбинированных с режущими вставками из быстрорежущих сталей и твердых сплавов в мировой практике горнодобывающих отраслей предлагается впервые. Внедрение технологии позволит значительно снизить себестоимость резцов за счет сокращения объема механической обработки (изготовление режущих вставок, корпусов резцов, запрессовывания, напайки или посадки).

Установлено влияние редкоземельных металлов (церия, иттрия, наноструктурированного диборида титана), вводимых в расплав в качестве модификаторов, на структуру и ударную вязкость литых бористых сплавов с высоким содержанием бора. Модификаторы способствуют эффективному диспергированию структурных составляющих сплавов (измельчение первичных зерен, составляющих эвтектики), что приводит к существенному повышению ударной вязкости.

Совместно с Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси разработаны рекомендации по изготовлению детали «Колесо рабочее» грунтовых насосов точным литьем. Полученные отливки обладают значительно лучшим качеством поверхности каналов по сравнению с отливками, изготавливаемыми по стандартным технологиям. Показано, что повысить износостойкость грунтовых насосов можно за счет применения нового инновационного материала – эвтектического легированного чугуна. Сплав имеет высокую твердость до 750 НV, содержит повышенное (до 42–45%) количество карбидов и более высокую (в 2 раза) износостойкость, чем стандартный заводской чугун ИЧХ28Н2.

Совместно с Физико-техническим институтом и Институтом порошковой металлургии НАН Беларуси синтезированы разделительные покрытия с использованием ранее не применяемых наполнителей – гранитоидных, базальтовых и диабазовых пород в композиции с металлофосфатным связующим. Экспериментально подтверждена их пригодность при литье алюминиевых сплавов. Определены основные факторы, обеспечивающие необходимую седиментационную устойчивость суспензий: дисперсность

наполнителя (не более 10–20 мкм), количественное содержание алюмофосфатного связующего и суспензирующих добавок – каолина или бентонита (3–5%). Разработанные покрытия прошли производственные испытания в цехе алюминиевого литья ОАО «Управляющая компания холдинга «Минский моторный завод» с положительными результатами.

Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси разработан способ магнитного контроля структуры материала движущегося ферромагнитного изделия. Способ снижает энергопотребление контроля и упрощает его реализацию в промышленных условиях. Эта разработка реализована при эксплуатации автоматизированного участка сортировки чугуновых ниппелей в литейном цехе серого и ковкого чугуна Минского завода отопительного оборудования.

Белорусским государственным технологическим университетом разработаны процессы получения комплексного металлургического сырья из железо- и углеродсодержащих отходов. Окусковывание мелкофракционных и тонкодисперсных компонентов позволяет обеспечить предприятия дополнительными ресурсами железосодержащих материалов и уменьшить экологическую нагрузку на окружающую среду. Разработаны шихтовые и литейные материалы из тонкодисперсных металлосодержащих концентратов и полимерных отходов для легирования и модифицирования железоуглеродистых сплавов, поверхностного легирования отливок в форме (патенты Республики Беларусь № 11641, 14183). В составе пакетов предполагается использовать все виды тонкодисперсных железо-флюсо-легиру-углеродсодержащих материалов. Промышленные испытания метода с вводом шихтовых пакетов из железосодержащих и полимерных отходов и результаты исследований выплавленных сплавов, шлаков, материального баланса плавки показывают, что при использовании в составе пакетов в качестве восстановителя отходов аккумуляторных (тяжелых) пластиков повышаются механические характеристики чугуна с  $\sigma_B = 165$  до  $\sigma_B = 75$  МПа при вводе 10 кг окалина, 3,4 кг цемента, 0,39 кг аккумуляторного полимера на 412 кг расплава.

ОАО НПО «Центр» выполнены работы по построению конечно-элементной модели кокиля с использованием пакета «CosmosDesignStar». Проведен расчет гидродинамических процессов заполнения кокиля расплавом в модуле «Flow Vision» пакета «Полигон». Получена картина возможных усадочных дефектов в объеме отливки, образовавшихся в процессе кристаллизации расплава в кокиле. Показано, что применение указанных мероприятий позволило уменьшить объем прибыли на 30–35%, что повысило выход годного литья и дало возможность снизить расход дорогостоящих легирующих материалов для их компенсации при угаре во время плавки и разливки.

### **В области литья цветных металлов и сплавов**

Институтом технологии металлов НАН Беларуси исследовано влияние металлургических и технологических параметров литья на образование глобулярного кремния в полых фасонных заготовках из силумина, полученных в металлические охлаждаемые формы. Установлено, что при литье полых фасонных отливок в спрейерно-охлаждаемую литейную форму при расходе охладителя 1,4 м<sup>3</sup>/ч размеры кристаллов эвтектического кремния в сплаве АК14 измельчаются на 81%, параметр глобулярности уменьшается на 77% по сравнению с литьем в воздушно-охлаждаемую литейную форму. Показано, что с уменьшением толщины стенки стальной литейной формы с 15 до 10 мм размеры кристаллов эвтектического кремния в сплаве АК14 измельчаются на 65%, параметр глобулярности уменьшается на 58%.

Разработана и создана опытная установка и технологическая оснастка для получения полых фасонных заготовок из силуминов с глобулярным кремнием. Изготовлена охлаждаемая металлическая литейная форма для получения полых фасонных цилиндрических отливок с наибольшим наружным диаметром 145 мм и высотой 80 мм. Литьем в металлическую охлаждаемую форму были получены экспериментальные образцы полых фасонных отливок из силумина АК14 с глобулярным эвтектическим кремнием.

Разработаны процессы литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) для ряда деталей из алюминия. Проведено моделирование ЛГМ для деталей простых форм.

Разработана и изготовлена технологическая оснастка и макет опытно-экспериментальной плавильно-литейной установки непрерывного литья вверх. Разработана физическая модель теплообменных процессов, возникающих в процессе контакта расплава и формирующейся отливки с формообразующей частью кристаллизатора, частично погруженного в расплав. Получены опытные партии алюминиевой катанки, которые прошли успешные испытания на действующем производстве ООО «ПО «Энергокомплект». Реализован договор на разработку и поставку промышленного оборудования для непрерывного литья вверх алюминиевой катанки диаметром 9,5 мм для ООО «ПО «Энергокомплект».

Исследовано влияние низкочастотной вибрации глухонного кристаллизатора с затопленно-струйной системой охлаждения на микроструктуру и качество отливок из силумина АК18М2. Исследовано влияние схемы вибрации и температуры заливки на структуру и свойства отливок из доэвтектического, эвтектического и заэвтектического силумина диаметром 53 мм, а также эвтектического силумина диаметром 70 мм. Литьем в глухонный кристаллизатор с применением пневматического вибратора постоянного удара, расположенного в вертикальной плоскости кристаллизатора, получены опытные отливки наружным диаметром 53 мм из доэвтектического силумина АК9М2, эвтектического силумина АК12М2 и заэвтектического силумина АК15М2. Проведены сравнительные триботехнические исследования опытных образцов из силумина АК12М2 наружным диаметром 70 мм, полученные литьем в глухонный кристаллизатор без вибрации и с применением пневматического вибратора постоянного удара, и образцов из бронзы БрОЦС 5-5-5 и БрОЦС 4-4-17.

Физико-техническим институтом НАН Беларуси методами компьютерного моделирования установлены особенности распределения температурных и электромагнитных полей при индукционной термообработке деталей, изготовленных из трубных заготовок. Выполнен анализ температурных полей и энергетических параметров индукционной термообработки типовых трубных деталей (ось, вал, шток). Разработаны оптимальные режимы скоростной индукционной термообработки данных сталей. Разработана лабораторная технология индукционной обработки деталей, произведенных из трубных заготовок. Разработаны макет и компоновочное решение установки автоматизированной термообработки длинномерных трубных деталей.

Совместно с Институтом порошковой металлургии и Белорусским национальным техническим университетом отработана технология получения катодов-мишеней из различных силицидов. Получены заготовки мишеней с относительной плотностью 88–89% из резистивного сплава РС 1004. На основании анализа зависимости относительной плотности прессовок от температуры спекания определены оптимальные режимы их спекания. Разработаны рекомендации по применению мишеней при изготовлении изделий электронной техники. Разработана технология изготовления мишеней для вакуумно-плазменного нанесения высокостабильных резистивных покрытий на основе силицидов металлов с использованием лигатур системы кремний – металл методом импульсного прессования. Разработаны режимы изготовления высокоомных мишеней на основе литейных лигатур с содержанием кремния больше 50 мас. %, обеспечивающие получение заготовок мишеней с отклонением плотности по высоте и диаметру заготовки менее 1,5–3,0%.

Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси установлена зависимость изменения структуры алюминий-кремниевого сплава АК12М2МгН и его свойств от количества модифицирующей добавки и морфологии используемого углеродного наноматериала, в качестве которого могут выступать неочищенные углеродные нанотрубки (УНТ), фуллеренсодержащая сажа (ФСС), алмазографитная шихта, графеноподобный углерод. Разработана лабораторная технология комплексного модифицирования эвтектического силумина АК12М2МгН добавкой, содержащей УНТ и медь. Это позволило увеличить твердость в 1,2 раза, предел прочности – в 1,3 раза, относительное удлинение – более чем в 2 раза, а также снизить коэффициент трения в 8–10 раз, интенсивность изнашивания – в 5–7 раз. Разработанная технология модифицирования алюминий-кремниевых сплавов углеродными наноматериалами позволяет повысить механические и триботехнические свойства алюминий-кремниевых сплавов при введении малого количества добавки, до 0,5 мас. %, и может использоваться на металлургических заводах при изготовлении деталей и конструктивных элементов двигателей внутреннего сгорания, получаемых литьем. Комплексное повышение свойств силуминов позлит использовать указанные сплавы для изготовления слабо- и средненагруженных втулок и подшипников взамен более дорогостоящих, стальных или на основе медных сплавов.

Белорусским национальным техническим университетом разработана литейная технология получения материалов с макрогетерогенной структурой на основе цветных металлов с высокими функциональными свойствами. Изучено влияние первичных и вторичных матричных сплавов на ряд свойств композиционных материалов, предназначенных для использования в узлах трения машин, работающих в тяжелых условиях эксплуатации, что позволяет уменьшить себестоимость изготавливаемой продукции на 30–35% при сохранении требуемого качества получаемых изделий. В лабораторных условиях опробована экспериментальная технология заливки нового типа форм.

Приведены критерии оценки выбора целесообразности модернизационных мероприятий с точки зрения окупаемости проектов модернизации. Проанализированы основные реконструктивные

мероприятия, повышающие эффективность работы топливных и электрических термических (химико-термических) печей. Разработана методика выбора оптимальной степени рекуперации теплоты отходящих газов для топливных печей, позволяющая минимизировать издержки на топливо и конструкцию и обслуживание рекуператора. Предложен критерий выбора нагревательных элементов, учитывающий как конструкцию, так и способы размещения. Разработана методика, позволяющая оценивать равностоимостные коэффициенты полезного действия для топливных и электрических печей, эксплуатируемых при различных режимах работы (в одну, две и три смены и при различных коэффициентах загрузки оборудования), различных тарифах и способах оплаты за электроэнергию и принимать решение об использовании того или иного типа отопления. Предложены принципы регулирования технологическим процессом в печах химико-термической и термической обработки. Разработаны функциональные схемы управления тепловой нагрузкой и составом атмосферы печей химико-термической обработки.

На основе учета физико-химических и тепловых процессов определены пределы изменения общего КПД электрических печей, печей с комбинированными источниками и печей, работающих в дуплекс-процессах в зависимости от условий их работы. Проведены обоснование наиболее эффективного использования электрических печей (электродуговых, индукционных тигельных, индукционных канальных) в процессах плавки чугуна и анализ их эффективности в сравнении с коксовыми и коксогазовыми вагранками. Определена зависимость экономического эффекта использования топлива в электрических печах от коэффициента использования топлива и повышения производительности при различных значениях амортизационных отчислений и тарифов на электрическую энергию и топливо.

Исследованы закономерности формирования механических свойств сталей, применяемых при изготовлении деталей подшипников, после их карбонитрации, азотирования и карбидизации. Установлены эффективные режимы ХТО, подобраны составы насыщающих сред и режимы насыщения сталей различного химического состава и структурных классов для упрочнения рабочих поверхностей стальных деталей подшипников для их работы в условиях экстремальных нагрузок. Предложены составы поверхностных слоистых систем на основе термодиффузионных карбонитридных, нитридных и карбидных слоев и ионно-плазменных нитридных и углеродных алмазоподобных покрытий. Их использование позволяет повысить микротвердость в 2,1–4,4 раза и износостойкость – в 1,8–3,1 раза для систем с покрытием TiAlN, микротвердость – в 1,9–5,3 раза и износостойкость – в 2,1–3,7 раза для систем с алмазоподобным покрытием по сравнению с образцами из закаленной и отпущенной стали ШХ15. Разработана технология комплексного поверхностного упрочнения колец подшипников из стали У8А как замена стали ШХ15 для их работы в условиях экстремальных контактных нагрузок, которая включает химико-термическую обработку и нанесение твердого или сверхтвердого нитридного вакуумного ионно-плазменного покрытия.

Разработаны пути интенсификации процессов термоциклического азотирования, что позволило повысить скорость формирования азотированного слоя на 15–20% при сохранении микротвердости поверхности. Установлено влияние лазерного оплавления на микроструктуру, фазовый состав и свойства азотированного слоя на легированных сталях, что позволило определить эффективные режимы лазерной обработки азотированных сталей для повышения микротвердости поверхности в 1,4–1,6 раза. Разработан режим термоциклического азотирования, который позволяет получать твердый и износостойкий диффузионный слой с равномерным распределением твердости по сечению образца. При этом толщина слоя составляет до 0,5 мм.

### **В области термической обработки и упрочнения сталей и сплавов**

Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси установлены зависимости, связывающие конструктивно-технологические параметры процесса электрофрикционного плакирования гибким инструментом (ЭФПГИ) и тепловое состояние материала покрытия и контактирующего с ним ворса щетки, отличающиеся от известных учетом дополнительного тепла, возникающего от электрического тока. Это позволяет обоснованно выбрать рациональные режимы формирования покрытий методом ЭФПГИ. В результате эксплуатационных испытаний в условиях ОАО «МЗАЛ им. П. М. Машерова» установлено, что функциональное покрытие из твердого сплава ВК8 обеспечивает повышение стойкости деталей пресс-форм в расплаве сплава ЦА4М1 в среднем в 1,9 раза по сравнению с деталями без покрытия.

Разработана методика выбора экономолегированной конструкционной стали для высоконапряженных зубчатых колес регламентированной долговечности. Установлено оптимальное содержание

легирующих элементов (никель, марганец, углерод, хром), а также добавок, измельчающих и стабилизирующих зерно, например, ниобия и азота, в конструкционной стали с регламентированной прокаливаемостью. Сформулированы основные факторы влияния ниобия на структурные превращения в легированных конструкционных сталях. К ним относятся процессы аустенизации, рекристаллизации, роста зерна, фазовых переходов, выделения фаз. Формирование высоких механических свойств в сталях сложного состава связано с влиянием ниобия, которое определяет объемное содержание и стабильность остаточного аустенита.

Совместно с Физико-техническим институтом НАН Беларуси выполнено исследование прокаливаемости новой экономнолегированной стали. Установлено, что новая сталь характеризуется высокой закаливаемостью цементованного слоя и приемлемой прокаливаемостью сердцевины (300 HV<sub>0,2</sub>). В диапазоне содержания углерода 0,5–0,8 прокаливаемость цементованного слоя составляет 800–900 HV<sub>0,2</sub>. Разработаны технологические параметры вакуумной химико-термической обработки зубчатых колес из новой марки стали, которые значительно отличаются от технологических параметров для стали 20ХН3А. В результате сокращения времени цементации снижается стоимость производства (сокращается расход газа и электроэнергии и пр.) и повышается производительность при изготовлении цементованных деталей. Годовой экономический эффект при снижении потребления электроэнергии от повышения температуры цементации до 1030 °С на вакуумном оборудовании фирмы «ModulTherm 7/1» составила 70 тыс. руб.

### В области обработки металлов давлением

Физико-техническим институтом НАН Беларуси разработаны конструкторская документация индукционного нагревателя и технологический процесс применительно к изготовлению изделий типа ножей кормоуборочной техники. Проведены испытания экспериментальных образцов деталей на соответствие устойчивости к ударным нагрузкам и абразивному изнашиванию. Утверждены комплекты документов на технологические процессы изготовления деталей: нож косилочный поворотный ФТИ5.001.1572-ТД, нож косилочный ФТИ5.001.1592-ТД. Конструкторская и технологическая документация переданы ОАО «Минский агросервис».

Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси выполнено технологическое обоснование снижения деформаций и остаточных напряжений после термической обработки маложестких деталей типа дисков и валов с использованием динамической стабилизации на основе знакопеременного циклического. Технологическое обоснование снижения деформаций и остаточных напряжений маложестких деталей типа дисков и валов позволяет для такого типа деталей аналитическим путем определять режимы циклического знакопеременного нагружения и по расчетным параметрам этого нагружения с учетом конструктивных особенностей проектировать установки для реализации динамической стабилизации без проведения длительного и затратного цикла экспериментальных исследований. Результаты исследования использованы при выполнении договора с ЗАО «САБА МАШИНИНГ САЛЮШЕНС» (Российская Федерация) при расчете силовых параметров установок для динамической стабилизации дисков АО «Уралвагонзавод». В дальнейшем результаты исследования планируется использовать на ОАО «БелАЗ», ОАО «Муромтепловоз», АО «Концерн Калашников».

Разработаны основные положения использования циклического нагружения для исправления геометрической формы и снятия остаточных напряжений в бесшовных кольцах методом кольце-раскатки. Положения представлены в методике расчета силовых параметров установок с циклическим нагружением. Методика содержит основные положения по составу и последовательности проведения расчета силовых параметров установок для повышения геометрической точности и снятия остаточных напряжений применительно к различным типам колец с использованием циклического нагружения. В методике даны способы расчета силовых параметров установок для реализации динамического нагружения с применением двух разных типов механизмов: клиновым механизмом и рычажно-шарнирным. Для ускорения выполнения расчетов силовых параметров экспандирования с рычажно-шарнирным механизмом разработано программное обеспечение в системе Microsoft Excel, с использованием которого выполнен расчет силовых параметров экспандирования для группы колец малой жесткости (30 наименований) из номенклатуры колец ОАО «БелАЗ». При выполнении расчетов силовых параметров экспандирования использовались параметры прочности материала колец при различных температурах. Методика предназначена для использования при проведении научно-исследовательских и экспериментальных работ, связанных с разработкой методов

повышения геометрической точности и снятия остаточных напряжений в деталях типа маложестких колец, изготавливаемых с использованием горячей кольцераскатки. Разработанные параметры и положения циклического нагружения для обеспечения геометрической точности и эксплуатационных показателей деталей типа колец могут быть предложены для использования на предприятиях отечественного машиностроения ОАО «МПЗ», холдинг ОАО «БелАЗ» при производстве бесшовных колец методом радиально-осевой кольцераскатки.

Разработаны технологические схемы получения алюминиевых покрытий методом многослойной центробежной наплавки, позволяющие формировать двухслойные покрытия с использованием горизонтальной и вертикальной осей вращения, различающиеся между собой по кинематическому исполнению и направлению действующих сил. Разработаны основополагающие способы нанесения многослойной индукционной наплавки покрытий из композиций на основе алюминиевых сплавов, представляющие собой нанесение двухслойных покрытий на стальную основу путем формирования промежуточного слоя из материала, например свинца, на котором формируется основной слой алюминиевого покрытия. Изготовлена и испытана опытная партия деталей (втулок № 90.31.00.062 подбивочных блоков путевых машин ВПР и гаек № ВПО.55.70.08 подъема электромагнитов путевой машины ВПО основного производства эксплуатационного республиканского унитарного предприятия «Центр механизации путевых работ Белорусской железной дороги») с покрытиями, нанесенными из материалов и по технологии, разработанной в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси. Срок службы биметаллических деталей с двухслойными покрытиями из состава антифрикционного материала, включающего композицию в виде кусочков проволоки силумина со свинцовым порошком ПС1, разработанных в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси, в 1,15–1,20 раза выше, чем у серийных деталей. Результаты исследований обоснован, откорректирован и стендовыми испытаниями подтвержден оптимальный состав композиции и разработанный оптимальный состав для нанесения покрытий с повышенной износостойкостью и адгезионной прочностью (75% силумина марки АК12 + 25% порошка свинца ПС1). Разработаны методические рекомендации по внедрению в производство технологии нанесения на стальные изделия композиций на основе алюминиевых сплавов методом многослойной индукционной наплавки в поле центробежных сил.

Гомельским государственным техническим университетом им. П. О. Сухого определена степень влияния скорости грубого волочения проволоки на обрывность металлокорда, получаемого из этой проволоки. Получена зависимость для коэффициента, влияющего на обрывность металлокорда и зависящего от скорости грубого волочения. Получено значение коэффициента, влияющего на обрывность металлокорда и зависящего от дополнительного латунирования проволочной заготовки. Установлена зависимость величины микротвердости проволоки из сталей 80 и 90 от степени деформации проволоки на отдельных этапах свивки металлокорда. Определено, что для повышения производительности свивки металлокорда требуется привести зависимость роста твердости и эквивалентных напряжений в проволоках металлокорда к линейному виду путем изменения скорости свивки на отдельных ее этапах. Разработана методика расчета оптимальной величины единичной вытяжки тонкого волочения в производстве сверх-, ультра- и мегапрочного металлокорда, позволяющая выполнять процесс тонкого волочения проволоки с оптимальной интенсивностью упрочнения.

Совместно с Физико-техническим институтом НАН Беларуси на основе анализа влияния системы калибровки прокатных валков на напряженно-деформированное состояние трубной заготовки и анализа влияния калибровки прокатных валков на геометрию черновой трубы определена наиболее эффективная система калибровки прокатных валков пяти клетей раскатного стана: круг, овал, овал, круг, круг. Найденная система калибровки прокатных валков позволяет повысить равномерность контактных напряжений в очаге деформации и точность профиля черновой трубы. Разработана зависимость, определяющая соотношение скоростей инструмента и трубы, обеспечивающее минимальный износ инструмента. Разработаны рекомендации по корректировке настроечных параметров раскатного стана с целью снижения износа прокатного инструмента, который влияет на качество поверхности черновой трубы.

Проведено исследование разработанных калибровок валков для прошивки сплошной заготовки в гильзу методом поперечно-винтовой прокатки. Калибровки предназначены для изменения напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при прошивке на более благоприятное (снижение объемов областей с растягивающими напряжениями). Исследованы грибовидные



валки (базовый вариант), валки с кольцевой калибровкой и валки с двойным пережимом. Валки с кольцевой калибровкой и валки с двойным пережимом позволяют провести большую проработку металла в очаге деформации. Это способствует изменению схемы напряженно-деформированного состояния на более благоприятную (валки с двойным пережимом позволяют добиться большей эффективности). Также изменение пластического течения металла при использовании разработанных калибровок приводит к увеличению энергосиловых параметров, необходимых для проведения операции прошивки.

Разработана численная модель редуцирования горячедеформированных бесшовных стальных труб, позволяющая производить оценку напряженно-деформированного, теплового состояния заготовки в процессе прокатки. Определено влияние деформационных режимов редуцирования на распределение напряжений, возникающих в заготовке в процессе прокатки, и степень неравномерности деформации стенки получаемого трубного профиля. Определено, что повышению точности трубного профиля и снижению напряжений в заготовке в процессе редуцирования способствует режим прокатки при коэффициенте пластического натяжения в диапазоне 0,6–0,8. Разработана методика определения деформационных, геометрических и скоростных параметров редуцирования горячедеформированных бесшовных стальных труб, способствующих повышению точности геометрических параметров трубных профилей и снижению неравномерности деформации сечения трубы. Разработаны зависимости для определения частоты вращения прокатных труб с учетом влияния растяжения трубы между клетями. Разработаны рекомендации по корректировке настроечных параметров раскатного и редуцирующе-растяжного стана, режиму термообработки в производстве трубы 93,17×12,45 мм из стали марки ТТ309, обеспечивающие снижение неравномерности деформации трубы и трещинообразования. Практическая направленность результата состоит в повышении эффективности производства бесшовных горячедеформированных труб путем снижения брака вследствие трещинообразования при термообработке. Результаты предназначены для использования на ОАО «БМЗ–УКХ«БМК».

Совместно с Белорусским государственным технологическим университетом методом сканирующей электронной микроскопии с микрорентгеноспектральным анализом исследованы микрохимический состав и структурное состояние полутеплостойких хромистых сталей класса X12M для инструментальной и технологической оснастки после термической обработки на различных режимах, подвергнутых ионно-плазменному азотированию. Выявлен механизм взаимодействия карбидной фазы и твердого раствора в исследованных образцах при действии на них пульсирующих контактных напряжений и определена роль карбидной фазы в процессе структурных изменений в поверхностном слое металла при его изнашивании под действием пульсирующих контактных напряжений. Исследованы механизм и закономерности изнашивания поверхностных слоев высоколегированных инструментальных сталей X12M, X12MФ и P18 при действии на них пульсирующих контактных напряжений с амплитудой 1300 и 1640 МПа. Показано, что традиционная термическая обработка с последующей низкотемпературной нитроцементацией не обеспечивает высокой износоустойчивости полутеплостойких штамповых сталей. Модернизация режимов термохимической обработки позволила приблизить структуру и свойства упрочненных слоев сталей X12M и X12MФ к показателям азотированных слоев стали P18 и обеспечить возможности для равноценной замены дорогостоящей быстрорежущей стали более дешевыми и менее трудоемкими в термохимической обработке штамповыми сталями при изготовлении из них штампового инструмента в металлургической промышленности.

Белорусским национальным техническим университетом выполнены исследования напряженно-деформированного состояния в очаге деформации от параметров процесса продольной прокатки бывших в употреблении рельсов. Создан метод построения поля линий скольжения при продольной прокатке путем решения задачи определения контактных напряжений методом верхнеграницной оценки. Спроектирован инструмент для производства заготовок рабочих элементов шаровых мельниц из бывших в употреблении железнодорожных рельсов методом продольной прокатки. Разработана технология получения шаров для помола из бывших в употреблении железнодорожных рельсов методами прокатки для ОАО «Кобринский инструментальный завод «СИТОМО».

Проведена теоретическая проработка новой технологии изготовления изделия «Шкворень». В ходе новой технологии производится горячая валково-клиноватая прокатка локально нагретого участка заготовки с передачей заготовки в 2-позиционный штамп для осадки и гибки. Формирование поковки «Шкворень» позволит обеспечить получение изделия с коэффициентом использования металла до 97–99%,

снижение энергозатрат на 60%, повышение производительности в 2,5 раза по сравнению с действующей молотовой технологией. Новая технология позволяет уйти от сложной и энергозатратной молотовой технологии изготовления изделия «Шкворень».

Определены закономерности угла инструмента поперечно-клиновой прокатки на усилия деформации заготовки и критерии разрушения материала заготовки. Вычислены необходимые теоретические усилия оборудования для закрытой штамповки, подобраны компенсационные магазины и предохранительные механизмы, проведен компьютерный анализ процесса закрытой штамповки, осуществлен подбор оборудования по энергосиловым параметрам, созданы трехмерные компьютерные модели штамповой оснастки. Совместное использование технологии поперечно-клиновой прокатки и закрытой штамповки открывает возможности для создания ресурсосберегающих технологий, повышения уровня проработки геометрических особенностей заготовок, промежуточных этапов и их взаимосвязи. Практическое применение данной технологии позволяет добиться коэффициента использования металла 92–95%. Данного рода технологии могут использоваться для производства изделий машиностроения и тракторостроения.

В 2021–2025 гг. работы будут продолжены в рамках подпрограммы «Металлургия», которая является составной частью государственной программы научных исследований «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении» на 2021–2025 гг. Структура подпрограммы оптимизирована. Теперь она содержит 17 комплексных заданий, содержащих 42 НИР.

Подпрограмма «Металлургия» направлена на научное обеспечение технического переоснащения и модернизацию литейных производств (в соответствии с Программой развития литейных производств Республики Беларусь на 2017–2030 годы, утвержденной Министром промышленности 30.12.2017 г.), термических и других энергоемких производств.

Главными направлениями проведения исследований по подпрограмме будут:

- оптимизация действующих литейных производств, повышение качества выпускаемой продукции, снижение производственных затрат, обеспечение максимальной загрузки литейных мощностей;
- технологии литья черных и цветных металлов и сплавов, математическое моделирование процессов затвердевания, формообразования;
- технологии выплавки, обработки давлением, термической обработки металлов и сплавов;
- процессы формообразования, снижения деформаций и ряд других проектов.

В ходе реализации заданий подпрограммы будут:

1. Разработаны новые методы выбора оптимальных технологических решений в условиях литейных, металлургических и термических производств, научные основы получения аустенитных высокопрочных чугунов с использованием литья, деформации и изотермической закалки, конкурентных легированным сталям.
2. Предложены методы рециклинга дисперсных металлических отходов для создания функциональных материалов и покрытий.
3. Разработаны технологии получения новых литых композиционных материалов, сплавов и покрытий с высокой конкурентоспособностью.
4. Предложены новые ресурсосберегающие импортозамещающие литейные технологии, позволяющие использовать местное вторичное сырье для создания высококачественных литейных изделий со специальными свойствами.

В первую очередь разработки будут направлены на решение задач, актуальных для ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» и предприятий, входящих в состав холдинга «Белорусская металлургическая компания». В частности, предполагается:

- оптимизация технологии нанесения покрытий;
- определение и внедрение различных типов модификаторов поверхности бортовой бронзированной проволоки и металлокорда с целью увеличения адгезионных свойств к резине;
- разработка новых экономнолегированных сталей.

Научные разработки будут содействовать выпуску новой промышленной продукции, улучшению ее качества и срока эксплуатации, содействовать модернизации производства. Снижение импортозависимости, увеличение экспорта, использование вторичного сырья для производства научно-технической продукции – эти факторы лежат в основе укрепления национальной безопасности и улучшения качества жизни населения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Витязь П. А., Шипко А. А., Толстой А. В.** Программа «Металлургия» – важное звено научного обеспечения программы технического переоснащения энергоемких производств Республики Беларусь // *Литье и металлургия*. 2009. № 1. С. 123–128.
2. **Витязь П. А., Шипко А. А., Толстой А. В.** Программа «Металлургия» – итоги и перспективы // *Литье и металлургия*. 2011. № 1. С. 6–11.
3. **Витязь П. А., Шипко А. А., Толстой А. В.** Исследования в области металлургических переделов, выполненные в рамках подпрограммы «Металлургия» в 2011–2015 годах. Часть 1. Разработки в области литья и металлургии железоуглеродистых и цветных металлов и сплавов // *Металлургия в машиностроении Беларуси: итоги и перспективы научного обеспечения*. Минск: Беларуская навука, 2016. С. 308–324.
4. **Витязь П. А., Шипко А. А., Толстой А. В.** Исследования в области металлургических переделов, выполненные в рамках подпрограммы «Металлургия» в 2011–2015 годах. Часть 2. Результаты в области термической обработки и обработки металлов давлением // *Металлургия в машиностроении Беларуси: итоги и перспективы научного обеспечения*. Минск: Беларуская навука, 2016. С. 330–355.
5. **Витязь П. А., Шипко А. А., Толстой А. В.** Особенности подпрограммы «Металлургия» на 2016–2020 годы // *Металлургия в машиностроении Беларуси: итоги и перспективы научного обеспечения*. Минск: Беларуская навука, 2016. С. 355–369.

## REFERENCES

1. **Vitjaz' P.A., Shipko A.A., Tolstoj A.V.** Programma «Metallurgija» – vazhnoe zveno nauchnogo obespechenija programmy tehničeskogo pereosnashhenija jenergoemkih proizvodstv Respubliki Belarus' [The Metallurgy program is an important part of the scientific support of the program of technical re-equipment of energy-intensive industries of the Republic of Belarus]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2009, no.1, pp. 123-128.
2. **Vitjaz' P.A., Shipko A.A., Tolstoj A.V.** Programma «Metallurgija» – itogi i perspektivy [Metallurgy Program-results and prospects]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2011, no.1, pp. 6–11.
3. **Vitjaz' P.A., Shipko A.A., Tolstoj A.V.** *Issledovanija v oblasti metallurgičeskikh peredelov, vypolnennye v ramkah podprogrammy «Metallurgija» v 2011 – 2015 godah. Čast' 1. Razrabotki v oblasti lit'ja i metallurgii zhelezouglerodistykh i cvetnykh metallov i spлавov* [Research in the field of metallurgical processing carried out within the framework of the “Metallurgy” subprogram in 2011-2015. Part 1. Developments in the field of casting and metallurgy of iron-carbon and non-ferrous metals and alloys // Metallurgy in mechanical engineering of Belarus: results and prospects of scientific support] *Metallurgija v mashinostroenii Belarusi: itogi i perspektivy nauchnogo obespechenija*: Minsk. Belaruskaja navuka Publ., 2016. Pp. 308–324.
4. **Vitjaz' P.A., Shipko A.A., Tolstoj A.V.** *Issledovanija v oblasti metallurgičeskikh peredelov, vypolnennye v ramkah podprogrammy «Metallurgija» v 2011 – 2015 godah. Čast' 2. Rezul'taty v oblasti termičeskoj obrabotki i obrabotki metallov davleniem* [Research in the field of metallurgical processing carried out within the framework of the “Metallurgy” subprogram in 2011-2015. Part 2. The results in the field of heat treatment and processing of metals by pressure ]. *Metallurgija v mashinostroenii Belarusi: itogi i perspektivy nauchnogo obespechenija = Metallurgy in machine-building in Belarus: results and prospects of scientific support*, Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2016, pp. 330-355.
5. **Vitjaz' P.A., Shipko A.A., Tolstoj A.V.** *Osobennosti podprogrammy «Metallurgija» na 2016-2020 gody* [Features of the Metallurgy subprogram for 2016-2020]. *Metallurgija v mashinostroenii Belarusi: itogi i perspektivy nauchnogo obespechenija = Metallurgy in machine-building in Belarus: results and prospects of scientific support*, Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2016, pp. 355-369.