



ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

УДК 669.1

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

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

E-mail: tolstoy@oim.by

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 03.04.2023.

РАЗРАБОТКИ ПОДПРОГРАММЫ «МЕТАЛЛУРГИЯ», ВЫПОЛНЕННЫЕ В ИНТЕРЕСАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Представлены основные результаты выполнения заданий подпрограммы «Металлургия» Государственной программы научных исследований «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении» на 2021–2025 гг., имеющие прикладную направленность, полученные организациями Национальной академии наук Беларуси, Министерства образования и Министерства промышленности Республики Беларусь. Показан их вклад в решение практических задач. В области металлургии железоуглеродистых сплавов разработана гамма новых марок сталей для крупногабаритных зубчатых колес и крупногабаритных отливок несущих систем машин. Отличительными особенностями разработанных сталей является возможность получения более высоких показателей твердости упрочненного слоя и зубьев цементированных зубчатых колес по сравнению с аналогами из серийных сталей. Разработана новая экономно-легированная сталь для коробок передач тракторов БЕЛАРУС. Сталь характеризуется высокой закаливаемостью цементованного слоя. В области металлургии цветных металлов и сплавов разработаны теоретические и технологические основы производства отливок сложной конфигурации. Применение этих отливок улучшает размерную точность изделий. В области упрочнения сталей и сплавов разработана технология формирования покрытий на рабочих поверхностях деталей металлургического и литейного оборудования методом механического плакирования гибким инструментом. Данные покрытия обеспечивают повышение стойкости деталей пресс-форм в 1,9 раза по сравнению с деталями без покрытия. Разработан технологический процесс индукционной наплавки на поверхности деталей узлов трения износостойких антифрикционных покрытий. Срок службы биметаллических деталей с покрытиями в 1,25–1,33 раза выше, чем у серийных деталей. Разработаны физико-химические принципы создания алюмоматричных композитов на основе микро- и ультрадисперсных порошков оксидов. Это обеспечило повышение трибомеханических свойств в 5 раз. В области обработки металлов давлением разработана стратегия кольцеразкатки применительно к номенклатуре колец белорусских предприятий. Выполнено технологическое обоснование снижения деформаций и остаточных напряжений после термической обработки мало жестких деталей типа дисков с использованием динамической стабилизации на основе знакопеременного циклического нагружения.

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

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-2-63-75-89>

Введение. Металлургия (литейно-металлургические, термические, кузнечно-прессовые производства) является одним из ключевых звеньев

современного производства промышленно развитого государства. Металлургические производства в той или иной степени присутствуют

практически на всех крупных машиностроительных предприятиях Беларуси. В первую очередь это такие предприятия, как ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК», ОАО «Минский автомобильный завод», ОАО «БЕЛАЗ» — управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», ОАО «Минский тракторный завод», ОАО «ГОМЕЛЬСКИЙ ЛИТЕЙНЫЙ ЗАВОД «ЦЕНТРОЛИТ», ОАО «Могилевский металлургический завод», на которых в больших или меньших масштабах применяются технологии металлургии, литья и смежных производств. На предприятиях Беларуси сегодня функционирует около 300 цехов и участков литейного, металлургического, термического производств. Развитие технологических процессов сталеплавильного, литейного, прокатного, термического производств предполагает решение вопросов проектирования, технического переоснащения и модернизации литейно-металлургического, термического (включая нагревательные и термические печи) и кузнечно-прессового оборудования, а также совершенствование и создание новых технологий и материалов.

Для решения этих вопросов была сформирована подпрограмма «Металлургия». Ее основная цель заключается в том, чтобы на основании использования научной базы ресурсов страны провести совершенствование существующих и разработку новых технологических процессов литья и металлургии для повышения качества, конкурентоспособности и экспортного потенциала данных производств и отраслях их применения. В рамках ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении» подпрограмма решает не только научные, но и вполне конкретные прикладные проблемы в интересах предприятий машиностроительного комплекса республики [1]. В настоящей статье приведены примеры разработок, которые могут быть использованы на промышленных предприятиях страны.

Разработки в области литья и металлургии железоуглеродистых сплавов. Объединенным ин-

ститутом машиностроения НАН Беларуси разработан ряд новых марок сталей для крупногабаритных зубчатых колес (цементированных и азотированных) и крупногабаритных отливок несущих систем машин (стали 20ХНЗМА, 40ХМФА, 15НМФЛ).

Сталь для цементированных зубчатых колес (20ХНЗМА) обладает повышенными характеристиками прочности и обрабатываемости, а также сопротивлением короблению на всех этапах технологического передела при их изготовлении и в эксплуатации. Сталь близка по составу стали SKF 253A, но обладает заметно лучшей обрабатываемостью и повышенной мелкозернистостью. Отличительными особенностями и преимуществами стали 20ХНЗМА является возможность получения существенно более высоких показателей твердости и микротвердости упрочненного слоя и сердцевины зубьев цементированных зубчатых колес по сравнению с деталями из сталей-аналогов (20ХНЗА, 20Х2Н4А). Сталь внедрена в серийное производство крупногабаритных цементируемых зубчатых колес для всей линейки карьерных автосамосвалов БЕЛАЗ (рисунок 1) [2].

Безалюминиевая сталь 40ХМФА предназначена для азотируемых деталей, работающих при циклических, ударных и вибрационных нагрузках в широком диапазоне климатических температур. Ее отличительными особенностями и преимуществами являются:

- отсутствие хрупких фаз в азотированном слое и исключение трещинообразования в нем при эксплуатационных нагрузках;
- возможность получения повышенной (по сравнению с алюминийсодержащими сталями) толщины азотированного слоя (до 1,0 мм) при сравнимых и обычно используемых технологиях азотирования;
- обеспечение повышенной обрабатываемости и точности деталей;
- повышение предела выносливости азотированных зубчатых колес на 20–25 % по сравнению с зубчатыми колесами из алюминийсодержащих сталей.

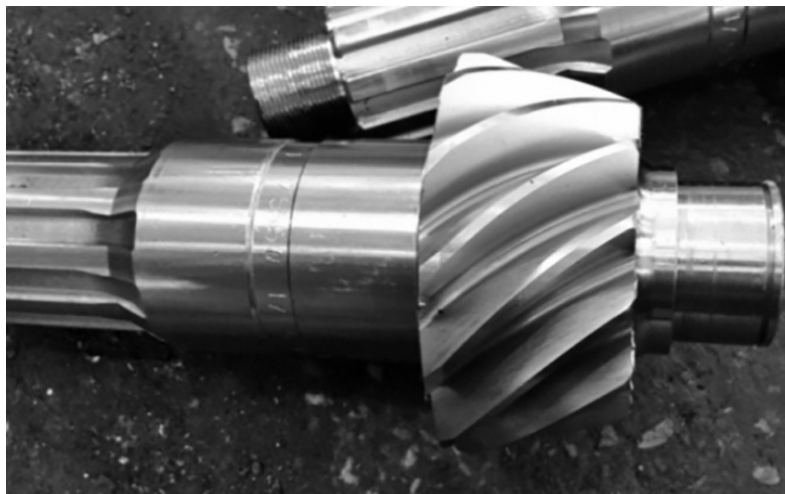


Рисунок 1 — Зубчатые колеса из цементованной стали 20ХНЗМА
Figure 1 — Gear wheels made of cemented steel 20ХНЗМА (20KhN3MA)

Сталь внедрена в серийное производство крупногабаритных азотируемых зубчатых колес для всей линейки карьерных самосвалов БЕЛАЗ, обеспечивая заданный ресурс планетарных редукторов самосвалов грузоподъемностью до 450 т (рисунок 2) [2].

Хладостойкая литейная сталь 15НМФЛ обладает повышенным сопротивлением образованию горячих трещин при кристаллизации отливок и их распространению при служебных нагрузках. Материал исключает хрупкое разрушение при низких и ударных нагрузках, допускает сварку и заварку дефектов при эксплуатации конструкции без ее подогрева и последующей термообработки. Использование этой стали с одновременным совершенствованием совместно с Управлением главного конструктора и Отделом главного металлурга ОАО «БЕЛАЗ» технологического процесса получения бездефектных стальных отливок (рисунок 3) явилось основой создания полностью локализованного в республике производства литосварных рам для карьерных самосвалов БЕЛАЗ. Объем литья из стали 15НМФЛ, произведенного ОАО «БЕЛАЗ» (сталелитейный цех в Могилеве), в 2022 году составил 2700 т или 23 % общего объема стального литья, потребляемого заводом.

Внедрение совместно с ОАО «БЕЛАЗ» новых материалов и технологий обработки деталей в производство редукторов, а также литосварных рам карьерных самосвалов грузоподъемностью 130–450 т способствовало устранению или существенному снижению в гарантийный период аварийных отказов проблемных деталей и систем (для редукторов в 3–4 раза), а также увеличению их ресурса в разы (литосварных рам более, чем в 10 раз), позволив достигнуть срока службы, равного жизненному циклу самосвала.

Применение этих материалов регламентировано ТУ ВУ 600038906.082-2013 «Отливки стальные для несущих конструкций карьерной техники», ТУ 14-132-242-2014 «Прутки горячекатаные из стали 20ХНЗМА», ТУ 1-806-1184-2013 «Кольца цельнокатаные, кольца цельнокатаные точные, поковки и штамповки из стали марки 40ХМФА».



Рисунок 2 — Шестерня из азотируемой стали 40ХМФА
Figure 2 — Gear made of nitrided steel 40ХМФА (40KhMFA)



a



b

Рисунок 3 — Общий вид опоры поперечины рамы карьерного самосвала БЕЛАЗ (a) и ее отливки из стали 15НМФЛ (b)
Figure 3 — General view of BELAZ dump truck frame crossbeam support (a) and its casting made of steel 15НМФЛ (15NMFL) (b)

Еще одна разработка Объединенного института машиностроения НАН Беларуси — новая экономно-легированная сталь для коробок передач тракторов БЕЛАРУС. Разработана методика выбора экономно-легированной конструкционной стали для высоконапряженных зубчатых колес регламентированной долговечности. Новая сталь характеризуется высокой закаливаемостью цементованного слоя. В диапазоне содержания углерода 0,5–0,8 % прокаливаемость цементованного слоя составляет 800–900 HV_{0,2}. Выполнена опытно-промышленная проверка изготовления зубчатых колес в производственных условиях на участке химико-термической обработки линии вакуумных печей ModulTherm 7/1 фирмы ALD (рисунок 4). Разработанная сталь рекомендована к применению в коробках передач тракторов БЕЛАРУС с мощностью 130–300 л. с. Ее использование обеспечивает ресурса не менее 10 000 мото-часов.

Физико-техническим институтом НАН Беларуси предложена концепция создания группы экономно-легированных аусферритных (бейнитных) чугунов с сочетанием высоких прочности и пла-

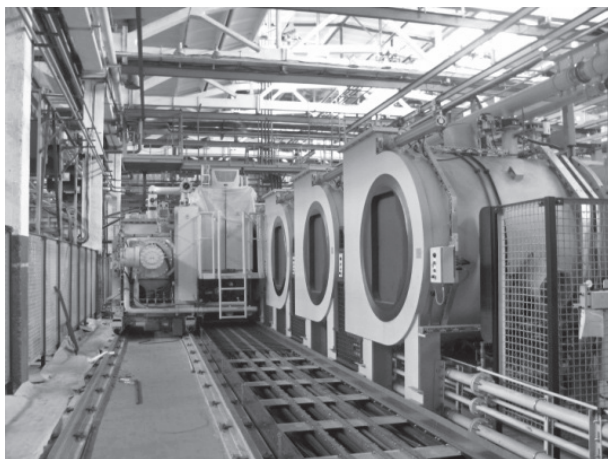


Рисунок 4 — Линия вакуумных печей ModulTherm 7/1 фирмы ALD

Figure 4 — Vacuum furnace line ModulTherm 7/1 by ALD

стичности. Указанные показатели достигаются за счет сочетания оптимизации классического состава чугуна. Аусферритный чугун — современный материал с высокими прочностными и пластическими характеристиками. Широко используется во всем мире как заменитель легированной стали [3].

Предложено несколько групп экономно-легированных чугунов:

- безмолибденовый с микродобавками бора (0,01–0,05 %); безмолибденовый с микродобавками ниобия и бора;
- безмолибденовый с минимальным легированием никеля и меди (суммарное содержание Ni + Cu до 1,8 %);
- низконикелевый (до 0,2 %) и низкомолибденовый (до 0,15 %) с повышенным содержанием меди (до 1,8 %) и добавками ванадия (до 0,1 %).

Разработаны рациональные схемы и температурно-силовые параметры горячей пластической обработки литой заготовки с целью получения машиностроительных изделий из аусферритного чугуна (рисунок 5). В условиях Беларуси, где термические отделения имеются практически на каждом машиностроительном заводе, высокопрочные аус-

ферритные чугуны могут составить существенную конкуренцию стальному прокату.

ОАО «БЕЛНИИЛИТ» разработаны теоретические и технологические основы производства отливок сложной конфигурации для станкостроения и тракторостроения с применением песчаных и комбинированных форм и стержней [4]. Изготовлен экспериментальный образец комплекса для получения стержневых пакетов с последующей продувкой газовыми катализаторами. Изготовлен комплект кокильной и стержневой оснастки для отливок лопастных колес гидротрансформаторов («Колесо турбинное 3301709203», «Реактор 3301709155», «Колесо насосное 330179101») и освоено их производство (рисунки 6–9).

Данные отливки применяются для изготовления узла гидротрансформатора трехтонных погрузчиков производства ОАО «АМКОДОР» — управляющая компания холдинга». Их производство дает возможность отказаться от сварно-штампованного варианта изготовления данного вида изделий, что в свою очередь улучшает размерную точность изделий и существенно повышает качество автоматической коробки передач фронтальных погрузчиков.

Белорусским национальным техническим университетом разработана математическая модель процесса затвердевания заготовки в условиях машины непрерывного литья заготовок, 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. Предложен рациональный режим организации «мягкого» обжата. Учет зависимости максимально допустимой интенсивности внешних воздействий от температуры перегрева расплава при управлении работой систем внешних динамических воздействий обеспечивает получение стабильных результатов в плане повышения качества структуры непрерывно

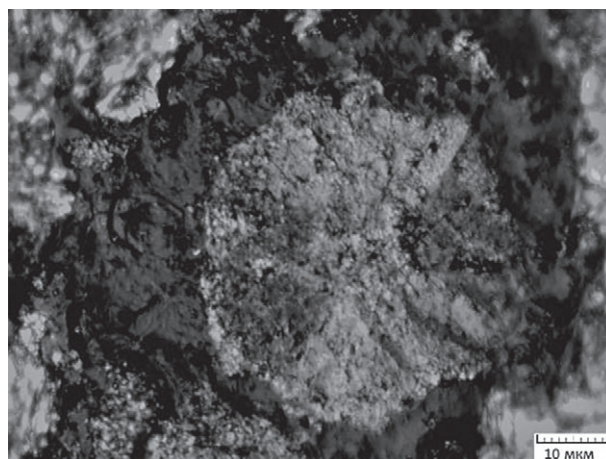
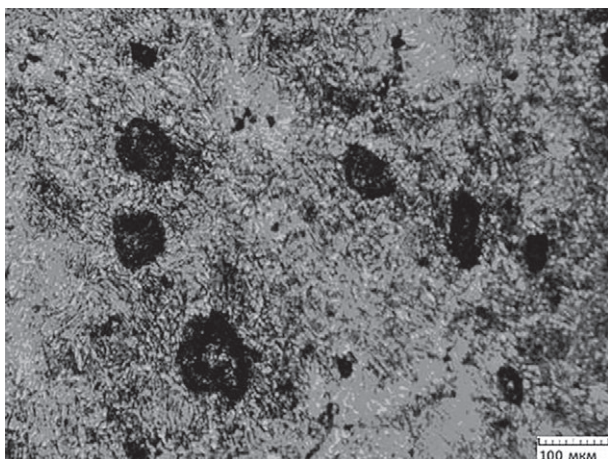


Рисунок 5 — Примеры микроструктур аусферритного чугуна в литом состоянии

Figure 5 — Examples of microstructures of ausferritic cast iron



Рисунок 6 — Комплект кокильной оснастки
Figure 6 — Permanent mold tooling set

литых заготовок, позволяет снизить расход электроэнергии при работе данных систем за счет регулирования мощности в зависимости от температуры перегрева (рисунок 10). Реализация рекомендаций по совершенствованию режима работы системы «мягкого» обжата позволит обеспечить стабильность качества осевой зоны заготовки.

Разработки в области литья цветных металлов и сплавов. ОАО «БЕЛНИИЛИТ» разработана технология изготовления сложных корпусных отливок из алюминиевых сплавов с применением песчаных и комбинированных форм и стержней.

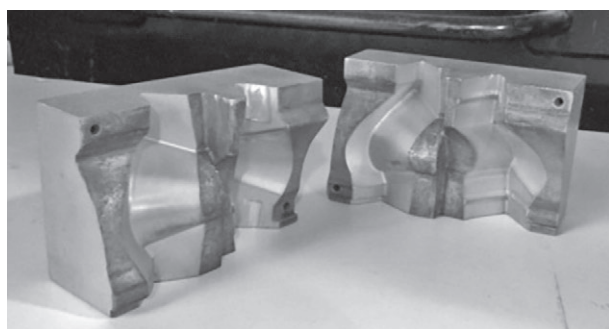


Рисунок 7 — Стержевая оснастка для производства отливки «Реактор 3301709155»
Figure 7 — Core equipment for production of casting “Reactor 3301709155”

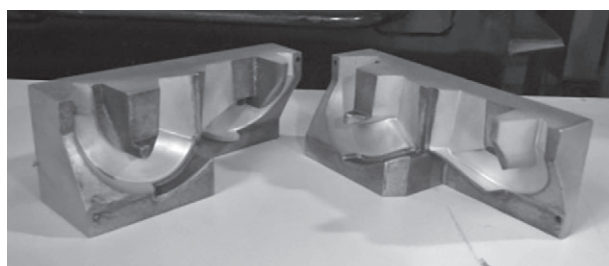


Рисунок 8 — Стержевая оснастка для производства отливки «Колесо насосное»
Figure 8 — Core equipment for production of the casting “Pumping wheel”

Изготовлен образец комплекса для получения стержневых пакетов с последующей продувкой газовыми катализаторами (рисунок 11).

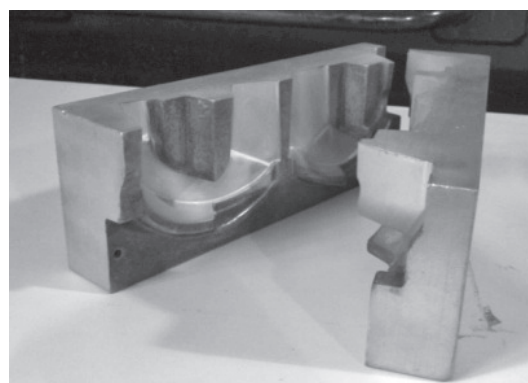


Рисунок 9 — Стержевая оснастка для производства отливки «Колесо турбинное»
Figure 9 — Core equipment for production of casting “Turbine wheel”

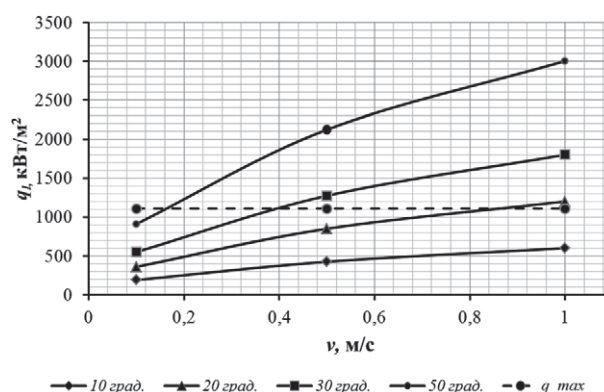


Рисунок 10 — Сравнение расчетных значений интенсивности теплообмена на фронте кристаллизации при различных температурах перегрева расплава с пороговым значением плотности теплового потока q_D , при котором начинается расплавление твердой фазы (в кристаллизаторе МНЛЗ)
Figure 10 — Comparison of calculated values of intensity of heat transfer at the crystallization front at different temperatures of melt superheating with the threshold value of heat flux density q_D , at which solid phase melting begins (in CCM crystallizer)



Рисунок 11 — Комплекс для изготовления стержневых пакетов, получаемых из песчано-смоляных смесей
Figure 11 — Complex for production of core assemblies, produced from sand and resin mixtures

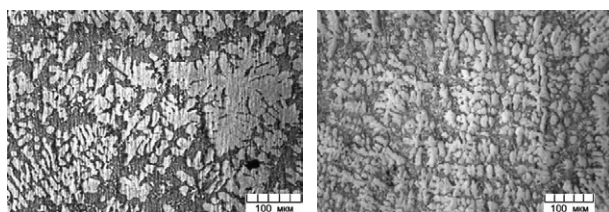


Рисунок 12 — Структура сплава АК12М2МgН до (а) и после (б) модифицирования
Figure 12 — Structure of AK12M2MgN (AK12M2MgN) alloy before (a) and after (b) modification

Физико-техническим институтом НАН Беларуси разработаны состав, технология и режимы получения лигатур-модификаторов системы алюминий-натрий-фосфоросодержащие соли. Разработана технология получения износостойких литейных алюминиевых сплавов из вторичных ресурсов и наноструктурированных керамических частиц (рисунок 12). Созданные материалы могут найти применение в качестве ответственных изделий машиностроения, а также при освоении объектов новой техники, в частности для получения поршней, корпусов топливной аппаратуры в ДВС.

Разработки в области термической обработки и упрочнения сталей и сплавов. Белорусским государственным технологическим университетом разработана ресурсосберегающая технология термической обработки стальных изделий в водно-

акриловых охлаждающих средах. Закалка в водно-акриловых средах обеспечивает высокое качество изделий по структуре и механическим показателям, исключает эффект смачивания полимером поверхности деталей и его налипания на деталь (рисунок 13).

Водно-акриловые закалочные среды способствуют уменьшению слоя окалины на поверхности деталей. Стоимость рабочего состава закалочной среды на порядок ниже, чем у охлаждающих сред из минеральных масел, а срок эксплуатации значительно выше. При этом отсутствует проблема утилизации отходов.

Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси разработана технология формирования покрытий на рабочих поверхностях деталей металлургического и литейного оборудования методом механического плакирования гибким инструментом (рисунок 14). Подобраны составы материалов-доноров для формирования композиционных покрытий (рисунок 15), обеспечивающих защиту от эрозии, коррозии и налипания при взаимодействии с расплавленным металлом [5–6].

В результате эксплуатационных испытаний в условиях ОАО «МЗЛ им. П.М. Машерова» установлено, что функциональное покрытие из твердого сплава ВК8 обеспечивает повышение стойкости деталей пресс-форм при литье деталей из сплава ЦА4М1 в среднем в 1,9 раза по сравнению с деталями без покрытия.

Разработан технологический процесс индукционной наплавки на поверхности деталей узлов трения путевых машин упрочненных порошковых и износостойких антифрикционных покрытий на основе металломатричных композитов (рисунок 16). Срок службы биметаллических деталей с покрытиями в 1,25–1,33 раза выше, чем у серийных деталей.

Разработаны технологии химико-термического упрочнения применительно к конкретному оборудованию, обеспечивающие требуемое качество деталей силовых передач для автотракторной техники. На основе программного обеспечения на этапе проектирования назначается марка стали, технические требования к эффективной толщине и качеству мик-

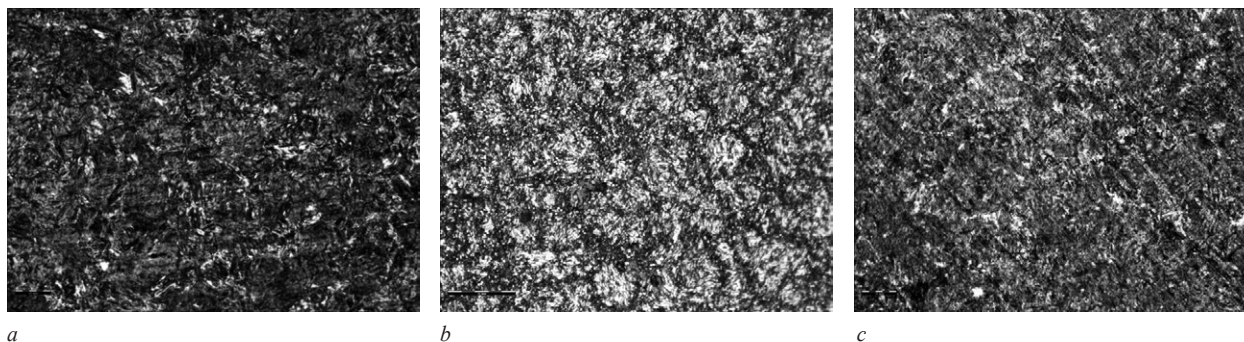


Рисунок 13 — Структура деталей после закалки в водно-акриловой охлаждающей среде:
а — шайба 260 – 1005055; б — шайба 260 – 1002161; с — шайба 50 – 1006017
Figure 13 — Structure of parts after quenching in water-acrylic cooling medium:
a — washer 260 – 1005055; b — washer 260 – 1002161; c — washer 50 – 1006017



Рисунок 14 — Процесс нанесения покрытия на плунжер
Figure 14 — Application process of plunger coating



Рисунок 16 — Процесс центробежной индукционной наплавки износостойких антифрикционных покрытий из порошковых шихт с активирующими добавками
Figure 16 — Process of centrifugal induction surfacing of wear-resistant antifriction coatings made of powder charge materials with activating additives



Рисунок 15 — Композиционный материал-донор для формирования теплостойких покрытий
Figure 15 — Composite donor material for the formation of heat-resistant coatings

роструктуры упрочненных слоев, разрабатываются технологические режимы химико-термической обработки. Технология соответствует лучшим мировым аналогам (Caterpillar, Mercedes-Benz, Volvo, Komatsu, Unit Rig, General Electric).

Работы по освоению прогрессивных технологий ХТО выполнены на ОАО «Минский завод колесных тягачей», ОАО «БЕЛАЗ» — управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», ОАО «Минский тракторный завод».

Разработан программный комплекс проектирования технологических процессов ХТО зубчатых колес трансмиссий, который включает:

- программный комплекс по расчету и прогнозированию на стадии проектирования показателей надежности зубчатых колес трансмиссий (рисунок 17). Расчет проводится с учетом условий эксплуатации и конструктивного исполнения передачи, геометрических параметров зубчатого зацепления, марки стали, технологии изготовления и качества химико-термической обработки, а также базы данных по влиянию качества структуры упрочненных слоев и особенностей применяемого термического оборудования на характеристики изгибной и контактной усталости зубчатых колес. Выходными данными на этом этапе являются конструктивные параметры зубчатой передачи и технические требования к марке стали, распределению микротвердости по толщине упрочненного слоя (эффективной

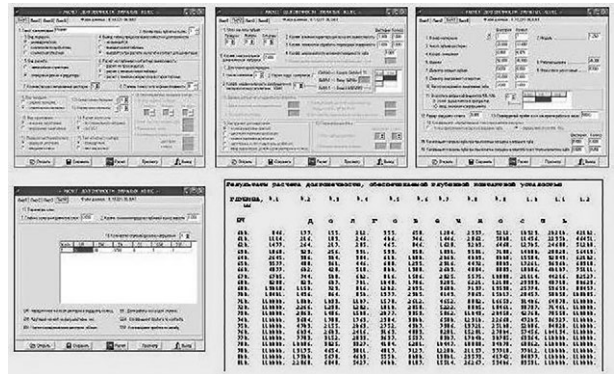


Рисунок 17 — Программа расчета долговечности зубчатых колес
Figure 17 — Calculation program for gear wheel life

толщине) и качеству микроструктуры, обеспечивающие заданную долговечность;

- программный комплекс по расчету режимов химико-термической обработки, состоящий из программы расчета прокаливаемости стали (рисунок 18) и программы расчета процесса диффузии углерода в сталь в зависимости от марки стали, параметров науглероживания и закалки (рисунок 19). Выходны-

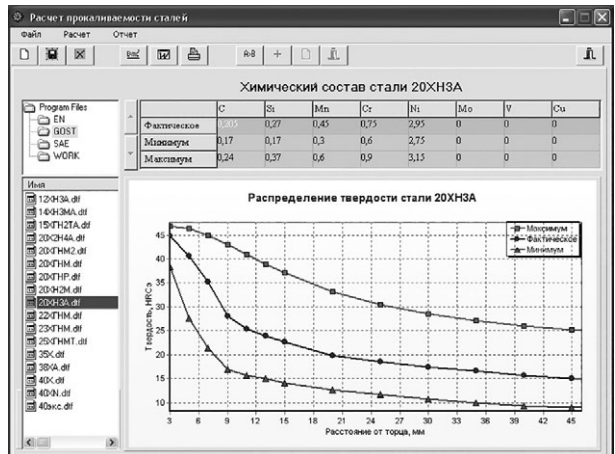


Рисунок 18 — Программа расчета прокаливаемости конструкционных сталей
Figure 18 — Calculation program for the hardenability of structural steels

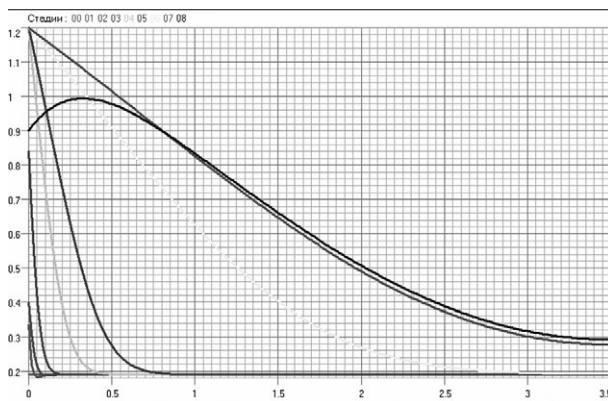
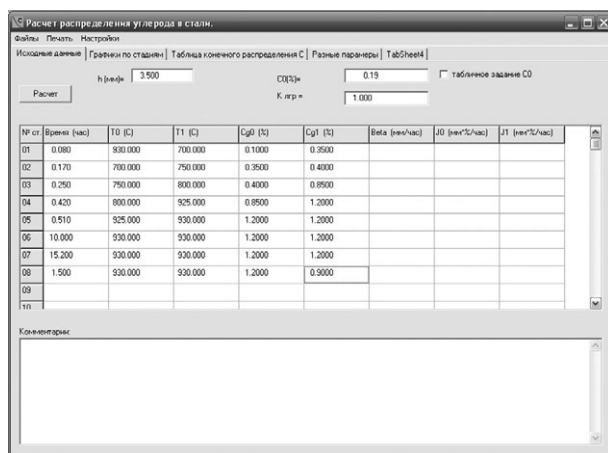


Рисунок 19 — Программа расчета процесса диффузии углерода в сталь
 Figure 19 — Calculation program for carbon diffusion into steel

ми данными расчета являются концентрация углеродного потенциала и температурно-временные интервалы каждой стадии техпроцесса ХТО.

Применение программного комплекса позволяет на этапе проектирования не только выбирать конструктивные параметры зубчатых передач, но и в зависимости от уровня нагруженности и требуемой долговечности назначать марку стали, технические требования к эффективной толщине и качеству микроструктуры упрочненных слоев, разрабатывать технологические режимы химико-термической обработки для каждого конкретного типа передачи.

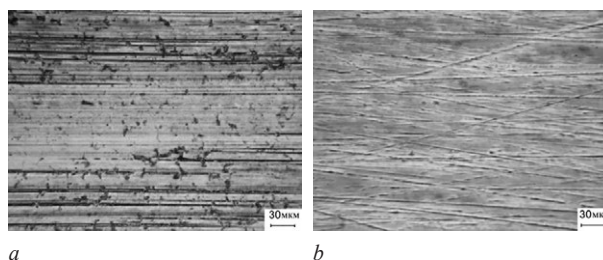


Рисунок 20 — Микроструктура поверхности трения немодифицированного (a) и модифицированного (b) фуллеренами C₆₀ керамического покрытия
 Figure 20 — Microstructure of friction surface of ceramic coating unmodified (a) and modified (b) with fullerenes C₆₀

При изменении условий термообработки и изменении номенклатуры деталей появляется возможность быстрой перенастройки технологического процесса, что повышает производительность производственных процессов ХТО.

Как известно, одним из методов повышения триботехнических свойств деталей является создание на их поверхности алюмоматричных композитов [10, 11]. Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси выполнен комплекс работ по установлению природы воздействия частиц углеродных наноматериалов (нанотрубок, фуллеренсодержащих форм, аморфного углерода), включенных в виде добавок в керамическую матрицу структурных модификаций α -, γ -Al₂O₃, сформированную методом микродугового оксидирования, на формирование антифрикционных, износостойких слоев на поверхности керамики [12].

Разработаны физико-химические принципы создания алюмоматричных композитов путем целенаправленного армирования сплавов тугоплавкими полифункциональными наноструктурированными наполнителями на основе микро- и ультрадисперсных порошков оксидов и нитридов, приводящих к образованию наноразмерных соединений и элементов, обеспечивая при этом их равномерное распределение в алюминиевой матрице (рисунок 20).

Разработан процесс самопроизвольного синтеза керамических тугоплавких наночастиц в алюминиевых расплавах. При модифицировании эв-

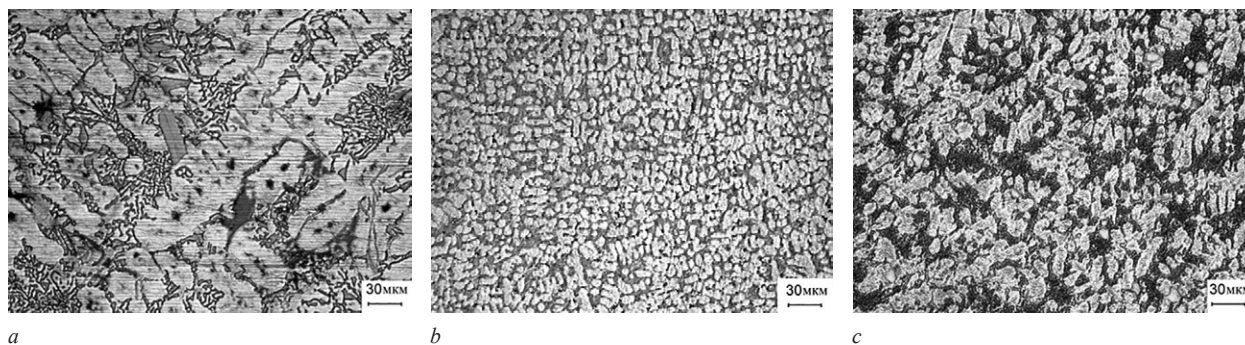


Рисунок 21 — Микроструктура сплава АК12М2МгН в состоянии поставки (a), модифицированного наноструктурированным наполнителем на основе ультрадисперсного диоксида кремния (b) и нитрида бора (c)
 Figure 21 — Microstructure of AK12M2MgN alloy in the state of delivery (a), modified with nanostructured filler based on ultradispersed silicon dioxide (b) and boron nitride (c)

тектического силумина АК12М2МгН наноструктурированным наполнителем на основе ультрадисперсного порошка диоксида кремния достигнуто измельчение эвтектики силумина в 20–30 раз (рисунок 21). Это обеспечило повышение трибомеханических свойств в 1,5–5 раз при расширении диапазона рабочих нагрузок в 2 раза.

Полученные результаты применены для упрочнения узлов трения различного назначения. При упрочнении разработанным керамическим покрытием рабочих поверхностей дорогостоящего технологического оборудования ЗАО «АТЛАНТ» достигнуто повышение его срока эксплуатации в 10 раз. На ОАО «Полоцк-Стекловолокно» упрочнены керамическим покрытием запорные кольца оборудования для производства стекловолокна. Осуществлена замена шаров запорной газовой арматуры, изготавливаемых из дорогостоящей нержавеющей стали, на шары из сплавов алюминия с керамическим покрытием, что обеспечивает значительное повышение износостойкости этих деталей при одновременном снижении массы (рисунок 22).

Белорусским национальным техническим университетом впервые предложено использовать для тяжело нагруженных подшипников качения инструментальную сталь марки У8А (рисунок 23). Для достижения уровня механических свойств сопоставимых с традиционной сталью ШХ15 разработана технология объемно-поверхностного упрочнения с самоотпуском. Технологический процесс упрочнения осуществляется на спроектированном и изготовленном оборудовании. Благодаря оптимальным режимам нагрева и охлаждения формируется дифференцированное распределение твердости и микроструктуры по сечению колец подшипника. Стендовые испытания показали, что износостойкость подшипников из стали марки У8А не уступает традиционным — из стали марки ШХ15.

Разработанная технология может быть реализована при изготовлении и упрочнении деталей автомобильной промышленности, что позволяет сократить энергоемкость, снизить себестоимость упрочнения изделий.

Разработки в области обработки металлов давлением. Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси разработана стратегия кольцераскатки применительно к номенклатуре колец белорусских предприятий, заключающаяся в получении готового кольца с одного нагрева, позволяющая использовать минимальные усилия деформирования и обеспечить оптимальную стоимость оборудования (рисунок 24).

Внедрение кольцераскатки на ОАО «Минский подшипниковый завод» и ОАО «БЕЛАЗ» — управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» позволит увеличить коэффициент использования металла с 0,6 до 0,71–0,77, снизить годовую потребность в закупке сталей примерно на 3500 т,



a



b



c



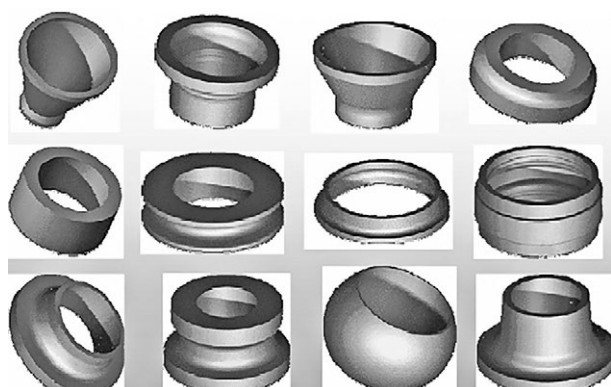
d

Рисунок 22 — Детали, упрочненные модифицированным углеродными наночастицами керамическим покрытием:
a, b — подвижные вставки вакуум-форм для изготовления крупногабаритных полимерных комплектующих холодильников ATLANT; c — запорные кольца технологического оборудования ОАО «Полоцк-Стекловолокно»; d — шар газового крана НППРУП «Белгазтехника»

Figure 22 — Parts hardened with ceramic coating modified with carbon nanoparticles:
for the production of large-sized polymeric components of ATLANT refrigerators; c — lock rings of technological equipment JSC “Polotsk-Steklovolokno”; d — ball of the gas valve of RVE “BELGAZTEKHNIKA”



Рисунок 23 — Подшипники качения с кольцами из стали У8А
Figure 23 — Rolling bearings with rings made of steel U8A



a



b

Рисунок 24 — Возможности кольцераскатки: *a* — номенклатура деталей для кольцераскатки; *b* — раскатка профильных колец
Figure 24 — Ring rolling capabilities: *a* — nomenclature of parts for ring rolling; *b* — rolling of profile rings

уменьшить энергозатраты при изготовлении заготовок колец на 10–15 %.

Разработаны рекомендации по выбору технологических силовых параметров оборудования автоматизированной линии, которое определяет ее тактовое время. Подготовлены методики оптимизации загрузки автоматизированного производства по тактовому времени [13–15]. Разработан и предложен к использованию в автоматизированных кольцераскатных комплексах способ стабилизации маложестких колец [16]. Рассчитаны параметры установки для динамической стабилизации маложесткого кольца. Данные рекомендации используются при выборе планируемой к поставке автоматизированной линии для ОАО «БЕЛАЗ», которая не имеет аналогов в мировой практике. Выполненная разработка учитывает особенности эксплуатации и обслуживания автоматизированной линии и включает перечень оборудования, необходимого для производства кольцевых заготовок.

Кроме того, 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 нагружения [17].

Технологическое снижение 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. Определены оптимальные диапазоны основных технологических параметров процессов динамической стабилизации, разработаны схемы нагружения (рисунки 25, 26) и методики инженерных расчетов напряженного состояния деталей типа дисков, плоских колец и валов применительно к условиям их нагружения при динамической стабилизации. Создана принципиально новая конструкция установки с ЧПУ для динамической стабилизации фрикционных дисков с диаметром до 1000 мм (рисунок 27), которые используются в карьерных самосвалах БЕЛАЗ. Применение нового решения при изготовлении фрикционных дисков дало возможность обеспечить требуемую величину отклонения от плоскостности не более 0,3 мм, снизить припуски под черновое и чистовое шлифование, обеспечить повышение ресурса и конкурентоспособности белорусских карьерных самосвалов.

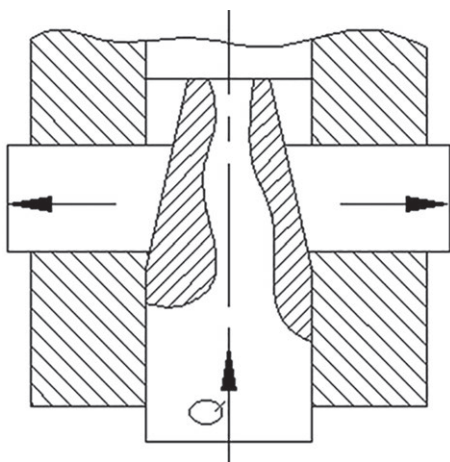


Рисунок 25 — Схема нагружения кольца клиновым механизмом
Figure 25 — Scheme of ring loading by wedge mechanism

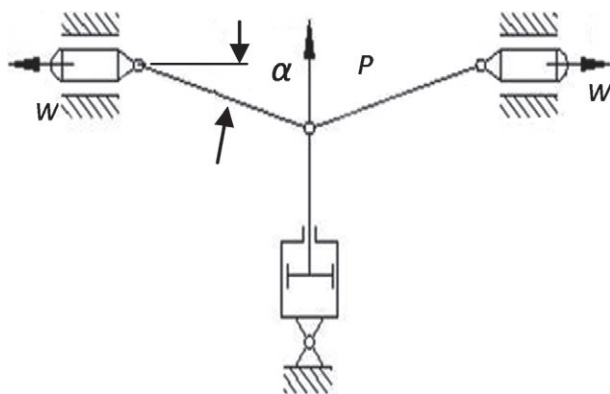


Рисунок 26 — Схема рычажного механизма
двухстороннего действия
Figure 26 — Diagram of a double-acting lever mechanism

Намечены пути дальнейшего использования динамической стабилизации при изготовлении таких деталей, как коленчатые и торсионные валы, венцы маховиков, бурильные трубы, кольца (таблица).

Гомельским государственным техническим университетом для ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК» разработан способ повышения производительности изготовления сверхпрочного и ультрапрочного металлокорда путем повышения скорости процесса тонкого волочения стальной высокоуглеродистой проволоки и процесса свивки металлокорда из тонкой проволоки. Предложены новые маршруты волочения проволоки, отличающиеся повышенной равномерностью деформации ее сечения, низкой температурой волочения при его высоких скоростях. Выработаны практические рекомендации по модернизации узлов трения канатных машин (рисунок 28) путем использования комбинированной конструкции фрикционных дисков, включающей облегченную основу и металлополимерное композиционное износостойкое покрытие, что позволило обеспечить снижение металлоемкости фрикционных узлов до 25 %.

Установлены и рекомендованы к внедрению величины скоростей волочения, обеспечивающие более равномерное распределение микротвердости по сечению проволоки. Разработана методика

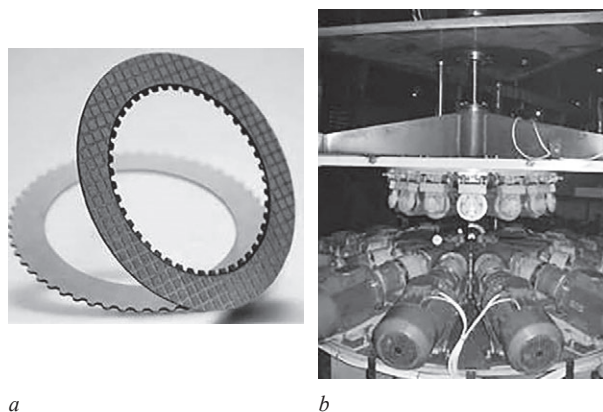


Рисунок 27 — Динамическая стабилизация фрикционных дисков: *a* — фрикционный диск; *b* — установка для динамической стабилизации
Figure 27 — Dynamic stabilization of friction discs: *a* — friction disc; *b* — dynamic stabilization installation

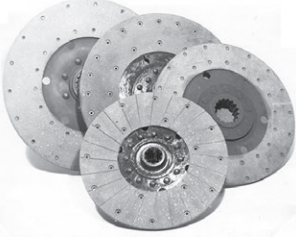
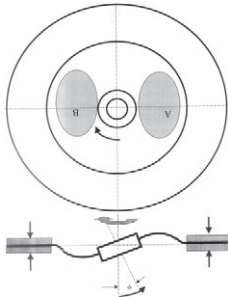

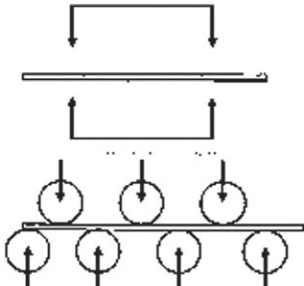
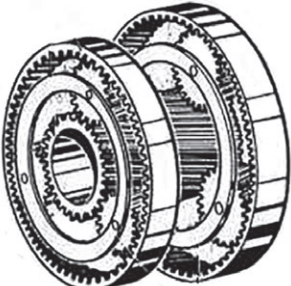
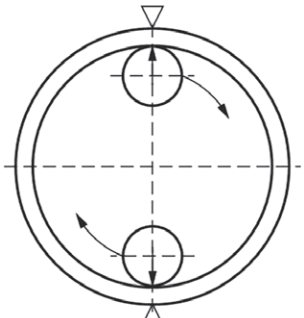

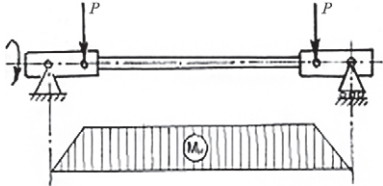

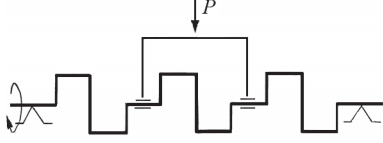
расчета оптимальной величины единичной вытяжки тонкого волочения в производстве сверхпрочного металлокорда, позволяющая выполнять процесс тонкого волочения проволоки с оптимальной интенсивностью упрочнения.

Заключение. В рамках подпрограммы «Металлургия» выполнен ряд работ, направленных на решение практических задач в области металлургии, которые могут быть востребованы промышленными предприятиями страны. В первую очередь это касается разработок Объединенного института машиностроения НАН Беларуси, являющегося головной организацией по подпрограмме «Металлургия». В частности, разработанные в институте новые марки сталей внедрены в серийное производство крупногабаритных цементуемых и азотируемых зубчатых колес, а также литосварных рам карьерных самосвалов БЕЛАЗ грузоподъемностью 130–450 т.

Разработанная технология формирования покрытий на рабочих поверхностях деталей металлургического и литейного оборудования методом механического плакирования гибким инструментом прошла промышленные испытания, которые показали, что покрытия обеспечивают повышение стойкости деталей пресс-форм в 1,9 раза по сравнению с деталями без покрытия.

Разработаны технологии химико-термического упрочнения применительно к конкретному оборудованию, обеспечивающие требуемое качество деталей силовых передач автотракторной техники. На основе программного обеспечения на этапе проектирования назначается марка стали, технические требования к эффективной толщине и качеству микроструктуры упрочненных слоев, разрабатываются технологические режимы химико-термической обработки. Технология соответствует лучшим мировым аналогам. Работы по освоению прогрессивных технологий ХТО выполнены на ОАО «Минский завод колесных тягачей», ОАО «БЕЛАЗ» — управляющая компа-

Таблица — Примеры деталей, для которых возможно применение динамической стабилизации
 Table — Examples of parts for which dynamic stabilization is possible

Детали-представители	Особенности нагружения	Схема нагружения
<p>Диски сцепления</p> 	<p>Нагружение за счет разворота и вращения центральной части диска</p>	
<p>Фрикционные диски</p> 	<p>Нагружение вращением диска между нижним и верхним рядом радиальных роликов</p>	
<p>Венцы маховика, коронные шестерни</p> 	<p>Нагружение вращающимися роликами по отверстию кольца</p>	
<p>Торсионные валы, буровые трубы</p> 	<p>Нагружение изгибом с вращением</p>	
<p>Коленчатые валы</p> 	<p>Нагружение изгибом с вращением вала</p>	

ния холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», ОАО «Минский тракторный завод».

Разработанная стратегия кольцераскатки используется на ОАО «Минский подшипниковый завод». Также предложен к использованию в автоматизированных кольцераскатных комплексах способ стабилизации маложестких колец. Данные рекомендации используются при выборе планируемой к поставке автоматизированной линии для

ОАО «БЕЛАЗ». Выполненная разработка учитывает особенности эксплуатации и обслуживания автоматизированной линии и включает перечень оборудования, необходимого для производства кольцевых заготовок. Это позволит увеличить коэффициент использования металла с 0,6 до 0,71–0,77, снизить годовую потребность в закупке сталей примерно на 3500 т, снизить энергозатраты при изготовлении заготовок колец на 10–15 %.

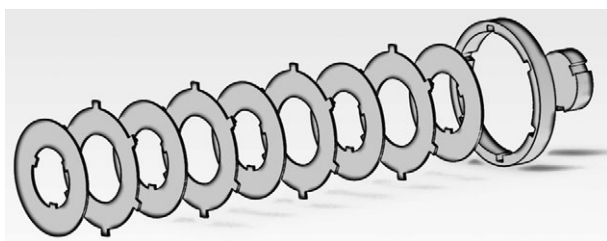


Рисунок 28 — Развернутая модель узла свивки металлокорда
Figure 28 — Expanded model of the metal cord coiling unit

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 нагружения. Технологическое снижение 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. Определены оптимальные диапазоны основных технологических параметров процессов динамической стабилизации, разработаны схемы нагружения и методики инженерных расчетов напряженного состояния деталей типа дисков, плоских колец и валов применительно к условиям их нагружения при динамической стабилизации. Создана принципиально новая конструкция установки с ЧПУ для динамической стабилизации фрикционных дисков с диаметром до 1000 мм, которые используются в карьерных самосвалах БЕЛАЗ. Применение нового решения при изготовлении фрикционных дисков дало возможность обеспечить требуемую величину отклонения от плоскостности не более 0,3 мм, снизить припуски под черновое и чистовое шлифование, обеспечить повышение ресурса и конкурентоспособности белорусских карьерных самосвалов.

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. Повышение ресурса крупногабаритных зубчатых колес с использованием новых сталей / С.А. Шишко [и др.] // *Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]*. — Минск, 2017. — Вып. 6. — С. 219–225.

3. Марукович, Е.И. Разработка экономнолегированных высокопрочных аусферритных (бейнитных) чугунов — магистральное направление в чугунолитейной промышленности / Е.И. Марукович, А.И. Покровский // *Литейщик России*. — 2022. — № 12. — С. 16–20.
4. Марукович, Е.И. Технологии и оборудование для литейного производства / Е.И. Марукович, М.А. Садох // *Литейщик России*. — 2022. — № 6. — С. 36–37.
5. Плакирование гибким инструментом / К.В. Григорович [и др.] // *Актуальные проблемы прочности* / под ред. В.В. Рубаника. — Минск, 2022. — С. 274–285.
6. Применение планирования эксперимента для выбора оптимальных режимов электродеформационного плакирования гибким инструментом / М.А. Леванцевич [и др.] // *Вестн. машиностроения*. — 2020. — № 5. — С. 71–76.
7. 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. — С. 33–46.
8. К вопросу оптимизации процесса многослойной центробежной наплавки антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский [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.
9. Sosnovsky, I.A. Study of laws of electromagnetic fluxes during induction surfacing powder layer / I.A. Sosnovsky, A.A. Kuriylyonok, O.O. Kuznechik // *Aspects in Mining & Mineral Science*. — 2022. — Vol. 9, iss. 2. — Pp. 1032–1034. — DOI: <https://doi.org/10.31031/AMMS.2022.09.000710>.
10. Borodianskiy, K. Mechanical properties and microstructure characterization of Al-Si cast alloys formation using carbide nanoparticles / K. Borodianskiy, M. Zinigrad // *Journal of Materials Sciences and Applications*. — 2015. — Vol. 1, no. 3. — Pp. 85–90.
11. Jiang, D. Fabrication of Al₂O₃/SiC/Al hybrid nanocomposites through solidification process for improved mechanical properties / D. Jiang, J. Yu // *Metals*. — 2018. — Vol. 8, iss. 8. — DOI: <https://doi.org/10.3390/met8080572>.
12. Формирование триботехнических покрытий Al-Cu с функциональными добавками методом центробежной индукционной наплавки / А.И. Комаров [и др.] // *Механика машин, механизмов и материалов*. — 2022. — № 2 (59). — С. 54–61. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-2-59-54-61>.
13. Разработка основных требований к автоматизированному участку термической обработки кольцеракатного комплекса / В.Е. Антонюк [и др.] // *Литье и металлургия*. — 2022. — № 2. — С. 97–103. — DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-97-103>.
14. Требования к выбору массы и нагреву заготовок в автоматизированных кольцеракатных комплексах / В.Е. Антонюк [и др.] // *Литье и металлургия*. — 2022. — № 1. — С. 121–129. — DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-121-129>.
15. Антонюк, В.Е. Технические особенности управляемого охлаждения кольцевых заготовок после колцеракатки / В.Е. Антонюк, С.Г. Сандомирский, В.В. Яворский // *Литье и металлургия*. — 2023. — № 1. — С. 106–111. — DOI: <https://rep.bntu.by/handle/data/126903>.
16. Антонюк, В.Е. Динамическая стабилизация маложестких колец после кольцеракатки / В.Е. Антонюк, С.Г. Сандомирский // *Механика машин, механизмов и материалов*. — 2020. — № 3(52). — С. 34–41. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-3-52-34-41>.
17. Антонюк, В.Е. Особенности конструкции и эксплуатации фрикционных дисков / В.Е. Антонюк // *Механика машин, механизмов и материалов*. — 2022. — № 2(59). — С. 39–46. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-2-59-39-46>.

TOLSTOY Aliaksandr V., Ph. D. in Phys. and Math., Assoc. Prof.
Deputy Head of Laboratory Metallurgy in Mechanical Engineering of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”
E-mail: tolstoy@oim.by

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

Received 03 April 2023.

DEVELOPMENTS OF THE SUBPROGRAM “METALLURGY” PERFORMED IN THE INTERESTS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

The main results of the implementation of the tasks of the subprogram “Metallurgy” of the State Research Program “Mechanics, Metallurgy, Diagnostics in Mechanical Engineering”, 2021–2025, with an applied orientation are presented, which are 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. Their contribution to the solution of practical problems is shown. In the field of metallurgy of iron-carbon alloys, a range of new grades of steels for large gears and large castings of supporting systems of machines are developed. Distinctive features of the developed steels are the possibility to obtain higher hardness values of the hardened layer and teeth of cemented gears compared with counterparts from serial steels. A new sparingly alloyed steel for gearboxes of tractors BELARUS has been developed. The steel is characterized by high hardenability of cemented layer. In the field of metallurgy of non-ferrous metals and alloys, theoretical and technological bases for production of complex configuration castings are developed. Application of these castings improves the dimensional accuracy of products. In the field of hardening of steels and alloys, the technology of coating formation on the working surfaces of metallurgical and foundry equipment parts by mechanical cladding with flexible tool is developed. The coatings provide 1.9 times higher durability of mold parts by compared to the parts without coatings. The technological process of induction cladding on the surfaces of friction nodes parts of wear-resistant antifriction coatings is developed. The service life of bimetallic parts with coatings is 1.25–1.33 times higher than that of serial parts. Physico-chemical principles of creation of aluminomatrix composites were developed on the basis of micro- and ultradispersed oxide powders. This provided a 5-fold increase in tribomechanical properties. In the field of metal forming, the strategy of ring rolling is developed as applied to the nomenclature of rings of the Belarusian enterprises. Technological substantiation is performed for reducing deformations and residual stresses after heat treatment of low-rigid parts such as discs using dynamic stabilization based on alternating cyclic loading.

Keywords: metallurgy, casting, chemical heat treatment, surface hardening, pressure treatment

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-2-63-75-89>

References

- Vitiaz 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.).
- Shishko S.A., Moiseenko V.I., Sidorenko A.G., Sotnikov M.V., Tomashevsky D.G. Povyshenie resursa krupnogabaritnykh zubchatykh kolez s ispolzovaniem novykh staley [Increasing the resource of large-sized gearwheels with using new steels]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2017, iss. 6, pp. 219–225 (in Russ.).
- Marukovich E.I., Pokrovskiy A.I. Razrabotka ekonomnolegirovannykh vysokoprochnykh ausferritnykh (beynitnykh) chugunov — magistralnoe napravlenie v chugunoliteynoy promyshlennosti [Development of economic alloyed high-strength ausferritic (bainitic) cast irons — the main direction in the iron foundry industry]. *Liteyshchik Rossii*, 2022, no. 12, pp. 16–20 (in Russ.).
- Marukovich E.I., Sadokha M.A. Tekhnologii i oborudovanie dlya liteynogo proizvodstva [Technologies and equipment for foundry production]. *Liteyshchik Rossii*, 2022, no. 6, pp. 36–37 (in Russ.).
- Grigorovich K.V., Platov S.I., Dema R.R., Vitiaz P.A., Basi-nyuk V.L., Levantsevich M.A. Plakirovanie gibkim instrumentom [Cladding with flexible tool]. *Aktualnye problemy prochnosti*, 2022, pp. 274–285 (in Russ.).
- Levantsevich M.A., Piliptsuk E.V., Maksimchenko N.N., Belevskiy L.S., Dema P.P. Primenenie planirovaniya eksperimenta dlya vybora optimalnykh rezhimov elektrodeformatsionnogo plakirovaniya gibkim instrumentom [Application of experimental design for selection of optimal modes of electro-deformation cladding with a flexible tool]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2020, no. 5, pp. 71–76 (in Russ.).
- Belotserkovsky M.A., Sosnovsky I.A., Kurilyonok A.A. Induktсионnyy nagrev v protsessakh tsentrobezhnogo naneseniya funktsionalnykh pokrytiy [Induction heating in the processes of centrifugal application of functional coatings]. *Aktualnye problemy prochnosti*, 2022, pp. 33–46 (in Russ.).
- Belotserkovsky M.A., Kurilyonok A.A., Belyavin K.E., Sosnovsky I.A., Komarov A.I., Orda D.V. K voprosu optimizatsii protsessa mnogoslonoynoy 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.).

9. 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>.
10. Borodianskiy K., Zinigrad M. Mechanical properties and microstructure characterization of Al-Si cast alloys formation using carbide nanoparticles. *Journal of materials sciences and applications*, 2015, vol. 1, no. 3, pp. 85–90.
11. Jiang D., Yu J. Fabrication of Al₂O₃/SiC/Al hybrid nanocomposites through solidification process for improved mechanical properties. *Metals*, 2018, vol. 8, iss. 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8080572>.
12. Komarov A.I., Orda D.V., Sosnovsky I.A., Kurilyonok A.A. Formirovanie tribotekhnicheskikh pokrytiy Al-Cu s funktsionalnymi dobavkami metodom tsentrobezhnoy induktsionnoy naplavki [Formation of tribotechnical Al-Cu coatings with functional additives by centrifugal induction surfacing]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2022, no. 2(59), pp. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-2-59-54-61> (in Russ.).
13. 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.).
14. Antonyuk V.E., Sandomirski S.G., Yavorskiy 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.).
15. Antonyuk V.E., Sandomirski S.G., Yavorskiy 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. Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/126903> (in Russ.).
16. Antonyuk V.E., Sandomirski S.G. Dinamicheskaya stabilizatsiya malozhestkikh kolets posle koltseraskatki [Dynamic stabilization of rings of low rigidity after the ring-rolling]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2020, no. 3(52), pp. 34–41. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-3-52-34-41> (in Russ.).
17. Antonyuk V.E. Osobennosti konstruktssii i ekspluatatsii friktsionnykh diskov [Design and operation features of friction discs]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2022, no. 2(59), pp. 39–46. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-2-59-39-46> (in Russ.).