



The domestic developments carried out for the last three years in the field of foundry-metallurgical, thermal, galvanic productions are described in detail.

П. А. ВИТЯЗЬ, НАН Беларуси, А. А. ШИПКО, ОИМ НАН Беларуси

УДК 621.74

НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЛИТЕЙНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ И ДРУГИХ ЭНЕРГОЕМКИХ ПРОИЗВОДСТВ. РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Качество продукции машиностроения закладывается на стадиях выплавки металла, осуществления литейных технологий, пластического формообразования, термической обработки. Исправить недостатки металла и деталей, допущенные на этих переделах, зачастую невозможно. В то же время низкая эффективность оборудования и соответственно технологий выплавки сталей и сплавов, литья и термообработки не позволяют достичь качества продукции европейского уровня. Значительный износ основных фондов резко снижает энергоэффективность производства. Только около 15% литья в стране получают на современном оборудовании. Кроме того, производство 1 т чугуна и стального литья сопровождается выбросом в атмосферу 50 кг пыли и вредных веществ. Реальный тепловой к. п. д. агрегатов химико-термической и термической обработки не превышает 5-10%. В них зачастую проблематично достигнуть требуемых для обработки температурных режимов. Подобные проблемы существуют в гальваническом производстве. Средний срок эксплуатации оборудования здесь составляет более 20 лет.

Эти данные стали широко известны после принятия Советом Министров Республики Беларусь в конце 2007 г. Программы технического переоснащения и модернизации литейных, термических, гальванических и других энергоемких производств на 2007-2010 гг. Ее мероприятия содержали более 200 заданий 50 предприятиям страны. И хотя актуальность Программы ни у кого не вызывала сомнений, работа сначала шла трудно. Ведь печное литейное, печное нагревательное и термическое оборудование, генераторы для индукционного нагрева, футеровочные материалы, гальванические линии всегда закупались. А тут поставлена задача импортозамещения - создать отечественные об-

разцы оборудования и техпроцессов. Госстандартом, Минпромом и Национальной академией наук Беларуси сразу после принятия Программы проводятся многочисленные консультации с участием предприятий и институтов. Назначаются головные организации, выполняется мониторинг литейного и термического оборудования. По предложению НАН Беларуси, а затем и поручению Совета Министров разрабатывается новый раздел Программы - «Научное обеспечение». Вопрос рассматривается на заседании Президиума НАН Беларуси.

К работам со стороны науки и производства подключено более 50 организаций страны, включая научно-технические центры предприятий. Сразу мы вспомнили важность того, что в Беларуси сохранен образованный еще во времена Союза отраслевой институт ОАО «БЕЛНИИЛИТ», специализирующийся в области создания машин для получения стержней и автоматизированных комплексов для приготовления смесей, формовочных и кокильных машин, автоматических линий финишной обработки литых заготовок, что лидерами литейно-металлургической и термической науки в стране являются Белорусский национальный технический университет, где работают четыре специализированные кафедры и ряд научно-исследовательских лабораторий, Институт технологии металлов НАН Беларуси. Такие подразделения есть и в Гомельском государственном техническом университете им. П. О. Сухого, других университетах и ряде академических и отраслевых институтов. Большой опыт по технологиям термообработки и индукционным технологиям имеют ученые Минского автозавода, Физико-технического института НАН Беларуси, Объединенного института Машиностроения НАН Беларуси. Гальваническими технологиями давно и успешно занимаются

Белорусский государственный технологический университет и Научно-исследовательский институт физико-химических проблем Белорусского государственного университета, отраслевой институт Минпрома в г. Витебске.

Под председательством Первого заместителя Премьер-министра Республики Беларусь В. И. Семашко состоялся ряд семинаров и совещаний, где нелегко приходилось руководителям и организаторам Программы. В текущем году Правительством принята новая редакция Программы, уже до 2015 года.

Литейно-металлургическое производство

Институтом технологии металлов НАН Беларуси (директор - академик Е. И. Марукович) разработаны.

1. Технология изготовления из сталей заготовок деталей прокатного оборудования методом электрошлакового переплава. Экономия за счет снижения расхода бронзы на изготовление биметаллических дисков составила около 1 т в год.

2. Аноды цинковые для нанесения гальванического покрытия при производстве металлокорда. Ежегодно ИТМ НАН Беларуси поставляет более 100 т цинковых анодов (30% - из отходов гальванического производства РУП «БМЗ»), Суммарный экономический эффект - более 1 млрд. руб.

3. Устройство для разделения плоской непрерывной отливки, обеспечивающее быстрое и качественное пиление отливки с минимальными потерями на стружку.

4. Струйный кристаллизатор с профилированной наружной поверхностью гильзы, позволяющий в 3-5 раз повысить производительность литья и получать заготовки с наноструктурированным эвтектическим силумином.

5. Принципиально новый метод литья полых цилиндрических заготовок из чугуна, позволивший кардинально повысить износостойкие и прочностные свойства изделий массового производства типа поршневых колец и гильз цилиндров. Создано передовое производство деталей более 700 наименований, обеспечивающее потребности сборочных конвейеров МТЗ, БелАЗ, МАЗ и других предприятий страны и за рубежом.

Последняя разработка представлена на соискание Государственной премии Республики Беларусь 2010 г. (авторский коллектив: Е. И. Марукович, В. Ф. Бевза, А. М. Бодяко).

На опытном производстве Института технологии металлов НАН Беларуси за 10 месяцев текущего года для предприятий республики литьем в кокиль изготовлено свинцовых изделий на сумму свыше 150 млн. руб. С целью энерго- и ресурсо-

сбережения и увеличения производительности разработана машина непрерывного литья свинцовых лент для изготовления элементов радиационной защиты - конкурентоспособной импортозамещающей продукции для комплектации измерительного оборудования и радиационной защиты персонала, оборудования и приборов. Планируется создание производства изделий из литейных материалов на площадях института, что позволит на 30—40% уменьшить энергозатраты, в 4-5 раз повысить производительность по сравнению с литьем в кокиль.

Целый ряд предприятий республики вынужден импортировать свинцовые комплектующие или прокат в виде свинцового листа и полосы, тратя на эти цели немалые средства в валюте. Основными потребителями свинцовых изделий в республике являются УП «Атомтех» (около 20 т в год); ОДО «Тиса» (около 100 т в год); гальванические производства предприятий Министерства промышленности.

Этим институтом разработан технологический процесс литья заготовок диаметром до 200 мм из эвтектического антифрикционного силумина взамен бронзовых. Проведены промышленные испытания червячных колес и подшипников скольжения из антифрикционного силумина на предприятиях республики: РУП «Завод Оптик» (г. Лида), РУПП «Станкозавод «Красный борец» (г. Орша), ОАО «Белшина» (г. Бобруйск), ОАО «Бобруйсксельмаш». Установлено, что заготовки из антифрикционного силумина не уступают аналогичным из бронз БрАЖ9-4 и БрОЦС5-5-5. Стоимость заготовок из антифрикционного силумина в 1,2—2,0 раза, а масса в 2,5-3,0 раза меньше, чем аналогичных из бронз. Налажен выпуск заготовок, которые по хозяйственным договорам поставляются на ОАО «Белшина» (г. Бобруйск), ОАО «Завод Оптик» (г. Лида), ОАО «Бобруйсксельмаш» (г. Бобруйск). Ряд эффективных разработок института проанализирован в работе [1].

В ОАО «БЕЛНИИЛИТ» (директор - канд. техн. наук А. П. Мельников) разработано и освоено производство [2]:

- специальной кокильной поворотной машины (мод. 4982М) для производства отливок методом самозаполнения, имеющей высоту уровня заливки металла 1400 мм и размер рабочего места 600х1000 мм;

- вихревых смесителей для приготовления песчано-глинистой формовочной смеси производительностью до 50 т/ч, позволяющих снизить энергозатраты по сравнению с катковыми смесителями на 135 тыс. кВт/ч в год на 1 т замеса;

- автоматизированного смесеприготовительного комплекса с массой замеса 1 т производительностью 44 т/ч;
- установок для интенсивного рафинирования алюминиевых сплавов, произведенных из вторичных материалов, позволяющих увеличить массу обрабатываемого металла до 400 кг и сократить время обработки до 15 мин;
- оборудования вертикально-станочной формовки производительностью 600 т/ч, а также для производства отливок методом самозаполнения формы с машинным временем цикла не более 52 с;
- стержневых машин для изготовления стержней массой до 150 кг по Амин-процессу, а также машины для центробежного литья, литья дробы и др.

ОАО «БЕЛНИИЛИТ», являющееся головной организацией ГНТП (подпрограммы) «Технологии литья», в 2011-2015 гг. будет развивать новое направление, связанное с компьютерными технологиями для проектирования оборудования, технологической оснастки и моделирования процессов литья. Получит развитие научная школа по разработке новых технологий, проектированию и изготовлению современного технологического оборудования для литейного производства.

Белорусским национальным техническим университетом, Институтом тепло— и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, Институтом механики металлополимерных систем НАН Беларуси, Институтом технологии металлов НАН Беларуси, Институтом математики НАН Беларуси под руководством профессоров Д. М. Кукуя, А. Н. Чичко, В. Ф. Соболева, И. А. Трусковой, академика Е. И. Маруковича, чл.-корр. Н. В. Павлюкевича, Ю. М. Плескачевского разработаны математические модели совершенствования технологических процессов различных переделов металлургического производства; движения неметаллических частиц в системе «сталь - ковш - промежуточный ковш - кристаллизатор»; нагрева цилиндрических заготовок в кольцевой печи с вращающимся подом и процессов в дуговой сталеплавильной печи; формирования заготовок на стадии кристаллизации и прокатки; заполнения тонкостенных форм расплавом с учетом гидродинамических параметров силуминовых сплавов при литье под давлением; идентификации, управления и оптимизации процессов термической обработки материалов и др. [3-7].

У этих работ хорошая перспектива развития в 2011-2015 гг. В подпрограмму «Металлургия» включено комплексное задание по созданию при

БНТУ центра математического моделирования процессов и технологий в металлургии, литье, термообработке, обработке металлов давлением. Это исключительно перспективное направление, позволяющее экономить большие деньги при проектировании и эксплуатации процессов и оборудования.

Белорусским национальным техническим университетом (под руководством профессора Д. М. Кукуя) разработаны и внедрены на РУП «ГЛЗ «Центролит» ресурсосберегающая технология и оборудование для плавки железоуглеродистых сплавов на подогретой шихте, обеспечивающие сокращение затрат электроэнергии, повышение качества жидкого металла и снижение брака отливок. Внедрение данного оборудования позволяет сократить удельный расход электроэнергии в литейном производстве на 18-25% (120-180 кВт ч на 1 т жидкого металла) и уменьшить длительность плавки на 15-20%. Ожидаемый суммарный экономический эффект к 2011 г. в условиях РУП ГЛЗ «Центролит» около 963 млн. руб. Срок окупаемости — два года. За девять месяцев текущего года произведено 8320 т чугуна (при плане 10000 т) на сумму 3427 тыс. у. е., сэкономлено более 900 тыс. кВт электроэнергии.

Физико-техническим институтом НАН Беларуси, ПРУП «ММЗ» под руководством чл.-корр. А. П. Ласковнева исследованы процессы переработки и использования алюминиевых отходов для приготовления сплавов производства двигателестроения методами литья [8].

Создан комплекс устройств для сушки стружечных отходов объемом более 1000 тыс. т в год, ее сепарирования от магнитных и слабомагнитных включений, что позволило повысить выход годного металла до 92-95%; исключить возгорание стружки при переплаве; интенсифицировать механическое диспергирование стружки при получении изделий с использованием алюминиевого порошка. Организован участок на ПРУП «Минский моторный завод» по переработке алюминиевой стружки и получению отливок ответственных изделий машиностроения. Это позволило использовать в производстве весь объем образующейся на предприятии алюминиевой стружки в составе шихты взамен дорогостоящих покупных шихтовых материалов.

Говоря о легировании слитков, приведем пример Белорусского национального технического университета, где под руководством профессора О. С. Комарова разработана технология подготовки отработанных никелевых катализаторов с высоким содержанием Ni для их использования в каче-

стве источников никеля при производстве легированных чугунов [9]. Технология освоена на Бобруйском машиностроительном заводе и УПП «Универсал-Лит» (г. Солигорск) при производстве износостойкого чугуна, из которого изготавливают роторы и улитки шламовых насосов, детали горной техники, мелющие шары, лопасти дробебетных машин и другие детали. Экономический эффект от освоения технологии на Бобруйском машиностроительном заводе составил более 100 тыс. у. е. в год. Себестоимость чугуна снижена на 18%. На предприятиях нефтехимических производств ежегодно скапливается порядка 200 т отработанных катализаторов, в состав которых в виде оксидов входит 10-30% Ni, 8-15% Mo, до 20% Bi, до 50% Si.

Конечно, хотелось привести уже внедренные работы. Хотя большое их количество находится на стадии выполнения поисковых, фундаментальных исследований. Например, в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси канд. техн. наук А. И. Комаровым и В. И. Комаровой [10] разработаны физические принципы создания наноструктурированного композиционного тугоплавкого полифункционального модификатора, который обеспечивает одновременное армирование матрицы микро- и наночастицами различной природы. Так, варьируя составом исходной шихты, получен модификатор, включающий карбид и нитрид титана. Это открывает широкие возможности для целенаправленного управления свойствами сплавов. Установлено, что армирование силумина АК12МЗМgH таким модификатором обеспечивает повышение его износостойкости в 2,5-3,0 раза при одновременном снижении коэффициента трения до 3 раз и расширении диапазона рабочих давлений.

Белорусским национальным техническим университетом (руководитель проф. Б. М. Немененко) предложены новые составы рафинирующих препаратов с кремнеземом, карбонатами и серой, которые при вводе в расплав в оптимальных количествах обеспечивают минимальные выбросы пыли [11]. Флюсы с карбонатами и кремнеземом снижают объем выделяющейся при обработке расплава пыли по сравнению с традиционным флюсом системы $\text{NaCl-KCl-Na}_3\text{AlF}_6$ в 3,3 и 4,6 раза соответственно, а рафинирующие препараты с NaNO_3 и смесь серы с криолитом уменьшают данный показатель в 22,5 и 30,0 раз, а серы с Na_2CO_3 - в 120 раз.

Следует отметить перспективы развития этого направления. В подпрограмму «Металлургия» на 2011—2015 гг. включено комплексное задание по созданию низкотоксичных препаратов для рафи-

нирующе-модифицирующей обработки алюминиевых сплавов (с использованием вторичных ресурсов и наноструктурированных частиц), легирующей смеси для серого чугуна на базе отработанного катализатора, комплексных модификаторов-раскислителей с использованием наноразмерных соединений активных элементов, литейных сплавов, напрямую легированных наноматериалами, механически легированных лигатур. Как видно, диапазон этих исследований весьма широк. Координатором этого комплексного задания выступает Белорусский национальный технический университет (профессор Б. М. Немененко).

Продолжаются работы по созданию технических нормативно-правовых актов в литейном производстве. Так, Белорусским государственным институтом стандартизации и сертификации (БелГИСС) (директор - В. Л. Гуревич) введен в действие стандарт EN 1560-2010 «Производство литейное. Система обозначения отливок из чугуна. Обозначение материалов символами и кодами».

В соответствии с указанной программой до декабря 2010 г. должны быть разработаны следующие стандарты:

- СТБ EN 1247 «Требования безопасности к литейным ковшам, разливочному оборудованию, машинам для центробежного литья, установкам непрерывной и полунепрерывной разливки»;
- СТБ EN 1559—4 «Производство литейное. Технические условия поставки. Часть 4. Дополнительные требования к отливкам из алюминиевых сплавов»;
- СТБ EN 1559-5 «Производство литейное. Технические условия поставки. Часть 5. Дополнительные требования к отливкам из магниевых сплавов»;
- СТБ EN 1559-6 «Производство литейное. Технические условия поставки. Часть 6. Дополнительные требования к отливкам из цинковых сплавов».

Разработчиком указанных стандартов является ОАО «БЕЛНИИЛИТ».

Термическое производство

Если технологиями термообработки заготовок и деталей в республике давно занимались Белорусский национальный технический университет, Физико-технический институт НАН Беларуси, Белорусский государственный технологический университет; другие организации и провести любое исследование в этой области дело техники, то создать отечественное печное оборудование казалось нерешаемой проблемой.

В НАН Беларуси работы начались с создания в Институте тепло- и массообмена им. А. В. Лыко-

ва в лаборатории, руководимой канд. техн. наук П. С. Гринчуком, лабораторной нагревательной печи для проведения НИР по повышению эффективности использования природного газа с промышленности. Теоретическая поддержка была со стороны Белорусского национального технического университета. Как логичное продолжение, Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси и ЗАО «АТЛАНТ» Барановичский станкостроительный завод провели модернизацию камерной печи отжига, нормализации поковок. По результатам промышленной эксплуатации печи, Минпром рекомендовал предприятиям при планировании закупок термического оборудования учитывать, что ЗАО «АТЛАНТ» БСЗ разрабатывает и изготавливает газовые и электрические печи широкого назначения. Белорусским теплоэнергетическим институтом Минэнерго для МАЗ разработана проходная печь для нагрева крупногабаритных заготовок (диаметр до 150 мм, длина до 900 мм) перед штамповкой. Производительность печи - 2,5 т/ч, температура нагрева - до 1250 °С, проектный КПД печи - 50%, коэффициент использования природного газа при нагреве воды для бытовых нужд - около 75%.

Сейчас в республике уже известно, что ЗАО «АТЛАНТ» Барановичский станкостроительный завод разрабатывает и изготавливает отечественное печное оборудование термической обработки широкой гаммы — электрические и газовые проходные и камерные печи для термической обработки металлов, газовые печи для нагрева металла перед ковкой, электрические и газовые печи для термической обработки металлов с защитной атмосферой, газовые и электрические шахтные, методические, полуметодические печи для химико-термической обработки, газовые и электрические агрегаты для закалки и отпуска. В 2010 г. этот завод разработал и изготовил газовую двухкамерную нагревательную печь ТРН 39764М и газовую камерную печь НГ 400/13 для нагрева заготовок под ковку и штамповку, а также электрические камерные печи СНО 3,5.8.3/11, СНО 8.10.10/9 и СНО 8.10.4/11.

Между ЗАО «АТЛАНТ» БСЗ и Институтом тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси заключено соглашение о научно-техническом сотрудничестве и совместной деятельности. В рамках соглашения проводится работа по совместной разработке энергоэффективных образцов печного оборудования для предприятий Беларуси.

Подобные работы получают развитие и в УП «Авторемпроект» Министерства промышленности Республики Беларусь. Между ЗАО «АТЛАНТ» БСЗ и УП «Авторемпроект» заключен договор на

изготовление опытного образца газовой камерной нагревательной печи для РУП «Гомельский станкостроительный завод им. С. М. Кирова».

Институтом тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (директор - д-р техн. наук А. М. Русецкий) подготовлен и представлен в Совет Министров Республики Беларусь проект постановления Совета Министров Республики Беларусь, предусматривающий дополнение Программы технического перевооружения и модернизации литейных, термических, гальванических и других энергоемких производств на 2010-2015 гг. 155 ед. оборудования с капитальными затратами 74193,7 млн. руб. и прогнозируемой годовой экономией теплоэнергетических ресурсов в 14,8 тыс. т у. т.

Этим институтом совместно с ЗАО «АТЛАНТ» БСЗ и предприятиями-потребителями (ОАО «Минский завод «Калибр», РУП «МЗОР», ОАО «Гидромаш») подготовлены два отдельных инновационных проекта по линии ГКНТ на создание пяти опытных образцов электропечей, предусмотренных планом разработки опытных образцов энергоэффективного печного оборудования на 2010—2012 гг., утвержденных Первым заместителем Премьер-министра Республики Беларусь В. И. Семашко. Разработан и изготовлен экспериментальный образец камерной электропечи сопротивления со стационарным подом СНО 3,5.8.3/11 (ГКПНИ «Энергобезопасность»). Образец прошел предварительные испытания, продемонстрирован представителям ряда промышленных предприятий республики.

Наиболее полно состояние и перспективы перевооружения парка печного оборудования приведены в работе [12].

Разработки по нормированию удельного расхода топлива в нагревательных печах, ресурсосбережению при эксплуатации газопламенных агрегатов, оптимизации нагрева массивных изделий выполнены в Белорусском национальном техническом университете [13, 14] (научный руководитель д-р техн. наук И. А. Трусова). Например, создана методика подбора слоев волокнистой футеровки рабочей камеры промышленных нагревательных камерной и проходной печей. Получены конструкции энергоэффективных футеровок при различных температурных режимах печи. Установлена зависимость размера воздушного зазора между металлическим кожухом и внешним слоем футеровки промышленной нагревательной печи от собственной толщины металлического кожуха и температуры поверхности внешнего слоя футеровки (в соответствии с Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь № 93 «Ги-

гигиенические требования к организации технологических процессов и производственному оборудованию»).

Как видно, есть все основания полагать, что при перевооружении термических производств предприятий страны успешно могут быть использованы энергоэффективные отечественные образцы печей, технические решения по их модернизации и совершенствованию технологий.

В ряде случаев существенная экономия энергоресурсов достигается за счет использования индукционного нагрева взамен печного. Хорошим примером тому является Минский автомобильный завод [15, 16]. Мы уже ранее приводили примеры внедрения разработок на Минском автозаводе, выполненных под руководством д-р техн. наук П. С. Гурченко и канд. техн. наук А. И. Михлюка. В частности, в 2009 г. внедрен технологический процесс и комплекс оборудования для термообработки с применением индукционного нагрева труб каркасов автобусов. Такая обработка по сравнению с печной обеспечивает одновременное повышение и прочности труб и их пластичности, что повышает долговечность работы каркасов автобусов при одновременном снижении затрат электроэнергии на термообработку. Годовой экономический эффект в ценах сентября 2009 г. составил 178,4 млн. руб. В том числе экономия энергоресурсов - 224,1 тыс. кВт ч, природного газа - 560,9 тыс. м³.

Освоена также объемно-поверхностная закалка с нагревом ТВЧ сателлитов дифференциала моста автомобиля. Упрочнено по этой технологии 10 тыс. деталей. По сравнению с традиционной цементацией стоимость применяемой стали снижена в 1,5 раза, энергозатраты - в 11,5 раз. Экономия на обработанную партию составила 5,1 тыс. кВт ч электроэнергии и 0,9 тыс. м³ газа.

Дорогостоящий нагрев заготовок в газовых печах под пластическое деформирование на Минском автозаводе вытесняется индукционным нагревом токами высокой частоты. Наряду с устранением угара и обезуглероживания поверхности поковок применение индукционного нагрева позволило полностью механизировать загрузку заготовок в нагревательных устройствах и их поштучную подачу к рабочему месту кузнеца, значительно повысить культуру производства в кузнечном цехе. В настоящее время в кузнечном цехе МАЗ на 14 индукционных установках производят заготовки более 370 наименований массой от 50 г до 45 кг.

Однако широкое распространение таких технологий на другие предприятия Республики Беларусь сдерживается отсутствием у них современных аппаратных средств индукционного нагрева. Прове-

денный в рамках ГППНИ «Металлургия» мониторинг наличия, технического состояния и применения оборудования индукционного нагрева на 60 предприятиях Республики Беларусь показал, что в наличии находится и используется около 500 высокочастотных преобразователей. Причем около 50% из них машинные генераторы, 38% - ламповые, 10% - тиристорные и только 3% - транзисторные генераторы. При этом 70% эксплуатируемых генераторов имеют 100%-ный износ, 20%-износ более 50% и 10% - износ менее 50%.

Следует отметить, что эксплуатируемые в настоящее время установки индукционного нагрева импортного (в основном российского) производства. Вместе с тем, РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» под руководством канд. техн. наук О. А. Головача разработаны и изготовлены полупроводниковые (транзисторные) генераторы для замены электромашинных преобразователей в оборудовании индукционного нагрева и термообработки сталей и сплавов [17]. За период с 2005 по 2009 г. разработаны и изготовлены 25 преобразователей мощностью от 60 до 250 кВт с частотой генерации от 2,4 до 66 кГц. Учитывая низкий КПД электромашинных генераторов (на уровне 70-75%) и высокий КПД транзисторных генераторов (не менее 92%), экономия электроэнергии на одной электротермической установке установленной мощностью 250 кВт при двухсменной работе составляет до 16 500 кВт ч/год. Высокочастотные преобразователи (от 22 до 66 кГц) разрабатывались с целью замены ламповых генераторов. КПД лампового генератора не превышает 60%, а транзисторного - не менее 92%. Причем стоимость генераторной лампы в ценах на 01.01.2009 г. составляет около 25000 тыс. руб. при сроке службы не более 5000 ч. Таким образом, даже без учета стоимости эксплуатационных расходов только за счет экономии электроэнергии расчетный экономический эффект от внедрения одного транзисторного генератора предполагается до 25000 тыс. руб. в год.

ОАО «МАЗ» планирует в будущем совместно с Физико-техническим институтом и Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси, Белорусским национальным техническим университетом разрабатывать и изготавливать оборудование для:

- методического или поштучного (локального или полного) нагрева цилиндрических заготовок диаметром 12-150 мм и плоских заготовок длиной до 2200 мм для обработки давлением (ковка, штамповка, высадка, гибка, завивка);
- электроконтактного нагрева под гибку, навивку и закалку заготовок пружин из стали диаметром 10-18 мм;

- поверхностной индукционной закалики цилиндрических (наружных и внутренних), плоских, сферических, шлицевых, зубчатых и фасонных поверхностей деталей размерами от 5 до 2500 мм;
- объемно-поверхностной закалики деталей из сталей пониженной прокаливаемости в свободном состоянии и штампах;
- термической индукционной обработки длинномерного проката (пруток, трубы диаметром 16-38 мм, прямоугольные трубы с размером грани до 120 мм и др.);
- термической индукционной обработки сыпучих металлических материалов (металлическая дробь, стружка и др.) производительностью до 1,2 т/ч;
- индукторов для нагрева и закалики ТВЧ изделий всех типов (имеется каталог разработанных индукторов более 3200 типоразмеров) для нагрева, закалики, пайки, плавки и других термических операций).

Новое для республики направление развивают Физико-технический институт НАН Беларуси, Белорусский национальный технический университет, Институт порошковой металлургии и другие организации страны в области разработки теплоизоляционных и огнеупорных материалов из местного и синтезированного сырья для тепловых агрегатов металлургического, литейного и термического оборудования, в том числе в качестве футеровочных.

Например, Физико-техническим институтом НАН Беларуси под руководством д-р техн. наук А. Т. Волочко разработаны термостойкие защитные покрытия, набивные массы, огнеупоры экзотермического синтеза [18]. Работы по термостойким материалам успешно также развиваются в Институте порошковой металлургии НАН Беларуси [19]. На следующую пятилетку в подпрограмму «Металлургия» включено амбициозное комплексное задание, которое потребует серьезных фундаментальных и прикладных исследований и должно завершиться выпуском опытных партий таких материалов. Прежде будет проведен мониторинг, изучена потребность в них, возможность импортозамещения.

Ряд работ металлургического направления связан с созданием упрочняющих технологий для металлургического и кузнечно-прессового оборудования. Так, Белорусским государственным аграрным техническим университетом (под руководством канд. техн. наук Г. Ф. Бетени) с использованием печного и индукционного нагрева, термопластической обработки на станах продольной и поперечной прокатки, диффузионного намораживания износостойких сплавов освоен комплекс технологий

изготовления сменных деталей рабочих органов почвообрабатывающих, посевных и кормоуборочных машин [20] (ГНТП «Белсельхозмеханизация»). Начиная с 2009 г. изготовлено около 54000 изделий, в том числе оборотных долот 45119 шт., лемехов 5370 шт., ножей измельчающих аппаратов 752 шт., ножей косилочных 1000 шт., дисков-лущильников 200 шт., зубьев роторных борон 680 шт. (суммарной стоимостью около 1,2 млрд. руб.). Переоснащение термических участков предприятий, изготавливающих детали (ПРУП «Минский завод шестерен», ОАО «Брестский электромеханический завод», ОАО «Бобруйскагропромаш», ОАО «Оршаагропромаш», ОАО «Лидеельмаш» и др.), ведется с использованием отечественного оборудования: транзисторных генераторов для индукционного нагрева (НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства), нагревательных печей (ЗАО «АТЛАНТ» БСЗ), станов продольной и поперечной прокатки (Физико-технический институт НАН Беларуси) и др.

ОАО «Белкард» разработана и внедрена технология изготовления и термической обработки карданных валов из сталей пониженной прокаливаемости, заменяющих дорогостоящие легированные стали, основанная на сочетании глубинного прогрева и двухстадийного охлаждения. В первый год освоения выпущено продукции на 464,3 тыс. у. е. (ГНТП «Технологии и оборудование машиностроения»).

Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси (под руководством д-р техн. наук П. Л. Мариева и д-р техн. наук В. И. Моисеенко) совместно со специалистами РУП «БелАЗ» проводится комплекс работ по карьерным самосвалам особо большой грузоподъемности [21]. Например, разработаны параметры технологических процессов термической обработки сталей при изготовлении крупногабаритных зубчатых колес (диаметром до 1500 мм). Внедрение указанных процессов в производство позволило значительно улучшить обрабатываемость стали при формировании зубьев, увеличить стойкость инструмента (фрез, долбяков), в 3 раза снизить энергозатраты на операции закалики и получить экономический эффект 500 млн. руб. в год. Этим институтом разработана технология поверхностного модифицирования узлов металлургического и кузнечно-прессового оборудования [22]. Создана технологическая установка для формирования модифицированных покрытий гибким инструментом (руководитель работ канд. техн. наук М. А. Леванцевич). Нанесение поверхностно-модифицированных слоев с наноразмерными наполнителями из ультрадисперсных алма-

зов снижает коэффициент трения в 2,0-2,5 раза, увеличивает несущую способность в 2,2-2,3 раза. Изучение условий эксплуатации деталей металлургического оборудования проводилось в рамках контракта на металлургическом комбинате POSCO (Республика Корея), кузнечно-прессовой и штамповой оснастки - на ПРУП «МЗАЛ им. П. М. Машерова, РУПП «Оршанский станкостроительный завод «Красный борец».

Имеются также примеры разработок по созданию приборов контроля технологических параметров печного оборудования, структуры и характеристик полуфабрикатов и деталей.

Гальваническое производство

Научным лидером этого направления является Белорусский государственный технологический университет (ректор И. М. Жарский). Начиная с 1980 г. им подготовлено около 1000 специалистов по специальностям гальванических производств. Этим университетом, а также НИИ Физико-химических проблем БГУ (директор Т. В. Гаевская) и Витебским БелГПИ Минпрома (гл. инж. С. В. Лазовский) выполнен комплекс исследований и разработок по созданию эффективных процессов электрохимического осаждения металлов и сплавов, очистки электролитов, создания композиционных покрытий, а также по проектированию и реконструкции гальванических производств, схем рекуперации электролитов [23-25].

С точки зрения производства гальванических линий наиболее продвинутым является ООО «Стеклопласт» (г. Гродно). С 2000 г. это предприятие (директор А. В. Лазовский) специализируется на изготовлении, поставке, монтаже полнокомплектных механизированных и автоматизированных линий, а также очистных сооружений. За 2009-2010 гг. им внедрено на предприятиях республики 17 образцов гальванического оборудования.

В текущем году ООО «Стеклопласт» активизировало производственную деятельность. В настоящее время это крупнейшее белорусское предприятие по проектированию, изготовлению, монтажу гальванических линий, участков нейтрализации, очистке сточных вод, а также по изготовлению емкостного оборудования из пластмасс. В 2010 г. на разных стадиях (поставка, изготовление, разработка предложений) выполняются работы по гальваническим производствам предприятий РУП ДП «Зенит» (г. Могилев), ОАО «Стародорожский механический завод (филиал РУПП «БелАЗ»)), УП «КБТЭМ-СО» ГНПО «Планар» (г. Минск), РУПП «Витязь» (г. Витебск), ОАО «Белкард» (г. Гродно), ЗАО «Каскад» (г. Лида) и др.

Суммарное ресурсопотребление гальванических линий этого предприятия в большинстве случаев в 3-5 раз ниже большинства действующих аналогов. Использование предлагаемого оборудования позволяет уменьшить расход энергетических ресурсов в 3-5 раз, снизить потребление воды на промывные операции в 10-100 раз, в отдельных случаях организовать бессточную систему промывки, свести до минимума затраты на обезвреживание отработанных растворов и очистку стоков, повысить качество наносимых покрытий, улучшить экологическую ситуацию и культуру производства.

В области экологии предприятие проектирует, изготавливает, поставляет и запускает любые очистные сооружения для гальванического производства, химической, электронной, радиотехнической и других отраслей промышленности со всем оборудованием автоматизации.

ООО «Стеклопласт» подготовлены предложения по поэтапной реконструкции собственными силами гальванических производств страны.

Белорусским государственным технологическим университетом по заказу РУП «МТЗ» в рамках хозяйственного договора разработана технология утилизации гальванического шлама с целью получения технического продукта «Ферригидроксид». Получаемый продукт может применяться в качестве флюсующей добавки в производстве керамических и строительных материалов (керамзита, кирпича, аглопорита) для понижения температуры обжига, а также в производстве железосодержащих пигментов для лакокрасочных и строительных материалов. Разработаны технические условия «Продукт технический «Ферригидроксид» и технологический регламент «Производство технического продукта «Ферригидроксид»». В настоящее время РУП «МТЗ» перерабатывает все накопленные в цехах шламы (всего 90 т), поставляет этот продукт как флюсующую добавку на Петриковский керамзитовый завод для производства керамзита. Работа продолжается в направлении создания на основе гальваношламов импортозамещающих пигментных материалов для нужд промышленности Республики Беларусь.

Научно-исследовательский институт Физико-химических проблем БГУ разработал и внедрил технологические процессы электрохимического осаждения покрытия никель-бор на детали преобразовательной техники РУП «Молодечненский радиозавод «Спутник», покрытия никель-бор/медь/никель-бор при изготовлении изделий спецтехники ОАО «БелОМО ММЗ им. С. И. Вавилова», покрытия никель-бор/золото при изготовлении кон-

тактов измерительных приборов медицинского назначения на ОДО «Диатроник» (подпрограмма «Малотоннажная химия» ГНТП «Химические технологии и производства»).

Различные варианты технологий нанесения покрытий на основе никель-бор в период 2006-2010 гг. внедрены на предприятиях ОАО «БелОМО ММЗ им. С. И. Вавилова», РУП «Молодечненский радиозавод «Спутник», ОДО «Диатроник», ОАО «Экран» (г. Борисов), УП «Минский электромеханический завод», ЧУП «ЭНВА» ОО БелТИЗ» (г. Молодечно), РУП ДП «Зенит». Объем выпущенной продукции составил более 26.2 млн. изделий на сумму 5 640 тыс. дол. США. Основной объем выпущенной продукции экспортировался в Россию, Украину, Молдову и Азербайджан.

В рамках вышеназванной ГНТП этим институтом на участке печатных плат ОАО «Минский часовой завод» внедрен пероксидно-сульфатный раствор травления для меди, характеризующийся более низкой стоимостью и более высокой экологичностью по сравнению с используемым ранее персульфатным раствором. В первом полугодии 2010 г. изготовлено 2800 л раствора микротравителя, с использованием которого изготовлены и реализованы печатные платы на сумму 1016,0 млн. руб.

НИИ ФХП БГУ имеет Сертификат № 3/7084-2 на выпуск продукции собственного производства, выданный Белорусской торгово-промышленной палатой. На базе НИИ ФХП БГУ выпущено и реализовано потребителям по договорам поставки борсодержащей композиции для электрохимического осаждения покрытия сплава никель-бор на изделия различного функционального назначения на сумму 75,8 млн. руб. (ОАО «БелОМО ММЗ им. С. И. Вавилова», ОАО «Экран», УП «Минский электромеханический завод», ЧУП «ЭНВА» ОО БелТИЗ» (г. Молодечно), ПРУП «Завод «Могилевлифтмаш», РУП ДП «Зенит»).

ОАО «УПНР» Министерства промышленности Республики Беларусь (директор М. Н. Кистень) разработана конструкция и освоен выпуск выпрямителей с промежуточным инвертором для гальванических производств. До конца года будет отгружено 38 шт. на сумму 675 млн. руб. Выпрямитель по габаритам и массе меньше в 5-7 раз применяемых аналогов, позволяет получать 10-20% экономии электроэнергии.

Научно-организационное сопровождение

Важным событием для научных учреждений страны, занимающихся тематикой гальванических производств, является разработка на 2011-2015 гг. новой подпрограммы научных исследований «Галь-

ванические технологии и оборудование» «Создание и совершенствование действующих технологий и оборудования гальванических и их замещающих защитных покрытий на металлах и сплавах, полимерных материалах» (головная организация Белорусский государственный технологический университет). Подпрограмма признана стать основой научно-технического обеспечения гальванических и их замещающих производств. Учреждениями и организациями республики (БГТУ, БГУ, НИИ ФХП БГУ, БИТУ, НТП БИТУ «Политехник», БГИР, БрГТУ, ПГУ, ИОНХ НАН Беларуси, НПО ПМ НАН Беларуси, ФТИ НАН Беларуси, ИММС НАН Беларуси, ОИМ НАН Беларуси, ИТМ НАН Беларуси, Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь, РУП «МТЗ», БелТЭИ, БелНИЦ «Экология») будут выполняться 28 проектов, целями которых являются разработка и внедрение новых, совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических, химических и конверсионных покрытий, обладающих улучшенными коррозионными, функциональными, защитными свойствами; очистки сточных вод и вентиляционных выбросов; утилизации и переработки гальванических шламов и отходов производства, обеспечивающих снижение энергетических и материальных затрат гальванических производств; снижение воздействия гальванических производств на окружающую среду; решение проблем импортозамещения. На основе мониторинга гальванических производств будут разработаны предложения по выводу из производства энергозатратных, устаревших гальванических линий, поэтапной замене оборудования силами отечественных производителей.

Полностью под нужды научного обеспечения Программы технического переоснащения и модернизации литейных, термических, гальванических и других энергоемких производств на 2010-2015 гг. построен проект подпрограммы научных исследований «Металлургия». Ее тематика расширена. Кроме литья и металлургии в чистом виде, в ней появились разделы «Технология и оборудование термического производства», а также «Технология обработки металлов давлением». По последнему разделу в качестве первоочередных должны быть выполнены задания по мониторингу кузнечно-прессовых, прокатных и волочильных технологий и оборудования предприятий РБ, определению потребности в модернизации и замене оборудования, выработке рекомендаций по техническому переоснащению этих видов производств, организации производства определенных типов оборудования в Республике Беларусь (Белорусский националь-

ный технический университет, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Физико-технический институт НАН Беларуси). Среди других разработок этого раздела: разработка технологических основ изготовления заготовок крупногабаритных подшипников с использованием метода кольцераскатки (Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Белорусский автомобильный завод), отработка режимов пластической деформации конструкционных сталей при минимально допустимых температурах нагрева с целью снижения энергопотребления (Белорусский национальный технический университет, Физико-технический институт НАН Беларуси) и др.

Из новых заданий по литейно-металлургическому производству: разработка методологии создания ресурсосберегающего производства крупногабаритных литых элементов для несущих деталей и конструкций машин (Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, ОАО «БЕЛНИИЛИТ»); технологии производства высокопрочного чугуна с особыми свойствами для тяжелонагруженных компонентов общемашиностроительного и транспортного применения (Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Белорусский государственный университет транспорта, Белорусский национальный технический университет, Белорусский государственный технологический университет); теоретических и технологических основ твердо- и жидкофазного восстановления полидисперсных металлосодержащих отходов и оборудования для осуществления этих процессов (Белорусский национальный технический университет, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого); теоретических основ создания среднечастотных индукционных плавильных систем на примере печей емкостью 50 кг и создание на их базе технологического процесса плавки сплавов черных и цветных металлов (Белорусский национальный технический университет, ЗАО «АТЛАНТ» БСЗ).

Именно в эту подпрограмму включены комплексные задания по созданию и производству теплоизоляционных и огнеупорных материалов; разработке энергосберегающих технологий термообработки, в частности противоблоксного отжига конструкционных сталей; созданию печного оборудования и оборудования индукционного нагрева; замене высоколегированных хромоникелевых сталей на экономно-легированные и др.

Работы по научному обеспечению нашли всестороннюю поддержку со стороны промышленных предприятий: лидера металлургии страны Белорусского металлургического завода, ОАО «Мин-

ский тракторный завод», ОАО «МАЗ», РУП «БелАЗ», ЗАО «АТЛАНТ», БСЗ ПО «Гомсельмаш», ПРУП «Минский моторный завод», которые сами располагают сильной научно-технической базой, кадровым потенциалом и без которых невозможно продвижения отечественных исследований и разработок в производство. Эти и другие предприятия собственными силами выполняют много технических мероприятий по реконструкции и модернизации литейно-металлургического оборудования, увеличению использования вторичных энергоресурсов, установлению отечественных стержневых автоматов и очистных камер, замене парка машинных преобразователей ТВЧ, внедрению оборудования индукционного нагрева, модернизации термических и нагревательных печей.

Важное значение для активизации научного обеспечения Программы имеют научно-организационные мероприятия, проводимые органами государственного управления, институтами и предприятиями. Среди них можно отметить Белорусский промышленный форум, Международную научно-техническую конференцию «Литейное производство и металлургия». Беларусь, семинары на Минском тракторном заводе, научно-технические конференции в Физико-техническом институте НАН Беларуси, Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси и др.

Выводы

Таким образом, усилиями Госстандарта Республики Беларусь, НАН Беларуси, Министерства промышленности Республики Беларусь, Министерства образования Республики Беларусь, научных организаций и промышленных предприятий, ученых и инженеров-литейщиков, металлургов, термистов и гальваников в стране обозначилась положительная тенденция развития исследований и разработок, направленных на научное и научно-техническое обеспечение литейных, термических и гальванических производств. Получен ряд серьезных научных результатов как фундаментального, так и прикладного значения. Созданы экспериментальные и опытные образцы оборудования и технологий. Кроме закупок оборудования, которое сегодня нерационально производить в республике, предприятия своими силами проводят техническое перевооружение и модернизацию устаревшего оборудования. Разработаны и выпущены промышленные образцы литейного, термического и гальванического отечественного оборудования. Имеются хорошие перспективы освоить их выпуск и поэтапно расширять его применение в действующем производстве.

Главное, что нам всем удалось достичь в деле научного обеспечения Программы технического перевооружения и модернизации литейных, термических, гальванических и других энергоемких производств – консолидировать труд многих коллективов ученых и инженеров независимо от ведомственной принадлежности их организаций в решении в республике своими силами многих вопросов технического перевооружения энергоемких производств. Это движение приобрело необратимый характер и обязательно приведет к повышению эффективности работы выше-названных видов производств страны.

Литература

1. Марукович Е. И. Технологии литья и металлургии. Мн.: Белорусская наука, 2010.
2. Мельников А. П. Белорусские разработки в области ресурсосбережения в литейном производстве // Литье и металлургия. 2009. № 1. С. 40-46.
3. Чичко А. Н., Кукуй Д. М., Соболев В. Ф. и др. Математическое моделирование траектории движения неметаллических частиц в промежуточном ковше МНЛЗ // Литье и металлургия. 2009. № 1. С. 102-109.
4. Станкевич Ю. А., Тимошпольский В. И., Павлюкевич Н. В., Герман М. Л., Гринчук П. С. Математическое моделирование нагрева и плавления металлошихты в дуговой сталеплавильной печи // Инженерно-физический журнал. 2009. Т. 82. №2. С. 227-241.
5. Марукович Е. И., Брановицкий А. М., Лебединский Ю. А. Моделирование роста дендритов при кристаллизации с малым переохлаждением силуминовых сплавов на основе метода фазового поля // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2009. № 1. С. 4-13.
6. Барановский Э. Ф., Пумпур В. А., Ильюшенко В. М., Барановский К. Э. Компьютерное моделирование теплообмена при затвердевании и охлаждении отливки из ИЧХ в комбинированных формах / Сб. тр. «Технология литья и металлургия». К 40-летию Института технологии металлов НАН Беларуси. Мн., 2010. С. 73-85.
7. Трусова И. А., Ратников П. Э., Менделев Д. В. и др. Исследование влияния скорости вытягивания непрерывного слывового слитка на условия его охлаждения // Литье и металлургия. 2009. № 4. С. 133-139.
8. Ласковнев А. П. Развитие методов порошковой металлургии алюминия в ФТИ НАН Беларусі // Современные методы и технологии создания и обработки материалов (15-17 сентября 2010 г.): Сб. материалов. Кн. 3. Пленарные доклады. Мн.: ФТИ НАН Беларусі, 2009. С. 178-193.
9. Комаров О. С., Волосатиков В. И., Проворова И. Б. и др. Исследование параметров технологического процесса извлечения никеля из никельсодержащих отходов // Литье и металлургия. 2006. № 3. С. 81-83.
10. Комаров А. И., Комарова В. И., Шипко А. А. Физико-химические основы in-situ технологии создания керамических тугоплавких наполнителей перспективных аломоматричных композитов // Сб. материалов 50-го Междунар. науч. симпозиума «Актуальные проблемы прочности». Витебск, 2010. С. 91-94.
11. Немененок Б. М., Задруцкий С. П., Бежок А. П., Кудравец Н. И. Оценка экологической безопасности плавки и внепечной обработки алюминиевых сплавов // Литье и металлургия. 2008. № 3. С. 171-174.
12. Гринчук П. С., Русецкий А. М. Состояние парка промышленных печей Республики Беларусі и перспективы его модернизации // Наука и инновации. 2010. № 12.
13. Трусова И. А., Менделеев Д. В., Корнеев С. В., Ратников П. Э. Анализ и выбор расчетных методик эффективности сжигания топлива в газопламенных печах // Литье и металлургия. 2009. № 4. С. 157-160.
14. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Несенчук А. П., Менделеев Д. В., Герман М. Л. Тепловое обоснование выбора энергоэффективной футеровки нагревательных и термических печей машиностроительных предприятий // Изв. вузов и энергет. объедин. СНГ. Энергетика. 2009. № 4.
15. Гурченко П. С. Пути перевооружения энергоемких производств на ОАО «МАЗ» в 2008-2009 годах и перспективы развития на 2010-2012 годы // Техника, экономика, организация. 2009. № 4. С. 12-14.
16. Михлюк А. И., Гордиенко А. И., Вегера И. И. Индукционная термическая обработка: Анализ, состояние и перспективы развития // Литье и металлургия. № 1. 2010.
17. Головач О. А., Хайтин И. А., Викторович В. В., Михлюк А. И. Разработка транзисторных преобразователей для электротехнологий // Сб. тр. МНТК «Теория и практика энергосберегающих термических процессов». Мн., 2008. С. 56-59.
18. Волочко А. Т., Подболотов К. Б., Жукова А. А. Керамические огнеупорные и тугоплавкие материалы и изделия различного назначения // Современные методы и технологии создания и обработки материалов (15-17 сентября 2010 г.): Сб. материалов. Кн. 3. Пленарные доклады. Мн.: ФТИ НАН Беларусі. 2009. С. 194-205.
19. Шмурадко В. Т., Ильюшенко А. Ф., Фомихина И. В., Лисовская Ю. О., Дроздов А. В. Структура и свойства тиглей и защитных экранов на основе $Al_2O_3-ZrO_2-SiO_2$, получаемых методом импульсного прессования, для металлургической промышленности // Огнеупоры и техническая керамика. 2008.
20. Бетеньга Г. Ф., Литовчик Д. П., Голубев В. С. Методы повышения конкурентоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники // Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Мн., 2007. С. 85-92.
21. Мариев П. Л., Егоров А. Н., Моисеенко В. И., Зотов А. А., Кулешов А. А. Карьерные самосвалы большой грузоподъемности // Проектирование, технологии, маркетинг. Мн.: Интегралполиграф, 2008.
22. Леванцевич М. А., Максимченко Н. Н., Зольников В. Г. Повышение эксплуатационных свойств трибоспряжений нанесением покрытий металлическими щетками. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2005. X» 1. С. 7-72.
23. Курило И. И., Жарский И. М. Устойчивость продуктов анодного окисления сплава Co-Cu-Sn в кислых средах // Весці НАН Беларусі Сер. хім. навук. 2008. № 1. С. 48-53.
24. Цыбульская Л. С., Гаевская Т. В., Бекиш Ю. Н., Позняк С. К. Электрохимическое осаждение борсодержащих покрытий на основе никеля // Химические проблемы создания новых материалов и технологий. Мн.: БГУ. 2008. Вып. 3. С. 90-103.
25. Кругликов С. С., Черник А. А. Опыт применения погружных электрохимических модулей для утилизации отработанных растворов химического никелирования // Гальванотехника и обработка поверхности. 2010. Т. XXVIII. № 1. С. 35-36.