

ГПНИ
«МЕТАЛЛУРГИЯ»

The main results of carrying out of state program of applied scientific research «Metallurgy» both in the field of theoretical and practical developments are given.

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

ПРОГРАММА «МЕТАЛЛУРГИЯ» – ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Металлургия является одним из ключевых производственных звеньев любого современного промышленно развитого государства. Эта отрасль имеет важное значение для развития всего народнохозяйственного комплекса Республики Беларусь. За относительно короткий промежуток времени в республике создано крупнейшее передовое предприятие металлургической отрасли – Белорусский металлургический завод (РУП «БМЗ»), которое занимает ведущее место в промышленном комплексе и экономике Республики Беларусь, являясь крупнейшим поставщиком наукоемкой конкурентоспособной металлопродукции высокого качества (катанки, строительной арматуры, металлокорда и др.), производимой на основе ресурсосберегающих, прогрессивных технологических процессов, отвечающих мировым критериям технической новизны. Металлургические производства в той или иной степени присутствуют практически на всех крупных промышленных производствах Беларуси: ОАО «Минский автомобильный завод», ОАО «Белорусский автомобильный завод», ПО «Минский тракторный завод», ОАО «Минский завод отопительного оборудования», ОАО «Гомельский литейный завод «Центролит», ОАО «Могилевский металлургический завод», на которых в больших или меньших масштабах применяются технологии металлургии, литья, порошковой металлургии и смежных производств. В общем на предприятиях Беларуси сегодня функционирует около 300 цехов и участков литейного, металлургического и термического производств.

Стратегия дальнейшего развития технологических процессов сталеплавильного, литейного, прокатного, термического производств диктует необходимость получения качественных сталей и сплавов и создания на этой основе наукоемкой металлопродукции. Это предполагает вопросы проектирования, технического переоснащения и модернизации литейно-металлургического и терми-

ческого оборудования, включая плавильные печи, установки внепечной обработки стали, машины непрерывной разливки стали, прокатные станы, нагревательные и термические печи, волочильное оборудование и др. Необходимы энергоэффективные технологии.

Для решения этих вопросов в 2005 г. была сформирована Государственная программа прикладных научных исследований «Создание высокоэффективных технологических процессов и оборудования для развития металлургического комплекса Республики Беларусь» (ГПНИ «Металлургия»). Программа утверждена Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 5 мая 2005 г. № 462 и Постановлением Президиума Национальной академии наук Беларуси от 31 мая 2005 г. № 42. Ее основная цель заключалась в том, чтобы на основании использования научного потенциала страны провести совершенствование существующих и разработку новых технологических процессов литья и металлургии, в том числе порошковой, с целью повышения качества, конкурентоспособности и экспортного потенциала в этих производствах и отраслях их применения. Исходя из этого, основные задачи программы заключались в:

- разработке технологий и оборудования литейного производства для получения высококачественных отливок и заготовок из специальных чугунов, сталей и сплавов;
- создании энерго- и ресурсосберегающих процессов и технологий в металлургии, порошковой металлургии, позволяющих снизить топливopотребление, окислительно-восстановительные процессы;
- разработке технологий обработки металлов давлением и термообработки, принципов проектирования современного нагревательного оборудования и предложений по сокращению энергопотребления и уменьшению сроков окупаемости.

Основные результаты

За прошедшие пять лет в рамках выполнения программы получен ряд важных результатов как в области теоретических, так и практических разработок. Высокий научный уровень разработок подтверждается, в частности, тем, что по результатам выполнения заданий опубликовано более 1000 научных работ, в том числе 30 монографий, учебников и учебных пособий, получены 162 патента, создано 150 методов и методик исследований.

Среди наиболее важных и востребованных разработок можно выделить следующие.

В области литейно-металлургического производства

Выполнен ряд теоретических исследований, в том числе:

- разработаны математические методы моделирования процессов непрерывной разливки сталей на этапах «промежуточный ковш – кристаллизатор» в машине непрерывной разливки сталей и затвердевания расплава в тонкостенной форме;
- математические модели и программы численного моделирования процессов тепло- и массообмена среды в области шихты и «болота», температурных полей в отливке и кристаллизаторе;
- статистические модели для совершенствования технологических процессов различных процессов металлургического производства;
- численное моделирование температурных полей при затвердевании отливки «фланец» из сплава А380 в процессе литья под давлением.

Разработанные математические модели позволяют оптимизировать процессы непрерывной разливки сталей и литья под давлением в тонкостенные формы, плавления в электропечах, получения отливок с заданными свойствами и структурой. Основные разработчики – БНТУ и ИТМ НАН Беларуси. Разработки широко опубликованы. В качестве примера приведем две публикации [1, 2].

Среди практических разработок отметим следующие.

Метод литья полых цилиндрических заготовок из чугуна, позволяющий повысить износостойкость и прочностные свойства изделий, определяющих качество, надежность и долговечность машин (ИТМ НАН Беларуси). Для реализации новой технологии спроектированы и изготовлены специализированное оборудование и технологическая оснастка [3]. Создано ресурсно- и энергосберегающее безотходное и экологически безопасное производство широкой гаммы изделий типа полых тел вращения ответственного назначения для авто-, тракторно- и станкостроения, промышленности строительных мате-

риалов, подвижного железнодорожного состава, агропромышленного комплекса и других отраслей промышленности. Новой продукцией полностью обеспечивается потребность МТЗ, БелАЗа, МАЗа, Гомельского завода пусковых двигателей, Минского завода колесных тягачей и других предприятий страны.

Методы и средства получения непрерывнолитых заготовок (ИТМ НАН Беларуси). В результате внедрения повысились стабильность и производительность процесса литья, качество непрерывнолитого слитка, расширилась номенклатура выпускаемых заготовок.

Процессы литья закалочным затвердеванием и литья в струйный кристаллизатор, которые позволяют получать заготовки с наноструктурным эвтектическим кремнием, увеличивать производительность процесса литья заготовок в 3–5 раз, повысить механические свойства заготовок на 30%, исключать из технологического процесса литья применение экологически небезопасных модификаторов (ИТМ НАН Беларуси).

Технология производства базовых отливок моторной группы с применением стержней и форм холодного отверждения, позволяющая за счет увеличения прочности формы и сокращения массы отливок существенно повысить их механические свойства. Впервые в Республике Беларусь получена чугунная отливка головки блока цилиндров для 600-сильного двигателя внутреннего сгорания (ОАО «БЕЛНИИЛИТ»).

Технологические основы оптимальных методов смешивания компонентов формовочной смеси для производства стальных отливок массой от 120 до 400 кг, а также практические рекомендации по выбору составов песчаных формовочных смесей для производства крупного стального литья. Показана реальная возможность замены жидкостекольных формовочных смесей на песчаные (ОАО «БЕЛНИИЛИТ»).

Рекуперативные теплообменники для ваграночных установок. Разработанные технические решения и рекомендации были использованы при модернизации 10-тонной коксовой вагранки, установленной в литейном цехе Могилевского металлургического завода. Разработанный конвективный рекуператор обеспечивает нагрев 15 000 м³/ч воздуха до 350 °С при расходе дымовых газов 25 000 м³/ч и температуре 600 °С. Создана база для разработки типоразмерного ряда рекуперативных систем для плавильных печей различных типов, в том числе вагранок, газо- и жидкотопливных печей для плавки черных и цветных металлов (БНТУ).

Теоретические и практические подходы получения крупногабаритных отливок деталей несущих конструкций мобильных машин и сооружений, корпусных и несущих деталей редукторов большой единичной мощности, обладающих служебными свойствами, близкими или равными поковкам (ОИМ НАН Беларуси, ОАО «БелАЗ»).

В области металлургии черных и цветных металлов

Разработана технология изготовления из стальной заготовок деталей прокатного оборудования методом электрошлакового переплава (ИТМ НАН Беларуси), основанная на процессе плавления расходного электрода. В результате замедленной и строго направленной кристаллизации небольшого количества жидкого металла обеспечивается его высокая химическая и структурная однородность. Типичными представителями деталей, получаемых методом электрошлакового литья, являются заготовки штампового и режущего инструмента, крупногабаритных шестерен, колец, шкивов, зубчатых колес, а также различного вида вилки, проушины, корпуса, цапфы, биметаллические заготовки типа червячных колес, прокатных роликов и т. д. Биметаллические отливки бронза БрО12Ф – серый чугун СЧ20, полученные методом электрошлакового переплава, предназначены для изготовления червячных колес главного привода лифтов. Использование биметаллических заготовок колес вместо сборной конструкции позволяет существенно сократить количество промежуточных станочных операций при производстве червячных колес. Разработанная технология электрошлаковой наплавки биметаллических червячных колес серийно используется на РУП «Могилевлифтмаш».

Создан комплекс устройств для сушки стружечных отходов объемом более 1000 тыс. т/год, ее сепарирования от магнитных и слабомагнитных включений (ФТИ НАН Беларуси), 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 РУП «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.

Комплекс интересных работ выполнен по направлению, которое получит дальнейшее развитие и в следующей пятилетке, – «Модифицирование

железоуглеродистых и алюминиевых сплавов». Так, в ИТМ НАН Беларуси разработаны составы новых модификаторов на основе алюминий-кремниевых сплавов с высокодисперсной микроструктурой, содержащие добавки Mg, Ca и Ti [4, 5]. Впервые в мире разработан способ получения структурно-высокодисперсного силуминового модификатора литьем в струйный кристаллизатор. Разработаны способы ввода структурно-высокодисперсных силуминовых модификаторов. Получены опытные партии силуминовых модификаторов. Их использование в условиях действующих производств позволили на РУП «БМЗ» (г. Жлобин) измельчить микроструктуру стальных слитков в 2–4 раза, снизить ликвацию на 25%, уменьшить содержание серы в среднем на 10% и количество вводимого раскислителя на 25%. Разработаны новые принципы включения в алюминиевую матрицу дисперсных субмикро- и наноразмерных оксидов и нитридов (ОИМ НАН Беларуси).

Термическое производство, печи

Институтом тепло- и массообмена и Белорусским национальным техническим университетом выполнен ряд теоретических и экспериментальных работ по теплофизике и новым техническим решениям газовых и электрических нагревательных и термических печей. Совместно с организациями Минпрома проведен мониторинг печного оборудования [6]. По результатам проведенных работ, разработок ЗАО «АТЛАНТ» БСЗ начат выпуск отечественного печного оборудования (ЗАО «АТЛАНТ», ИТМО). ИТМО ведутся работы по созданию пяти опытных образцов электропечей, предусмотренных планом разработки опытных образцов энергоэффективного печного оборудования, утвержденным Первым заместителем Премьер-Министра Республики Беларусь В. И. Семашко.

Разработана математическая модель тепловой обработки стали в нагревательных печах [7]. Выполнен комплекс экспериментальных исследований по поиску оптимальных характеристик нагрева цилиндрических трубных заготовок диаметром 150 мм до температуры закалки в камерной печи с использованием сводовой плоскопламенной и боковых короткофакельных горелок (БНТУ).

Выполнены разработки по нормированию удельного расхода топлива в нагревательных печах, ресурсосбережению при эксплуатации газопламенных агрегатов, оптимизации нагрева массивных изделий [8]. Создана методика подбора слоев волокнистой футеровки рабочей камеры промышленных нагревательных камерной и проходной печей [9, 10]. Получены конструкции энергоэффективных футеровок при различных темпе-

ратурных 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.

Индукционные технологии и оборудование

Проведен мониторинг наличия оборудования на промышленных предприятиях Республики Беларусь и его состояния (ФТИ, ОИМ НАН Беларуси). Как показал анализ, 70% используемого оборудования требует замены или модернизации. Начаты разработки и производство отечественных установок и генераторов ТВЧ (ОАО «МАЗ», НТЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, ФТИ, ОИМ НАН Беларуси).

Разработаны методы и устройства, обеспечивающие регулируемый индукционный нагрев и контролируемое охлаждение обрабатываемых деталей (ОИМ НАН Беларуси, МАЗ). Освоена также объемно-поверхностная закалка с нагревом ТВЧ сателлитов дифференциала моста автомобиля. По этой технологии упрочнено 10 тыс. деталей. По сравнению с традиционной цементацией стоимость применяемой стали снижена в 1,5 раза, энергозатраты – в 11,5 раз, длительность цикла упрочнения – в 420 раз. Экономия на обработанную партию составила 5,1 тыс. кВт·ч электроэнергии и 0,9 тыс. м³ газа [11, 12].

Новые материалы и упрочняющие технологии в металлургии

Разработана технология поверхностного модифицирования узлов металлургического и кузнечно-прессового оборудования (ОИМ НАН Беларуси). Создана технологическая установка для формирования модифицированных покрытий гибким инструментом. Нанесение поверхностно-модифицированных слоев с наноразмерными наполнителями из ультрадисперсных алмазов снижает коэффициент трения в 2,0–2,5 раза, увеличивает несущую способность в 2,2–2,3 раза [13].

Разработана технология напыления износостойких покрытий (на никель-железной основе) на сложнопрофилированные поверхности крупногабаритных деталей прокатного производства (БНТУ). Технология позволяет восстановить функциональные свойства изношенных деталей, повысить ресурс их работы в 2–3 раза [14].

Ряд заданий программы посвящен разработке огнеупорных материалов. Проведены исследования по разработке огнеупорных алюмосиликатных и магнезиальных керамических материалов методом экзотермического синтеза, а также исследования их свойства при эксплуатации в тепловых агре-

гатах. Полученные СВС-мертели обладают повышенными прочностными свойствами по сравнению со стандартными шамотными (ФТИ НАН Беларуси) [15].

Разработаны экспериментальные образцы тиглей, тепловых экранов и чехлов для термопар, изготовленных из разработанных шихтовых составов, а также технология изготовления абразивного инструмента (ИПМ) [16].

Контрольно-измерительная аппаратура

Создан ряд диагностических приборов и комплексов:

- аппаратура контроля структуры белого чугуна в малогабаритных отливках массового производства перед отжигом на ковкий чугун (ОИМ НАН Беларуси), на основе которой введена в строй автоматизированная линия контроля отливок ниппелей в цехе ковкого и серого чугуна Минского завода отопительного оборудования [17]. Производительность линии свыше 50 000 отливок в сутки;
- спектрометрический комплекс для диагностики газовых сред металлургических печей и исследования эмиссионных характеристик газовых сред (ИФ НАН Беларуси);
- высокотемпературное тепловизионное устройство, предназначенное для визуализации тепловых полей в диапазоне 850–2200 °С (ИТМО НАН Беларуси);
- аппаратно-программный комплекс для бесконтактного контроля температуры при наличии посторонних источников излучения (ИТМО НАН Беларуси).

Результаты выполнения заданий программы используются при чтении курсов лекций и проведении практических занятий по дисциплинам «Современные проблемы теплофизики гетерогенных сред» на физическом факультете БГУ, «Обратные задачи математической физики» на факультете математической физики БГУ, «Теория формирования отливки», «Специальные вопросы ТМО», «Теоретические основы теплотехники», «Обработка металлов давлением», «Технология металлургического производства», «Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах», «Технология непрерывной разливки», «Общая теория печей», «Теория формирования отливки» для студентов БНТУ, «Теоретические основы теплотехники», «Специальные вопросы ТМО» – для студентов энергетических специальностей БНТУ, «Специальные методы сварки и резки» – на МТФ БНТУ.

В рамках выполнения заданий программы исполнителями защищены шесть докторских, восемь кандидатских, девять магистерских диссертаций.

Перспективы

В 2011–2015 гг. работы в указанных выше направлениях будут продолжены в рамках подпрограммы «Металлургия», которая является составной частью государственной программы научных исследований «Развитие научных основ механики технических систем, методов и средств их диагностики, создание и совершенствование технологических процессов в металлургии и машиностроении» (Механика, Техническая диагностика, Металлургия). Структура подпрограммы оптимизирована. Она содержит четыре раздела: металлургия черных и цветных металлов и сплавов, литейное и заготовительное производство, технологии обработки металлов давлением, технологии и оборудование термической обработки. Все 38 заданий подпрограммы направлены на научное обеспечение Программы технического переоснащения и модернизации литейных, термических, гальванических и других энергоемких производств на 2010–2015 гг.

Металлургия черных и цветных металлов и сплавов

Включенные в этот раздел задания подпрограммы направлены на:

- разработку и освоение новых высокоэффективных технологий выплавки металлов и сплавов, рециклинг металлоотходов, новых методов модифицирования железоуглеродистых и алюминиевых сплавов, теоретических и технологических принципов формирования структуры литейных высоколегированных наноматериалами сталей и сплавов;

- расширение номенклатуры отливок, производимых методом непрерывно-циклического литья намораживанием, разработку технологий литья высококачественных специальных сплавов;

- создание низкотоксичных инновационных препаратов для рафинирующей и рафинирующе-модифицирующей обработок сплавов и технологии получения износостойких литейных алюминиевых сплавов с использованием вторичных ресурсов и наноструктурированных керамических частиц;

- разработку технологий получения вспененных материалов из вторичных алюминиевых сплавов литейно-металлургическими способами для применения в качестве звуко- и теплоизолирующих материалов, а также наполнителей.

Литейное и заготовительное производство

Задания подпрограммы этого раздела направлены на:

- создание технологий и оборудования получения отливок для тракто-, двигателестроения, сельскохозяйственного машиностроения, станкостроения и вагоностроения; новых методов плавки металлических отходов,

диспергирования железоуглеродистых сплавов, литья под давлением, кристаллизации заготовок;

- разработку эффективных технологических схем и мероприятий, направленных на улучшение экологических показателей производства стали и чугуна в условиях металлургических и машиностроительных предприятий Республики Беларусь, технологий и оборудования для экологически чистого извлечения цветных металлов из низкосортных отходов производства;

- разработку способов литья и прокатки вторичного свинца, создание технологических процессов изготовления элементов радиационной защиты для атомной промышленности Беларуси из местного сырья.

Технологии обработки металлов давлением

В рамках этого раздела подпрограммы будут:

- выполнены исследования и разработки новых ресурсосберегающих технологий обработки металлов давлением при производстве плоских упругих элементов транспортных средств;

- разработаны научные и технологические основы энергосберегающего процесса прокатки-штамповки шатунов двигателей трактора МТЗ, высокоскоростного волочения высокоуглеродистой высокопрочной и ультравысокопрочной стальной проволоки, изготовления заготовок крупногабаритных подшипников с использованием метода кольцеракатки;

- разработаны новые материалы и упрочняющие технологии в металлургии;

- созданы и внедрены технологии упрочнения сплавов и деталей металлургического производства.

Технологии и оборудование термической обработки

Тематика заданий этого раздела включает:

- математическое моделирование тепловых потоков в нагревательных печах;

- разработку и изготовление опытных образцов проходной печи и закалочной ванны с псевдооживленным слоем для безокислительной термической обработки мелких стальных деталей, безмуфельного агрегата для нагрева и термической обработки крупногабаритных чугунных и стальных заготовок;

- организацию производства печного оборудования, оптимизацию процессов термической обработки сталей и сплавов, а также организацию опытного производства футеровочных материалов на основе местного, в том числе вторичного, сырья;

- разработку опытно-промышленных технологий и оборудования индукционной термообработки колец подшипников и длинномерных деталей

транспортных средств, производство установок и генераторов ТВЧ.

Решение поставленных задач невозможно без участия потенциальных потребителей произведенной в рамках программы научно-технической продукции. Поэтому все задания программы будут выполняться в тесном взаимодействии с ведущими предприятиями республики. Самое непосредственное участие в реализации про-

граммы примут такие предприятия, как РУП «Белорусский металлургический завод», ОАО «Минский автомобильный завод», ОАО «БелАЗ», РУП «Минский тракторный завод», ОАО «Белшина», Барановичский станкостроительный завод ЗАО «Атлант», ОАО «Гомельский литейный завод» «Центролит», ПО «Гомсельмаш», ОАО «Минский завод отопительного оборудования» и др.

Литература

1. Чичко А. Н., Кукуй Д. М., Соболев В. Ф., Лихоузов С. Г., Пивцаев В. В., Демин А. В. Математическое моделирование траектории движения неметаллических частиц в промежуточном ковше МНЛЗ // *Литье и металлургия*. 2009. № 1. С. 102–109.
2. Чичко А. Н., Матюшинец Т. В., Лихоузов С. Г., Соболев В. Ф., Чичко О. И. Модели и алгоритмы для САПР технологического процесса изготовления отливок, ориентированного под суперкомпьютер СКИФ // *Литье и металлургия*. 2009. № 1. С. 94–101.
3. Марукович Е. И., Бевза В. Ф., Бодяко А. М. Создание и промышленная реализация принципиально нового метода непрерывно-циклического литья намораживанием высокоизносостойких деталей техники // *METALLинформ*, 2010. № 6. С. 28–34.
4. Стеценко В. Ю., Ривкин А. И., Гутев А. П., Певнев А. М. Структурно-высокодисперсный силуминовый модификатор для чугунов и медных сплавов // *Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого*. 2009. № 1. С. 7–10.
5. Стеценко В. Ю. Структурно-высокодисперсные слитки из вторичных силуминов // *Вторичные металлы*. 2009. № 2. С. 50–54.
6. Гринчук П. С., Русецкий А. М. Модернизация парка промышленных печей // *Наука и инновации*. 2010. № 12. С. 49–52.
7. Тимошпольский В. И., Герман М. Л., Гринчук П. С., Кабишов С. М. Математическое моделирование сопряженного теплообмена в нагревательных печах с подвижным подом // *ИФЖ*. 2006. Т. 79. № 3. С. 3–11.
8. Трусова И. А., Менделев 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.
9. Менделев Д. В. Анализ применения современных волокнистых футеровочных материалов при создании нагревательных и термических печей машиностроительного производства // *Материалы 7-й Междунар. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике»*. Мн.: БНТУ, 2009.
10. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Несенчук А. П., Менделев Д. В., Герман М. Л. Теплотехническое обоснование выбора энергоэффективной футеровки нагревательных и термических печей машиностроительных предприятий // *Изв. Вузов и энергет. объедин. СНГ. Энергетика*. 2009. № 4.
11. Гордиенко А. И., Гурченко П. С., Михлюк А. И., Вегера И. И. Обработка изделий машиностроения с применением индукционного нагрева. Мн., 2009.
12. Шипко А. А., Вегера И. И., Михлюк А. И., Разработка методик расчета эффективности применения индукционного оборудования на промышленных предприятиях // *Материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Инновации в машиностроении»*, 26–29 октября 2010 г., Минск, ГНУ «ОИМ НАН Беларуси».
13. Леванцевич М. А., Максимченко Н. Н., Присевок А. Ф. Применение метода плакирования гибким инструментом для снижения трения в направляющих скольжения станков // *Машиностроение*. 2009. Вып. 24. С. 69–72.
14. Горанский Г. Г., Толстяк Э. Н. Ресурсосберегающие технологии газопламенного нанесения износостойких покрытий на детали оборудования металлургического производства // *Материалы 10-го Междунар. симпозиума «Технологии – оборудование – качество»*. Мн., 2007. С. 111–112.
15. Волочко А. Т., Згурская А. А., Подболотов К. Б. Получение керамических материалов системы алюминий-диоксид кремния – доломит методом СВС // *Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Промышленность. Прикладные науки. Материаловедение и металлургия. Серия В*. 2010. № 2. С. 110–114.
16. Шмурадко В. Т., Роман О. В., Ильющенко А. Ф., Фомихина И. В. Особенности создания защитных чехлов для термопар из огнеупорных материалов с использованием импульсных методов формования // *Сб. тр. Междунар. конф. огнеупорщиков и металлургов*. 23–24 апреля 2009 г.
17. Сандомирский С. Г. Методические и технические аспекты обеспечения заданной структуры отливок массового производства из ковкого чугуна // *Литье и металлургия*. 2010. № 3 (57). Спецвыпуск. С. 89–94.