

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.745.551

КУЛИКОВ

Сергей Александрович

Повышение механических свойств серого чугуна
в отливках моторной группы добавками на основе дисперсных
металлосодержащих отходов

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.16.04 – Литейное производство

Минск, 2023

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете и на Минском тракторном заводе.

Научный руководитель: **РУДНИЦКИЙ Федор Иванович**,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Машины и технология
литейного производства» Белорусского
национального технического
университета

Официальные оппоненты: **МАРУКОВИЧ Евгений Игнатьевич**,
академик НАН Беларуси, доктор техниче-
ских наук, профессор, лауреат Государ-
ственных премий БССР и Республики Бе-
ларусь, Заслуженный изобретатель Рес-
публики Беларусь

КОРОЛЕВ Сергей Павлович,
кандидат технических наук,
директор ОДО «Эвтектика»

Оппонирующая организация: Учреждение образования «Белорусский
государственный технологический
университет»

Защита состоится 21 апреля 2023 г. в 12⁰⁰ на заседании совета по защите
диссертаций Д 02.05.14 при Белорусском национальном техническом
университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 1,
ауд.202, тел. ученого секретаря +375297788465, e-mail: cadoxam@gmail.com.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского техни-
ческого университета.

Автореферат разослан 16 марта 2023 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.05.14,
кандидат технических наук, доцент



М.А. Садоха

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Предприятиям современного машиностроения, производящим продукцию ответственного назначения, важно получать детали с повышенными эксплуатационными характеристиками. Литые заготовки (отливки) для обеспечения этих характеристик должны обладать соответствующими свойствами: прочностью на растяжение (σ_B), твердостью (НВ) материала и др. Как правило, эти свойства формируются в процессе кристаллизации и зависят от ее параметров (скорость охлаждения и др.) либо регулируются введением в расплав каких-либо добавок. В качестве добавки часто используют ферросилиций (FeSi), который поставляется в виде лигатуры, окатышей, «чипсов» и т. п. Проведение операций модифицирования преследует несколько целей, определяющих состав модификатора. FeSi, являясь основой модификатора, позволяет исключить кромошный отбел по обрабатываемым поверхностям, что снижает износ режущего инструмента и облегчает механическую обработку. Присутствие в составе комплексного модификатора добавок щелочноземельных или редкоземельных металлов (Ba, Ca, La и др.) в незначительных количествах повышает графитизирующую способность. Введение в состав модификатора карбидообразующих элементов (Cr, W, V, Mo) позволяет регулировать соотношение перлита и феррита и, как следствие, увеличить твердость и износостойкость отливок. В настоящее время в литейном производстве присутствует ряд проблем: дороговизна модификаторов, неритмичная поставка шихты и ее нестабильное качество.

Отсутствие собственной сырьевой базы в Республике Беларусь требует изыскания новых способов и материалов для модифицирования, разработки технологических процессов с применением образующихся на предприятии отходов. На различных технологических переделах ОАО «МТЗ» образуются существенные объемы дисперсных трудно перерабатываемых металлодержающих отходов. Они могут служить источником как шихтовых материалов, так и являться основой для получения модификаторов.

Необходимость проведения научных изысканий в области модифицирования отливок моторной группы дисперсными материалами обусловлена поиском путей повышения механических свойств материала отливок, уменьшения металлоемкости форм.

Развитие модифицирования расплавов ультрадисперсными частицами позволяет расширить область применения наноразмерных материалов в литейном производстве.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Настоящая работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете в соответствии с основными направлениями научно-технического развития Республики Беларусь.

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь на 2021–2025 гг., утвержденных Указом Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156:

3. Энергетика, строительство, экология и рациональное природопользование:

– техника и технологии в сфере сбора, обезвреживания и использования отходов

4. Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы:

– машиностроение и машиноведение

– композиционные и многофункциональные материалы

– наноматериалы и нанотехнологии, нанодиагностика

Полученные результаты были использованы в работе ГБ 19-89 № ГР 20192602 в рамках задания 2.1.33 ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении, подпрограмма «Металлургия» на 2019–2020 гг., а также в работе ГБ 21-20/7 № ГР 20211668 в рамках задания ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении, подпрограмма «Металлургия» на 2021–2023 гг.

Цель и задачи исследования

Цель исследования – повышение механических свойств серого чугуна в отливках моторной группы за счет использования добавок на основе дисперсных металлосодержащих отходов.

Для достижения этой цели было необходимо решить следующие задачи:

– Исследовать составы дисперсных металлосодержащих отходов и их влияние на степень усвоения при внепечной обработке чугуна.

– Исследовать и установить закономерности комплексного влияния степени дисперсности и содержания неметаллических частиц в составе добавок на прочностные и литейные характеристики при получении отливок моторной группы.

– Исследовать особенности формирования структуры и свойств отливок при их дополнительной обработке ультрадисперсными добавками.

– Разработать технологию подготовки дисперсных добавок и внепечной обработки расплава чугуна для отливок моторной группы, обеспечивающие повышение эксплуатационных характеристик.

Научная новизна заключается:

1. Установлено влияние степени дисперсности частиц размером от 10^{-4} до 2 мм в составе добавок на процесс модифицирования и микролегирования чугуна при получении отливок моторной группы, что проявляется в преимущественной концентрации легирующих элементов (Мо и W) в цементитной фазе перлита, а также в уменьшении расстояния между пластинками цементита до 23 %.

2. Установлен эффективный интервал усвоения дисперсных добавок в пределах 0,05–0,5 %, что позволяет повысить механические свойства серого чугуна не менее чем на 20 %, не снижая жидкотекучесть и исключая образование отбела на рабочих поверхностях отливок при скорости охлаждения 4 кг/мин.

3. Установлены закономерности влияния условий подготовки и введения дисперсных частиц в расплав, а также температурно-временные параметры внепечной обработки чугуна, что позволило добиться увеличения предела прочности серого чугуна не менее чем на 10 %, а также снизить колебание твердости в сечении отливки и по литой поверхности с 5 % до 1 %.

Достоверность результатов обеспечивается комплексным подходом, включающим современные методы исследований с использованием высокоточного оборудования, проведением экспериментов в том числе, и в условиях действующего производства, сопоставлением результатов экспериментов с результатами исследований отечественных и зарубежных авторов.

На защиту выносятся следующие положения:

– экспериментально установленные зависимости изменения σ_b от количества и типа дисперсных модификаторов, которые отличаются нелинейным изменением этого показателя, что позволяет усовершенствовать технологический процесс модифицирования и получать наибольшее увеличение σ_b (до 25 %) при минимальном количестве модификатора (0,05 %), а также минимизировать колебание твердости по сечению отливок (не более 10 HB);

– экспериментально установленные закономерности комплексного влияния степени дисперсности металлосодержащих добавок и содержания в них неметаллических примесей на прочностные характеристики и жидкотекучесть при получении отливок, позволившие оптимизировать их количество и обеспечить максимальное увеличение прочности до 309,5 МПа и минимизировать колебание твердости в пределах 10 HB, добиться снижения дефектности отливок моторной группы на 4–5 %;

– эффект микролегирования цементита в составе перлитных зерен, который проявляется в более высокой на 50–65 % интенсивности пиков молибдена (до 100 имп/с) и вольфрама (до 85 имп/с) в сравнении с традиционными модификаторами, что в совокупности с диспергированием перлита на

25–27 % позволяет повышать прочность на 25 % и добиться равномерности твердости по сечению с колебаниями этого показателя не более 5 %;

– технологический процесс, включающий подготовку дисперсных металлосодержащих (Mo, W) добавок, сепарацию, упаковку в конверты из алюминиевой фольги 0,06–0,2 мм, внепечную обработку под струю расплава при заполнении ковша на 0,1–0,2 объема при температуре выше 1360 °С при получении отливок моторной группы из серого чугуна. Результаты эксплуатационных испытаний, показывающие снижение дефектности по «проседанию» до 4,9 %.

Апробация работы. Материалы диссертации были представлены на 15-й МНТК «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2017 г.), на 16-й МНТК «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2018 г.), на 73-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ (Минск, 2020 г.), на 29-я Международная научно-техническая конференция «Литейное производство и металлургия 2021. Беларусь» (Минск, 2021 г.), на Международной научной и научно-технической конференции «Ресурсо- и энергосберегающие инновационные технологии в литейном производстве» (Ташкент, 2021 г.).

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 6 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК и 6 сборниках трудов и материалов белорусских и международных конференций.

Личный вклад соискателя ученой степени

Личный вклад соискателя ученой степени заключается в определении цели, постановки задач исследования, планировании и проведении экспериментов, обработке и анализе полученных результатов, формулировке выводов, составлении положений, выносимых на защиту, а также написании статей по теме диссертации.

Работа выполнена соискателем в соавторстве с кандидатом технических наук, доцентом Ф. И. Рудницким, который осуществлял общее руководство исследованиями. Инженер-технолог В. А. Шумигой привлекался к проведению опытных плавок и подготовке образцов.

Все представленные в работе теоретические и экспериментальные результаты получены соискателем самостоятельно.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 4 глав, заключения, списка литературных источников. Общий объем работы составляет 124 страницы, содержит 87 рисунков, 5 таблиц, 6 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, а также необходимость проведения научных изысканий в области модифицирования чугунов дисперсными добавками. Отражена необходимость уточнения известных теоретических положений по модифицированию расплавов.

В первой главе проведен обзор литературы по кристаллизации железоуглеродистых сплавов, на примере серых чугунов с различной формой графита рассмотрены наиболее известные теории кристаллизации, сделан вывод о необходимости дальнейшего изучения данного вопроса. Проведен обзор литературы по вопросу модифицирования расплавов ультрадисперсными добавками, выполнен краткий анализ способов получения ультрадисперсных частиц (УДЧ), приведены примеры технологических процессов с применением УДЧ. Проанализированы некоторые теории термодинамики растворения наноразмерных частиц в металлической ванне для определения возможных путей управления данным процессом. Так, рассмотрена формула растворения металлической частицы, введенная С. С. Затуловским:

$$t_{\text{общ}} = t_n + t_{\text{плс}} + t_{\text{пл}} + t_{\text{диф}} \quad (1)$$

где $t_{\text{общ}}$ – общее время существования частицы в расплаве; t_n – время замерзания расплава на частице; $t_{\text{плс}}$ – время плавления замерзшего слоя; $t_{\text{пл}}$ – время плавления нагретой частицы; $t_{\text{диф}}$ – время диффузионного растворения частицы.

Выражение (1), по мнению С. С. Затуловского, показывает, что время существования малой металлической частицы в металлическом расплаве исчезающе мало. В тоже время, при рассмотрении теоретических положений о стабилизации дисперсных систем, описываемых дифференциальным уравнением энергии Гельмгольца (2), сделано предположение, что регулирование параметров уравнения (2) может привести к тому, что дисперсная система стабилизируется и, несмотря на повышение температуры, коагуляции частиц не произойдет:

$$dF = -TdS + d(\sigma\Omega) \quad (2)$$

где F – энергия Гельмгольца; Ω – величина площади раздела между фазами; T – температура; S – энтропия; σ – поверхностное натяжение.

Рассмотрен вопрос с позиций классической термодинамики, а также представлена теоретическая модель взаимодействия ультрадисперсного мо-

диффикатора с металлическим расплавом с применением подходов неравновесной термодинамики. Согласно данной модели, дисперсное вещество, введенное в расплав определенным образом, позволяющим распределить вещество равномерно по объему металлической ванны, порождает в ней множество неоднородностей (флуктуаций). Преимущество данного подхода в том, что возникающие флуктуации (названные академиком И. Р. Пригожиным «химическими осцилляторами») являются источниками множества термодинамических движущих сил. Если предположить, что подобное может происходить и в металлических расплавах, то использование ультрадисперсных смесей для модифицирования расплавов, по сравнению с их макроскопическими аналогами (выражение (1)), будет более эффективно и самоорганизация УДЧ может служить инструментом для создания модифицирующих комплексов.

Кратко изложена основная проблематика отливок моторной группы на примере отливок ОАО «МТЗ», выражающаяся в нехватке качественных шихтовых материалов или неритмичностью их поставки, а также в необходимости повышения механических свойств литья и выравнивания твердости по сечению отливок для устранения дефекта проседания (нарушение параллельности плоскостей прилегания) деталей корпуса коренного подшипника в тело блока цилиндров.

При моделировании процесса заливки и кристаллизации отливок «Блоков цилиндров» в системе ProCast (ESI Group, Франция) было подтверждено, что неравномерная твердость обусловлена направленной кристаллизацией от тонких сечений к массивным. Учитывая особую сложность отливок моторной группы, а также жесткий регламент по химическому составу было предложено прибегнуть к модифицированию расплава дисперсными добавками, как наиболее простому и эффективному способу решения поставленных задач.

В главе 2 описывается методология проведения экспериментов. Указано, какие свойства серого чугуна были отобраны как контрольные: химический состав, временное сопротивление чугуна при растяжении σ_b , твердость (НВ) и микроструктура. Таким образом, контроль характеристик литья, а также условия при проведении экспериментов соответствовали условиям действующего литейного производства ОАО «МТЗ».

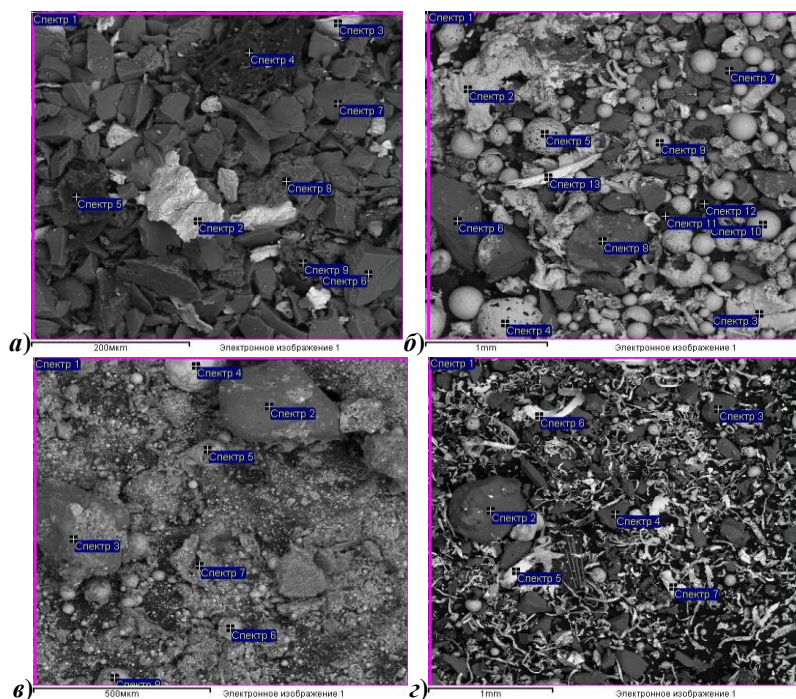
В соответствии с технологическим процессом внепечной обработки, для предотвращения кромочного отбела, предварительно на дно ковша вводился модификатор «Sibar» (ООО «НПП Групп», РФ). При выпуске металла из печи в разливочный ковш под струю металла вводилась добавка экспериментального модификатора. При заполнении ковша металлом он перемещался на конвейер. Перед заливкой с зеркала металла скатывался шлак и измерялась температура расплава погружной термопарой ПТПР-91 (ООО

«Прибор», РФ), подключенной к прибору ДИСК-250М (ГК «Теплоприбор», РФ). Заливка образцов свидетелей производилась после заливки из ковша двух форм на литейном конвейере. Образцы заливались в форму, в которой охлаждались до комнатной температуры. Контроль глубины кромочного отбела проводился по клиновидной пробе, контроль жидкотекучести расплава – по спирали Керри.

В соответствии с ГОСТ1412-85 «Отливки из серого чугуна с пластинчатым графитом» испытание на временное сопротивление при растяжении проводилось в соответствии с ГОСТ27208-87 на разрывной машине Quasar 250 (фирма «Galdabini», Италия) с применением цилиндрических образцов, выточенных из образцов-свидетелей диаметром 30 и длиной 160 мм. Образцы-свидетели отливались двумя способами: в литейном цехе № 1 (ЛЦ-1) в песчаные ПГС опочные формы на четыре образца. В цехе точного стального литья (ЦТСЛ) в песчаную ХТС безопочную форму на 2 образца. В случае проведения эксперимента в ЛЦ-1 от формы произвольным образом отбиралось два образца из четырех. В случае испытаний образцов, изготовленных в ЦТСЛ, к испытанию принимались оба образца-свидетеля. Итогом испытания считалось среднее арифметическое от двух образцов из одной формы. В соответствии ГОСТ27208-87 измерение твердости производилось на фрагментах образцов, оставшихся после проведения испытания на растяжение. Итогом испытания считалось среднее арифметическое от двух образцов из одной формы. Микроструктуру чугуна определяли по шлифам согласно ГОСТ 3443-87 «Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры» при увеличении $\times 100$ на оптическом микроскопе MicroVert 1500 (холдинг «Планар», РБ) с подключенной приставкой для фотографирования микроснимков в программе SimpleIm (РФ). Шлифы изготавливались из образцов, оставшихся после испытаний на твердость. Форму графита исследовали на нетравленных образцах на расстоянии половины радиуса от центра. После определения свойств и идентификации микроструктуры образцов, оставшиеся части образцов были использованы для определения химического состава. Образцы подготавливали с учетом требований ГОСТ 7565-81. Содержание углерода оценивали по ГОСТ 2604.1-77 путем сжигания в среде инертного газа стружки, выверленной из образца. Остальные элементы определялись спектральным методом анализа на оптико-эмиссионном спектрометре модели QSN750 («OBLF», Германия). При спектральном анализе учитывались элементы с интенсивностью пиков до 0,01 %, элементы с интенсивностью пиков 0,009 % и менее считались следами. Морфология поверхности порошков, ультрадисперсных частиц и их смесей, а также их химический состав исследовались на электронном сканирующем микроскопе VEGA TESCAN («TESCAN Brno», Чехия) с

приставкой для микрорентгеноспектрального анализа. Тонкие исследования микроструктуры металлографических образцов проводились на электронном сканирующем микроскопе MIRA TESCAN («TESCAN Bрно», Чехия) с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа.

В третьей главе изложены результаты исследования влияния добавок различной степени дисперсности на свойство серого чугуна марки СЧ20. На промышленных предприятиях образуется целый спектр дисперсных отходов, которые могут служить источником как черных металлов, так и дорогостоящих легирующих элементов (рисунок 1).



***а* – пыль дробетных камер; *б* – шлам металлоабразивный; *в* – шлам плавильных агрегатов; *г* – шлам металлоабразивный с участков специального инструмента**

Рисунок 1 – Дисперсные отходы литейных цехов ОАО «МТЗ»

Для их применения в качестве добавок необходимо учитывать такие факторы, как количество металлических частиц в общем объеме материала,

наличие в них легирующих элементов, морфологию частиц и т. д. В настоящем исследовании критериями отбора образцов для испытаний являлись: предполагаемое значительное количество металла (не менее 25 %), наличие в нем легирующих элементов (хром, молибден, вольфрам и др.) и чистота от СОЖ.

В общем случае дисперсные отходы состоят как минимум из двух фракций: металлических частиц и фрагментов неметалла. При использовании таких материалов необходимо уточнить влияние каждой из фракций. С этой целью были отобраны не только образцы дисперсных отходов, но и материалы-аналоги. К примеру, металлоабразивный шлам стали Р6М5 состоит из металлических фрагментов стали Р6М5 и частиц абразива. Как материалы-аналоги указанных фракций использовались порошок стали Р6М5 и наноструктурированный бемит (гидрооксид алюминия). Материалы были условно разделены на несколько групп, в зависимости от размера основной фракции дисперсные – с размером частиц 0,2–2 мм; ультрадисперсные – менее 10^{-4} мм, полидисперсные – от 10^{-4} мм до 0,2 мм, кусковые – от 2 мм и более (таблица 1).

Таблица 1 – Материалы, используемые для модифицирования

Материал	Размерный состав частиц	Причина, по которой материал был использован в исследовании
стружка Р6М5	дисперсный 0,2 – 2 мм	оценка возможности рециклинга
шлам стали Р6М5	полидисперсный 10^{-4} мм до 0,2 мм	оценка возможности рециклинга
магнитная фракция шлама Р6М5	полидисперсный 10^{-4} мм до 0,2 мм	оценка возможности рециклинга
порошок 10Р6М5ПМ	ультрадисперсный менее 10^{-4} мм	как аналог металлической фракции шламов
бемит	ультрадисперсный менее 10^{-4} мм	как аналог неметаллической фракции шламов
смесь бемита и порошка 10Р6М5ПМ	ультрадисперсный менее 10^{-4} мм	как аналог шламов
пруток стали Р6М5	кусовой от 2 мм и более	как аналог кусковых модификаторов

При использовании дисперсных материалов, предполагалось, что введение в расплав множества дисперсных частиц изоморфного состава будет иметь свойство инокулирующей обработки вследствие образования множества вынужденных центров кристаллизации. Наличие в составе частиц легирующих элементов послужит дополнительным фактором, повышающим механические свойства. Предварительно стружка подверглась термической обработке для удаления СОЖ. Модификатор на основе стружки стали Р6М5 вводился в полиэтиленовом пакете на струю расплава при заполнении ковша. Как видно из представленных графиков (рисунок 2), по мере увеличения вводимого количества модификатора возрастают и механические свойства.

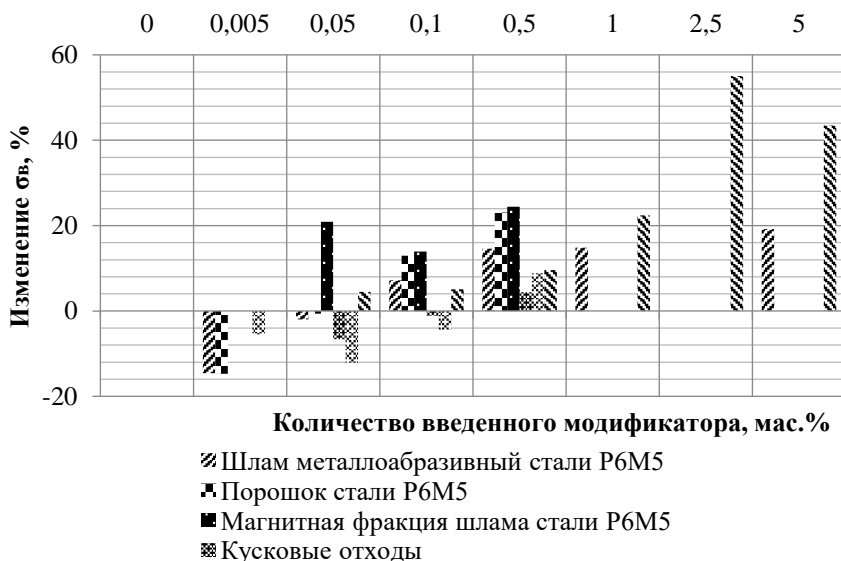


Рисунок 2 – Изменение прочности серого чугуна в зависимости от вида модификатора

Максимум прочности достигнут при 2,5 % модификатора, после чего прочность несколько снизилась, а твердость при этом продолжила увеличиваться. Химический состав также характерно изменялся по мере ввода модификатора: с увеличением количества вводимого дисперсного модификатора возрастало содержание хрома и молибдена. Увеличение прочности до 50 % является значительным результатом, однако при этом растет твердость

и происходит легирование металлической матрицы. Для большинства отливок моторной группы это не всегда допустимо.

Также отмечено, что химический состав претерпевает изменения в сторону снижения Si и S, по-видимому, за счет рафинирования.

Применение дисперсных материалов действительно эффективно с точки зрения приращения механических свойств. Однако, когда легирование неприемлемо, возможным решением может быть применение полидисперсных материалов, таких как металлоабразивные шламы. Они схожи по химическому составу с дисперсными материалами, но отличаются наличием металлических частиц меньшего размерного диапазона, что дает преимущество в виде повышенного значения поверхностной энергии частиц. Из этого следует, что применение таких материалов позволяет получить сопоставимое увеличение механических свойств при меньшей массе модификатора. Как и дисперсные материалы, предварительно упакованный в полиэтиленовый пакет шлам металлоабразивный стали Р6М5 подавался на струю металла при заполнении ковша. Увеличение прочности было достигнуто только при 5 % модификатора и это являлось предельно допустимым значением вследствие низкого насыпного веса модификатора. Анализ результатов эксперимента показал, что одной из возможных причин понижения механических свойств могло быть неэффективное введение материала, при которых модификатор не усваивается. То есть для дисперсных материалов с малым размером частиц такое количество материала избыточно и приводит к ошлаковыванию. Была проведена корректировка условий проведения экспериментов в сторону уменьшения вводимых количеств модификаторов и изменена фасовка модификаторов: они упаковывались в конверты из алюминиевой фольги. Корректировка вводимого количества материала положительно сказалось на изменении механических свойств. В тоже время при 0,005 % и 0,05 % зафиксировано снижение прочности. В случае применения дисперсной стружки повышение прочности было обусловлено изменением химического состава. В случае применения металлоабразивного шлама изменения химического состава зафиксировано не было. Для уточнения вопроса, какая фракция шлама приводит к увеличению механических свойств, применялись материалы-аналоги.

Как видно из графика (см. рисунок 2), изменение механических свойств в случае применения порошка стали Р6М5 подобно изменениям при модифицировании серого чугуна шламами. Отличием служит более значительное увеличение прочности, что связано с отсутствием неметаллической фракции в составе модификатора. Для уточнения данного факта потребовалось применение материала-аналога неметаллической фракции шлама – наноструктурированного бемита. Применение бемита в качестве модификатора привело к снижению механических свойств и только при 0,5 % добавки

имеет место повышение прочности. Следует учесть, что ввиду низкой насыпной массы 0,5 % масс. являлось предельно допустимым количеством, т. к. бемит плохо усваивается чугуном. Таким образом, эксперименты с применением материалов аналогов свидетельствуют в сторону того, что присутствие в составе модификатора неметаллической фракции снижает эффективность металлических частиц. Для уточнения данного предположения была использована смесь, состоящая из двух материалов-аналогов: порошка стали Р6М5 и бемита. При этом количество металлической составляющей оставалось неизменным, а количество неметаллической фракции в составе модификатора возрастало. Результаты исследований показали, что увеличение в составе модификатора неметаллической составляющей снижает эффективность модифицирования.

Уточнив состав модификаторов, были проведены исследования по сравнению эффективности кусковых материалов и дисперсных добавок в количествах от 0,05–0,5 % масс.

Результаты серии экспериментов свидетельствуют, что применение дисперсных добавок по сравнению с кусковыми материалами позволяет при уменьшении вводимого количества достичь соизмеримого модифицирующего эффекта. Наибольшее увеличение прочности показали дисперсные материалы в количествах 1–5 %. Однако при этом происходит пропорциональный рост твердости с характерным изменением химического состава и ухудшением литейных свойств. Данного недостатка лишены полидисперсные и ультрадисперсные добавки, вводимые в количествах 0,05–0,5 %. Кусковые материалы в этом диапазоне оказались малоэффективны.

В главе 4 приведены результаты практического применения накопленных экспериментальных данных. Для эффективного применения модификаторов в условиях действующего производства необходимо учитывать особенности дисперсных систем (ДС), выражающиеся в избытке поверхностной энергии.

Учитывая значительный рост механических свойств, модификатор на основе стружки стали Р6М5 был использован для выравнивания твердости по сечению отливки 50-1005140 «Корпус коренного подшипника». Для данной отливки допуски по химическому составу менее строгие, чем для блоков цилиндров. Модификатор подавался на дно ковша в полиэтиленовом пакете. По результатам эксперимента механические свойства опытных отливок возросли, при этом колебания твердости по литой поверхности и центре отливки составили не более 5 НВ.

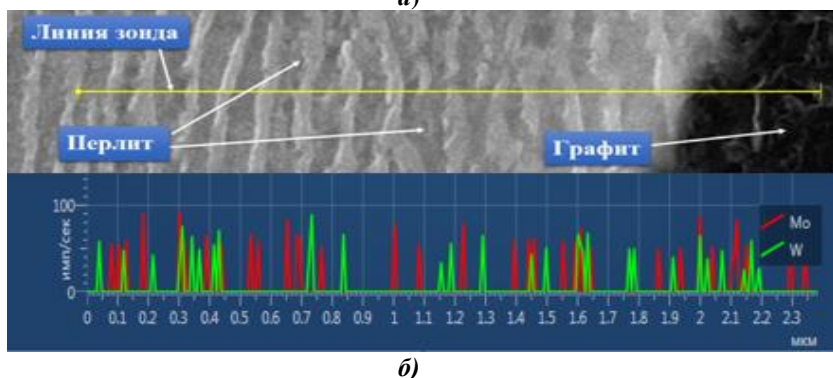
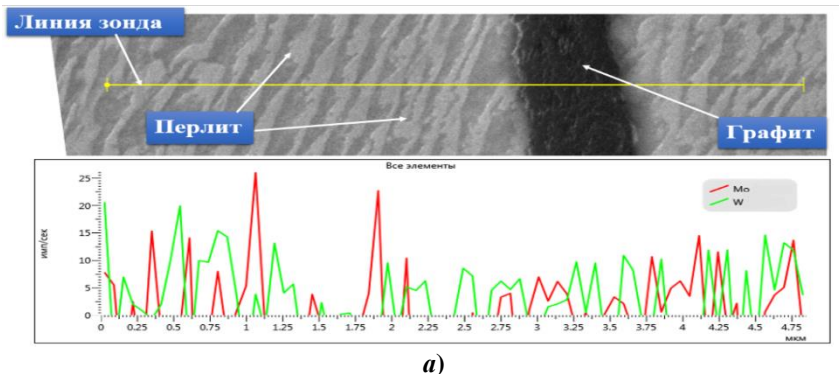
На основе результатов использования полидисперсных и ультрадисперсных материалов для повышения прочности серого чугуна, предназначенного для отливок моторной группы, был применен модификатор на основе

магнитной фракции шлама стали Р6М5. В результате σ_v чугуна удалось увеличить на 24 %.

На заключительном этапе работ потребовалось уточнить причины повышения прочности при модифицировании дисперсными материалами в переделах 0,005–0,5 %. Материал конверта, пищевая алюминиевая фольга, вводимая в количестве 0,0002–0,0005 %, не оказывал влияния свойства чугуна. В случае применения дисперсной стружки в количестве 1–5 % изменения химического состава и твердости позволяют судить о легировании металлической матрицы. Применяя дисперсные добавки в количестве 0,05–0,5 % значимых изменений твердости и химического состава не происходит. Стоит отметить, что в части снижения механических свойств причина выявляется оперативно на нетравленных шлифах: это области междендритного точечного графита, которые и приводят к понижению механических свойств. По мере увеличения количества вводимых добавок эти области уменьшаются с характерным повышением механических свойств. Однако травленные шлифы не показали каких-либо значимых изменений в распределении перлита и феррита. Для уточнения причины повышения прочности потребовалось проведение высокоточных исследований.

Исследование контрольных образцов и образцов, модифицированных 0,5 % модификатора на основе магнитной фракции шламов Р6М5 на электронном сканирующем микроскопе позволяет судить о том, что причина повышения механических свойств – это микролегирование цементита в составе перлитных зерен: микрорентгеноспектральный анализ фиксирует пики вольфрама и молибдена в контрольном образце в среднем 25 импульсов в секунду, у модифицированных – выше 50 имп/с (рисунок 3).

Практическое применение результатов исследования позволило обеспечить равномерную твердость по сечению отливки 50-1005141 «Корпус коренного подшипника», а также повысить σ_v серого чугуна для отливок моторной группы более чем на 20 %. В результате удалось добиться снижения дефектности отливок моторной группы по проседанию коренного подшипника на 4,9 % (при критерии значимости 0,95 %), что подтверждается актом от 08.10.2019 г. Расчет ожидаемого экономического эффекта показывает, что замена FeMo в шихтовке литейного цеха № 2 для индукционных печей модификатором на основе магнитной фракции шлама стали Р6М5 позволяет получать экономию более 390 тыс. долларов США ежегодно. В процессе практического применения результатов исследований была сформирована технологическая инструкция по внепечной обработке чугуна дисперсными модификаторами, что облегчит процесс внедрения этой технологии на промышленных предприятиях.



а – контрольный образец, **б** – образец, полученный из серого чугуна, модифицированного 0,5 % металлоабразивным шламом стали Р6М5
Рисунок 3 – Результаты электронной сканирующей микроскопии

В настоящее время в Литейном цехе № 2 ОАО «МТЗ» смонтирован и запущен в производство комплекс индукционных печей, который включает в себя многоступенчатую систему очистки отходящих газов. С учетом того, что дисперсные отходы плавильных агрегатов содержат наибольшее количество легирующих элементов, повсеместное внедрение таких систем в будущем позволит организовать наиболее эффективную систему рециклинга металлосодержащих отходов. На примере литейного производства ОАО «МТЗ» показано, что, с учетом особенностей конкретных производственных условий, рециклинг дисперсных металлосодержащих отходов может быть организован на любом промышленном предприятии Республики Беларусь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты:

1. Обнаружено нелинейное изменение прочности серого чугуна при внепечной обработке дисперсными металлосодержащими добавками. Установлено, что степень дисперсности металлических частиц влияет не только на механические свойства материала отливок, но и на литейные свойства. Теоретически показана и экспериментально доказана целесообразность применения дисперсных металлических частиц без операций компактирования. Это позволяет повышать прочность чугуна до 25 %, не снижая литейные свойства расплава, обеспечив отсутствие отбела по обрабатываемым поверхностям на глубине механической обработки [1–А – 12–А].

2. Установлен эффективный интервал 0,05–0,5 % усвоения дисперсных добавок в зависимости от степени дисперсности металлических частиц и наличия неметаллических примесей. Показано, что отделение неметаллических примесей позволяет повысить степень усвоения металлических частиц на 55–59 % [1–А, 3–А – 6–А, 10–А – 12–А].

3. Исследованы химический и фракционный состав образующихся на ОАО «МТЗ» дисперсных металлосодержащих отходов, показывающий, что в зависимости от типа оборудования (плавильного, очистного, аспирационного и т. п.) содержание металлических частиц в таких типах отходов промышленных предприятий может колебаться в широких пределах от 10 до 55 %, что дает возможность при производственной программе 5000 т годового в месяц возвращать в производственный цикл до 120 т металлической шихты за этот же период [3–А – 6–А].

4. Установлено микролегирующее влияние молибдена и вольфрама при модифицировании отливок ультрадисперсными материалами, в составе которых присутствуют данные элементы. Выявлено, что легирующие элементы входят в состав цементитной области перлита с интенсивностью пиков до 100 имп/с. Это позволяет получать отливки моторной группы с повышенными прочностными характеристиками, при этом не выходя за требования ТУ ВУ101483199.541-2006 [5–А, 6–А, 11–А, 12–А].

5. Определено влияние различных технологических факторов (состав добавки, способ ее упаковки, температурно-временные интервалы) на степень усвоения ультрадисперсных материалов. Показано, что с увеличением степени дисперсности добавок увеличивается влияние технологических факторов. При использовании дисперсных частиц 0,2–2 мм влияние технологических факторов снижается, в то время как для ультрадисперсных частиц 10^{-4} мм игнорирование технологических факторов приводит к снижению прочностных характеристик до -14,7 % [2–А – 6–А, 9–А – 12–А].

Практическая ценность работы.

1. Проведение исследований позволило разработать технологический процесс 100316761204.25210.00244 внепечной обработки серых чугунов дисперсными добавками.

2. Ожидаемый экономический эффект от замены в составе шихты ферромolibдена модификатором на основе магнитной фракции шлама стали Р6М5 может составить более 390 тыс. долларов США в год.

3. Данные, полученные в ходе исследований, будут использованы в учебной программе по дисциплине «Специальные виды литья» (акт о практическом использовании результатов исследований в образовательном процессе от 10.06.2022 г.).

4. Технология внепечной обработки дисперсными добавками при производстве отливок 240-1002015-А2 «Блок цилиндров», а также 50-1005141 «Корпус коренного подшипника» позволила сократить дефектность моторной группы «по проседанию» на 4,9 %.

5. Результаты исследований могут найти применение на промышленных предприятиях Республики Беларусь, стран СНГ, где имеется литейное производство: ОАО «УКХ «ММЗ», ОАО «МАЗ», ПАО «КАМАЗ» и др.



СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях, в том числе, включенных в перечень ВАК

1–А Рудницкий Ф. И., Куликов С. А. Модифицирование чугунов ультрадисперсными добавками = Modifying of cast iron with ultradisperse additives // Литье и металлургия. – 2017. – № 1 (86). – С. 11–15.

2–А Повышение прочности серого чугуна путем введения в расплав дисперсных добавок = Increasing the strength of grey cast iron by introducing of dispersed additives into the melt / Ф. И. Рудницкий, С. А. Куликов, В. А. Шумигой // Литье и металлургия. – 2018. – № 3 (92). – С. 43–49.

3–А Энергия поверхности ультрадисперсных частиц как инструмент создания наномодифицирующих комплексов = Surface energy of ultrafine particles as a tool for creating nanomodifiers complexes / Ф. И. Рудницкий, С. А. Куликов, В. А. Шумигой // Литье и металлургия. – 2019. – № 3. – С. 46–53.

4–А Использование энергии поверхности ультрадисперсных частиц при разработке наномодифицирующих комплексов / Ф. И. Рудницкий, С. А. Куликов, В. А. Шумигой. // Металлургия машиностроения. – 2019. – № 6. – С. 9–13

5–А Повышение качества моторных отливок модифицированием чугуна ультрадисперсными добавками / Ф. И. Рудницкий, С. А. Куликов, В. А. Шумигой. // Литейное производство. 2020. – № 2. – С. 2–5

6–А Об отличиях ультрадисперсных модификаторов от их макроразмерных аналогов / Ф. И. Рудницкий, С. А. Куликов, В. А. Шумигой. // Литейщик России. – 2021. – № 1. – С. 25–28.

Статьи в научных сборника и материалы конференций

7–А Модифицирование чугунов при изготовлении отливок моторной группы / Ф. И. Рудницкий, С. А. Куликов, В. А. Шумигой // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 15-й Международной научно-технической конференции. – Минск : БНТУ, 2017. – Т. 1. – С. 427–428.

8–А Рудницкий Ф. И., Куликов С. А. Ультрадисперсные частицы для модифицирования высокотемпературных расплавов // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 16-й Международной научно-технической конференции. – Минск : БНТУ, 2018. – Т. 1. – С. 292.

9–А Применение ультрадисперсных добавок для модифицирования чугунов / К. В. Волот; науч. рук.: Ф. И. Рудницкий, С. А. Куликов // Новые ма-

териалы и технологии их обработки : сборник научных работ XX Республиканской студенческой научно-технической конференции, Минск, 17–18 апреля 2019 года. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 66–67.

10–А Особенности механизма кристаллизации серых чугунов в результате модифицирования дисперсными добавками с позиций термодинамики открытых неравновесных систем = Features of the mechanism of crystallization of gray cast irons as a result of modification with dispersed additives from the standpoint of thermodynamics of open nonequilibrium systems / Ф. И. Рудницкий, С. А. Куликов, В. А. Шумигай // *Металлургия : республиканский межведомственный сборник научных трудов* : в 2 ч. / редкол.: И.А. Иванов (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – Вып. 41, ч. 1. – С. 113–128.

11–А Перспективы применения ультрадисперсных частиц для модифицирования высокотемпературных расплавов / Ф. И. Рудницкий, С. А. Куликов, В. А. Шумигай // *Современные технологии для заготовительного производства [Электронный ресурс]* : сборник научных работ Республиканской научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов МТФ БНТУ (проводится в рамках 74-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ), 14 апреля 2021 г. / сост. А. П. Бежок. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 85–86.

12–А Использование дисперсных металлосодержащих отходов для модифицирования расплавов = The use of dispersed metal-containing waste for modifying melts / Ф. И. Рудницкий, С. А. Куликов, В. А. Шумигай // *Литейное производство и металлургия 2021. Беларусь [Электронный ресурс]* : 29-я Международная научно-техническая конференция и информационная выставка : труды участников конференции / Белорусский национальный технический университет ; под общ. ред. Е. И. Маруковича ; ред.: С. В. Машканова [и др.]. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 55–62.

РЕЗЮМЕ

Куликов Сергей Александрович

Повышение механических свойств серого чугуна в отливках моторной группы добавками на основе дисперсных металлосодержащих отходов

Ключевые слова: отливка, дисперсные отходы, модифицирование, прочность, твердость

Цель работы – повышение механических свойств серого чугуна в отливках моторной группы за счет использования добавок на основе дисперсных металлосодержащих отходов.

Методы исследований и аппаратура: определение механических свойств материала отливки (Quasar 250 «Galdabini»); определение морфологии дисперсных материалов и металлографические исследования, оптическая микроскопия (MicroVert 1500), сканирующая электронная микроскопия (MIRA TESCAN, VEGA TESCAN), микрорентгеноструктурный анализ.

Полученные результаты и их новизна: доказана целесообразность модифицирования серого чугуна ультрадисперсными модификаторами в дисперсном виде без предварительных операций компактирования, при использовании такой технологии в более полной мере реализуется особенность дисперсных систем – избыток поверхностной энергии; разработана классификация, учитывающая морфологию и состав дисперсных металлосодержащих отходов, позволяющая эффективно использовать их в технологическом процессе; установлена зависимость изменения свойств серых чугунов от дисперсности и количества вводимой добавки, которая позволяет управлять не только механическими, но и литейными свойствами; выявлен эффект микролегирования молибденом и вольфрамом при использовании ультрадисперсных модификаторов; установлено, что присутствие неметаллической фракции в составе модификатора снижает эффективность металлических частиц.

Степень использования: Ожидаемый экономический эффект от замены в составе шихты ферромолибдена модификатором на основе магнитной фракции шлама стали Р6М5 составляет более 390 тыс. долларов США в год; предложенный способ модифицирования позволил повысить временное сопротивление на разрыв σ_b модифицированных отливок более чем на 20 %. применение модификатора на основе дисперсной стружки стали Р6М5 позволило снизить дефектность моторной группы по «проседанию» на 4,9 %.

РЭЗІЮМЭ

Кулікоў Сяргей Аляксандравіч

Падвышэнне механічных уласцівасцяў шэрага чыгуну ў адліўках маторнай групы дадаткамі на аснове дысперсных металазмяшчальных адходаў

Ключавыя словы: адліўка, дысперсныя адходы, мадыфікаванне, трываласць, цвёрдасць

Мэта работы – павышэнне механічных уласцівасцей шэрага чыгуну ў адліўках маторнай групы за кошт выкарыстання дабавак на аснове дысперсных металазмяшчальных адходаў.

Метады даследавання і апаратура: вызначэнне механічных уласцівасцяў матэрыялу адліўкі (Quasar 250 «Galdabini»); вызначэнне марфалогіі дысперсных матэрыялаў і металаграфічных даследаванні, аптычная мікраскапія (MicroVert 1500), сканавальная электронная мікраскапія (MIRA TESCAN, VEGA TESCAN), мікранэнаструктурны аналіз.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: даказана мэтазгоднасць мадыфікавання шэрага чыгуну ультрадысперснымі мадыфікатарамі ў дысперсным выглядзе без папярэдніх аперацый кампактавання, пры выкарыстанні такой тэхналогіі ў больш поўнай меры рэалізуецца асаблівасць дысперсных сістэм – лішак павярхоўнай энергіі; распрацавана класіфікацыя, якая ўлічвае марфалогію і склад дысперсных металазмяшчальных адходаў, якая дазваляе эфектыўна выкарыстоўваць іх у тэхналагічным працэсе; усталявана залежнасць змены ўласцівасцяў шэрых чыгуноў ад дысперснасці і колькасці ўводзімага дадатку, якая дазваляе кіраваць не толькі механічнымі, але і ліцэйнымі ўласцівасцямі; выяўлены эфект мікралегавання малібдэнам і вальфрамам пры выкарыстанні ультрадысперсных мадыфікатараў; устаноўлена, што прысутнасць неметалічнай фракцыі ў складзе мадыфікатара зніжае эфектыўнасць металічных часціц.

Ступень выкарыстання: Чаканы эканамічны эфект ад замены ў складзе шыхты ферамалібдэна мадыфікатарам на аснове магнітнай фракцыі шлама сталі Р6М5 складае больш за 390 тыс. даляраў ЗША у год; прапанаваны спосаб мадыфікавання дазволіў павысіць часовы супраціў на разрыў у мадыфікаваных адлівак больш чым на 20 %. ужыванне мадыфікатара на аснове дысперснай габлюшкі сталі Р6М5 дазволіла зменшыць дэфектнасць маторнай групы па прасяданні на 4,9 %.

SUMMARY

Kulikov Sergey Alexandrovich

Improving the mechanical properties of gray cast iron in castings of the motor group by additives based on dispersed metal-containing waste

Key words: casting, dispersed waste, modification, strength, hardness

The purpose of the work – improvement of the mechanical properties of gray cast iron in castings of the motor group through the use of additives based on dispersed metal-containing waste.

Research methods and equipment: determination of the mechanical properties of the casting material (Quasar 250 “Galdabini”); determination of the morphology of dispersed materials and metallographic studies, optical microscopy (MicroVert 1500), scanning electron microscopy (MIRA TESCAN, VEGA TESCAN), micro-ray diffraction analysis.

The results obtained and their novelty: the expediency of modifying gray cast iron with ultrafine modifiers in a dispersed form without preliminary compacting operations has been proved; when using this technology, the feature of dispersed systems is more fully realized – an excess of surface energy; a classification has been developed that takes into account the morphology and composition of dispersed metal-containing wastes, which makes it possible to effectively use them in the technological process; the dependence of the change in the properties of gray cast irons on the dispersion and the amount of the additive introduced, which allows you to control not only mechanical, but also casting properties, has been established; the effect of microalloying with molybdenum and tungsten was established when using ultrafine modifiers; it was found that the presence of a non-metallic fraction in the composition of the modifier reduces the effectiveness of metal particles.

The Practical Degree: the expected economic effect of replacing ferromolybdenum in the composition of the charge with a modifier based on the magnetic fraction of R6M5 steel sludge is more than 390 thousand US dollars per year; The proposed modification method made it possible to increase the tensile strength σ in modified castings by more than 20 %; the use of a modifier based on dispersed chips of steel R6M5 made it possible to reduce the defectiveness of the motor group in terms of “sagging” by 4.9 %.