Комаров О. Н.
O. N. Komarov

ВЛИЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ ПРИ АЛЮМОТЕРМИИ НА СВОЙСТВА ОТЛИВОК, ПОЛУЧАЕМЫХ ИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СПЛАВОВ

EFFECT OF PRODUCTION FACTORS IN ALUMINOTHERMY ON PROPERTIES OF RECEIVED CASTINGS FROM EXPERIMENTAL ALLOYS

Комаров Олег Николаевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1; тел.: +7 (4217) 54-95-39. E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

Mr. Oleg N. Komarov – PhD in Engineering, Associate professor, Leading Researcher, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681005, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, 1 Metallurgists' str.; tel.: +7 (4217) 54-95-39. E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

Аннотация. Получение расплавов металлов алюмотермией позволяет повысить технико-экономические показатели производств, сократить долю традиционных шихтовых материалов, эффективно переработать металлоотходы машиностроительных и металлургических предприятий, сократить потребление энергоресурсов, снизить продолжительности операций по подготовке расплавов перед заливкой в форму. Однако при применении восстановителей с высоким содержанием примесных элементов их активность снижается, что влечёт снижение температуры продуктов реакции. На температуру влияют влага, замасленность, высокое содержание инертных компонентов. Снижение температуры продуктов реакции приводит к браку литья. Для повышения температуры продуктов реакции шихтовые составы предварительно подогревают. Для определения эффективных температур подогрева смесей проведены дифференциально-термический и термогравиметрический анализы исходных компонентов композиций, которые позволили установить диапазон значений применяемых температур.

Summary. The production of metal melts by aluminothermy allows increasing the technical and economic indicators of production, reducing the share of traditional charge materials, efficiently processing metal waste of machine-building and metallurgical enterprises, reducing the consumption of energy resources, and shortening the duration of operations for preparing melts before pouring into a mold. However, when reducing agents with a high content of impurity elements are used, their activity decreases, which leads to a decrease in the temperature of the reaction products. The temperature is affected by moisture, oily high content of inert components. Reducing the temperature of the reaction products leads to a casting marriage. To increase the temperature of the reaction products, the charge compositions are preheated. To determine the effective heating temperatures of the mixtures, differential thermal and thermo gravimetric analyzes of the initial components of the compositions were carried out, which made it possible to establish the ranges of the temperatures used.

Ключевые слова: алюмотермия, термитная смесь, структура, физико-механические свойства, химический состав, литые образцы, огнеупорная оснастка, температура, металлоотходы.

Key words: aluminothermy, termite mixture, structure, physical and mechanical properties, chemical composition, cast samples, refractory equipment, temperature, metal waste.

УДК 669.094.2-926.62

Работа выполнена в рамках государственного задания № 007-00285-18-00.

Введение

В литейном производстве сокращение себестоимости литья возможно с помощью применения в качестве шихтовых материалов отходов машиностроительных предприятий на стадиях получения расплава металла за счёт сокращения потребления энергоресурсов и снижения продолжи-

тельности процесса с применением алюмотермии [1; 2; 3]. Отходами машиностроительных предприятий являются стружка чёрных и цветных металлов, металлургическая окалина (оксиды железа), на основе которых составляются термитные смеси.

Важным является обеспечение химического состава, свойств, максимального выхода металлической фазы с единицы прореагировавшей экзотермической композиции. Регулирование химического состава получаемого металла определяет необходимость использования в термитах ферросплавов, лигатур, карбюризаторов, влияющих на тепловой баланс продуктов реакции. Чем больше в получаемом сплаве содержится примесных элементов, тем больше исходных компонентов, содержащих эти химические элементы, должно быть в составе термитной композиции. Это снижает значение пика температурного всплеска экзотермического процесса.

Предварительный подогрев смесей позволяет увеличить выход металла введением в составы большего количества наполнителя в виде стружки чёрных металлов, снизить количество дорогостоящего восстановителя и управлять свойствами металла, а также получать более стабильные параметры реакций [4]. Влияние на химический состав получаемого термитного металла оказывают также используемые огнеупорные материалы. Химический состав расплава зависит от состояния вводимого элемента, скорости и температуры протекания реакции. Температура реакции и остальные условия должны выбираться таким образом, чтобы обеспечить максимальный переход элементов из исходных составов в металлическую фазу, влияя на структуру получаемых литых заготовок [5; 6].

Применение предварительного нагрева шихты перед осуществлением реакции позволяет объединить операции термической обработки исходных компонентов с процессом получения металла, сократить время технологического цикла и затраты на энергетические ресурсы. При этом устраняется влага, замасленность и смазочно-охлаждающая жидкость, которые присутствуют в общей массе металлоотходов и ухудшают показатели процесса. За счёт предварительного термического воздействия реагирующая система получает дополнительный запас тепла, что позволяет вводить в экзотермические составы больше корректирующих химический состав компонентов и получать средне- и высоколегированные сплавы.

Цели и задачи исследования

Целью работы является изучение влияния температур предварительного нагрева исходных компонентов на изменение их свойств и свойств получаемых сплавов из шихтовых составов, сформированных из исследуемых материалов.

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

- исследование поведения применяемых материалов при предварительном термическом воздействии и выявление, исходя из их свойств, допустимых температур нагрева шихты перед осуществлением экзотермического процесса;
- выявление закономерностей влияния температурных режимов нагрева шихты на химический состав получаемого термитного металла;
- исследование структур образцов из термитного металла, получаемого с использованием углеродных форм;
- определение параметров физико-механических свойств образцов из экспериментальных сплавов.

Методы и материалы

Термогравиметрический и дифференциально-термический анализы компонентов термитной смеси, материалов огнеупорной оснастки проводился на приборе дифференциально-термического анализа Shimadzu DTG-60H.

Экзотермические реакции проводили в огнеупорных тиглях, выполненных из боя графитированных электродов, применяемых для плавки стали в электродуговых печах марки ЭГ15 по ТУ 14-139-177-2003 «Электроды графитированные диаметром от 75 до 555 мм и ниппели к ним. Технические условия». Плотность огнеупорного материала 1700 кг/м³. Объём рабочего пространства тигля 0,000572 м³, толщина стенки 0,01 м. Масса тигля составляла 0,71 кг. Объём рабочего пространства соответствовал засыпке смеси с минимальной насыпной плотностью мас-

сой 1 кг для получения образца необходимого размера. Тигель после засыпки смеси накрывали крышкой с отверстием для выхода газов (диаметр 20 мм). Внутренний диаметр тигля равен высоте его рабочего пространства, которая составляет 0,09 м. В дне тигля устанавливалась разовая вставка с отверстием диаметром 0,007 м для стабилизации скорости разливки расплава. Смеси перед реакцией не уплотнялись. Отверстие для слива металла закрыто диском-стопором (диаметр 0,05 м и толщина 0,005 м) из графита той же марки [13].

После прохождения реакции и выдержки расплава в тигле в течение 10 секунд для обеспечения разделения металла и шлака стопор выбивается и форма для экспериментальных образцов заполняется металлом. Форма для получения образцов представляет собой цилиндр с глухим дном из графита марки ЭГ15 с внутренним диаметром 0,03 м, толщиной стенки 0,03 м и высотой 0,15 м.

Перед проведением экспериментов огнеупорная оснастка нагревается до 150 °С и покрывается противопожарной краской следующего состава: маршалит – 20 %, жидкое стекло – 5 %, вода – 74 %, борная кислота – 1 % [7].

Железоалюминиевая термитная смесь включает восстановитель и железную окалину фракций 0,2–1,5 мм следующего химического состава: восстановитель – Al = 89,443 %; Mg = 3,917 %; Zn = 2,961 %; Cu = 2,040 %; Si = 1,097 %; Mn = 0,304 %; Fe = 0,166 %; Cr = 0,062 %; Ni = 0,008 %; железная окалина – Fe = 71,500 %; O₂ = 22,639 %; Si = 2,960 %; Mn = 1,188 %; Al = 0,697 %; Cu = 0,444 %; Ni = 0,188 %; Cr = 0,173 %; C = 0,150 %; S = 0,030 %; P = 0,030 %.

Подготовка термитных смесей осуществлялась перемешиванием в смесителе в течение 10 мин; сушке при значении температуры, равном 150 °С в течение 1 часа; повторном перемешивании в течение 10 мин, при котором происходит гомогенизация композиции и незначительное дробление компонентов, очистка поверхности частиц восстановителя от оксидной плёнки. Этот процесс усиливает взаимодействие между реагирующими материалами. Химический состав образцов определяли с помощью оптико-эмиссионного спектроанализатора Q4 TASMAN 170 BRUKER. Образцы для испытания на разрыв изготавливались в соответствии с ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение». Исследование предела прочности на разрыв проводили на универсальной испытательной машине AG-X plus SHIMADZU при постоянной скорости перемещения захватов 0,01 мм/с. Определение таких механических свойств, как предел прочности на разрыв σ_b , относительное удлинение δ и твёрдость по Роквеллу проводилось по общепринятым методикам. При определении микроструктуры металла отливок использовали микроскоп оптический AXIO VERT A1 с цифровой камерой AxioCam ERc5s и растровый сканирующий микроскоп ZEISS EVO LS10 с приставкой для элементного анализа OXFORD Xmaxⁿ.

Основная часть

Выбор режимов предварительного нагрева шихты основывается на проведении дифференциально-термического и термогравиметрического анализов исходных материалов для составления термитных композиций и материалов огнеупорной оснастки. Анализом источников установлено, что большинство превращений происходит в интервале температур подогрева 25...600 °С [9; 10].

В табл. 1 представлены возможные соединения в материалах, условия их образования и разложения. Данные табл. 1 частично подтверждаются результатами термогравиметрического анализа при нагреве используемых материалов. Несколько искажают картину превращений примесные элементы, содержащиеся в окалине и алюминиевом сплаве (в чистом виде и в виде окислов, гидроокислов и гидридов), а также взаимное наложение процессов диссоциации, окисления и восстановления [11].

Таблица 1

Возможные соединения в материалах и температуры их превращений

Соединения до нагрева	Температура перехода, °С	Соединения, образующиеся после нагрева
1. AlH ₃	Более 105 °С – разлагается	Al
2. Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O (гибсит)	Более 150 °С – переход	Al ₂ O ₃ ·H ₂ O (бемит)

Продолжение таблицы 1

Соединения до нагрева	Температура перехода, °С	Соединения, образующиеся после нагрева
3. $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (гидраргелит)	180...200 °С – переход	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (бемит)
4. $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (бемит)	Более 300 °С – переход	Al_2O_3
5. $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (диаспор)	Более 420 °С – переход	Al_2O_3
6. $\text{Fe}(\text{OH})_2$	150...200 °С – разлагается	Fe
7. $\text{Fe}(\text{OH})_3$	500 °С – переход	Fe_2O_3

На рис. 1 и 2 представлены дифференциально-термический и термогравиметрический анализы применяемых оксидов железа. Согласно графику потребление тепла оксидами железа происходит по первому пику до значения температуры, равного 107 °С, когда происходит их нагрев. Далее, до значения температуры, равного 350 °С, следует выделение тепла, связанное с разложением отдельных групп соединений железа.

Рис. 1. Дифференциально-термический анализ оксидов железа

Рис. 2. Термогравиметрический анализ оксидов железа

Нагрев окалины при значении температуры выше 350 °С приводит к перекрытию потребляемым теплом выделяемого. При этом уменьшение массы образца происходит до значения температуры, равного 525 °С, что говорит о продолжающемся разложении соединений на основе железа. Далее следует постепенное увеличение массы образцов оксида железа вследствие присоединения кислорода. Дальнейший нагрев образцов до температуры 600 °С приводит к началу увеличения их массы.

Исследуемая масса незначительно присоединяет кислород, соответственно, можно сказать, что сохраняется стехиометрическое соотношение оксидов железа и восстановителя. Нагрев оксидов железа от 600 °С до 1342 °С провоцирует усиление потребления кислорода, что приводит к смещению стехиометрического соотношения компонентов.

Особо активное окисление отмечено при температуре 1142 °С, когда объём выделяемого тепла за счёт окисления больше потребляемого. При нагреве термитных смесей при температуре выше 600 °С будет наблюдаться нехватка восстановителя, что может повлиять на выход металла.

На рис. 3 и 4 представлены дифференциально-термический и термогравиметрический анализы применяемого восстановителя.

Анализ полученных термограмм при испытании восстановителя показал, что пик разложения соединений, содержащих газообразные продукты, соответствует значению температуры испытания, равному 338 °С. При этом уменьшение массы образца наблюдается при его нагреве до температуры 565 °С. Далее, наблюдается увеличение массы восстановителя при температуре его нагрева до 600 °С.

Более интенсивное увеличение массы восстановителя наблюдается при температуре нагрева выше 800 °С. Активное окисление с выделением тепла, превышающее потребляемое, начинается при температуре 955 °С.

Таким образом, при нагреве восстановителя до температуры 600 °С необходимо контролировать время нахождения смеси в подогревающей среде, чтобы смещение стехиометрического соотношения компонентов было несущественным, либо заранее использовать расчётное повышенное содержание восстановителя.

Исследования показали, что за время испытания при нагреве до 1400 °С образец восстановителя полностью переходит в оксид.

Рис. 3. Дифференциально-термический анализ восстановителя

Рис. 4. Термогравиметрический анализ восстановителя

Применяемые для изготовления форм и тиглей углеродные материалы не имеют высокой стабильности при высоких температурах. Интенсивное окисление, переход в газовую фазу продуктов окисления и унос их в атмосферу начинается уже при температуре 608 °C, что подтверждается графиками DTA и TGA анализа. При нагреве углеродных материалов до температуры 200 °C средняя скорость их окисления составляет 0,000027 %/с, в интервале температур 200...400 °C скорость окисления равна 0,000166 %/с, а в интервале температур 400...600 °C скорость окисления составляет 0,000559 %/с. В интервале нагрева углеродных материалов 600...1000 °C происходит их наиболее интенсивное окисление со скоростью 0,023 %/с по линейной зависимости. Преобладание тепла, выделяющегося при окислении над потреблённым теплом, продолжается до значения температуры, равного 802 °C, после которого происходит смена доминанты, и до достижения значения температуры, равного 1000 °C, наблюдается потребление энергии. Общее падение массы углеродного образца во время эксперимента составило 38,95 %.

Таким образом, проведённые исследования позволили установить диапазон применяемых температур подогрева 25...400 °C, при которых происходит большая часть превращений в компонентах термитных составов.

При этом не меняется стехиометрическое соотношение комплекса оксидов железа и восстановителя, углеродная оснастка работает не на критических температурах, а также реагирующая система получает дополнительный энергетический запас. В производственных условиях неизменность стехиометрического соотношения будет играть большую роль, так как контролировать этот фактор трудно, при этом он влияет на химический состав получаемого металла и его свойства. Экспериментально установлено, что повышение температуры более 400 °C провоцирует снижение стойкости тиглей, насыщение сплавов углеродом при отсутствии в составе термита инертных к снижению выхода термитного металла наполнителей, повышение выхода шлаковой и газовой фаз, выброс продуктов реакции за пределы тигля.

Управление химическим составом получаемых расплавов осуществляется регулированием температуры продуктов реакции при изменении начальной температуры термитных смесей. На рис. 5 приведена динамика изменения содержания примесных элементов, полученных на основе базового термитного состава.

Определено, что повышение температуры продуктов реакции для каждого элемента влияет индивидуально. Содержание некоторых элементов в сплаве при изменении температуры циклично изменяется во всём диапазоне температур.

Рис. 5. Влияние предварительной температуры нагрева шихты на содержание химических элементов в сплавах (содержание углерода и меди по вспомогательной оси)

Значительный рост содержания углерода и серы наблюдается при повышении температур подогрева шихты. При использовании базового состава при большинстве температурных режимов шихты в заготовках присутствуют газовые поры, являющиеся следствием нахождения в сплаве большого количества газов, выделяющихся при затвердевании заготовки. Для исследования физико-механических свойств были изготовлены образцы типа «Цилиндр» из сплавов, полученных из базовой термитной композиции при предварительном температурном воздействии 25 °C и 200 °C. Выбор указанных выше температурных режимов получения литых образцов обосновывается наиболее удовлетворительным качеством металла в продольных сечениях исследуемых образцов.

На рис. 6 представлены диаграммы растяжения образцов, полученных из базового термитного состава при указанных выше температурах шихты.

Рис. 6. Диаграммы растяжения экспериментальных сплавов, полученных из базового термитного состава при разных температурах шихты: а – температура шихты 25 °C; б – температура шихты 200 °C

Характер разрушения аналогичен для большинства получаемых образцов из термитных сплавов с использованием базового термитного состава. Все образцы имеют излом, характеризующийся как кристаллический с хрупким разрушением. Так называемая площадка текучести на диаграмме растяжения всех образцов отсутствует, что соответствует средне- и высокоуглероди-

стым сталям, а также сталям, прошедшим специальную термообработку, полученным традиционными способами. В табл. 2 представлены сравнительные характеристики образцов сплавов, полученных при использовании базового состава в зависимости от начальных температур нагрева термитных композиций.

Таблица 2

Температурные режимы получения, химический состав и механические свойства
при растяжении образцов, полученных при использовании базового состава

Химический элемент	Химический состав образцов, %	
Температуры шихты	25	200
Углерод	0,250	0,890
Марганец	0,190	0,170
Кремний	0,150	0,120
Сера	0,028	0,036
Фосфор	0,018	0,023
Хром	0,040	0,040
Никель	0,120	0,110
Медь	1,270	1,290
Алюминий	0,310	0,430
Железо	97,624	96,891
Свойства образцов		
Предел прочности на растяжение, МПа	552,39	911,34
Относительное удлинение образца, %	5,3	6,05
Средняя твердость, HRC (~HB)	6,8 (~178)	34,7 (~330)

Микроструктуры образцов из базового состава при различных температурных режимах различаются структурными составляющими. На это влияет химический состав получаемых сплавов. На рис. 7 представлены микроструктуры образцов, полученных с применением базового состава и меняющихся температурных параметров шихты [12].

Рис. 7. Микроструктура образцов типа «Цилиндр» при разных увеличениях, полученных из термитных сплавов с применением базового состава при температурах шихты: а – 25 °С (х200); б – 25 °С (х1000); в – 200 °С (х200); г – 200 °С (х1000)

Микроструктура образца, полученного из базового состава без температурного воздействия на шихту, указана на рис. 7, а и б, с основной своей структурной составляющей-мартенситом (тёмная составляющая) с размером зерна до 10 баллов по ГОСТ 8233-56 «Сталь. Эталоны микроструктуры». Феррит (светлая составляющая) расположен между выделяющимися иглами мартенсита. Структура соответствует литому состоянию.

Образец, полученный из базового состава с температурными параметрами шихты 200 °С, имеет колонии мелкодисперсного перлита с плохо различимой пластинчатой структурой. Микроструктура данного образца указана на рис. 7, в и г. Цементит находится в структурно-свободной форме, достигая 0 баллов по ГОСТ 5640-68 «Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты». Границы зёрен трудно просматриваются. Структура соответствует литому состоянию. Режим литья обеспечил высокий температурный градиент между металлом и формой, а также высокую скорость охлаждения металла в форме, при которой произошло измельчение структуры.

Выводы

Проведённые дифференциально-термический и термогравиметрический анализы исходных компонентов термитных смесей позволили установить эффективный температурный диапазон предварительного нагрева композиций 25...400 °С. При использовании данного температурного диапазона происходит разложение различных гидрооксидных групп соединений, удаление из материалов неметаллических включений, влаги и так далее; реагирующая система получает дополнительный энергетический запас. Изменение массы исходных компонентов термитных смесей в данном диапазоне температур нагрева незначительно, следовательно, стехиометрическое соотношение компонентов железо-алюминиевого термита остаётся неизменным, что даёт возможность получать на производстве литые заготовки с прогнозируемыми свойствами.

Содержание большинства химических элементов в сплавах при использовании предварительного нагрева термитных шихт предсказуемо. Их содержание в сплавах изменяется незначительно. Сложно поддаются прогнозированию остаточное содержание алюминия в сплавах и содержание углерода и серы: последние при применении углеродной огнеупорной оснастки активно насыщаются из тиглей, достигая в ряде случаев недопустимых значений. В диапазоне температур подогрева их содержание может различаться в разы.

Микроструктуры получаемых образцов экспериментальных сплавов соответствуют литому состоянию и различаются структурными составляющими. В ряде случаев образцы обладают удовлетворительными свойствами и не требуют дополнительной термообработки. Равномерность распределения химических элементов по структуре и отсутствие ликваций характерны для всех экспериментальных образцов.

Образцы при испытании на разрыв имеют излом, характеризующийся как кристаллический с хрупким разрушением. Так называемая площадка текучести на диаграмме растяжения всех образцов отсутствует. Предел прочности образцов, полученных при температурах шихты 25...200 °С, достигает 911,34 МПа при невысоком относительном удлинении (6,05 %), что определяется высокими внутренними напряжениями. Твёрдость исследуемых образцов, полученных из базового термитного состава при изменяющихся температурах шихты, имеет достаточно высокие показатели в сравнении со сплавами, схожими по химическому составу, полученными по традиционным технологическим процессам и подвергающимися характерной термообработке.

Таким образом, применение предварительного нагрева термитных смесей позволяет управлять свойствами получаемых экспериментальных сплавов при алюмотермии, получая из одного состава сплавы из различных классификационных групп.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новохацкий, В. А. Малоотходная технология производства стальных отливок с экзотермическими прибылями / В. А. Новохацкий, А. А. Жуков, Ю. И. Макарычев. – М.: Машиностроение, 1986. – 64 с.
2. Комаров, О. Н. Использование термитных материалов в технологиях получения стальных отливок: монгр. / О. Н. Комаров, И. Г. Сапченко, С. Г. Жилин. – Владивосток: Изд-во Дальнаука, 2008. – 166 с.
3. Малкин, Б. В. Термитная сварка / Б. В. Малкин, А. А. Воробьев. – М.: Изд-во МКХ РСФСР, 1963. – 105 с.

4. Использование алюминиевого сплава с высоким содержанием примесных элементов в качестве восстановителя для получения сортовых марок сталей при алюмотермии / В. В. Предеин, А. В. Попов, О. Н. Комаров, С. Г. Жилин, А. И. Евстигнеев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № III - 1(31). – С. 106-114.
5. Влияние начальных температур шихты и формы на структуру и физико-механические свойства литых заготовок, получаемых при алюмотермитном переплаве / В. В. Предеин, О. Н. Комаров, А. В. Попов, С. Г. Жилин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2017. – Т. 19. – № 4. – С. 24-40.
6. Свойства термитных сталей из отходов металлургического производства / О. Н. Комаров И. Г. Сапченко, С. Г. Жилин, Н. Г. Зиновьев // Металлургия машиностроения. – 2007. – № 5. – С. 26-28.
7. Специальные способы литья: справочник / В. А. Ефимов, Г. А. Анисович, В. Н. Бабич [и др.]; под общ. ред. В. А. Ефимова. – М.: Машиностроение, 1991. – 436 с.: ил.
8. Комаров, О. Н. Особенности получения металлошихты из отходов машиностроительных предприятий [Электронный ресурс] / О. Н. Комаров, С. Г. Жилин, И. Г. Сапченко, А. В. Попов. – Режим доступа: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39650> (дата обращения: 08.01.2016).
9. Рабинович, В. А. Краткий химический справочник / В. А. Рабинович, З. Я. Хавин. – Л.: Химия, 1991. – 432 с.
10. Борнацкий, И. И. Основы физической химии: учеб. для техникумов / И. И. Борнацкий. – М.: Металлургия, 1989. – 320 с.
11. Бигеев, А. М. Металлургия стали / А. М. Бигеев. – Челябинск: Металлургия: Челяб. отд-ние, 1988. – 480 с.
12. Комаров, О. Н. Влияние особенностей переплава алюмотермитной шихты на образование агрегатных фаз, структуру и физико-механические свойства отливок / О. Н. Комаров, А. В. Попов, И. Г. Сапченко // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: материалы VI Междунар. конф., Москва, 10–13 ноября 2015 г. – Москва: ИМЕТ РАН, 2015. – С. 398-399.
13. The Influence of Structure on Strength Properties of Casting Steel Obtained with the Use of Thermite Materials / O. N. Komarov, S. G. Zhilin, D. A. Potianikhin, V. V. Predein, E. E. Abashkin, A. A. Sosnin A. V. Popov // AIP Conference Proceedings. – Vol. 1785. – P. 1-5.