

**В. Н. Цуркин, А. В. Иванов, Н. А. Федченко,  
С. С. Череповский, Н. А. Васянович, М. Л. Фещук**

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

## **КОНДУКЦИОННАЯ ЭЛЕКТРОТОКОВАЯ ОБРАБОТКА РАСПЛАВА СПЛАВА А390 В КОМПЛЕКСЕ С МОДИФИКАТОРАМИ**

*Определены физические условия и технологические параметры импульсной кондукционной электротоковой обработки расплава сплава А390 в комплексе с химическим модифицированием, которые обеспечивают повышение показателей качества литого металла: предел прочности – на 14 %, относительное удлинение – с 0,8 до 2,8 %.*

**Ключевые слова:** *заэвтектический силумин, расплав, модифицирование, кондукционная электротоковая обработка, кристаллизационная способность расплава.*

*Визначено фізичні умови і технологічні параметри імпульсної кондукційної електрострумової обробки розплаву сплава А390 в комплексі з хімічним модифікуванням, які забезпечують підвищення показників якості литого металу: межі міцності – на 14 %, відносно подовження – з 0,8 до 2,8 %.*

**Ключові слова:** *заэвтектичний силумін, розплав, модифікування, кондукційна електрострумова обробка, кристалізаційна здібність розплаву.*

*Physical terms and technological parameters of conducting pulse electric treatment of melt of А390 alloy in a complex with the chemical modification, which provided the increase of quality indexes of the cast metal: tensile strength on 14 %, relative elongation from 0,8 to 2,8 %, are defined.*

**Keywords:** *hypoeutectic silumin, alloy, modification, conduction electric pulse treatment, alloys crystallization ability.*

### *Введение*

В предыдущей статье [1] экспериментально показаны функциональные возможности энергетического модифицирования поршневого заэвтектического силумина (ПЗС) сплава А390 кондукционной электротоковой обработкой (КЭТО) жидкого состояния. Исследовано влияние тока: постоянного (по амплитуде), импульсного низковольтного (с амплитудой до 1 кА) и импульсного высоковольтного (с амплитудой свыше 1 кА). Установлено, что наиболее эффективное энергетическое модифицирование обеспечивается при КЭТО импульсами тока в жидком состоянии в температурном интервале охлаждения от 850 до 685 °С. Наиболее вероятным механизмом, с помощью которого происходит измельчение кристаллов  $Si_1$  и модифицирование его эвтектической составляющей  $Si_2$ , может быть структурная перестройка микронеоднородного строения жидкого металла, обеспечивающая увеличение количества зародышей кристаллизации на 2-3 порядка. Также в работе показано, что КЭТО вне печного агрегата потенциально обеспечивает уменьшение размеров  $Si_1$  и  $Si_2$  в разы, что может, в принципе, составить конкуренцию химическому модифицированию и легированию сплава с помощью вводимых добавок. Но с помощью использованного в работе оборудования при исследованных параметрах и режимах обработки все же не достигнуты размеры  $Si_1$  до 20 мкм, а  $Si_2$  до 10 мкм, которые, как известно, и гарантируют высокие показатели свойств литого металла [2-4].

На сегодня проблема повышения показателей свойств ПЗС зачастую решается

одновременным введением в расплав различных добавок, эффективность которых зависит от многих факторов, в том числе и от взаимного их влияния на перестройку структуры сплава. При этом, как подчеркнуто в работе [2], пока отсутствуют универсальные рекомендации относительно параметров и режимов обработки расплава модификаторами, а также относительно наиболее эффективных модифицирующих элементов и их оптимального сочетания. Но, как свидетельствуют многочисленные экспериментальные результаты, с помощью только модификаторов весьма проблематично обеспечить качество, удовлетворяющее потребителям литой металлопродукции. В этом случае прибегают к приемам обработки, связанных с энергетическим воздействием на расплав (вибрацией, ультразвуком, электромагнитной обработкой). Но такие способы являются зачастую энергоемкими, что, естественно, существенно повышает цену литых металлоизделий. Перспектива же использования принципа кондукционной электротокерной обработки расплава с введением модификаторов определяется как низкими энергозатратами метода, так и широким набором функциональных возможностей электрического тока обеспечивать перемешивание расплава, активировать процессы растворимости, переноса, сорбции и оказывать каталитическое влияние на физико-химическое взаимодействие добавок химических элементов с компонентами расплава [5-7].

При этом, как показано в работах [1, 5, 7], импульсные режимы электрического тока за счет генерирования в расплаве высококонцентрированных мощных потоков энергии имеют большие функциональные возможности, чем переменный или постоянный ток, обеспечивающие активное позитивное изменение кристаллизационной способности расплава, в том числе за счет повышения активационного действия модификаторов.

*Цель работы* – определить физические условия и технологические параметры импульсной кондукционной электротокерной обработки расплава сплава А390 в комплексе с химическим модифицированием, которые обеспечат повышение показателей качества литого металла.

### *Методические особенности экспериментальных исследований*

В качестве объекта обработки был выбран сплав А390 с химическим составом (в %мас.): Si – 18,5; Cu – 3,9; Mn – 0,12; Mg – 0,12; Ti – 0,2; Fe – 0,4; Zn – 0,02. Температурный интервал его кристаллизации определен диапазоном от 667 до 562 °С. Выплавку проводили в шахтной электропечи в металлических футерованных тиглях, где и проводили обработку током вне печного агрегата. Масса сплава составляла величину от 150 до 800 г. После обработки расплав заливали в металлическую форму для получения образцов, подвергаемых испытанию на разрыв по ГОСТу 1497-84 (ИСО 6892-84). Внутреннюю поверхность этой формы покрывали составом на основе мела и жидкого стекла. Форму предварительно прогревали до 180 °С, что обеспечивало полную ее заполняемость. Также обработанный расплав заливали в массивный медный кокиль, температура которого составляла 10 °С. Анализ микроструктуры сплава выполнялся по традиционной методике [8] на микроскопе Neofot-32 М. Образцы-свидетели вырезали из разных участков отливки. Температуру расплава регистрировали терморегулятором ТК-4К и хромель-алюмелевыми термопарами. Для химического модифицирования использовали натрий, фосфор, титан, SiC.

Действие натрия на измельчение Si<sub>1</sub> однозначно не доказано, но отмечается его поверхностно-активная роль, затрудняющая рост эвтектических колоний; кроме того, имеются сведения о повышении механических свойств ПЗС при совместной обработке натрия и фосфора [2].

Наиболее употребляемым в производственных условиях модификатором для ПЗС является фосфор. Но его прямое действие на Si<sub>3</sub> не обнаружено, а «... измельчение Si<sub>1</sub> до размеров порядка 15 мкм возможно только при хорошем модифицировании фосфора в тонкостенных отливках...» [2].

Эффект от дополнительного введения титана в сплав А390 не однозначен, хотя,

## Кристаллизация и структурообразование сплавов

как показано в работе [9], добавка его в малых дозах способствует лучшему усвоению вводимых добавок.

Интерес к SiC как к модификатору для ПЗС проявился не так давно из-за практической идентичности его кристаллической решетки и элементарного кремния [10].

Модификаторы вводили колокольчиками в состав предварительно измельченных лигатур  $AlCu_2,5P_3$ ,  $AlTi_5B_1$ ,  $Al_8SiC$  так, что количество вводимого фосфора варьировалось в пределах от 0,01 до 0,075; титана – от 0,05 до 0,5 %; SiC – от 0,1 до 0,8 %; натрий вводили в составе флюса NaCl.

Выплавку выполняли при температурах от 750 до 900 °С, заливку в температурном интервале – от 685 до 740 °С. Изотермическую выдержку проводили во временном интервале 5-30 мин., при этом время перемешивания расплава титановым импеллером – до 1 мин. Флюс и модификаторы вводили также при разных температурах.

В соответствии с данными работы [1] наилучшие результаты после КЭТО расплава сплава A390 получены с использованием источников импульсного тока, генерируемого как высоковольтным источником, так и низковольтным. Там же представлены характеристики источников тока. Ток вводили в расплав параллельными электродами, изготовленными из титана, диаметр электродов составлял 5 мм, глубина их погружения составляла столько же.

На рис. 1 представлена блок-схема экспериментального стенда, который позволял проводить выплавку в шахтной термопечи с последующим введением флюса и модификаторов, а затем вне печи при остывании расплава проводить обработку импульсами тока в пределах задаваемых параметров.

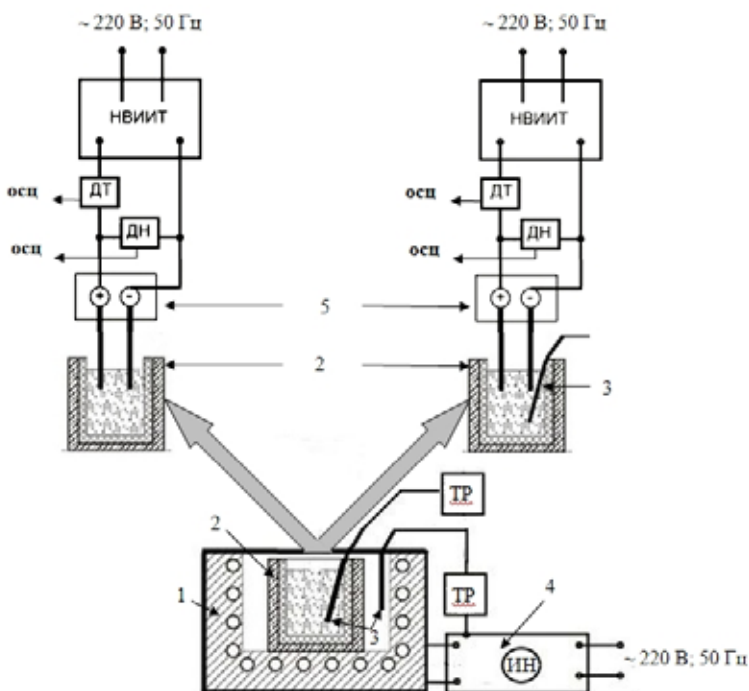


Рис. 1. Блок-схема экспериментального стенда: ДН – датчик напряжения, ДТ – датчик тока, ВВИИТ – высоковольтный источник импульсного тока, ИН – индикатор напряжения, НВИИТ – низковольтный источник импульсного тока, ТР – терморегулятор. 1 – шахтная термопечь, 2 – тигель с расплавом, 3 – термopара, 4 – блок управления и контроля термopечи, 5 – электродная система

### Описание и обсуждение результатов

Задача доводки расплава для получения его эффективной кристаллизационной способности является многофакторной и многопараметрической. Поэтому применить здесь методы рационального планирования эксперимента [11] было весьма проблематично, так как в данном случае для сложной динамической модели обработки объекта выбрать условия его функционирования с приемлемой точностью можно только при наличии требуемого объема информации, полученной с определенной достоверностью. Но, как показывают многочисленные экспериментальные данные публикаций по проблеме повышения качества ПЗС, у исследователей нет единого мнения как относительно базовых принципов выбора технологических параметров обработки, так и общих представлений о количестве и составе вводимых добавок [2]. Поэтому в данной работе поиск комплекса эффективных параметров и режимов обработки «модификаторы + импульсное воздействие» проводился методом перебора параметров. В связи с этим гарантированно классифицировать их как оптимальные и (или) универсальные нельзя.

Как известно, одним из ключевых факторов, определяющих эффективность доводки расплава до требуемого уровня его кристаллизационной способности, является температурный. Выбору значений температуры выплавки ПЗС и временного интервала изотермической выдержки, температуры, при которой целесообразно вводить модификаторы, посвящено много работ. Но в большинстве из них, анализируя микронеоднородное состояние расплава, авторы рекомендуют температуры выплавки, изотермической выдержки и введения добавки выбирать на уровне не ниже 950 °С. Именно при этой температуре (и выше) в ПЗС с содержанием кремния порядка 20 % происходит активное разупорядочивание кластерной структуры. В работе [12] обоснованы механизмы ее перестройки при воздействии импульсов электромагнитного поля. Показано, что импульсное нагружение уменьшает размеры кластеров и снижает температуру разупорядоченности. При этом, как отмечено, например, в [13, 14], увеличивается объем зоны мерцающих границ, где наиболее активно происходят процессы переноса и перераспределения элементов жидкой металлической системы. Это в свою очередь способствует образованию дополнительных центров кристаллизации.

В данной работе было установлено, что температура выплавки расплава, а также температура, при которой вводили модификаторы, не определяли столь активно конечный результат комплексной обработки, как условия, обеспечивающие позитивное влияние импульсов тока. Эти условия, как и в работе [1], определяются КЭТО от температуры (820-850 °С) при естественном остывании расплава до температуры заливки.

Представим результаты металлографического анализа образцов сплава А390 после комплексной обработки модификаторами и импульсами тока.

Как и в работе [1], здесь наилучший эффект комплексной обработки получен при использовании низковольтного источника тока, генерирующего импульсы с частотой 40 Гц и амплитудой тока 800 А. В высоковольтном источнике амплитуду тока повышали до величины, при которой получены удовлетворительные результаты, она составляла 15 кА. Дальнейшее наращивание энергии импульса нецелесообразно по двум причинам. Во-первых, это приводит к увеличению не только энергозатрат на обработку, но и массогабаритных показателей генератора. Во-вторых, сравнительно одинаковые результаты структуры металла, полученные при низковольтной и высоковольтной обработке, обеспечиваются разными удельными энергозатратами – 0,1 и 2,0 кВт · ч/т соответственно, что естественно, свидетельствует о наилучшей инвестиционной привлекательности именно низковольтного источника импульсного тока (НВИИТ).

На рис. 2, а представлена микроструктура образца, полученного выплавкой при 820 °С с последующим введением SiC в виде лигатуры, изготовленной на основе алюминия в соотношении 1:8, выдержкой в течение 20 минут. Обработка

НВИИТ с частотой 40 Гц проведена при остывании расплава до 695 °С. Как видим, добавочного уровня измельчения  $Si_1$  здесь не обнаружено ( $Si_1 \approx 60$  мкм), наиболее активно SiC повлиял на структуру эвтектики ( $Si_2 < 7$  мкм). Но проблема использования SiC заключается в низкой смачиваемости его частиц расплавом алюминия [10]. Это обстоятельство существенно затруднило приготовление модифицирующей лигатуры, а также привело к тому, что не все частицы SiC вовлекаются в кристаллизационный процесс. Но нами обнаружено, что длительная изотермическая выдержка расплава ( $> 30$  мин) все же увеличивает вероятность более активного усвоения расплавом частиц SiC, но, к сожалению, не полного. Попытки активизировать этот процесс импульсами тока не привели к 100 %-ному результату усвоения.

Комплексное воздействие импульсов тока и модифицирования фосфора в составе лигатуры AlCu<sub>2</sub>5P3 показало, что здесь проявляется не только эффект измельчения  $Si_1$ , свойственный влиянию фосфора, но и активное модифицирование  $Si_2$ , свойственное импульсному току [1]. При этом электрический ток способствовал более активному усвоению фосфора. Введение его в количестве 0,07 % без тока при одинаковых температурных режимах показало практически такой же результат и при доле 0,025 %, но при обработке НВИИТ с частотой посылок импульсов 40 Гц. На рис. 2, б представлена соответствующая микроструктура. Здесь  $Si_1$  измельчился до 35 мкм,  $Si_2$  – до 15.

Как и ожидалось, использование титана в качестве самостоятельного модификатора в составе лигатуры AlTi5B1 при различном количестве добавки в широком интервале температур как при действии тока, так и без него, не показало положительного эффекта. Но вместе с тем положительное действие титана сказалось при использовании набора химических модификаторов. Здесь удовлетворительный результат по структуре литого сплава A390 получен после выплавки при 850 °С, 20-ти минутной изотермической выдержке с трехкратным периодическим перемешиванием по 30 с, и с последующим введением Al8SiC (0,4 %мас. SiC), AlCu<sub>2</sub>5P3 (0,025 %мас. P), AlTi5B1 (0,15 %мас. Ti) при температуре 820 °С, затем 10-ти минутной изотермической выдержкой с двукратным периодическим перемешиванием по 30 с и далее обработкой вне печи НВИИТ при 40 Гц в температурном интервале от 810 до 700 °С. На рис. 2, в представлена микроструктура полученного при этом образца. Здесь  $Si_1$  выделился в компактной форме размером до 20 мкм,  $Si_2$  модифицирован до 10.

Как было отмечено выше, действие натрия на процессы измельчения  $Si_1$  и модифицирование эвтектики разными авторами трактуется по-разному. Но в работе [15] показано, что комплексная обработка NaCl и вибрацией с режимом акустической кавитации привела к измельчению  $Si_1$  в несколько раз. Но при этом структурные типы  $Si_1$  в положительную сторону не изменились, хотя отмечен эффект образования тонкодифференцированной эвтектики.

В данной работе обнаружен положительный эффект дополнительного использования натрия, вводимого в составе флюса NaCl (1 %мас.) в качестве элемента, благоприятно влияющего на улучшение кристаллизационной способности расплава, обрабатываемого в надликвидусной зоне комплексом мероприятий (Na+P+НВИИТ). На рис. 2, г представлена микроструктура образца, полученного по следующей процедуре: выплавка при 750 °С, введение флюса NaCl (1 %мас.), 10-ти минутная изотермическая выдержка с двукратным перемешиванием по 20 с, введение колокольчиком при перемешивании AlCu<sub>2</sub>5P3 (P – 0,025 %мас.), подъем температуры до 850 °С, 10-ти минутная изотермическая выдержка с двукратным перемешиванием по 20 с, обработка вне печи НВИИТ при 40 Гц в температурном диапазоне от 840 до 720 °С, заливка. Получены параметры структуры:  $Si_1$  размером 20 мкм, кристаллы в форме октаэдров со сглаженными краями;  $Si_2$  закристаллизовался в виде компактных частиц размером 12 мкм. Испытания образцов на разрыв показали увеличение предела прочности на 14 %, относительного удлинения с 0,8 до 2,8 %. Данные сравнивались с образцом, полученным по аналогичной процедуре, но при остывании сплава без

## Кристаллизация и структурообразование сплавов

электротокковой обработки. Микроструктура образца представлена на рис. 2, д. Здесь  $Si_1$  представлен различными формами, размер кристаллов  $Si_1$  – 45 мкм,  $Si_3$  имеет вид ограниченных пластин различной формы размером 15 мкм.

На рис. 2, е представлена микроструктура образца, полученного по аналогичной процедуре обработки, но вместо НВИИТ использован ВВИИТ. Здесь получены размеры включений кремния, аналогичные образцу на рис. 2, г ( $Si_1 \approx 20$  мкм;  $Si_3 \approx 12$  мкм), но в структуре эвтектики  $Si_3$  затвердел в менее благоприятной форме ограниченных пластин различной формы. При этом в сравнении с контрольным образцом (рис. 2, д)  $\sigma_B$  повышена на 12 %, а  $\delta$  – с 0,8 до 2,5 %. Заметим, что в образцах (рис. 2, г и е) объем частиц кристаллов  $Si_1$  в сравнении с образцами, полученными только с изотермической выдержкой, увеличен с 12 до 17 %, то есть достигнуто почти полуторакратное увеличение. Это косвенно подтверждает тот факт, что комплексная обработка расплава обеспечивает более активное использование кремния в процессах первичной кристаллизации в виде кристаллов  $Si_1$ .

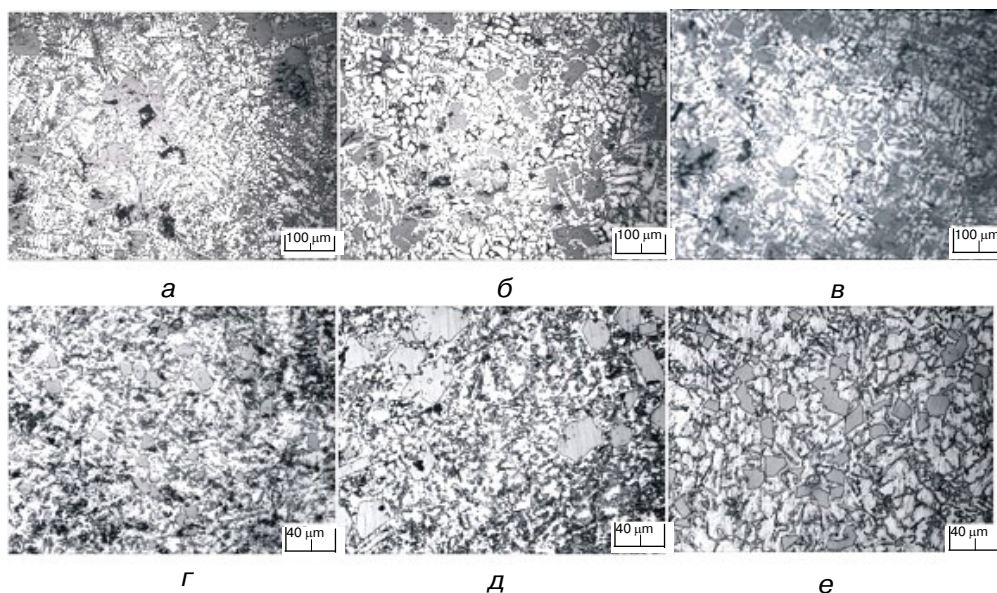


Рис. 2. Микроструктуры образцов после обработки: а – SiC+НВИИТ; б – P+НВИИТ; в – SiC, P, Ti + НВИИТ; г – Na+P+НВИИТ; д – Na+P; е – Na+P+ВВИИТ

В порядке обсуждения полученных результатов отметим, что количественное описание механизмов, обеспечивающее эффект модифицирования структуры ПЗС комплексной обработкой расплава, пока невозможно. Причина тому – недостаток экспериментальных данных, противоречивость в трактовке результатов, сделанных разными авторами. Что касается многофункционального и многоцелевого воздействия электрического тока на процессы зародышеобразования и кристаллизации, то любые попытки количественного описания механизмов воздействия тока, тем более в импульсном режиме тока, пока преждевременны.

### Выводы

Выполненные на описанном лабораторном оборудовании эксперименты по выбранным рациональным процедурам комплексной обработки показали возможность получения для сплава А390 дисперсной и однородной структуры, характеризуемой компактными кристаллами первичного кремния с размером 20 мкм и модифицированной эвтектикой с размером включений кремния 10 мкм. При этом объем кристаллов  $Si_1$  увеличен в 1,4 раза, предел прочности – на 14 %, а относительное удлинение увеличено с 0,8 до 2,8 %.

Воздействие в надликидусной зоне импульсного электрического тока малой удельной мощности (0,1 кВт · ч/т) обеспечивает улучшение кристаллизационной спо-

способности сплава с введенными модификаторами. Логично феноменологически это пояснить, в том числе, действием электромагнитного поля, схожим с каталитическим эффектом и эффектом, свойственным прекурсорам. Более детальное понимание этих эффектов возможно после рассмотрения процессов, происходящих в локальных зонах атомарного и субатомарного уровней, на которых и происходят элементарные акты перестройки структуры жидкометаллической гетерогенной системы.



### Список литературы

1. Кондукционная электротоксовая обработка расплава сплава А390 / В. Н. Цуркин, А. В. Иванов, Н. А. Федченко, С. С. Череповский и др. // Процессы литья. – 2014. – № 6. – С. 32-40.
2. Поршневые силумины / Н. А. Белов, В. Д. Белов, С. В. Савченко, М. Е. Самошина и др. – М.: Изд. дом «Руда и металлы», 2011. – 248 с.
3. Влияние магнитогидродинамической обработки расплава медистых заэвтектических силуминов на процессы образования упрочняющих наночастиц в процессе старения / А. А. Березина, В. И. Дубоделов, Т. А. Монастырская, В. Н. Фиксен, и др. // Металлофизика и новейшие технологии. – 2011. – Т. 33. – № 5. – С. 651-662.
4. *Скоробогатько Ю. П.* Фізичне модифікування заэвтектичних алюмінієвих сплавів з використанням електромагнітної дії // Металознавство та обробка металів. – 2011. – №4. – С. 44-50.
5. *Иванов А. В., Синчук А. В., Цуркин В. Н.* Электротоксовая обработка жидких и кристаллизующихся сплавов в литейных технологиях // Электронная обработка материалов. – 2011. – № 47 (5). – С. 89-98.
6. Структурные и фазовые превращения в силуминах под воздействием жидкофазной обработки электрическим током / С. С. Петров, А. Г. Пригунова, В. С. Пригунов и др. // Металлофизика и новейшие технологии. – 2009. – Т. 31. – № 8 – С. 1161-1168.
7. О высоковольтной электроимпульсной обработке расплава / Г. П. Борисов, В. Н. Цуркин, А. В. Синчук и др. // Металлургия машиностроения. – 2010. – № 5 – С. 33-39.
8. *Салтыков С. А.* Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1976. – 271 с.
9. *Peach-Paul, M. I., Katz R. N., Makhlouf M. M.* Optimum parameters for wetting silicon carbide by aluminum alloys // Metallurgical and materials transactions. – 2000. – Vol. 31A. – P. 565-573.
10. *Рафальский И. В.* Получение литейных композиционных материалов из алюминиевых сплавов в гетерогенном состоянии с дисперсными наполнителями // Литье и металлургия. – 2011. – № 3. – С. 26-31.
11. *Зедгенидзе И. Г.* Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. – М.: Наука, 1976. – 390 с.
12. *Черников Д. Г.* Повышение процессов литья при производстве деталей двигателей летательных аппаратов путем воздействия импульсного магнитного поля на расплав. Автореферат дис... канд. техн. наук. – Самара, 2010 – 16 с.
13. *Ершов Г. С., Поздняк Л. А.* Структурообразование и формирование свойств сталей и сплавов. – Киев: Наукова думка, 1998. – 380 с.
14. *Ладьянов В. И., Новохатский Н. А., Логунов С. В.* Оценка времени жизни кластеров в жидких металлах // Металлы. – 1995. – № 2. – С. 13-22.
15. Изменение структуры силуминов воздействием на их расплавы акустической кавитацией и жидкими солями / Л. Е. Бодрова, Э. А. Попова, Н. А. Ватолин и др. // Расплавы. – 2004. – № 4. – С. 62-66.

Поступила 18.12.2014