

И.Ф. Селянин, С.Н. Старовацкая, А.А. Куценко, А.И. Куценко

Сибирский государственный индустриальный университет

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОТЛИВКИ*

К поверхностям изделий современного машиностроения предъявляются требования повышенной твердости, устойчивости против коррозии, износостойкости, жаропрочности. На практике для обеспечения названных свойств широко используются известные методы химико-термической обработки поверхности изделия, нанесения электролитических покрытий, электро-взрывного легирования поверхности и др. В поисках более экономичного способа получения литых изделий с повышенными эксплуатационными свойствами рабочей поверхности в технологии литейного производства предлагалось совместить процесс легирования или модифицирования поверхностного слоя с процессом получения самой отливки в литейной форме. Однако всеми этими методами не удается получить поверхностный слой с необходимыми свойствами толщиной более чем 0,1 – 0,5 мм, что явно недостаточно для большинства машиностроительных изделий. Зачастую технологическими и конструкторскими требованиями к поверхностному слою изделия с повышенными свойствами предусматривается, чтобы его толщина была не менее 2 – 3 мм, а в ряде случаев – 10 мм и более.

В последние годы в области литейного производства активно ведутся исследования по разработке таких физических методов, которые позволяют оказывать воздействие на металл в момент формирования структуры, дают возможность управлять процессом кристаллизации металлов и сплавов, получать отливки с новым набором служебных свойств. Одним из таких способов воздействия на кристаллизующийся расплав является метод токового воздействия. Наиболее обстоятельные исследования в этом направлении проведены П.П. Бергом, П.А. Ребиндером, У. Харрисоном, В.А. Ефимовым, Г.Н. Миненко, М.А. Михайловым, И.Ф. Селяниным и др. Полученные теоретические и практические результаты авторов свидетельствуют о том, что при воздействии на расплав постоянного электрического тока существует возможность перемещения легирующих элементов из тела отливки к ее поверхности. Однако общепризнанной теории токового воздействия на расплав до сих пор не существует. К настоящему времени практически неизученными остаются вопросы о токовом влиянии на механизмы фазообразования в жидко-твердых сплавах

с различным типом проводимости твердых включений. Особенно много противоречий высказывается в отношении механизма массопереноса элементов во внутренних слоях отливки под действием постоянного тока.

Согласно существующим гипотезам, постоянный электрический ток вызывает измельчение структуры отливок благодаря взаимодействию его с токами термоЭДС в двухфазной зоне. Так, при пропускании тока с оптимальной плотностью $(0,8 \div 1,0) \cdot 10^4$ А/м² предел прочности $\sigma_{\text{в}}$ серого чугуна увеличивается на 20 – 40 %, измельчается и изменяется форма графита [1].

Исследованиями [2] установлено, что у модифицированных, обработанных током чугунов увеличение прочности $\Delta\sigma_{\text{в}}$ зависит от величины плотности тока j и описывается эмпирическим уравнением

$$\Delta\sigma_{\text{в}} = 39[1 - \exp(-0,82j)].$$

Авторы работы [3] исследовали влияние постоянного электрического тока на эффект модифицирования и свойства сплава АЛ2. Из условий длительного сохранения эффекта модифицирования за оптимальную была принята сила тока 0,5 А. При наложении тока эффект модифицирования сохраняется более длительное время (до 90 мин, без тока 20 – 40 мин). Отмечается также, что под воздействием электрического поля усиливается направленная диффузия модификатора, существенно замедляются его потери и в результате стабилизируется эффект модифицирования.

Обработка жидкого алюминиевого расплава электрическим током создает направленную кристаллизацию от анода к катоду, что позволяет управлять процессом кристаллизации кокильных отливок. При воздействии постоянного тока на жидкий металл между жидкой и твердой фазами возникает эффект Пельте, используемый при зонном плавлении. Этот эффект был применен при управлении кристаллизацией [4].

Доказано [5], что при пропускании через образец, находящийся в жидком и твердо-жидком состояниях, тока плотностью $j = (10^6 - 10^7)$ А/м растворимость кремния в алюминии возрастает примерно на 20 – 25 %. Размеры эвтектических кристаллических образований кремния уменьшаются, их распределение становится более равномерным – твердость материала повышается на 15 – 20 %. Предел прочности образцов, полученных под действием тока, повышается в среднем на 10 %.

* Работа выполняется в соответствии с реализацией Минобрнаукой РФ федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России». Соглашение № 14.132.21.1661.

По данным работы [6] воздействие электрического тока положительно влияет на процесс модифицирования расплава Ак9ч. Под воздействием тока растворяются стреловидные включения кремния, что значительно повышает качество сплава.

Воздействие тока плотностью $10^4 < j \leq 10^8$ А/м² на отливку, находящуюся в твердом состоянии, по завершении процесса кристаллизации и охлаждения ее до 0,2 – 0,5 температуры плавления приводит к дополнительному снижению механических напряжений, что равноценно операции отжига [7].

На основе экспериментальных данных [8] установлено, что при пропускании через жидко-твердый сплав постоянного тока процессы растворения и перемещения твердых частиц значительно ускоряются. При продолжительном по времени токовом воздействии в сплаве практически полностью исчезают отдельные твердые частицы; по сути происходит электрофоретическая «очистка» сплава от твердофазных включений.

В работе [9] представлены результаты исследования влияния температуры и постоянного электрического тока на фазовое состояние сплава Вi + 69 % (атомн.) In, находящегося в жидко-твердом состоянии. Показано, что электрический ток в зависимости от его направления по-разному влияет на структурное состояние расплава вблизи линии ликвидуса: форму, размеры и ориентацию твердых включений, что сказывается на микротвердости закристаллизованных сплавов. Под действием электрического тока существенно увеличивается микротвердость областей, прилегающих к отрицательному электроду, что связано с их обогащением интерметаллидом In₂Bi.

Исследовательские работы по данной тематике выполнялись и выполняются в настоящее время в Германии, Англии, США, Франции, Польше и других странах. Так, в работе [10] приведены результаты исследования интерфейсной морфологии во время кристаллизации сплава под действием электрического тока. При изучении свойств отливок из сплава Al – Si электрический ток пропускали через форму непрерывно во время заливки и кристаллизации металла. Отмечено, что с увеличением (от 0,25 до 5 А) силы тока, пропускаемого через литейную форму, предел прочности на разрыв возрастает и при токе 5 А увеличение этого параметра достигает 25 %.

Исследования на смеси Li₃PO₄ и Li₄GeO₄ [11] показали, что приложение к системе знакопеременного «пилообразного» электрического тока не приводит к изменению химического состава кристаллизующихся фаз и образованию новых фаз. При напряжении до 0,8 В на отрицательно заряженном Pt-стержне кристаллизовалась друза, состоящая из прозрачных пластинчатых кристаллов Li₂TiGeO₅ размером до 20 мм и толщиной порядка 1 мм. При смене полярности Pt-стержня на нем кристаллизовались кристаллы Li₂TiGeO₅ размером до 4 см и толщиной порядка 2 мм. На основе данных, полученных в этой серии опытов, сделан вывод о том, что приложение

электрического поля коренным образом влияет на область зарождения и последующий рост кристаллов.

Накопленные экспериментальные и теоретические данные позволяют предположить, что за счет воздействия электрического тока на металлический расплав в литейной форме можно получить литые изделия с повышенным содержанием легирующих элементов в поверхностном слое.

С помощью приложения токового воздействия на кристаллизующийся металлический расплав можно решить и обратную задачу – снизить количество нежелательных химических элементов и соединений в рабочих слоях изделия и их перемещение в «нерабочие» зоны.

Целью настоящего исследования являлась отработка технологии энергетического воздействия на кристаллизующийся расплав в литейной форме для получения оптимального распределения хрома в отливке типа «колосник», т.е. получение более высокой концентрации этого элемента в рабочей части колосника и меньшей концентрации в его внутреннем объеме.

Литье производили в сухую песчано-глинистую форму. Дополнительно в литейной форме располагали электроды, обеспечивая их контакт с расплавом в рабочей (плюсовой электрод) и затылочной (минусовой электрод) частях колосника. Одновременно в процессе эксперимента заливалась контрольная литейная форма, в которой получали отливку колосника без токового воздействия на расплав.

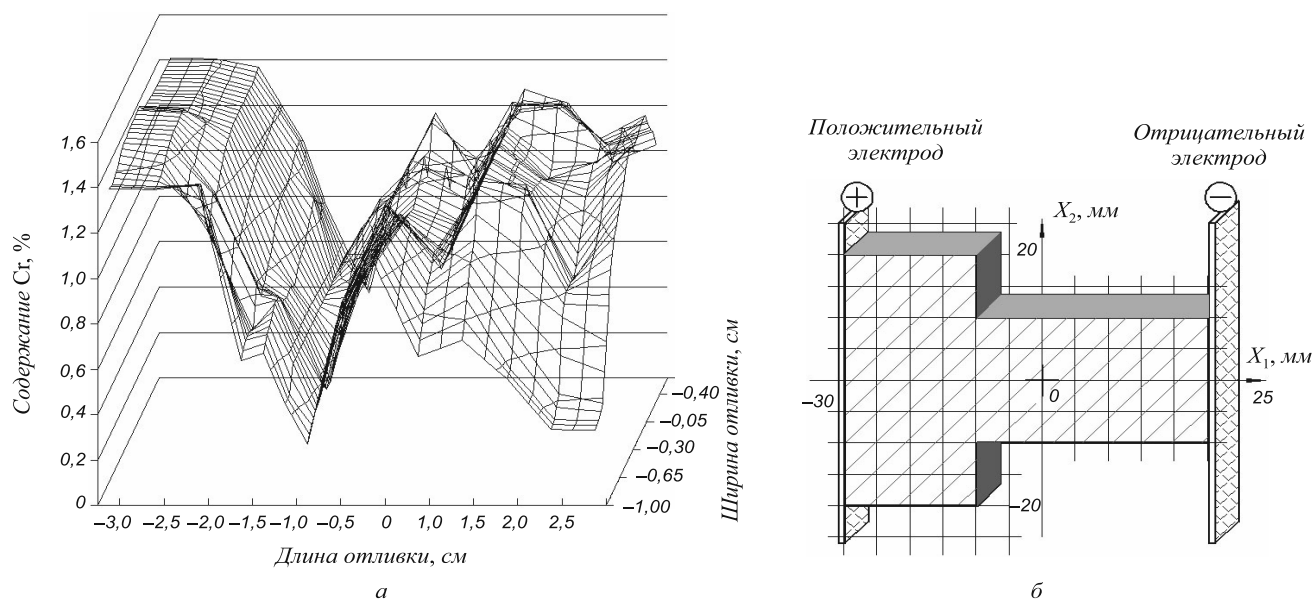
Плавку чугуна осуществляли в печи ППИ-0,06. Температура заливки расплава в форму превышала температуру ликвидуса на 100 °С. В период заливки, кристаллизации и охлаждения по отливкам пропускали постоянный ток плотностью $(1,8 \div 3,8) \cdot 10^4$ А/м².

С целью установления факта изменения концентрации хрома по сечению отливки за счет электропереноса, который фактически проявляется только в движении примесей (если концентрация их невелика), и с целью исключения влияния неравномерного легирования расплава хромом (при высоком его содержании в расплаве) за счет разных скоростей охлаждения различных объемов отливки, содержание хрома в исходном расплаве поддерживали на уровне 1,5 %.

На основании выполненных экспериментов и металлографических исследований установлено, что объемная доля карбидов хрома изменяется в зависимости от плотности токового воздействия на расплав. Причем следует заметить, что при плотности тока в отливке более $2,8 \cdot 10^4$ А/м² увеличивается объемная доля карбидов хрома и уменьшаются их средние размеры в рабочей части колосника. При меньшей плотности тока существенных изменений в размерах и доле карбидов по сечению колосника не наблюдается.

В отливках без специальной токовой обработки размер карбидов составлял 2 – 3 мкм, токовая обработка привела к большему их измельчению – до 0,5 – 1,0 мкм.

На поверхности шлифов хорошо заметны участки разной травимости в виде чередующихся полос, что является следствием возникшей при кристаллизации



Распределение хрома по сечению отливки (а) и ее вид с нанесенной координатной сеткой (б)

химической неоднородности отливки. Твердость контрольной отливки без токовой обработки по сечению не меняется и составляет 42 – 43 HRC. Твердость отливки с токовой обработкой на участках нормальной травимости составляет 41 – 43 HRC, на слаботравящихся участках достигает 46 – 47 HRC.

Данные по микротвердости металлической основы чугуна также значительно различаются. Микротвердость мартенсита составляет в среднем 760 HV, что соответствует нормальной твердости нелегированного мартенсита; микротвердость светлых участков значительно выше – 1260 HV, что также позволяет сделать вывод о том, что твердый раствор на отдельных участках обогащен хромом.

Для подтверждения гипотезы о неоднородном распределении легирующих элементов по сечению отливки было проведено исследование элементного состава металла отливки методом пошагового картирования на рентгенофлуоресцентном волнодисперсионном спектрометре последовательного действия XRF-1800 (Shimadzu, Япония). Графическая зависимость распределения хрома в отливке представлена на рисунке.

Результаты пошагового картирования показывают, что за счет токового воздействия на кристаллизующийся расплав в литейной форме удалось обеспечить содержание хрома в рабочей части колосника около 1,6 %, что несколько выше его содержания в исходном жидком металле. Максимальный приток хрома в рабочую часть колосника обеспечили слои, находящиеся на удалении 5 – 10 мм от центра картирования, где концентрация хрома в металле снизилась до 0,4 – 0,6 %. Затылочная часть колосника в меньшей степени обеднена хромом, что связано с особенностью затвердевания отливки в литейной форме, а именно, с высокой скоростью затвердевания тонкой затылочной части. Место сопряжения тонкой затылочной и более толстой рабочей части колосника образует термический

узел, в котором максимально долго находится расплав в жидком состоянии и из которого под действием электрического тока хром перемещается в сторону положительного электрода – рабочей части колосника.

Таким образом, методами металлографического и элементного анализов установлено, что содержание хрома в разных частях отливки различается более чем в два раза.

Выводы. Экспериментально доказано, что воздействие электрического постоянного тока плотностью $(3,0 - 3,5) \cdot 10^4 \text{ A/m}^2$ на затвердевающий в литейной форме расплав позволяет изменить распределение карбидообразующего элемента (хрома) по сечению отливки, тем самым обеспечить более высокие эксплуатационные свойства литых изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Специальные способы литья: Справочник. / В.А. Ефимов, Г.А. Анисович, В.Н. Бабич и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 436 с.
2. Миненко Г.Н. // Литейное производство. 2001. № 2. С. 11.
3. Крушенко Г.Г., Гуляев Б.Б., Дутов В.М., Непомнящих В.Н. // Литейное производство. 1974. № 12. С. 17, 18.
4. Якимов В.И., Марьин Б.Н., Зелинский В.В. и др. // Металлургия машиностроения. 2003. № 3. С. 36 – 39.
5. Рыбкин В.А., Тимченко С.Л. // Литейное производство. 2003. № 10. С. 17 – 19.
6. Килин А.Б. // Литейное производство. 2002. № 8. С. 21, 22.
7. Тимченко С.Л., Задорожный Н.А. // Литейное производство. 2005. № 9. С. 12, 13.
8. Лифшиц И.М., Слезов В.В. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1958. Т. 35. Вып. 2 (8). С. 479 – 492.
9. Афашоков В.З., Ахкубеков А.А., Ахкубекова С.Н., Байсултанов М.М. // Известия РАН. Серия физическая. 2008. Т. 72. № 10. С. 1436 – 1438.
10. Trivedi R., Tiller W.A. // Unconstrained Growth from a Pure Melt. - Acta Met. 1978 V. 26. № 5. P. 671 – 678.
11. Püippe J.Cl., Ibl N. // Oberfläche – Surface. 1977. Bd. 18. № .8. S. 205 – 207.

© 2012 г. И.Ф. Селянин, С.Н. Старовацкая, А.А. Куценко, А.И. Куценко
Поступила 4 октября 2012 г.