

Е. Н. Жбанова, Л. Н. Саитгареев /к. т. н./,
В. В. Ткач /к. т. н./

ГБУЗ «Криворожский национальный университет, г. Кривой Рог, Украина
e-mail: zhbanova.olena@gmail.com;
slevann@rambler.ru; tkach_v-v@mail.ru
Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, Украина
e-mail: byalik@zntu.edu.ua

Г. А. Бялик /к. т. н./

Модифицирование электрическим током конструкционных и износостойких марганецсодержащих сталей в литейной форме

O. M. Zhbanova, L. N. Saithareyev /Cand. Sci.
(Tech.)/, V. V. Tkach /Cand. Sci. (Tech.)/

National University, Kryvyi Rih, Ukraine
e-mail: zhbanova.olena@gmail.com;
slevann@rambler.ru; tkach_v-v@mail.ru
Zaporizhzhya National Technical University,
Zaporizhzhya, Ukraine
e-mail: byalik@zntu.edu.ua

G. A. Bialik /Cand. Sci. (Tech.)/

Modification by electric current of construction and wear-resistant manganese-containing steels in foundry form

Цель. Анализ влияния электроимпульсного модифицирования током переменной полярности расплава марганецсодержащих сталей в литейной форме в процессе кристаллизации.

Методика. Исследование фазового состава микроструктуры сталей 35ГЛ, 110Г13Л выполняли на оптическом микроскопе МИМ-8 при увеличении 200. Контроль микроструктуры сплава осуществляли по ГОСТ 10243-75.

Результаты. Электроимпульсное модифицирование сталей 35ГЛ и 110Г13Л улучшает химическую и физическую однородность структуры сплавов, что обеспечивает повышение предела прочности соответственно на 7 и 19 %, ударной вязкости – на 21 и 17 % без изменения химического состава.

Научная новизна. Впервые установлены параметры модифицирования электрическим током сменной полярности расплавов марганецсодержащих сталей в литейной форме в процессе кристаллизации, которые обуславливают дробление зерен карбида марганца и металлической основы сплавов.

Практическая значимость. Повышение качества структуры литого сплава позволяет получать лучшие физико-механические свойства стали после ее термической обработки. (Ил. 2. Табл. 2. Библиогр.: 6 назв.)

Ключевые слова: электроимпульсная обработка, конструкционная сталь, структура, кристаллизация, неметаллические включения, физическая неоднородность, карбиды марганца.

Постановка проблемы. Актуальной задачей металлургических предприятий является улучшение физико-механических свойств сталей. Наиболее целесообразным, по нашему мнению, является улучшение этих свойств еще на этапе кристаллизации заготовок вследствие уменьшения физической неоднородности (микротрещины, пористость, раковины), структурной неоднородности (размер и расположение зерен), а также химической неоднородности (распределение компонентов). Влияние на указанные параметры структуры без изменения химического

состава расплава и без применения затратных и трудоемких способов возможно вследствие электроимпульсной обработки металла при его кристаллизации. Но параметры тока, которые бы обеспечили необходимый модифицирующий эффект для стальных отливок, не обоснованы, что подтверждает актуальность исследований.

Цель. Целью является обоснование возможности повышения качества отливок из конструкционной стали 35ГЛ и износостойкой стали 110Г13Л без введения дополнительных легирующих элементов в результате модифици-

рования электроимпульсным током в процессе кристаллизации расплава.

Методика исследований и изложение основного материала. Для повышения качества отливок все большее применение находит метод воздействия электрического тока на расплав при кристаллизации. Такие технологические решения позволяют получать литые изделия с повышенным содержанием необходимых компонентов в поверхностном слое и снижать их содержание в теле отливки [1]. Импульсно-периодическая токовая нагрузка сплава при кристаллизации имеет определенные преимущества перед режимами постоянного и переменного тока. Прежде всего это более низкие энергозатраты при одновременном уменьшении потерь на нагрев металла.

Работы по обработке расплавов электрическим током в процессе кристаллизации в основном проводились на цветных металлах и сплавах [2–4]. Есть положительные результаты применения электрообработки при изготовлении отливок из чугунов [5]. Для указанных сплавов обработка электрическим током оказывает позитивное влияние на процессы тепло-массообмена и структурообразования, а также обуславливает направленную кристаллизацию в межэлектродном пространстве. Это особенно важно при получении тонкостенных литых изделий [6].

Следует отметить, что действие тока на марганецсодержащие стальные отливки ранее не изучалось, поэтому требуется проведение комплекса исследований по изучению модифицирования током структуры стального расплава при кристаллизации.

В лабораторных условиях плавильного павильона ГВУЗ «Криворожский национальный университет» была опробована технология получения опытной партии отливок из сплавов 35ГЛ и 110Г13Л, которая включает обработку в процессе кристаллизации расплава электроимпульсным током переменной полярности.

Полученные металлографические шлифы образцов изучали под микроскопом МИМ-8М, оснащенный видеокамерой, соединенной с компьютером. Контроль микроструктуры сплава осуществлялся по ГОСТ 10243-75.

Основные результаты исследования. Модифицирование отливок из марганецсодержащих сталей осуществляется в результате пропуска электрического через тугоплавкие электроды, заформованные в песчано-глинистой форме, которые контактируют непосредственно с металлом в процессе нахождения его в жидком, твердо-жидком состоянии и до окончания кристаллизации.

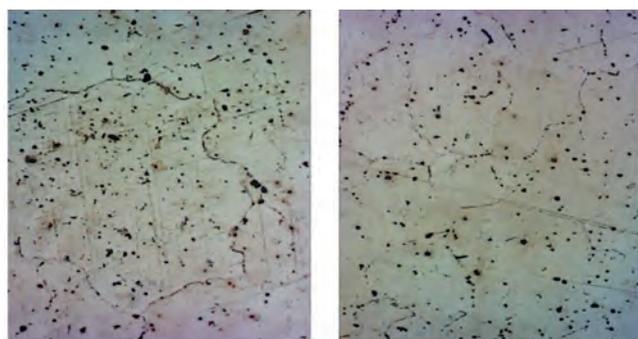
Переменная полярность положительно влияет на уменьшение химической неоднородности благодаря отсутствию электропереноса химических элементов между анодом и катодом. Длительность импульсов больше 10^{-3} с тока обеспечивает улучшение структурной однородности вследствие уменьшения размеров зерен феррита. Сила тока 30–40 А является оптимальной для процесса модифицирования. Большие значения силы тока способствуют увеличению размеров зерен карбидов марганца, ток меньше 30 А имеет незначительное влияние на микроструктуру образцов марганецсодержащих сталей. Диапазон частоты тока 5–33 Гц является оптимальным, поскольку меньшая частота тока не обеспечивает удаление неметаллических включений, а частота свыше 33 Гц способствует скоплению карбидов марганца на границах зерен металлической основы. Сквозность меньше 5 меандров не влияет на структуру и физико-механические свойства исследуемых образцов.

Модифицирование конструкционной стали марки 35ГЛ и износостойкой стали марки 110Г13Л при кристаллизации расплава электроимпульсным током переменной полярности с длительностью импульсов больше 10^{-3} с в пределах частоты 5–33 Гц, сквозности 5–24 меандров, силы 30–40 А, при напряжении 180–240 В обеспечивает уменьшение объема и протяженности трещин, снижение содержания газов, существенное (в 1,4–2,5 раза) уменьшение неметаллических примесей FeP, MnP, Fe₃P, Mn₃P, что в целом свидетельствует о значительном улучшении физической однородности сплавов, по сравнению с базовыми (не модифицированными) образцами.

Микроструктура базового образца стали 35ГЛ свидетельствует о наличии больших скоплений карбидов марганца на границах зерен феррита (рис. 1а). В модифицированном по предложенной методике образце размер ферритных зерен уменьшается на 53 %, карбиды марганца расположены в центре зерен (рис. 1б) и занимают в 1,46 раза меньшую площадь (табл. 1). В модифицированных образцах стали 110Г13Л размеры зерен уменьшаются на 60 % (рис. 2) по сравнению с базовыми образцами, площадь карбидов марганца уменьшается почти в 2,9 раза (табл. 1).

Для определения физико-механических свойств для всех образцов применялся следующий режим термической обработки: нагрев от 600 до 950 °С и выдержка при этой температуре в течение 40 минут. Закаливанию проводилось в воде при 18 °С.

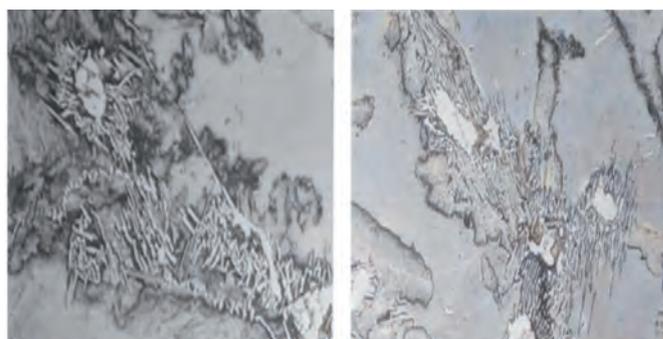
Анализ микроструктур закаленных образцов показал, что избыточные карбиды растворяются в зернах феррита или расположены исклю-



а) б)

Рис. 1. Микроструктура стали 35ГЛ:

а – базовый образец;
б – образец после модифицирования



а) б)

Рис. 2. Микроструктура стали 110Г13Л:

а – базовый образец;
б – образец после модифицирования

Таблица 1

Количественный анализ карбидной составляющей стали

Марка сплава	Модифицирование электрическим током	Длина кристаллов марганца, Мкм	Площадь кристаллов марганца, мкм ²	Размер зерен	
				Макрозерно, мм	Микрозерно, мкм
35ГЛ	Нет	12	11	15	60
110Г13Л		10,1	14	16,1	154
35ГЛ	Да	3,2	7,5	11	28
110Г13Л		2,8	4,8	4,0	93

чительно в их центрах. Модифицирование током с указанными параметрами обеспечивает уменьшение размера ферритных зерен и зерен карбидов марганца соответственно в 2 и 1,5 раза.

Микроструктурные перестройки в расплавах при их модифицировании электроимпульсным током обеспечивают значительное повышение уровня физико-механических свойств для закаленных образцов сталей 35ГЛ и 110Г13Л прежде всего предел прочности на 7 и 19 % соответственно и ударной вязкости – на 21 и 17 %, без изменения химического состава сплавов (табл. 2).

Таблица 2

Физико-механические свойства сталей

Модифицирование током	Марка стали	Предел прочности, МПа	Ударная вязкость, кДж/м ²
Нет	35ГЛ	503	243
	110Г13Л	553	190
Да	35ГЛ	540	296
	110Г13Л	659	223

Такой модифицирующий эффект, по нашему мнению, достигается вследствие микроструктурных перестроек в расплаве под действием тока переменной полярности, который меняет ближний порядок атомов в кластерах и уменьшает их размер вследствие резонансных явлений, которые происходят в процессе энергетического воздействия.

Выводы. Результаты исследований показали, что электроимпульсное модифицирование расплава стали 35ГЛ и 110Г13Л током переменной полярности с длительностью импульсов больше 10^{-3} с в пределах частоты 5–33 Гц, скважности 5–24 меандров, силы 30–40 А, при напряжении 180–240 В в процессе кристаллизации отливки способствует существенному уменьшению физической и структурной неоднородности и повышению физико-механических свойств сплавов 35ГЛ и 110Г13Л: предела прочности – на 37 и 106 МПа, ударной вязкости – на 53 и 33 кДж/м² соответственно.

Библиографический список / References

1. Электротоковая обработка жидких и кристаллизующихся сплавов в литейных технологиях / А. В. Иванов, А. В. Синчук, В. Н. Цуркин // Электронная обработка материалов. – 2011. – № 5, т. 47. – С. 89–98.
Ivanov A. V., Sinchuk A. V., Tsurkin V. N. *Elektrotokovaya obrabotka zhidkih i kristallizuyuschihsvya spлавov v liteyniyh tehnologiyah* [Electro-current treatment of liquid and crystallizing alloys in foundry technologies] *Elektronnaya obrabotka materialov*. 2011, no. 5, vol. 47, pp. 89-98.
2. Sethian J. A. Crystal growth and dendritic solidification / J. A. Sethian, J. Strain. – J. Comput. Phys. – 1992. – Vol. 92. – P. 231–253.
Sethian J. A., Strain J. Crystal growth and dendritic solidification. *J. Comput. Phys.* 1992, vol. 92, pp. 231-253.

3. Mikheev L. M. Mobility of a diffuse simple crystal-meltinterface / L. M. Mikheev, A. A. Chernove // J. Cryst Grow. – 1991. – Vol. 112. – P. 591-596.

Mikheev L. M., Chernove A. A. Mobility of a diffuse simple crystal-meltinterface. J. Cryst Grow. 1991, vol. 112, pp. 591-596.

4. Воздействие электрического тока на жидкий алюминиевый сплав / В. И. Якимов, Б. Н. Марьин, В. В. Зелинский, М. А. Заплетин // Металлургия машиностроения. – 2003. – № 3. – С. 36-39.

Yakimov V. I., Marin B. N., Zelinskiy V. V., Zapletin M. A. *Vozdeystvie elektricheskogo toka na zhidkiy alyuminievyiy splav* [The effect of electric current on liquid aluminum alloy] *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2003, no. 3, pp. 36-39.

5. Об энергетическом воздействии на металлический расплав / Г. Н. Миненко // Металлургия машиностроения. – 2006. – № 3. – С. 10-12.

Minenko G. N. *Ob energeticheskom vozdeystvii na metallicheskiy rasplav* [On the energy impact on a metallic melt] *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2006, no. 3, pp. 10-12.

6. Физическая модель воздействия электрического тока на процесс кристаллизации сплава / Г. Н. Миненко, Ю. А. Смирнова // Металлургия машиностроения. – 2009. – № 3. – С. 48-49.

Minenko G. N., Smirnova Yu. A. *Fizicheskaya model vozdeystviya elektricheskogo toka na protsess kristallizatsii splava*. [The physical model of the effect of an electric current on the crystallization process

of an alloy]. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2009, no. 3, pp. 48-49.

Purpose. Analysis of the effect of the electric impulse modulation by the current of the variable polarity of the melt in the mold during the crystallization process.

Methodology. Investigation of the phase composition of the microstructure of 35GL steel, 110G13L, was carried out on an optical microscope with a digital camera connected to a computer. Photos of the microstructure of the samples obtained at magnifications $\times 200$ were analyzed by comparison.

Findings. The results of a comparative study of the structural, chemical and physical uniformity of structural and wear-resistant manganese-containing steels are presented. The increase in strength by 7 and 19 % and impact strength by 21 and 17 %, respectively, compared with the base samples of 35GL and 110G13L steels, without changing their chemical composition.

Originality. For the first time, the parameters of the influence of the electroimpulse current of the reversed polarity on the crushing of manganese carbide and the metal base of the alloy were established.

Practical value. Improving the quality of the structure of the cast alloy will make it possible to obtain increased physical and mechanical properties of the steel after its heat treatment.

Key words: electric impact, steel, structure, crystallization, casting, porosity, manganese carbides.

Рекомендована к публикации
д. т. н. В. Е. Хрычиковым

Поступила 31.05.2017

