

УДК 669-178

В. Т. Калинин, д-р техн. наук, проф., e-mail: lutvo.metalov@gmail.com

В. Е. Хрычиков, д-р техн. наук, проф.

Национальная металлургическая академия Украины, Днепр

ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА КАЧЕСТВО СТАЛИ ВО ВРЕМЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ РАСПЛАВА В ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЕ

В работе использовались оптическая и электронная микроскопии, измерение твердости. Установлено, что за счет воздействия на металлический расплав в литейной форме электрическим током можно получить литые изделия с повышенным содержанием легирующих элементов в поверхностном слое отливки. Для практической реализации данного процесса следует использовать постоянный электрический ток, так как он создает направленную кристаллизацию от катода к аноду, для марганца разница концентрации между анодом и катодом составляет 26 % 35ГЛ, что позволяет управлять процессом кристаллизации отливок и способствует перемещению легирующих элементов во внутренних слоях отливки в процессе ее охлаждения и кристаллизации. Экспериментально установлено, что места подвода электродов к отливке в литейной форме оказывают существенное влияние на электроперенос компонентов в расплавах. Так, эффективность токовой обработки стального расплава в горизонтальной плоскости снижается в 4–8 раз по сравнению с обработкой расплава в вертикальной плоскости за счет конвективных потоков. Токовая обработка сплавов приводит к росту твердости сплава – на катоде твердость возрастает на 7 %.

Ключевые слова: постоянный электрический ток, сталь, кристаллизация, электроперенос, неметаллические включения.

У роботі використовувались оптична і електронна мікроскопії, вимірювання твердості. Встановлено, що за рахунок впливу на металевий розплав у ливарній формі електричним струмом можна отримати виливні вироби з підвищеним вмістом легуючих елементів у поверхневому шарі виливка. Для практичної реалізації даного процесу слід використовувати постійний електричний струм, так як він створює спрямовану кристалізацію від катода до анода, для марганця різниця концентрації між анодом і катодом складає 26 % 35ГЛ, що дозволяє управляти процесом кристалізації виливків і сприяє переміщенню легуючих елементів у внутрішніх шарах виливка в процесі його охолодження і кристалізації. Експериментально встановлено, що місця підведення електродів до виливка у ливарній формі істотно впливають на електроперенесення компонентів у розплавах. Так, ефективність електрообробки сталевого розплаву у горизонтальній площині знижується в 4–8 разів у порівнянні з обробкою розплаву у вертикальній площині за рахунок конвективних потоків. Обробка постійним електричним струмом сплавів призводить до зростання твердості сплаву – на катоді твердість зростає на 7 %.

Ключові слова: постійний електричний струм, сталь, кристалізація, електроперенесення, неметалеві включення.

Optical and electron microscopy, hardness measurements were used in the work. It is established that due to the influence of electric current on the metal melt in the casting mold, it is possible to obtain cast parts with an increased content of alloying elements in the surface layer of the casting. For the practical realization of this process, a constant electric current should be used, since it creates directional crystallization from the cathode to the anode, for manganese, the difference in concentration between the anode and the cathode is 26 % 35ГЛ, which allows the crystallization process of the castings to be controlled and facilitates the movement of the alloying elements in the inner layers of the casting during its cooling and crystallization. It has been experimentally established that the position of electrodes in the casting in the mold have a significant effect on the electrotransfer of the components in the melts. Thus, the efficiency of the current processing of steel melt in the horizontal plane is reduced by 4–8 times compared with the treatment of the melt in the vertical plane due to convective flows. Current processing of alloys leads to an increase in the hardness of the alloy – at the cathode the hardness increases by 7 %.

Keywords: constant electric current, steel, crystallization, electrotransfer, nonmetallic inclusions.

Вступление

Проблема улучшения структуры литой стали является предметом многочисленных исследований [1–3]. Для повышения качества и свойств отливок из различных сплавов наиболее широко применяются тепловые, механические и электромагнитные методы совершенствования структуры сплавов в жидком и твердо-жидком состояниях.

Для повышения качества и свойств отливок все большее применение находит метод воздействия электрическим током на расплав при кристаллизации. Технические решения, реализованные с использованием этого метода, дают возможность управлять процессами тепломассопереноса и структурообразования, а также получать литые изделия с повышенным содержанием необходимых компонентов в поверхностном слое или уменьшать их содержание в определенных зонах отливки.

Работы по обработке расплавов электрическим током в процессе кристаллизации, в основном, проводились на цветных металлах и сплавах [4–6]. Положительные результаты применения электрообработки существуют и при изготовлении отливок из чугунов [7] и сталей [8]. Обработка электрическим током также оказывает положительное влияние на процессы тепломассопереноса и структурообразования и обуславливает направленную кристаллизацию в межэлектродном пространстве. В работе [9] автор показал первые опыты по электровоздействию на сталь марки 40Л. Электрообработка легированных и марганецсодержащих стальных расплавов ранее изучалась на марках стали 110Г13Л [10], а также 35ГЛ [11].

Следует отметить, что механизм физико-химического воздействия электрического тока на процесс кристаллизации требует тщательных теоретических и экспериментальных исследований, приближенных к реальным условиям. Имеющиеся экспериментальные данные носят отрывочный характер, исследования выполнены на малых объемах расплава при очень медленном его охлаждении. Реальные литейные факторы, которые обуславливают кинетику кристаллизации промышленных сплавов, достаточно часто остаются вне поля зрения исследователей. Кроме того, исследовано влияние геометрии и расположения электродной системы как важнейшего технологического элемента в формировании электрического и магнитного полей в расплаве на изменение физико-механических свойств сплавов, кристаллизации под действием постоянного тока.

Поэтому проведение комплекса исследований по изучению модификации током структуры марганецсодержащих стальных расплавов при кристаллизации в литейной форме является актуальной задачей.

Экспериментальное моделирование

В основу экспериментальных исследований поставлена задача обоснования возможности улучшения качественных характеристик отливок из марганецсодержащих сталей в результате модифицирования электрическим током. Для изучения закономерностей влияния постоянного электрического тока на расплав при

кристаллизации использовались конструкционная сталь марки 35ГЛ, химический состав которой определялся методом спектрального анализа с использованием эталонных образцов.

Исследовались экспериментальные образцы весом 12 кг и размерами 100х100х180 мм. Модели образцов формировались в литейной форме с заформованными в ней тугоплавкими электродами диаметром 3 мм, по которым во время кристаллизации расплавов подавали постоянный электрический ток.

Согласно плану экспериментов варьировались следующие параметры: сила тока – от 40 А; положения образцов в форме – вертикальное и горизонтальное; расположение и количество электродов в форме (рис. 1).

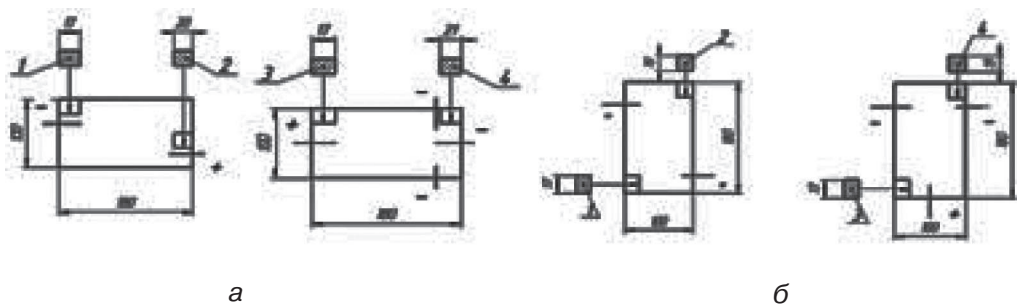


Рис. 1. Расположения отливок в форме, места подводов электродов: а – вертикальное расположение; б – горизонтальное расположение

Плавку шихты для получения конструкционного сплава заданного состава осуществляли в электродуговой печи. Исследование фазового состава микроструктуры образцов с 35ГЛ, а также балла зерна, выполнялись на оптическом микроскопе МИМ-8М с цифровой камерой, подключенной к компьютеру. Фотографии микроструктуры образцов, полученных при увеличениях 200х, анализировались методом сравнения.

В промышленных условиях проведены испытания технологии получения экспериментальных отливок из марганецсодержащих сталей с применением электрообработки стальных расплавов в процессе кристаллизации.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования полученных литых образцов из стали 35ГЛ, модифицированной при кристаллизации постоянным электрическим током силой 40 А, показали, что под действием тока наблюдается электроперенос основных компонентов расплавов, который обуславливает формирование мелкозернистой структуры сплавов у кромки образца (катод) и увеличение концентрации неметаллических включений и газовых раковин в его центральной части (анод).

При модифицировании электрическим током силой 40 А содержание марганца в верхней части (анод) снижалось до 1,2 %, в нижней части (катод) повышалось до 1,8 %. При пропускании электрического тока силой более 80 А содержание марганца в верхней части образца уменьшается до 1,4 %, в нижней части образца – увеличивается до 1,6 %.

В качестве одного из показателей электропереноса использовано относительное изменение концентрации элемента между анодом и катодом. Данный показатель широко используется в теории и практике электропереноса [12–13,] и его выражают в процентах:

$$\Delta C = \frac{C^A - C^K}{C} \times 100 \%,$$

Затвердевание сплавов

где C^K – содержание элемента на катоде, %мас.; C^A – содержание элемента на аноде, %мас.; C – содержание компонента в расплаве до электропереноса.

Полученные в процессе исследований данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Электроперенос при силе тока 40 А

Элемент	Fe	Mn	P	Si	C
Химический состав	97,4	1,5	0,4	0,3	0,38
ΔC 35ГЛ, %	4,2	26,6	8,9	4	4,6

Разница в вертикальном и горизонтальном расположении образцов на образование карбидов марганца существенно не отразилась. А вот содержание неметаллических примесей при горизонтальном положении образца в литейной форме и боковом подводе постоянного электрического тока изменяется незначительно, несмотря на силу тока 40 А, что связано с большей работой системы на перемещение примесей в горизонтальном направлении по сравнению с вертикально расположенным.

При горизонтальном расположении отливки на электродах разной полярности наблюдается скопление неметаллических частиц (рис. 2). Проведенные эксперименты показали, что полярность подведения постоянного электрического тока влияет на эффективность смещения неметаллических частиц в верхней части при горизонтальном расположении электродов и вертикальном расположении отливок (рис. 3). Это связано с движением ионов к катоду и его меньшей плотностью по отношению к железу.

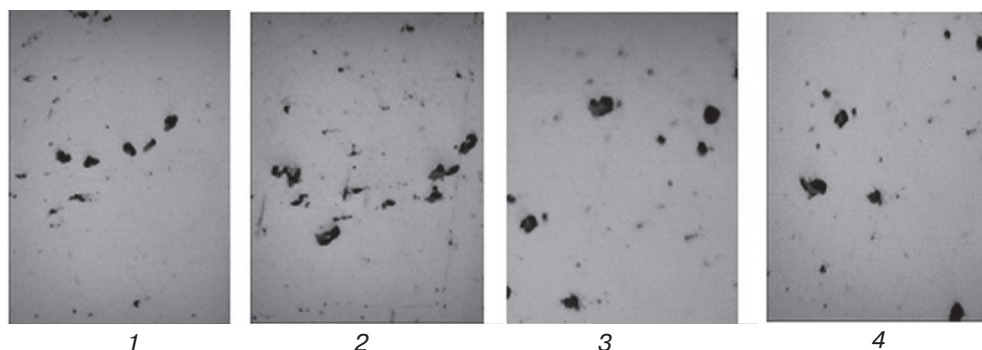


Рис. 2. Образцы неметаллических включений при горизонтальном расположении отливки

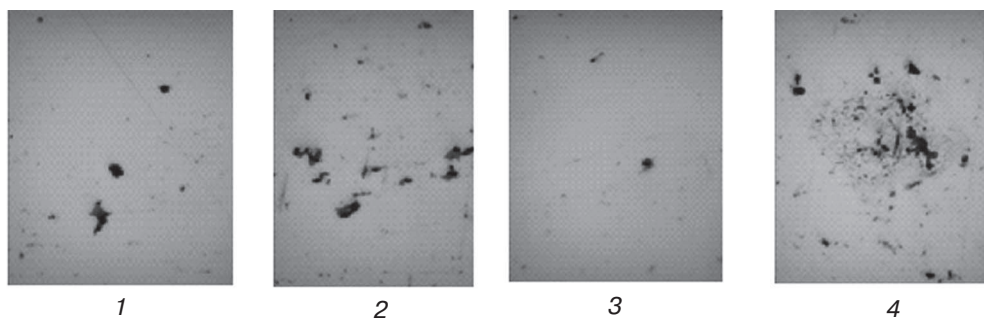


Рис. 3. Образцы неметаллических включений при вертикальном расположении отливки

Затвердевание сплавов

Неметаллические включения (оксиды и нитриды) в катодных образцах мельче и их гораздо больше. Кроме измельчения зерна феррита за счет увеличения числа первичных зародышей, электрический ток способствует выделению газа и неметаллических включений из расплава, на которые влияет количество подключенных электродов.

Эффект полярности дает возможность повышать качество стали в нижней зоне отливки – образец 3 на рис. 3 (или в центральной, если подвести к ней положительный электрод).

Исследование влияния постоянного электрического тока на смещение неметаллических частиц для образцов из стали 35ГЛ при увеличении количества анодов показали, что на анодной части наблюдается существенное увеличение FeP , MnP , Fe_3P , Mn_3P и газовых включений, причем содержание последних увеличивается почти в 2,5 раза. Этот факт свидетельствует о значительном улучшении физической однородности сплава.

В ходе экспериментов установлено, что за счет изменения полярности подведения к образцу постоянного электрического тока меняются кристаллизационные параметры сплава: интервал кристаллизации увеличился на 2–4 %, время кристаллизации отливки увеличилось на 5–9 %. Параметры кристаллизации марганецсодержащих сплавов зависят от силы тока.

Обработка жидкого марганцевого расплава электрическим током создает направленную кристаллизацию, что позволяет управлять процессом кристаллизации стальных отливок. Наряду с этим, электрический ток, будучи внутренним источником энергии, дополнительно прогревает отливку, что приводит к существенному улучшению физико-механических свойств отливки – происходят изменения в распределении фазовых составляющих в расплаве и формирование более мелкой структуры; наблюдается увеличение твердости литого металла в катодной части; совершается дегазация расплава (табл. 2).

Таблица 2
Физико-механические свойства образцов

Сила тока, А	Твердость по Бринеллю (без закаливания)		Предел прочности, МПа		Ударная вязкость, кДж/м ²	
	катодная часть	анодная часть	катодная часть	анодная часть	катодная часть	анодная часть
0	201		503		243	
40 А	216	205	540	512	296	249

Выводы

- Исследования показали, что на твердость образцов стальных сплавов влияет сила электрического тока и его полярность. Данный эксперимент дает возможность получить ранее неизвестный результат и новый технологический эффект, который выражается в существенном улучшении структурной и химической однородности марганецсодержащих сталей в поверхностных слоях отливки, что приводит к повышению предела прочности и ударной вязкости сплавов.

- Результаты работы расширяют представления о процессах формирования структуры и свойств отливок из марганецсодержащих сплавов, которые подвергались воздействию постоянного электрического тока. Установлено, что за счет воздействия постоянным электрическим током определенной силы при кристаллизации расплава в литейной песчано-глинистой форме в марганецсодержащих сплавах можно изменить содержание компонентов в поверхностном слое и в теле

отливки, а также влиять на структуру и твердость сплавов. В процессе кристаллизации расплава под действием постоянного электрического тока имеет место электроперенос: возникает направленное движение присутствующих в расплаве ионов металла к катоду, а газов и неметаллических включений – к аноду, следствием которого является формирование мелкозернистой структуры отливки у кромки образца и концентрирование неметаллических включений и газовых раковин в центре или наоборот, в зависимости от геометрии установки электродов и их полярности.

- Такой технологический прием дает возможность получать литые изделия с повышенным содержанием необходимых компонентов в поверхностном слое отливки (катодной части) и снижать их содержание в теле отливки (анодной части) или решать обратную задачу – перемещать «вредные» компоненты из поверхностных слоев в тело отливки. Для практической реализации данного процесса следует использовать постоянный электрический ток 40 А.

- Экспериментально установлено влияние полярности постоянного электрического тока на величину электропереноса компонентов в расплаве 35ГЛ – для марганца разница концентрации между анодом и катодом составляет 26,6 %. Наибольший эффект электропереноса компонентов расплава в литейной форме достигается для марганецсодержащих сплавов при вертикальном расположении анода и катода. Так, эффективность токовой обработки стального расплава в горизонтальной плоскости снижается в 4–8 раз по сравнению с обработкой расплава в вертикальной плоскости за счет конвективных потоков.

- Обработка сплавов электрическим постоянным током приводит к росту твердости сплава – для марганецсодержащих сталей в катодной части образцов твердость возрастает на 7 %.



Список литературы

1. Селянин И. Ф. Влияние наследственности на предсудачное расширение сплавов / И. Ф. Селянин, В. Б. Деев, А. П. Войтков и др. // *Металлургия машиностроения*. – 2005. – № 6. – С. 15–17.
2. Знаменский Л. Г. Электроимпульсные нанотехнологии в литейных процессах / Л. Г. Знаменский, В. В. Крымский, Б. А. Кулаков. – Челябинск: ЦНТИ, 2003. – 130 с.
3. Кіщенко О. М. Сучасні методи регулювання процесу кристалізації ливарних сплавів / О. М. Кіщешко, В. В. Ткач // *Вісник Криворізького національного університету*. – 2012. – Вип. 30.
4. Селянин И. Ф. Влияние зонной структуры металлических расплавов на интенсивность зародышеобразование новой фазы / И. Ф. Селянин, В. Б. Деев, А. И. Куценко [и др.] // *Литейщик России*. – 2012. – № 10. – С. 22–25.
5. Yongyong Gong. The effects of the electric current Pulse on the interface stability of Al-alloy / Yongyong Gong // *School of Materials Science and Engineering*. – 2006. – № 10. – pp. 12–13.
6. Кіщенко О. М. Поліпшення якості відливань електричним струмом в процесі кристалізації / О. М. Кіщенко, В. В. Ткач, Т. В. Орел // *Збірка конференцій ПІТ Кривий Ріг*, 25.
7. Миненко Г. Н. Физическая модель воздействия электрического тока на процесс кристаллизации сплава / Г. Н. Миненко, Ю. А. Смирнова // *Металлургия машиностроения*. – 2009. – № 3. – С. 48–49.
8. Миненко Г. Н. Об энергетическом воздействии на металлический расплав / Г. Н. Миненко // *Металлургия машиностроения*. – 2006. – № 3. – С. 10–12.
9. Ткач В. В. Влияние электровоздействия в процессе кристаллизации на свойства стали 110Г13Л / В. В. Ткач, Е. Н. Кищенко // *Электрометаллургия*. – 2015. – № 7. – С. 9–11.
10. Zhdanova O. M., Saitgareyev L. N., Skidin I. E. Influence of a Direct Current on Macrostructure

and Microstructure of Manganese-Containing Steels // *Metallofizika i noveishie tekhnologii*. – 2017. – Vol. 39. – no. 11. – pp. 1457–1469 [in English].

11. Ахкубеков А. А. Связь параметров диффузии и электропереноса компонентов бинарных расплавов при контактном плавлении / А. А. Ахкубеков, Б. С. Карамурзов // *Письма в ЖТФ*. – 2002. – Т. 28. – Вып. 2. – С. 60–66.
12. Ахкубекова С. Н. Электроперенос в гетерофазных системах и его роль в формировании структуры сплава / С. Н. Ахкубекова, М. М. Байсултанов, А. А. Ахкубеков // *Тезисы докладов X Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ*. – Казань: Казанский государственный технологический университет, 2002. – С. 177–178.



References

1. Selyanin, I. F., Deev, V. B., Vojtkov, A. P. et al. (2005) Vliyanie nasledstvennosti na predusadochnoe rasshirenie splavov [*The influence of heredity on the preplash expansion of alloys*]. *Metallurgiya mashinostroeniya*, no. 6, pp. 15–17 [in Russian].
2. Znamenskij, L. G., Krymskij, V. V., Kulakov, B. A. Znamenskij, L. G. (2003) Elektroimpul'snye nanotekhnologii v litejnyh processah [*Electroimpulse nanotechnology in foundry processes*]. CHelyabinsk: CNTI, 130 s. [in Russian].
3. Kishcheshko, O. M., Tkach, V. V. (2012) Suchasni metody reguluvannya protsesu kristalizatsii livarnykh splaviv [*Modern methods of regulation of the process of crystallization of foundry alloys*]. *Visnik Krivoriz'kogo nacional'nogo universitetu*, Vyp. 30 [in Ukrainian].
4. Selyanin, I. F., Deev, V. B., Kucenko, A. I. et al. (2012) Vliyanie zonnoj struktury metallicheskih rasplavov na intensivnost' zarodysheobrazovanie novoj fazy [*The effect of the band structure of metallic melts on the intensity of the nucleation of a new phase*]. *Litejshchik Rossii*, no. 10, pp. 22–25 [in Russian].
5. Yongyong, Gong (2006) The effects of the electric current Pulse on the interface stability of Al–alloy. *School of Materials Science and Engineering*, no. 10, pp. 12–13 [in English].
6. Kishchenko, O. M., Tkach, V. V., Orel T. V. Polipshennyya yakosti vidlivan' elektrichnim strumom v procesi kristalizatsii [*Improving the quality of casting by electric current in the process of crystallization*]. *Zbirka konferencij PIT Krivij Rig*, 25 [in Russian].
7. Minenko, G. N., Smirnova, YU. A. (2009) Fizicheskaya model' vozdejstviya ehlektricheskogo toka na process kristalizatsii splava [*The physical model of the effect of electric current on the crystallization process of an alloy*]. *Metallurgiya mashinostroeniya*, no. 3, pp. 48–49 [in Russian].
8. Minenko, G. N. (2006) Ob energeticheskom vozdejstvii na metallicheskiy rasplav [*On the energy impact on a metallic melt*]. *Metallurgiya mashinostroeniya*, no. 3, pp. 10–12 [in Russian].
9. Tkach, V. V., Kishchenko, E. N. (2015) Vliyanie elektrovozdejstviya v protsesse kristalizatsii na svoystva stali 110G13L [*The influence of electric action in the process of crystallization on the properties of 110G13L steel*]. *Elektrometallurgiya*, no. 7, pp. 9–11 [in Russian].
10. Zhanova, O. M., Saitgareyev, L. N., Skidin, I. E. (2017) Influence of a Direct Current on Macrostructure and Microstructure of Manganese-Containing Steels. *Metallofizika i noveishie tekhnologii*, Vol. 39, no. 11: 1457–1469 [in English].
11. Ahkubekov, A. A., Karamurзов, B. S. (2002) Svyaz' parametrov diffuzii i ehlektricheskogo komponentov binarnykh rasplavov pri kontaktnom plavlenii [*Relationship between the diffusion and electro-transfer parameters of the components of binary melts in contact melting*]. *Pis'ma v ZHTEF*, T. 28, Vol. 2, pp. 60–66. [in Russian].
12. Ahkubekova, S. N., Bajsultanov, M. M., Ahkubekov, A. A. (2002) Elektroperenos v geterofaznykh sistemah i ego rol' v formirovanii struktury splava [*Electrotransport in heterophase systems and its role in the formation of the alloy structure*]. *Tezisy dokladov X Rossijskoj konferentsii poteplofizicheskimi svoystvami veshchestv*. Kazan': Kazanskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskij universitet, pp. 177–178. [in Russian].

Поступила 05.02.2018