

## ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

PACSnumbers: 61.72.Ff, 61.72.Qq, 61.72.S, 62.20.fk, 62.20.Qp, 68.70.+w, 81.40.Cd, 83.60.La

### Вплив постійного струму на макро- та мікроструктуру мангановмісних сталей

О. М. Жбанова, Л. Н. Саїтгареев, І. Е. Скідін

*Державний вищий навчальний заклад  
«Криворізький національний університет»,  
вул. Віталія Матусевича, 11,  
50027 Кривий Ріг, Україна*

У статті показано, що для підвищення якості виливків все ширше використовуються методи, які ґрунтуються на впливі електричного струму на розтоп при його кристалізації. Позитивні результати модифікування полягають у поліпшенні процесів тепломасоперенесення та структуроутворення. Відзначається, що теоретично та практично доведено вплив електрооброблення лише на виливки з кольорових металів і стопів, а також з деяких чавунів. Механізм фізико-хімічного впливу електричного струму на процес кристалізації у ливарній формі мангановмісних сталей потребує ретельних досліджень, які були б наближені до реальних умов. У статті зроблено порівняння макро- і мікроструктур легованих Манганом сталей 110Г13Л і 35ГЛ, модифікованих під час кристалізації у ливарній формі постійним електричним струмом, із структурами зразків, одержаних за традиційною технологією. Усі дослідження проводилися за стандартними методиками. Встановлено, що модифікування сталевих розтопів у ливарній формі постійним електричним струмом силою у 40 А забезпечує одержання литих виробів з підвищеним вмістом леґувальних елементів у поверхневому шарі виливків. Відносна зміна концентрації Mn між анодною та катодною частинами зразків зі сталей марок 35ГЛ і 110Г13Л становить 26,6 та 5,3% відповідно. Показано, що схема розташування

Corresponding author: Olena Mykolayivna Zhbanova  
E-mail: zhbanova.olena@gmail.com

*State Institution of Higher Education 'Kryvyi Rih National University',  
11 Vitaliy Matusevych Str., UA-50027 Kryvyi Rih, Ukraine*

Please cite this article as: O. M. Zhbanova, L. N. Saithareyev, and I. E. Skidin, Influence of a Direct Current on Macrostructure and Microstructure of Manganese-Containing Steels, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 11: 1455–1467 (2017) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.39.11.1455.

електрод у ливарній формі істотно впливає на переміщення неметалевих включень. Продемонстровано значний вплив струму на мікроструктуру ступів 35ГЛ і 110Г13Л під час їх кристалізації: кількість і розміри первинних дендритів помітно змінюються. Карбіди мангану стають більш дисперсними, зменшуючись у розмірі від 80 до 53 мкм і від 254 до 90 мкм відповідно. При цьому віддаль між дендритами також зменшується. Електрооброблення ступів 35ГЛ і 110Г13Л приводить до зростання їхньої твердості на катодній частині зразків відповідно на 7% та 9%, ударної в'язкості — на 21% та 8%, межі міцності — на 7% та 14%.

**Ключові слова:** карбіди мангану, мангановмісні сталі, структура, механічні властивості, електроперенесення, постійний струм.

As shown in the article, the methods of electric-current influencing on melting during melt crystallization are more and more widely used to improve the quality of castings. Positive results of such modification are the improved processes of both the heat and mass transfer and the structure formation. As noted, the influence of electrical treatment is proved theoretically and practically only for the casting of non-ferrous metals and alloys as well as some types of cast irons. The mechanism of the physical and chemical influences of electric current on the process of crystallization in the foundry form of manganese-containing steels requires careful investigations, which must be close as possible to real conditions. In the article, the comparison of macro- and microstructures of the 110G13L and 35GL manganese-alloyed steels modified during crystallization in the foundry form by direct electric current with the structures of samples obtained by using the traditional technology is made. All the studies are carried out according to standard techniques. As determined, the modification of the smelting steels in the foundry form by direct electric current of 40 A provides an obtaining the cast products with an increased content of alloying elements in the surface layer of castings. The difference in the Mn concentration between the anode and cathode parts of the samples of the 35GL and 110G13L steel grades is 26.6% and 5.3%, respectively. As shown, the arrangement of electrodes in the foundry form influences significantly on the displacement of non-metallic inclusions. Significant influence of current on microstructure of 35GL and 110G13L alloys during their crystallization is consisted in significant changing the quantity and size of primary dendrites. Manganese carbides become more dispersed and decrease in size from 80 to 53  $\mu\text{m}$  and from 254 to 90  $\mu\text{m}$ , respectively. At the same time, the distance between dendrites is also decreasing. Electrical processing of the 35GL and 110G13L alloys results in the increase of their hardness on the cathode part of samples by 7% and 9%, the impact strength—by 21% and 8%, the ultimate tensile strength—by 7% and 14%, respectively.

**Key words:** manganese carbides, manganese-containing steels, structure, mechanical properties, electric transport, direct current.

В статье показано, что для повышения качества и свойств отливок всё шире используются методы, основанные на воздействии электрического тока на расплав при его кристаллизации. Положительные результаты модифицирования заключаются в улучшении процессов тепломассоперено-

са и структурообразования. Отмечается, что теоретически и практически доказано влияние электрообработки только на отливки из цветных металлов и сплавов, а также из некоторых чугунов. Механизм физико-химического воздействия электрического тока на процесс кристаллизации в литейной форме марганецсодержащих сталей требует тщательных исследований, которые были бы максимально приближены к реальным условиям. В статье сделано сравнение макро- и микроструктур легированных марганцем сталей 110Г13Л и 35ГЛ, модифицированных при кристаллизации в литейной форме постоянным электрическим током, со структурами образцов, полученных по традиционной технологии. Все исследования проводились по стандартным методикам. Установлено, что модифицирование стальных расплавов в литейной форме постоянным электрическим током силой 40 А обеспечивает получение литых изделий с повышенным содержанием легирующих элементов в поверхностном слое отливок. Относительное изменение концентрации Mn между анодной и катодной частями образцов из сталей марок 35ГЛ и 110Г13Л составляет 26,6 и 5,3% соответственно. Показано, что схема расположения электродов в литейной форме существенно влияет на перемещение неметаллических включений. Показано значительное влияние тока на микроструктуру сплавов 35ГЛ и 110Г13Л при кристаллизации: количество и размеры первичных дендритов существенно меняются. Карбиды марганца становятся более дисперсными, уменьшаясь в размерах от 80 до 53 мкм и от 254 до 90 мкм соответственно. При этом расстояние между дендритами также уменьшается. Электрообработка сплавов 35ГЛ и 110Г13Л приводит к росту их твердости на катодной части образцов соответственно на 7% и 9%, ударной вязкости — на 21% и 8%, предела прочности — на 7% и 14%.

**Ключевые слова:** карбиды марганца, марганецсодержащие стали, структура, механические свойства, электроперенос, постоянный ток.

*(Отримано 2 жовтня 2017 р.)*

## 1. ВСТУП

У ливарному металознавстві особлива увага приділяється формуванню первинної структури виливків, тобто структури після первинної кристалізації і повного затвердіння розтопу. Проблема поліпшення структури литих виробів є предметом численних досліджень [1–3]. Для поліпшення якості і властивостей виливків з різних стопів найбільш широко застосовуються теплові, механічні та електромагнетні методи удосконалення структури стопів у рідкому та твердо-рідкому станах. Теплові методи ґрунтуються на термочасовому та термошвидкісному обробленнях розтопу і полягають в управлінні литою структурою шляхом зміни швидкості затвердіння і градієнту температури. Різні механічні методи ґрунтуються на переміщенні одних мікрооб'ємів матеріалу відносно інших (перемішування, фільтрація, продування газами, оброблення ультразву-

вуком та вібрацією). Електромагнетні методи полягають в обробленні розтопу електромагнетними полями.

Для поліпшення якості та властивостей виливків все більшого застосування набуває метода, яка ґрунтується на впливі електричного струму на розтоп при кристалізації [4]. Технічні рішення, які реалізовано з використанням цієї методи, уможливають керування процесами тепломасоперенесення [5] та структуроутворення і одержання литих виробів з підвищеним вмістом необхідних компонентів у поверхневому шарі або зменшення їхнього вмісту в певних зонах виливка.

Роботи з оброблення розтопів електричним струмом в процесі кристалізації, в основному, проводилися на кольорових металах і стопах [6–8]. В роботі [9] показано, що виливки з алюмінієвих і мідних стопів, які кристалізувалися без дії електричного струму, пронизані численними порами, наявність котрих сприяє зниженню густини виливка на 5% у порівнянні з фізичною щільністю непоруваного матеріалу. Оброблення електричним струмом зазначених розтопів сприяє зниженню ймовірності виникнення макро- і мікрордефектів структури і зумовлює спрямовану кристалізацію в міжелектродному просторі.

Позитивні результати застосування електрооброблення існують й при виготовленні виливків з чавунів [10, 11]. Оброблення електричним струмом також має позитивний вплив на процеси тепломасоперенесення та структуроутворення й зумовлює спрямовану кристалізацію в міжелектродному просторі. У роботі [12] автор показав результати перших дослідів впливу струму на сталь марки 40Л.

Електродія струму на леговані та мангановмісні сталеві розтопи раніше не вивчалась, тому проведення комплексу досліджень з вивчення модифікування струмом структур вказаних розтопів під час їх кристалізації у ливарній формі є актуальним завданням.

Слід зазначити, що механізм фізико-хімічного впливу електричного струму на процес кристалізації потребує ретельних теоретичних та експериментальних досліджень, наближених до реальних умов. Наявні експериментальні дані носять уривчастий характер, дослідження виконано на малих об'ємах розтопу при дуже повільному його охолодженні. Реальні ливарні чинники, які зумовлюють кінетику кристалізації промислових стопів, досить часто залишаються поза увагою дослідників. Крім того, недослідженим є вплив схеми розташування електрод на зміну фізико-механічних властивостей стопів, що кристалізуються при дії постійного струму.

## 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МЕТОДИКА

В основу експериментальних досліджень поставлено задачу обґрунтування можливості поліпшення якісних характеристик виливків

ТАБЛИЦЯ 1. Хемічний склад досліджуваних сталей.

TABLE 1. Chemical composition of the studied steels.

Марка сталі	Масова частка основних компонентів, %						
	C	Mn	Cr	Si	S	P	Fe
35ГЛ	0,38	1,5	–	0,3	0,04	0,4	97,4
110Г13Л	1,24	11,5	0,5	0,9	0,05	0,12	85,6

із мангановмісних сталей у результаті модифікування електричним струмом. Для вивчення закономірностей впливу постійного електричного струму на розтоп під час його кристалізації використовувались мангановмісні сталі марок 110Г13Л (ГОСТ 2176-77) та 35ГЛ (ГОСТ 977-88), хемічний склад яких визначався методом спектральної аналізи з використанням еталонних зразків (табл. 1).

Досліджувалися зразки вагою у 12 кг та розмірами  $100 \times 100 \times 180$  мм<sup>3</sup>. Моделі зразків формувалися у ливарній формі із заформованими в ній тяжкотопкими електродами діаметром у 3 мм, по яких під час кристалізації розтопів подавали постійний електричний струм, силою 10–80 А (рис. 1).

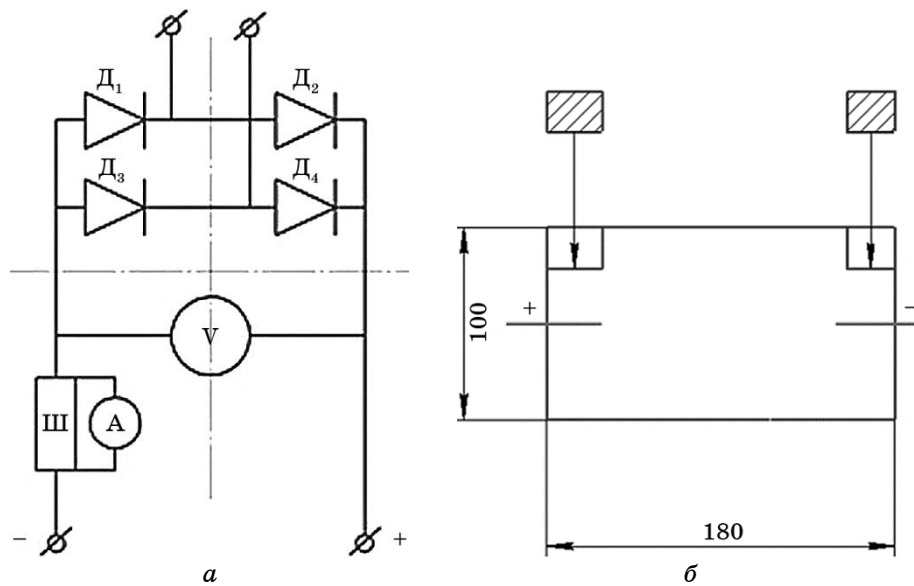


Рис. 1. Електрична схема лабораторної установки (а) та схема підведення струму до зразка (б).

Fig. 1. Electrical circuit of a laboratory installation (a) and scheme of supplying current to the sample (b).

Топлення шихти для одержання мангановмісних стопів заданого складу здійснювали в електродуговій печі. Контроль макроструктури по балу пористості здійснювався згідно зі стандартом ISO 6506-3. Дослідження мікроструктури зразків і балу зерна виконувалися на оптичному мікроскопі МІМ-8М з цифровою камерою, підключеною до комп'ютера. Фотографії мікроструктури, одержані при збільшенні у 200 разів, аналізувалися за методом порівняння. Фізико-механічні властивості одержаних литих зразків оцінювалися за методиками, які відповідають стандарту ISO 9001-2001.

Для розрахунку ступеня електроперенесення компонентів розтопу використовувалася відносна зміна концентрації між анодом і катодом [13]:

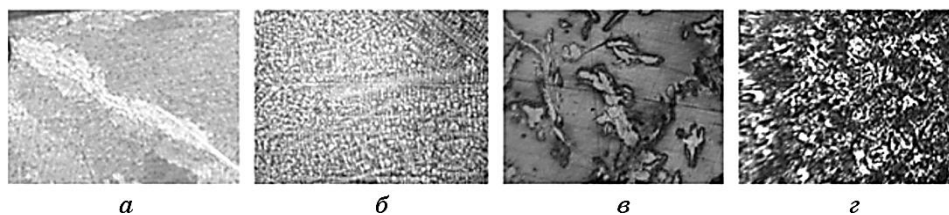
$$\Delta C = [(C^A - C^K)/C] \cdot 100\%, \quad (1)$$

де  $C^K$  — вміст елемента біля катода (% мас.),  $C^A$  — вміст елемента біля анода (% мас.),  $C$  — вміст компонента у розтопі до електроперенесення.

Одержані результати лабораторних досліджень перевірялись в промислових умовах при одержанні експериментальних виливків «Броня» із мангановмісних сталей із застосуванням електрооброблення в процесі кристалізації.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження контрольних зразків сталевих стопів, які не були модифіковані електричним струмом, свідчать (рис. 2), що зразки сталі 110Г13Л мають аустенітну структуру, кількість зерен металевої основи на  $1 \text{ см}^2$  становить 4–6 (рис. 2, *a*), що відповідає наявним вимогам. Зразки литої сталі 35ГЛ грубозернисті, що зумовлює їхні невисокі механічні властивості, особливо характеристики пластичності та в'язкості, а також показники опору мікропластичній деформа-



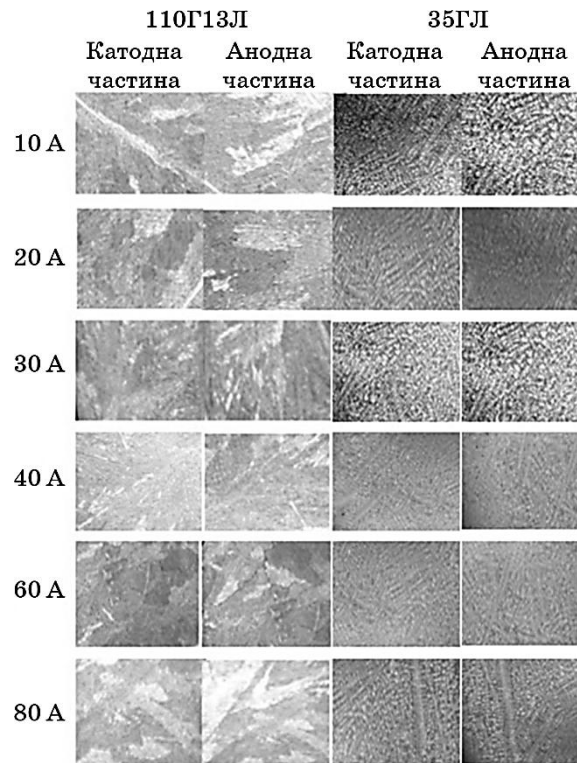
**Рис. 2.** Структури контрольних зразків: макроструктура 110Г13Л (*a*), макроструктура 35ГЛ (*б*), мікроструктура 110Г13Л (*в*), мікроструктура 35ГЛ (*г*).

**Fig. 2.** Structures of control samples: 110Г13Л macrostructure (*a*), 35ГЛ macrostructure (*б*), 110Г13Л microstructure (*в*), 35ГЛ microstructure (*г*).

ції металу. Дослідження показали, що при твердінні утворюються, переважно, кристали складної форми — дендрити (рис. 2, б). Мікроструктура зразка зі сталі 110Г13Л свідчить про наявність великих скупчень карбідів мангану на межах зерен аустеніту (рис. 2, в). Мікрозерна у зразку зі сталі 35ГЛ (ферит) є зібраними у крупні скупчення (рис. 2, г), по всій площині зразка спостерігаються протяжні дендритні кристали.

Макроструктури одержаних литих зразків, модифікованих під час кристалізації постійним електричним струмом різної сили, представлено на рис. 3.

В діапазоні зміни сили струму від 10 до 60 А в зразках зі сталі 110Г13Л спостерігається зменшення зерен металевої основи (табл. 2). При силі струму у 10 та 20 А їхній розмір зменшується на 10–20%, а у зразках, оброблених струмом силою у понад 40 А, розміри зерен стають вдвічі меншими у порівнянні з розмірами зерен конт-



**Рис. 3.** Макроструктура зразків сталей 110Г13Л і 35ГЛ залежно від сили струму та полярності.

**Fig. 3.** Macrostructure of the 110Г13Л and 35ГЛ steels' samples depending on current strength and polarity.

ТАБЛИЦЯ 2. Аналіза макро- та мікроструктур зразків.

TABLE 2. Analysis of the samples' macro- and microstructures.

Сила струму, А	Марка стопу	Характеристика макрозерен металевої основи				Розмір мікрозерна карбідів мангану, мкм	
		Кількість на 1 см <sup>2</sup>		Розмір, мм			
		Катода	Анода	Катода	Анода	Катода	Анода
Контрольний 0	35ГЛ	20–30		12		80	
	110Г13Л	4–6		10,1		254	
10	35ГЛ	20–30	20–30	11,3	11,5	77	77
	110Г13Л	4–7	4–7	9,6	9,9	212	229
20	35ГЛ	22–30	22–30	4,3	4,6	64	59
	110Г13Л	6–10	6–10	5,5	5,6	142	151
30	35ГЛ	25–36	25–36	4,0	4,2	59	54
	110Г13Л	8–10	8–10	2,7	3,5	109	124
40	35ГЛ	32–40	32–40	3,0	3,2	53	56
	110Г13Л	10–12	10–12	2,8	3,3	90	93
60	35ГЛ	30–36	30–36	7,3	7,2	67	73
	110Г13Л	6–7	6–7	8,2	8,4	207	234
80	35ГЛ	20–32	20–32	11,4	11,5	90	76
	110Г13Л	4–6	4–6	11,6	12,1	211	201

рольних зразків. Оброблення струмом силою у 80 А майже не впливає на їх розміри.

В усьому досліджуваному діапазоні сили струму в зразках зі сталі 35ГЛ спостерігається вплив струму на дендритну зону: дендрити стають тоншими та коротшими (рис. 3), тобто відбувається подрібнення макрозерна залізної основи. При силі струму у 10, 20 та 80 А структура не є рівновісною. При силі струму у 40 А віддаль між дендритами найменша, залишкова ізоляція зменшується, форма дендритів змінюється, і структура стає рівновісною. Таким чином, модифікувальна дія електричного струму у 40 та 60 А полягає у впливі на об'ємну кристалізацію через збільшення числа критичних зародків і зміну напрямку осей першого порядку дендритів.

Аналіза результатів досліджень (табл. 2) свідчить про те, що число зерен металевої основи в катодній та анодній частинах зразків обох стопів, оброблених струмом силою у 10 А, є майже незмінним у порівнянні з контрольними, не модифікованими струмом, зразками. При силі струму у 20–60 А спостерігається подрібнення зерен

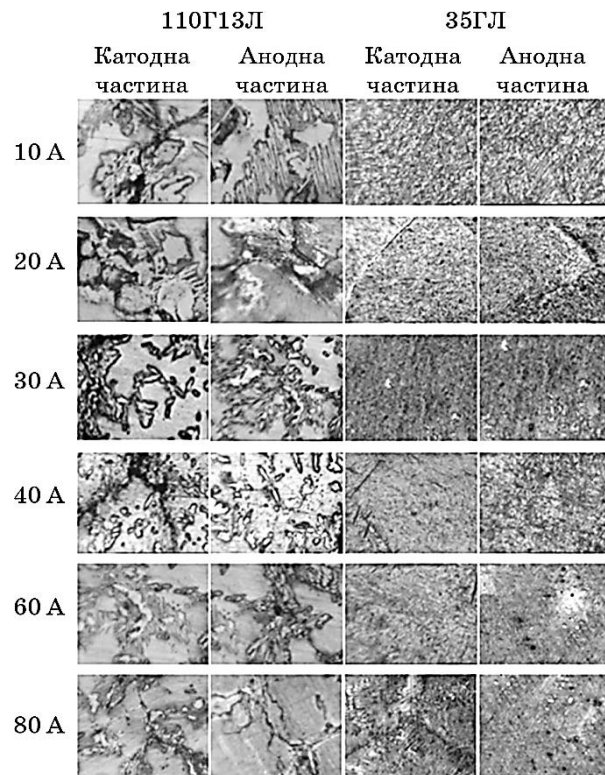


металевої основи в усіх частинах зразків, причому на катодній частині спостерігається їх найбільша концентрація.

Мікроструктури модифікованих струмом зразків обох розтопів представлено великою кількістю надлишкових кристалів карбідів мангану на катодній частині (рис. 4), конфігурація яких змінюється при будь-яких значеннях сили струму.

При силі струму у 10, 20 та 80 А аустенітна структура зразків ступу 110Г13Л переважно голчаста, форма карбідів мангану змінюється з протяжної на круглу. При силі струму у 30 та 40 А на катодній частині спостерігається більш тонка диференційована будова карбідів мангану розміром у 100 та 90 мкм відповідно. Таким чином, вплив постійного струму на розтоп 110Г13Л приводить до помітної зміни розміру та морфології зерен карбідів мангану (табл. 2) у порівнянні з контрольним зразком.

У зразках зі сталі 35ГЛ при різній силі струму ферит розподіля-



**Рис. 4.** Мікроструктура зразків сталей 110Г13Л та 35ГЛ, залежно від сили струму та полярності.

**Fig. 4.** Microstructure of the 110Г13Л and 35ГЛ steels' samples depending on current strength and polarity.

ється рівномірно по об'єму, зерно металевої основи більш дрібне. Напрямок осей першого порядку дендритів, переважно, збігається з напрямком відведення тепла (знизу вгору). У зразках, оброблених струмом силою у 30 та 40 А, первинні кристали практично зникають або займають відносно малий об'єм (на шліфах спостерігалися дуже рідкісні дендрити); найефективніше подрібнення спостерігається у катодній частині зразків. При меншій силі струму істотних змін в розмірах та частці карбідів по перетину не спостерігалось. При силі струму у 60 та 80 А збільшується об'ємна частка карбідів мангану та їхні середні розміри у порівнянні із обробленням при 40 А.

Встановлено, що при оптимальній силі струму у 40 А в зразках сталі 35ГЛ розмір зерен металевої основи зменшується втричі, карбіди мангану розташовані в центрі зерен основи і мають в 1,5 рази меншу площу; у модифікованих зразках сталі 110Г13Л карбіди мангану розподілені найбільш рівномірно, їх площа зменшується, у середньому, в 2,5 рази у порівнянні з контрольними зразками. Таким чином, постійний електричний струм значною мірою впливає на мікроструктуру сталевих розтопів під час їхньої кристалізації, що є передумовою поліпшення фізико-механічних характеристик зразків.

Хемічна аналіза усіх зразків обох стопів в усьому діапазоні зміни сили струму свідчить про електроперенесення основних компонентів у розтопі (табл. 3), що зумовлює можливість підвищення вмісту потрібних компонентів на катодній та анодній частинах виливка.

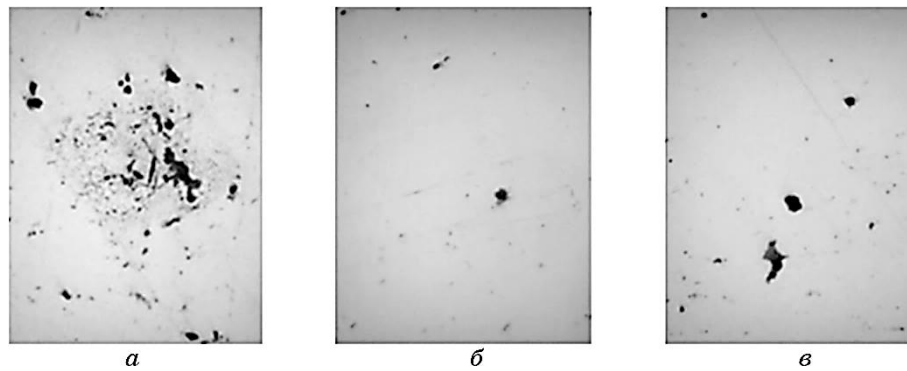
Так, при оптимальній силі струму у 40 А вміст Mn в анодній частині зразків зі сталі 110Г13Л зменшився з 11,5% до 11,2%, у катодній — збільшився до 11,8%. Модифікування зразків зі сталі 35ГЛ струмом такої ж сили забезпечує зниження вмісту Mn в анодній частині з 1,5% до 1,3% та підвищення його вмісту у катодній частині до 1,7%.

Дослідження впливу постійного електричного струму на зміщення неметалічних частинок для зразків зі сталі 35ГЛ показали, що на анодній частині спостерігається істотне збільшення FeP, MnP,

**ТАБЛИЦЯ 3.** Електроперенесення в сталях 110Г13Л та 35ГЛ при силі струму у 40 А.

**TABLE 3.** Electrotransport in the 110Г13Л and 35ГЛ steels' grades at a current of 40 А.

Елемент	Fe	Mn	Cr	Si	C
$\Delta C$ (110Г13Л), %	4,8	5,21	12,1	1,9	6,1
$\Delta C$ (35ГЛ), %	4,2	26,6	–	4	4,6



**Рис. 5.** Неметалеві включення в зразках сталі 35ГЛ, залежно від полярності електрод ( $I = 40$  А): анодна частина (а), катодна частина (б), контрольний зразок (в).

**Fig. 5.** Non-metallic inclusions in the 35ГЛ steel samples depending on the method of supplying current ( $I = 40$  А): anode part (a), cathode part (b), control sample (c).

$Fe_3P$ ,  $Mn_3P$  та газових включень, причому вміст останніх збільшується майже в 2,5 рази. Цей факт свідчить про значне поліпшення фізичної однорідності ступу в порівнянні з контрольним зразком (рис. 5).

Мікроструктурні перебудови в розтопах 35ГЛ та 110Г13Л при їх модифікуванні постійним електричним струмом силою у 40 А забезпечують значне підвищення рівня фізико-механічних властивостей на катодних частинах зразків: межі міцності — на 7% і 14% відповідно, ударної в'язкості — на 21% і 8% відповідно, Бринеллевої твердості — на 7% та 9% відповідно (табл. 4).

Одержані результати досліджень було підтверджено в промислових умовах при виготовленні литого деталю «Броня» з марки сталі

**ТАБЛИЦЯ 4.** Фізико-механічні властивості зразків.

**TABLE 4.** Physical and mechanical properties of samples.

Сила струму, А	Марка сталі	Бринеллева твердість (без гартування)		Межа міцності, МПа		Ударна в'язкість, кДж/м <sup>2</sup>	
		Катода	Анода	Катода	Анода	Катода	Анода
0	35ГЛ	201		503		243	
	110Г13Л	221		553		190	
40 А	35ГЛ	216	205	540	512	296	249
	110Г13Л	242	227	630	590	205	198

110Г13Л із застосуванням електрооброблення постійним струмом силою у 40 А у процесі кристалізації. Твердість одержаного стопу підвищилася на 12,4%, що забезпечило збільшення терміну експлуатації деталю в 2 рази після його термічного оброблення [14].

#### 4. ВИСНОВКИ

Результати роботи розширюють уявлення про процеси формування структури і властивостей виливків з манганомісних стопів під дією постійного електричного струму. Встановлено, що постійний електричний струм істотно впливає на макро- та мікроструктури стопів 35ГЛ та 110Г13Л під час їхньої кристалізації у ливарній формі та забезпечує поліпшення фізико-механічних властивостей виливок. Модифікувальна дія струму полягає у зміні кількості та розмірів первинних зерен металевої основи та карбідів мангану, зміні їх морфології, електроперенесенні окремих компонентів розтопів до електрод відповідної полярності.

При обробленні розтопів 35ГЛ та 110Г13Л струмом силою у 40 А кількість первинних зерен металевої основи на 1 см<sup>2</sup> збільшилася, відповідно, з 30 до 40 та з 6 до 12; розміри карбідів мангану зменшилися з 80 до 53 мкм та з 254 до 90 мкм; форма карбідів мангану змінилася з протяжної на круглу. Вміст Mn у катодній частині зразків стопів збільшився, відповідно, з 1,5% до 1,7% та з 11,5% до 11,8%, причому відносна зміна концентрації Mn між анодною та катодною частинами становила 5,3% та 26,6% відповідно. У литих зразках сталі 35ГЛ вміст газових включень на катодній частині зменшився в 2,5 рази. Завдяки зазначеним структурним перебудовам у зразках 35ГЛ та 110Г13Л суттєво підвищився рівень фізико-механічних властивостей на катодній частині: межа міцності — на 7% і 14% відповідно, ударна в'язкість — на 21% і 8% відповідно, Бринеллева твердість — на 7% та 9% відповідно.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. И. Ф. Селянин, В. Б. Деев, А. П. Войтков, *Металлургия машиностроения*, № 6: 15 (2005).
2. Л. Г. Знаменский, В. В. Крымский, Б. А. Кулаков, *Электроимпульсные нанотехнологии в литейных процессах* (Челябинск: ЦНТИ: 2003).
3. О. М. Кіщешко, В. В. Ткач, *Вісник Криворізького національного університету*, № 30: 220 (2012).
4. А. В. Иванов, А. В. Синчук, В. Н. Цуркин, *Электронная обработка материалов*, 47, № 5: 89 (2011).
5. J. A. Sethian, *J. Comput. Phys.*, 92: 231 (1992).
6. И. Ф. Селянин, В. Б. Деев, А. И. Куценко, *Литейщик России*, № 10: 22 (2012).

7. Yo. Gong, *School of Materials Science and Engineering*, No. 10: 12 (2006).
8. О. М. Кіщенко, В. В. Ткач, Т. В. Орел, *Збірка конференцій ПІТ* (Кривий Ріг: 2010), с. 25.
9. И. Ю. Кольчурина, И. Ф. Селянин, *Литейное производство*, № 8: 13 (2009).
10. F. Zhang, M. Zhang, B. Li, and J. Li, *Mater. Sci.*, **13**, No. 2: 120 (2007).
11. Г. Н. Миненко, Ю. А. Смирнова, *Металлургия машиностроения*, № 3: 48 (2009).
12. Г. Н. Миненко, *Металлургия машиностроения*, № 3: 10 (2006).
13. А. А. Ахжубеков, Б. С. Карамурзов, *Письма в ЖТФ*, **28**, вып. 2: 60 (2002).
14. Е. Н. Жбанова, Л. Н. Сайдгареев, Г. А. Бялик, И. Э. Скидин, *Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого*, № 3: 24 (2017).

## REFERENCES

1. I. F. Selyanin, V. B. Deev, and A. P. Voytkov, *Metallurgiya Mashinostroeniya*, No. 6: 15 (2005) (in Russian).
2. L. G. Znamenskiy, V. V. Krymskiy, and B. A. Kulakov, *Elektroimpul'snye Nanotekhnologii v Liteynykh Protsessakh* [Electropulse Nanotechnologies in Casting Processes] (Chelyabinsk: TsNTI: 2003) (in Russian).
3. О. М. Кішчешко and V. V. Tkach, *Visnyk Kryvoriz'kogo Natsional'nogo Universytetu*, No. 30: 220 (2012) (in Ukrainian).
4. A. V. Ivanov, A. V. Sinchuk, and V. N. Tsurkin, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, **47**, No. 5: 89 (2011) (in Russian).
5. J. A. Sethian, *J. Comput. Phys.*, **92**: 231 (1992).
6. I. F. Selyanin, V. B. Deev, and A. I. Kutsenko, *Liteyshchik Rossii*, No. 10: 22 (2012) (in Russian).
7. Yo. Gong, *School of Materials Science and Engineering*, No. 10: 12 (2006).
8. О. М. Кіщенко, В. В. Ткач, and Т. В. Орел, *Zbirka Konferentsiy PIT* (Kryvyi Rih: 2010), p. 25 (in Ukrainian).
9. I. Yu. Kol'churina and I. F. Selyanin, *Liteynoe Proizvodstvo*, No. 8: 13 (2009) (in Russian).
10. F. Zhang, M. Zhang, B. Li, and J. Li, *Mater. Sci.*, **13**, No. 2: 120 (2007).
11. Г. Н. Миненко and Ю. А. Смирнова, *Metallurgiya Mashinostroeniya*, No. 3: 48 (2009) (in Russian).
12. Г. Н. Миненко, *Metallurgiya Mashinostroeniya*, No. 3: 10 (2006) (in Russian).
13. А. А. Ахжубеков and Б. С. Карамурзов, *Pis'ma v ZhTF*, **28**, Iss. 2: 60 (2002) (in Russian).
14. Е. Н. Жбанова, Л. Н. Сайдгареев, Г. А. Бялик, and И. Э. Скидин, *Vestnik Gome'lskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni P. O. Sukhogo*, No. 3: 24 (2017) (in Russian).