

УДК 669.187

ВЛИЯНИЕ ВРАЩЕНИЯ РАСХОДУЕМОГО ЭЛЕКТРОДА ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ ПЕРЕПЛАВЕ НА АНИЗОТРОПИЮ СВОЙСТВ ПОЛУЧАЕМОГО СЛИТКА*

*Чуманов И.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Техника и технологии
производства материалов» (chumanoviv@susu.ru)*

*Матвеева М.А., инженер кафедры «Техника и технологии производства
материалов» (matveevama@susu.ru)*

*Сергеев Д.В., заведующий лабораториями кафедры «Техника и технологии
производства материалов» (sergeevdv@susu.ru)*

Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоуст
(456200, Россия, Челябинская обл., Златоуст, ул. Тургенева, 16)

Аннотация. Представлено теоретическое обоснование влияния технологии электрошлакового переплава с вращением расходуемого электрода на физико-механические свойства формируемой отливки (заготовки). Технология электрошлакового переплава с вращением расходуемого электрода вокруг собственной оси ведет к образованию восходящего потока тепла в шлаковой ванне, делая гидродинамическую обстановку в кристаллизаторе более рациональной с точки зрения использования образующегося тепла. При вращении расходуемого электрода на пленку жидкого металла, образующуюся на торце электрода, действуют центробежные силы, которые обеспечивают радиальное течение капель расплавленного металла. Последующий отрыв происходит с внешнего периметра электрода. Таким образом, капли электродного металла попадают в металлическую ванну ближе к стенке кристаллизатора, выравнивая температурный фронт ванны. Уменьшение температурного градиента ванны по сечению приводит к более плоскому фронту кристаллизации. Исследуемая технология электрошлакового переплава с вращением расходуемого электрода должна оказывать влияние на физико-механические свойства получаемого слитка (заготовки). С целью установления влияния вращения расходуемого электрода при электрошлаковом переплаве на свойства получаемого металла были проведены экспериментальные переплавы. Представлены данные об экспериментальных электрошлаковых переплавах электродов марки стали 20Х13 по различным технологиям на установке А-550. В ходе эксперимента устанавливалось влияние технологии вращения расходуемого электрода на условия процесса переплава, кристаллизации слитка, изменение механических и физических свойств. Проанализировано влияние способа переплава на свойства получаемого слитка. В качестве основного инструмента исследования использована обработка полученных данных о микротвердости, плотности, размере дендритной ячейки экспериментальных образцов. Анализ результатов исследований слитков в поперечном направлении показал повышение равномерности микротвердости при реализации технологии электрошлакового переплава с вращением расходуемого электрода по ходу плавки. Также показано, что применение технологии вращения уменьшает размер дендритной ячейки отливки и повышает плотность формируемой заготовки в сравнении с классической технологией без вращения электрода.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав, вращение электрода, микротвердость, дендритная ячейка, анизотропия свойств.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-2-91-96

ВВЕДЕНИЕ

Электрошлаковый переплав (ЭШП) – один из наиболее простых и эффективных способов вторичного переплава, позволяющий получать слитки и заготовки с весьма плотной структурой, низкой концентрацией неметаллических включений и вредных примесей [1]. Несмотря на высокую энергоемкость и малую производительность процесса, несомненным достоинством ЭШП является возможность получения крупногабаритных слитков и заготовок высокого качества из высоколегированных сталей и сплавов для нужд современного машиностроения [2].

Высокая плотность и кристаллическая однородность получаемого металла обусловлены, прежде всего,

соблюдением баланса скорости поступления металла с оплаваемого торца электрода и скоростью его кристаллизации в жидкой металлической ванне, а также геометрией фронта кристаллизации самой ванны.

Увеличение подводимой мощности на шлаковую ванну с целью повышения скорости плавления расходуемого электрода ведет к увеличению объема жидкого металла в ванне и изменению ее геометрии, а именно увеличению ее глубины по оси формируемого слитка или заготовки. Последнее обусловлено тем, что место максимального прогрева шлаковой ванны находится в подэлектродной зоне. В то же время известно, что температура жидкой металлической ванны определяется теплом поставляемого в нее электродного металла. Эти два фактора и приводят к существенному заглублению ванны жидкого металла по оси формируемого слитка или заготовки [3, 4]. Кристаллизация в этом

* Работа проведена в рамках выполнения гранта Президента РФ по договору № 14.У30.18.2874-МК.

случае становится в большей степени спонтанной, утрачивая преимущества электрошлаковой технологии. При таких условиях протекания электрошлакового процесса снижается и его рафинирующая способность. При ЭШП удаление неметаллических включений происходит преимущественно в пленке жидкого металла на оплавляемом торце электрода, и чем тоньше пленка – тем полнее удаляются включения. Увеличение подводимой мощности приводит к образованию большого объема металла на оплавляемом торце электрода и, следовательно, к ухудшению условий рафинирования от неметаллических включений. Избежать отмеченных недостатков можно, реализовав технологию переплава с вращением расходоуемого электрода вокруг собственной оси [5]. Данная отечественная разработка вызывает активный интерес и у зарубежных ученых [6 – 14].

Реализация вращения расходоуемого электрода вокруг собственной оси ведет к образованию восходящего потока в шлаковой ванне [15 – 17], делая гидродинамическую обстановку в ней более рациональной с точки зрения использования образующегося тепла (рис. 1). При вращении расходоуемого электрода на пленку жидкого металла, образующуюся на торце электрода, действуют центробежные силы, обеспечивая радиальное течение металла с образованием капель и последующего их отрыва с внешнего периметра электрода. В этом случае капли электродного металла попадают в металлическую ванну ближе к стенке кристаллизатора, выравнивая температуру ванны. Снижается температурный градиент ванны по сечению, что приводит к более плоскому фронту кристаллизации [15, 18]. Тех-

нология электрошлакового переплава с вращением расходоуемого электрода, таким образом, должна оказывать влияние на физико-механические свойства получаемого слитка (заготовки). С целью установления влияния вращения расходоуемого электрода при ЭШП на свойства получаемого металла была проведена серия опытных плавов.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования осуществляли на полупромышленной электрошлаковой установке А-550. Для проведения переплава по различным схемам в качестве расходоуемых электродов использовали прокат стали 20Х13 длиной 1500 мм и диам. 40 мм. Переплав во всех случаях проводился в кристаллизаторе диам. 90 мм. Электроды закрепляли в подвижной каретке установки электрошлакового переплава с использованием цангового зажима. После фиксации электрода токоведущие щетки прижимались к нему с использованием пружин для обеспечения большей поверхности контакта. Перед началом переплава рабочее пространство водоохлаждаемого кристаллизатора заполняли флюсом АНФ-6, химический состав которого соответствовал ГОСТ 30756.

Флюс предварительно просеивали до фракции не более 3 мм и прокаливали в течение двух часов при температуре 400 °С для удаления остаточной влаги. Время переплава по традиционной (классической) технологии (без вращения расходоуемого электрода) составляло 30 мин. Расплавленный торец переплавленного электрода имел коническую форму, характерную

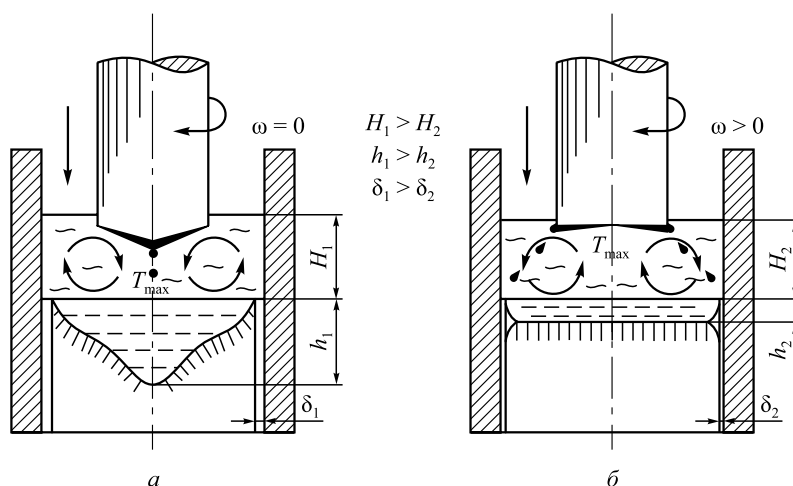


Рис. 1. Особенности процесса ЭШП при классической технологии (а) и с вращением расходоуемого электрода (б):

ω – скорость вращения расходоуемого электрода, об/мин; T_{\max} – эпицентр зоны с максимальной температурой в шлаковой ванне, °С; H_1 и h_1 – высота шлаковой и металлической ванны при принятом процессе, мм; H_2 и h_2 – высота шлаковой и металлической ванны при реализации технологии с вращением расходоуемого электрода вокруг собственной оси, мм; δ_1 и δ_2 – толщина шлакового гарнисажа при реализации технологии без вращения и с вращением расходоуемого электрода, соответственно, мм

Fig. 1. Features of the ESR process with traditional technology (a) and with rotation of consumable electrode (b):

ω – rotational speed of consumable electrode, rpm; T_{\max} is epicenter of zone with the maximum temperature in slag bath, °С; H_1 , h_1 – respectively, height of slag and metal baths with the accepted process, mm; H_2 , h_2 – respectively, height of slag and metal baths using technology with rotation of consumable electrode around its own axis, mm; δ_1 , δ_2 is thickness of slag skull using technology without rotation and with rotation of consumable electrode, respectively, mm

для процесса ЭШП [19]. При использовании технологии с вращением расходного электрода начало плавления осуществлялось аналогичным образом, вращение начиналось с момента полного расплавления рабочего флюса. Об этом свидетельствовало отсутствие токовых бросков. Скорость вращения электрода выбиралась с учетом рекомендаций работы [16] и составляла во время эксперимента 100 об/мин. Время переплава по экспериментальной технологии составило 26 мин. Внешний вид полученных слитков представлен на рис. 2. Вырезка образцов для исследования приведена на рис. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование химического состава проводилось в двух зонах слитков: в центральной их части и на периферии, результаты представлены в табл. 1.

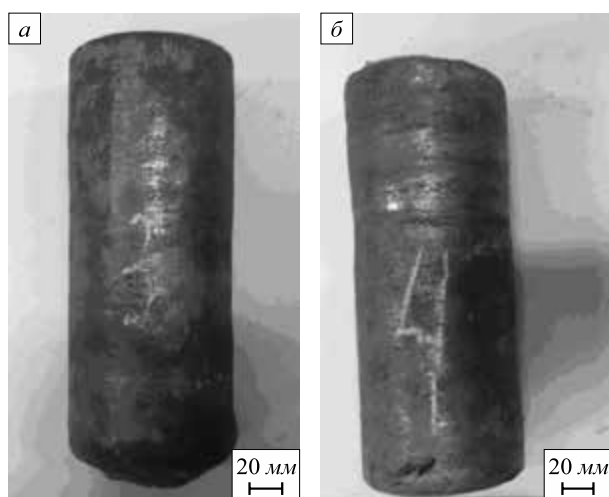


Рис. 2. Внешний вид полученных слитков: *a* – с использованием традиционной технологии без вращения расходного электрода; *b* – с использованием технологии с вращением расходного электрода

Fig. 2. Appearance of the obtained billets: *a* – using traditional technology, without rotation of consumable electrode; *b* – using technology with rotation of consumable electrode

Отбор проб для определения химического состава осуществляли по ГОСТ 7565 – 81, химический анализ – по ГОСТ 5632 – 2014. Для анализа применялся оптико-эмиссионный анализатор «Foundry Master».

Плотность определяли в соответствии с ГОСТ 15139 – 69 при температуре 20 °С на весах ВЛР-200. Значения плотности образцов приведены в табл. 2.

Микротвердость полученных образцов исследовали на микротвердомере ИТВ-1. Для этого использовали продольные темплеты, на которых определяли изменение микротвердости от оси отливки до края в радиальном направлении путем 65 измерений на каждый образец с шагом 70 мкм. Измерения показали, что твердость HV образца, полученного по классической технологии без вращения, ниже твердости образца, полученного при использовании механизма вращения электрода (в среднем 486,5 и 519,6 HV соответственно).

Для наглядности на рис. 4 значения HV представлены в виде точек (65 измерений) и среднеквадратической линии. Видно, что слиток, полученный по технологии с вращением расходного электрода, однороднее по исследуемому параметру.

Размер дендритной ячейки определяли на микроскопе С. Zeiss ObserverD1M, объединенном с программным комплексом Thixomet. Расчет размера ячейки дендрита проводился путем подсчета пересечений со свободными секущими, в частности методом концентрических окружностей. Для выявления микроструктуры исполь-

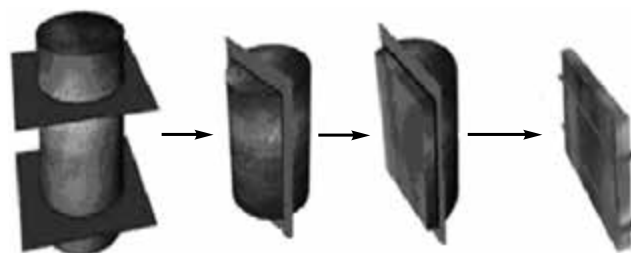


Рис. 3. Схема порезки слитков для исследования

Fig. 3. Diagram of billets cutting for research

Т а б л и ц а 1

Химический состав отливок

Table 1. Chemical composition of the castings

Зона слитка	Содержание, %									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
Слиток, полученный по классической технологии, без вращения										
Центр	0,23	0,76	0,41	0,036	0,002	12,7	0,011	0,26	0,16	0,07
Край	0,22	0,77	0,42	0,034	0,002	12,5	0,010	0,24	0,18	0,08
Слиток, полученный по технологии с вращением расходного электрода										
Центр	0,21	0,66	0,47	0,034	0,001	13,4	0,006	0,23	0,04	0,08
Край	0,21	0,65	0,47	0,030	0,002	12,9	0,006	0,26	0,04	0,08

Т а б л и ц а 2

Результаты измерения плотностей

Table 2. Density measurement results

Образец	Масса на воздухе, г	Масса в воде, г	Плотность металла, г/см ³
Отливка, полученная по классической технологии, без вращения			
2 – центр	29,03400	25,28960	7,728
2 – край	28,89310	24,94220	7,291
Отливка, полученная по технологии с вращением расходуемого электрода			
1 – центр	35,55675	30,96350	7,715
1 – край	27,38560	23,84400	7,707

зовали 5 %-ный раствор серной кислоты в спирте. Результаты представлены в табл. 3.

Повышение значений физико-механических свойств и их равномерности объясняется тем, что изменяется место доставки электродного металла – ближе к стенке кристаллизатора. При этом капли электродного металла равномерно распределяются по всему периметру кристаллизатора. При правильно подобранных центробежных силах обеспечивается полное радиальное течение металла с оплаваемого торца электрода. Увеличение плотности металла после ЭШП с использованием вращения расходуемого электрода при условии сохранения одинакового химического состава можно объяснить ростом скорости кристаллизации. Рост происходит в результате размывания теплового центра из-за периферийной доставки электродного металла в зону максимального охлаждения (ближе к стенке кристаллизатора). Это косвенно подтверждают ранее проведенные

Т а б л и ц а 3

Размер дендритных ячеек

Table 3. The size of dendritic cells

Зона образца	Размер ячеек, мкм, для			Среднее, мкм
	1	2	3	
Отливка, полученная по классической технологии, без вращения				
Центр	45,1	57,3	63,4	56,4
r/2	47,6	38,1	32,5	39,4
Край	31,0	38,6	29,9	33,2
Отливка, полученная по технологии с вращением расходуемого электрода				
Центр	32,9	29,6	32,5	31,6
r/2	35,5	32,5	32,1	33,4
Край	31,3	28,6	27,7	29,2

исследования по изучению кристаллической структуры путем периодической фиксации ванны жидкого металла на протяжении всего процесса [15]. Также можно предположить, что увеличение скорости кристаллизации в результате изменения гидродинамической обстановки в шлаковой ванне привело к меньшему тепловому воздействию на металлическую ванну.

Выводы

Анализируя полученные данные, можно сделать ряд заключений:

– отклонения значений HV от среднего для слитка, выплавленного с применением технологии вращения, составляет 6,73 %, для выплавленного по классической технологии без вращения – 9,85 %;

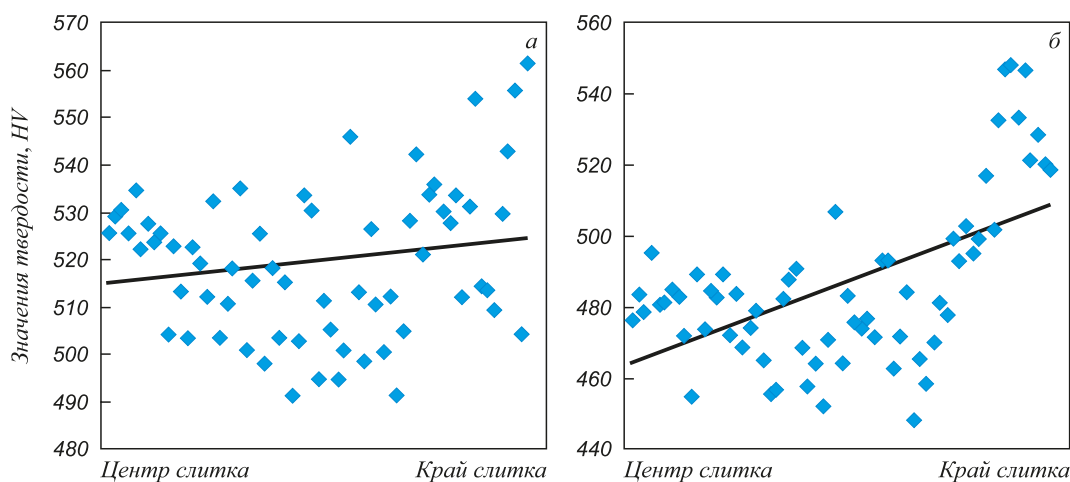


Рис. 4. Значения микротвердости слитков, полученных по классической технологии (а) и с применением вращения переплавленного электрода (б)

Fig. 4. Microhardness values of billets obtained by technology: а – traditional remelting technology; б – using rotation of remelted electrode

– размер дендритной ячейки на опытных образцах, полученных по технологии с вращением расходующего электрода, по сравнению с классической технологией меньше (34 и 40 мкм соответственно), его распределение более однородно по сечению;

– значение плотности для заготовки, полученной по технологии с вращением электрода, также выше, чем по классической: 7,711 и 7,509 г/см³ соответственно, то есть больше на 2,3 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Медовар Б.И., Цыкуленко А.К., Богаченко А.Г. и др. Электрошлаковая технология за рубежом. – Киев: Наукова думка, 1982. – 320 с.
2. Клюев М.М., Волков С.Е. Электрошлаковый переплав. – М.: Металлургия, 1984. – 208 с.
3. Jardy J., Ablitzer D. and Wadier J.F. Magnetohydrodynamic and Thermal Behavior of Electroslag Remelting Slags // Metall. Trans. 1991. В, 22В. P. 111 – 120.
4. Paton В.Е., Medovar L.B. Improving the electroslag remelting of steel and alloys // Steel in Translation. 2008. Vol. 38. P. 1028 – 1032.
5. Chumanov V.I., Chumanov I.V. Technology for electroslag remelting with rotation of the consumable electrode // Metallurgist. 2001. Vol. 45. No. 3-4. P. 125 – 128.
6. Paar A., Schneider R., Zeller P., Reiter G., Paul S., Siller I., Würzinger P. Influence of the polarity on the cleanliness level and the inclusion types in the ESR process // Proc. Int. Symp. Liquid Metal Processing & Casting, 22–25.09.2013, Austin, USA. – Hoboken: Wiley, 2013. P. 29 – 36.
7. Wang Q., Li G., He Z., Li B. A three-phase comprehensive mathematical model of desulfurization in electroslag remelting process // Appl. Therm. Eng. 2017. Vol. 114. P. 874 – 886.
8. Wang Q., Liu Y., Li G., Gao Y., He Z., Li B. Predicting transfer behavior of oxygen and sulfur in electroslag remelting process // Appl. Therm. Eng. 2018. Vol. 129. P. 378 – 388.
9. Kawakami M., Takenaka T., Ishikawa M. Electrode reactions in DC electroslag remelting of steel rod // Ironmak. Steelmak. 2002. Vol. 29. No. 4. P. 287 – 292.
10. Paar A., Schneider R., Zeller P., Reiter G., Paul S., Würzinger P. Effect of electrical parameters on type and content of non-metallic inclusions after electro-slag-remelting // Steel Research Int. 2014. Vol. 85. No. 4. P. 570 – 578.
11. Chang L.Z., Shi X.F., Yang H.S., Li Z.B. Effect of low-frequency AC power supply during electroslag remelting on qualities of alloy steel // J. Iron Steel Res. Int. 2009. Vol. 16. No. 4. P. 7 – 11.
12. Ayman F., Azza A., Hoda E.F., Mamdouh E. Behaviour of precipitates and inclusions during ESR of nitrogen alloyed and conventional AISI M41 high speed steels // Steel Grips. 2006. Vol. 4. No. 4. P. 298 – 304.
13. Дакуорт У.Э., Хойл Дж. Электрошлаковый переплав: научное издание / Пер. с англ. А.Б. Парцевского. – М.: Металлургия, 1973. – 192 с.
14. Karimi-Sibaki E., Kharicha A., Wu M., Ludwig A., Holzgruber H., Ofner B., Ramprecht M. A numerical study on the influence of the frequency of the applied AC current on the electroslag remelting process // Proc. Int. Symp. Liquid Metal Processing & Casting, 22–25.9.2013, Austin, USA. – Hoboken: Wiley, 2013. P. 13 – 19.
15. Chumanov I.V., Chumanov V.I. Control of the carbide structure of tool steel during electroslag remelting: Part I // Russian metallurgy (Metally). 2011. No. 6. P. 515 – 521.
16. Чуманов В.И., Белозёров Б.П., Чуманов И.В. Математическая модель переплава вращающегося электрода // Изв. вуз. Черная металлургия. 1991. № 12. С. 74, 75.
17. Chumanov I.V., Chumanov V.I. Increasing the efficiency of the electroslag process and improving the metal quality by rotating consumable electrode: Part I // Russian metallurgy (Metally). 2010. No.6. P. 499 – 504.
18. Чуманов И.В., Пятыхин Д.А. Особенности электрошлакового переплава на постоянном токе с вращением расходующего электрода // Изв. вуз. Черная металлургия. 2006. № 3. С. 22 – 25.
19. Лейбензон С.А. Электрошлаковый переплав и качество металла. – М.: Металлургия, 1965. – 64 с.

Поступила в редакцию 3 декабря 2018 г.
После доработки 25 января 2019 г.
Принята к публикации 28 января 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 2, pp. 91–96.

INFLUENCE OF CONSUMABLE ELECTRODE ROTATION ON ANISOTROPY OF PROPERTIES OF THE BILLET OBTAINED BY ELECTROSLAG REMELTING

I.V. Chumanov, M.A. Matveeva, D.V. Sergeev

Zlatoust branch of the South Ural State University, Zlatoust, Chelyabinsk Region, Russia

Abstract. The article presents theoretical substantiation of the influence of electroslag remelting technology with rotation of consumable electrode on physico-mechanical properties of the formed casting (billet). The technology of electroslag remelting with rotation of consumable electrode around its own axis leads to formation of upward flow of heat in the slag bath, making hydrodynamic environment in mold more rational from the point of using generated heat. During rotation of consumable electrode, centrifugal forces act on liquid metal film formed at the end of the electrode, providing radial flow of molten metal droplets. Subsequent separation occurs from the outer perimeter of electrode. Thus, drops of electrode metal fall into the metal bath closer to the wall of the mold, aligning temperature front of the bath. Decrease in temperature gradient of bath over the cross section leads to a flatter crystallization front. Studied technology of electroslag remelting with rotation of consumable electrode should have an impact on physical and mechanical properties of resulting casting (billet). In order to es-

tablish effect of rotation of consumable electrode during electroslag remelting on properties of metal obtained, experimental remelting was carried out. The article presents data on experimental electroslag remelting of electrodes of 20Kh13 grade steel using various technologies at A-550 unit. In course of experiment, influence of rotation technology of consumable electrode on conditions of remelting process, billet crystallization, changes in mechanical and physical properties was established. The influence of remelting method on complex properties of resulting billet was analyzed. As the main research tool, processing of the obtained data on microhardness, density, dendritic cell size of experimental samples was used. Analysis of the research results of billets in transverse direction showed an increase in microhardness uniformity in implementation of electroslag remelting technology with rotation of consumable electrode along the course of smelting. It is also shown that use of the rotation technology reduces size of dendritic cell of billet and increases density of the ingot formed in comparison with traditional technology without rotating electrode.

Keywords: electroslag remelting, electrode rotation, microhardness, dendrite cell, anisotropy of properties.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-2-91-96

REFERENCES

1. Medovar B.I., Tsykulyenko K.A., Bogachenko A.G., Litvinchuk V.M. *Elektroshlakovaya tekhnologiya za rubezhom* [Electroslag technology abroad]. Kiev: Naukova Dumka, 1982, 320 p. (In Russ.).
 2. Klyuev M.M., Volkov S.E. *Elektroshlakovyi pereplav* [Electroslag remelting]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 208 p. (In Russ.).
 3. Jardy J., Ablitzer D., Wadier J.F. Magnetohydrodynamic and thermal behavior of electroslag remelting slags. *Metall. Trans. B.* 1991, vol. 22B, pp. 111–120.
 4. Paton B.E., Medovar L.B. Improving the electroslag remelting of steel and alloys. *Steel in Translation.* 2008, vol. 38, pp. 1028–1032.
 5. Chumanov V.I., Chumanov I.V. Technology for electroslag remelting with rotation of the consumable electrode. *Metallurgist.* 2001, vol. 45, no. 3–4, pp. 125–128.
 6. Paar A., Schneider R., Zeller P., Reiter G., Paul S., Siller I., Würzinger P. Influence of the polarity on the cleanliness level and the inclusion types in the ESR process. In: *Proc. Int. Symp. Liquid Metal Processing & Casting, 22–25.09.2013, Austin, USA.* Hoboken: Wiley, 2013, pp. 29–36.
 7. Wang Q., Li G., He Z., Li B. A three-phase comprehensive mathematical model of desulfurization in electroslag remelting process. *Appl. Therm. Eng.* 2017, vol. 114, pp. 874–886.
 8. Wang Q., Liu Y., Li G., Gao Y., He Z., Li B. Predicting transfer behavior of oxygen and sulfur in electroslag remelting process. *Appl. Therm. Eng.* 2018, vol. 129, pp. 378–388.
 9. Kawakami M., Takenaka T., Ishikawa M. Electrode reactions in DC electroslag remelting of steel rod. *Ironmak. Steelmak.* 2002, vol. 29, no. 4, pp. 287–292.
 10. Paar A., Schneider R., Zeller P., Reiter G., Paul S., Würzinger P. Effect of electrical parameters on type and content of non-metallic inclusions after electro-slag-remelting. *Steel Research Int.* 2014, vol. 85, no. 4, pp. 570–578.
 11. Chang L.Z., Shi X.F., Yang H.S., Li Z.B. Effect of low-frequency AC power supply during electroslag remelting on qualities of alloy steel. *J. Iron Steel Res. Int.* 2009, vol. 16, no. 4, pp. 7–11.
 12. Ayman F., Azza A., Hoda E.F., Mamdouh E. Behaviour of precipitates and inclusions during ESR of nitrogen alloyed and conventional AISI M41 high speed steels. *Steel Grips.* 2006, vol. 4, no. 4, pp. 298–304.
 13. Duckworth W.E., Hoyle G. *Electro-slag refining.* London: Chapman & Hall, 1969, 178 p. (Russ.ed.: Duckworth W.E., Hoyle G. *Elektroshlakovyi pereplav.* Moscow: Metallurgiya, 1973. 192 p.).
 14. Karimi-Sibaki E., Kharicha A., Wu M., Ludwig A., Holzgruber H., Ofner B., Ramprecht M. A numerical study on the influence of the frequency of the applied AC current on the electroslag remelting process. In: *Proc. Int. Symp. Liquid Metal Processing & Casting, 22–25.9.2013, Austin, USA.* Hoboken: Wiley, 2013, pp. 13–19.
 15. Chumanov I.V., Chumanov V.I. Control of the carbide structure of tool steel during electroslag remelting: Part I. *Russian metallurgy (Metally).* 2011, no. 6, pp. 515–521.
 16. Chumanov V.I., Belozherov B.P., Chumanov I.V. Mathematic model of rotating electrode remelting. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 1991, no. 12, pp. 74, 75. (In Russ.).
 17. Chumanov I.V., Chumanov V.I. Increasing the efficiency of the electroslag process and improving the metal quality by rotating consumable electrode: Part I. *Russian metallurgy (Metally).* 2010, no. 6, pp. 499–504.
 18. Chumanov I.V., Pyatygin D.A. Features of electroslag remelting with direct current and rotation of consumable electrode. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2006, no. 3, pp. 22–25. (In Russ.).
 19. Leibenzon S.A. *Elektroshlakovyi pereplav i kachestvo metalla* [Electroslag remelting and metal quality]. Moscow: Metallurgiya, 1965. 64 p. (In Russ.).
- Funding.** The work was performed within the framework of the grant of the President of the Russian Federation under the contract No. 14.Y30.18.2874-MK.
- Information about the authors:**
- I.V. Chumanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Technics and Technologies of Materials Production"**
(chumanoviv@susu.ru)
- M.A. Matveeva, Engineer of the Chair "Technics and Technologies of Materials Production"**
(matveevama@susu.ru)
- D.V. Sergeev, Head of the Laboratory of the Chair "Technics and Technologies of Materials Production"**
(sergeevdv@susu.ru)

Received December 3, 2018

Revised January 25, 2019

Accepted January 28, 2019