

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНОКУЛЯТОРОВ НА ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ЛИТОЙ СТРУКТУРЫ СТАЛИ X12MФ-Ш

С. В. Давидченко¹, А. И. Панченко¹, И. М. Билоник²,
И. Н. Логозинский¹, А. С. Сальников¹, А. Г. Федьков¹

¹ЧАО «Электрометаллургический завод «Днепрспецсталь» им. А. Н. Кузьмина».

69008, г. Запорожье, Южное шоссе, 81. E-mail: info@dss.com.ua

²Запорожский национальный технический университет.

69061, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64. E-mail: znu@znu.edu.ua

Исследована дисперсность структуры литой стали X12MФ-Ш, обработанной инокуляторами в процессе выплавки слитка ЭШП диаметром 300 мм. Показано сравнительное строение сетки эвтектических карбидов осевой части слитка стали X12MФ-Ш с введением и без инокуляторов в металлическую ванну. Количественно оценены параметры сетки эвтектических карбидов в зависимости от массовой скорости введения в расплав инокуляторов. Установлено влияние ввода инокуляторов на массовую скорость наплавления слитка диаметром 300 мм стали X12MФ-Ш и суммарную производительность процесса ЭШП. Библиогр. 7, табл. 1, ил. 8.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав; инокуляторы; диспергирование; литая структура; сетка эвтектических карбидов; карбидная неоднородность

Повышение требований потребителей к служебным характеристикам изделий из инструментальных сталей ледебуритного класса вызывает необходимость металлургов разрабатывать и внедрять технологии, позволяющие влиять на измельчение зерна, уменьшение физико-химической и структурной неоднородности литого металла.

Известно, что прочностные свойства ледебуритных сталей улучшаются пропорционально уменьшению размеров зерна и повышению однородности распределения карбидов. Согласно данным [1] при снижении размеров зерна на один балл прочность сталей У12 и Р18 при неизменном распределении карбидов увеличивается на 200...300 МПа. А повышение карбидной неоднородности деформированного металла на один балл вызывает снижение прочности на 15...20 % и вязкости на 30...50 %. Поэтому диспергирование литой структуры необходимо для создания высокой прочности.

Первичные или эвтектические карбиды в ледебуритных сталях распределяются в металлической матрице неравномерно и значительно различаются по размерам и форме. Широкий температурный интервал затвердевания и различие в плотности кристаллизующихся фаз в этих сталях способствуют формированию карбидной неоднородности. В процессе затвердевания по границам зерен твердого раствора образуется аустенито-карбид-

ная эвтектика, морфология которой в значительной мере зависит от скорости кристаллизации. Так, например, в сталях Р6М5Ф3-МП, X12MФ-МП и др., полученных способом порошковой металлургии, вследствие высокой скорости охлаждения ($10^4...10^5$ °C/c) размеры карбидов чрезвычайно мелкие (до 2...3 мкм), а в стали обычного производства или ЭШП 8...20 мкм [1].

Управление затвердеванием металла является важной и актуальной задачей современной специальной электрометаллургии, поскольку именно в период затвердевания происходит формирование структурных зон, сегрегация неметаллических включений, образование ликвационной неоднородности, которые не устраняются на последующих переделах [2].

Согласно данным работы [3] с увеличением переохлаждения Δt скорость зарождения центров кристаллов и их рост увеличивается (рис. 1). Непосредственно вблизи температуры плавления вещества имеется область переохлаждения Δt^1 (интервал метастабильности расплава), в которой скорость зарождения центров кристаллизации равна нулю, а увеличение скорости их образования начинается при определенных показателях переохлаждения. Переохлаждение Δt^2 , при котором начинается рост кристалла, значительно меньше интервала метастабильности Δt^1 расплава при зарождении центров кристаллизации. Это означает,

© С. В. ДАВИДЧЕНКО, А. И. ПАНЧЕНКО, И. М. БИЛОНИК, И. Н. ЛОГОЗИНСКИЙ, А. С. САЛЬНИКОВ, А. Г. ФЕДЬКОВ, 2018

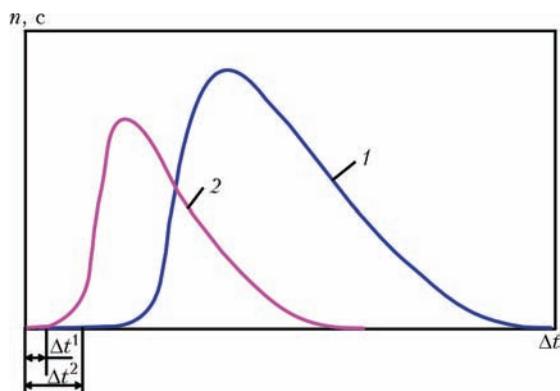


Рис. 1. Зависимости скорости (n) зарождения центров кристаллизации (1) и скорости (c) роста кристаллов (2) от переохлаждения (Δt) расплава

что образование кристалликов на готовой поверхности раздела фаз происходит намного легче, чем зарождение в объеме.

Способность к зародышеобразованию может быть значительно повышена внешним воздействием на параметры кристаллизации металла за счёт создания готовых центров кристаллизации в затвердевающем расплаве [4].

Перспективным направлением улучшения структуры и свойств электрошлакового слитка является введение в расплав инокуляторов (изоморфных микрочастиц-холодильников), которые повышают степень переохлаждения расплава и создают условия для образования мелкодисперсной структуры слитка или отливки [5].

Известны способы воздействия на кристаллическую структуру сплавов, связанные с применением модификаторов из изоморфных кристаллов того же металла [5, 6]. Этому способствует то, что интенсивность зарождения центров кристаллизации резко возрастает при образовании частиц, обладающих структурным сходством с затверде-

вающим сплавом. При этом желательно, чтобы образование продуктов реакции, способствующих образованию центров кристаллизации, происходило одновременно с формированием кристаллизующейся фазы основного металла. Наиболее полно этому условию отвечают обломки кристаллов затвердевающего сплава. Модифицирующее влияние обломков кристаллов затвердевающего сплава обнаружено Г. Ф. Баландиным [5].

В работе [6] установлено, что при электрошлаковой выплавке введение инокуляторов в металлическую ванну слитков диаметром 55 мм от 10 до 25 % повышает механические свойства литых сталей Р6М5 и Х12М в 1,2...1,4 раза. Однако в литературе весьма мало сведений о влиянии ввода изоморфных гранул-инокуляторов в металлическую ванну при ЭШП на структуру промышленных слитков, неизвестны и технико-экономические показатели плавки.

Цель настоящей работы: экспериментальные исследования влияния введения инокуляторов в металлическую ванну в процессе ЭШП на структуру промышленных слитков стали Х12МФ-Ш; выполнение количественной оценки параметров сетки эвтектических карбидов; определение влияния инокуляторов на процесс ЭШП и технико-экономические показатели плавки.

Работу выполняли на ПАО «Днепроспецсталь». Электрошлаковый переплав электродов диаметром 175 мм стали Х12МФ проводили на печи ОКБ 1065 в кристаллизаторе диаметром 300 мм с применением флюса АНФ-6. Ввод гранул инокуляторов в металлическую ванну выполняли в процессе ЭШП дозатором «Доза-4». Дозатор состоит из четырех вращающихся барабанов, оборудованных дозирующими устройствами (питателями) целевого типа, установленных над бункером конической формы, и предназначен для подачи порошкообразных, гранулированных легирующих материалов и раскислителей в металлическую ванну в процессе ЭШП.

Инокуляторы представляли собой изоморфные гранулы стали Х12МФ диаметром 0,8...1,2 мм, изготовленные распылением расплава азотом по технологии цеха порошковой металлургии завода «Днепроспецсталь». Качество гранул соответствовало требованиям для изготовления пресовок. Характерной особенностью инокуляторов является их мелкодисперсная структура (рис. 2), а также низкое содержание неметаллических включений, что обеспечивается способом производства и высокой скоростью кристаллизации при получении гранул.

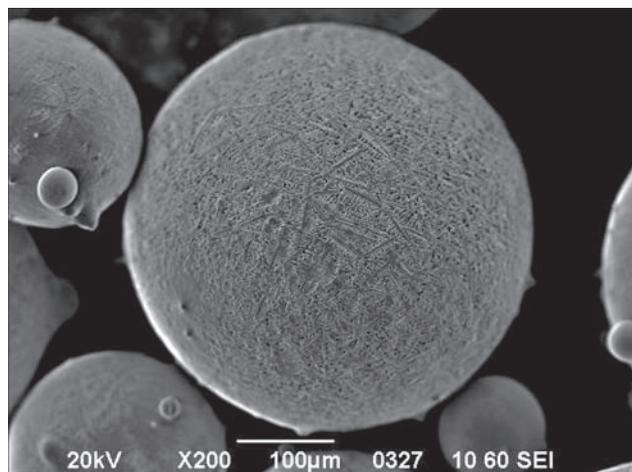


Рис. 2. Дендритная структура гранул инокуляторов стали Х12МФ

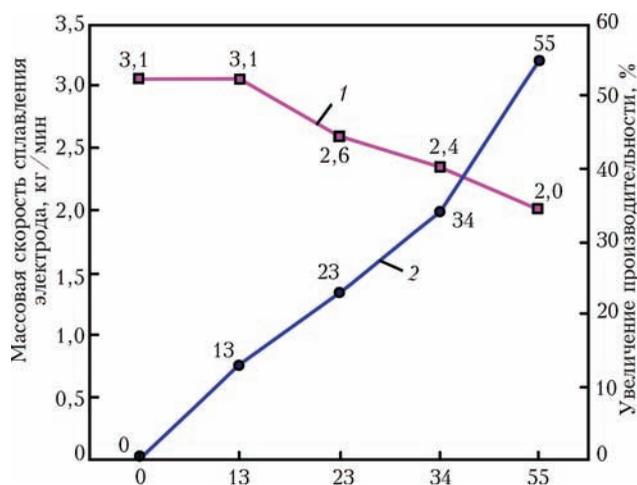


Рис. 3. Влияние ввода инокуляторов на массовую скорость сплавления электрода (1) слитка диаметром 300 мм стали X12MФ-Ш и суммарную производительность (2) процесса ЭШП

Опытную работу проводили согласно требованиям заводских технологических инструкций по следующей схеме:

исходный металл для ЭШП стали X12MФ выплавляли в 50-тонных электродуговых печах с обработкой на УПК и разливкой в слитки развесом 1,0 т. Затем предварительно отожженные слитки ковали в кузнечном цехе на электроды диаметром по 175 мм;

электрошлаковый переплав электродов диаметром 175 мм выполняли по стандартным электрическим режимам в соответствии с требованиями действующей технологии. В процессе ЭШП выполнили пять вариантов введения инокуляторов по расчету от массовой скорости сплавления электрода, %: 0 (стандартная технология), 10, 20, 30, и 50. Фактически при выплавке опытных слитков инокуляторов было внесено несколько больше. По второму варианту — 16,8 кг (13 %); третьему — 29,7 кг (23 %); четвертому — 43,6 кг (34 %); пятому — 70,4 кг (55 %);

линейную скорость сплавления электрода по каждому варианту фиксировали с помощью электронного устройства контроля скорости сплавления электрода ЛМ. 1790-1 РЭ разработки ПАО «Днепропетсталь», а также по каждому варианту фиксировали глубину металлической ванны забросом вольфрамовой крупки. Процесс ЭШП опытных вариантов проходил стабильно, без отклонений от заданного режима плавления. При внесении в металлическую ванну порядка 60 % инокуляторов от массовой скорости сплавления электрода зафиксированы броски рабочего тока до 1 кА с переходом плавки в нестабильный режим.

По результатам проведенных плавки установлено, что с увеличением расхода вводимых ино-



Рис. 4. Слиток ЭШП стали X12MФ-Ш диаметром 300 мм, выплавленный с введением инокуляторов в процессе ЭШП куляторов массовая скорость сплавления электрода снижается с 3,1 до 2,0 кг/мин, т. е. на 32 %. В то же время суммарная производительность процесса ЭШП за счет добавления инокуляторов увеличивается от 13 до 55 % (рис. 3). Расход электроэнергии с учетом массы добавленных гранул уменьшился на 8...16 % и находился в пределах 1345...1470 кВт·ч/т. При выплавке слитка диаметром 300 мм и массой 1,0 т средний расход электроэнергии по стандартной технологии составлял 1600 кВт·ч/т.

Один из опытных слитков представлен на рис. 4, из которого видно, что его поверхность гладкая, гофры и пережимы отсутствуют.

Исследования макроструктуры проводили на продольных темплетях, вырезанных по оси



Рис. 5. Макроструктура и глубина металлической ванны слитка диаметром 300 мм стали X12MФ-Ш, выплавленного с введением инокуляторов в процессе ЭШП (пятый вариант выплавки)

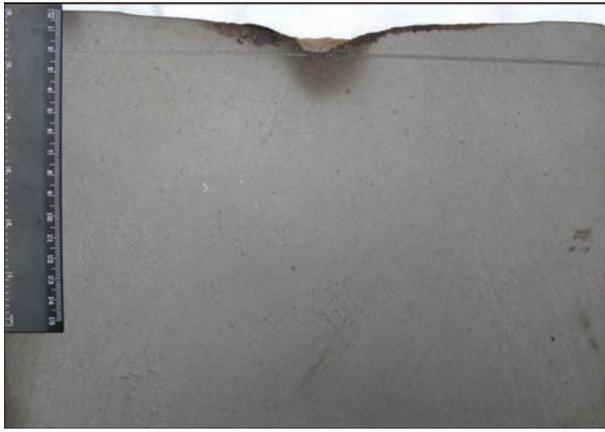


Рис. 6. Макроструктура с глубиной усадочной раковины 20 мм головной части слитка диаметром 300 мм стали X12МФ-Ш, выплавленного с введением инокуляторов в процессе ЭШП (пятый вариант выплавки)

слитка. Макроструктуру получили плотную, однородную, без дефектов ликвационного характера (рис. 5). На рис. 6 представлен макротемплет с усадкой по пятому варианту переплава. Видно, что дефектов усадочного характера нет, высота усадочной раковины от торца слитка 20 мм (по массе 15 кг). Ниже усадки макроструктура в слитке, полученном с введением инокуляторов, плотная и однородная. По стандартной технологии величина головной обреза составляет по высоте слитка 90 мм (50 кг). Это дает основание и возможность снижения головной обреза на 20...30 кг (от 40 до 60 %) [7]. Действие инокуляторов положительно сказалось на глубине металлической ванны. Глубина зафиксированной металлической ванны в осевой части слитка по пятому варианту выплавки составила 80 мм (рис. 5), что в 1,5 раза меньше глубины ванны в слитке, получаемом по действующей технологии.

Образцы для количественной оценки параметров сетки эвтектических карбидов отбирали из центра, на половине радиуса и от края слитков по каждому варианту выплавки. Оценка изменения

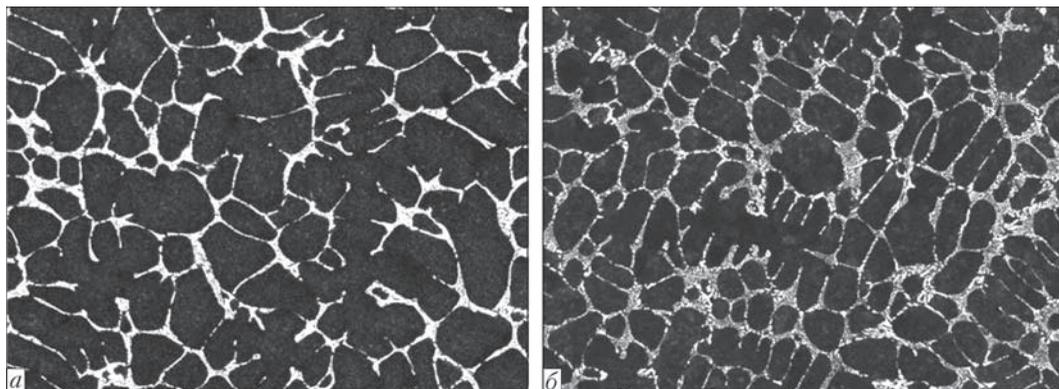


Рис. 7. Строение сетки эвтектических карбидов осевой части слитка диаметром 300 мм стали X12МФ-Ш: а — без введения инокуляторов; б — с введением 55 % инокуляторов, $\times 50$

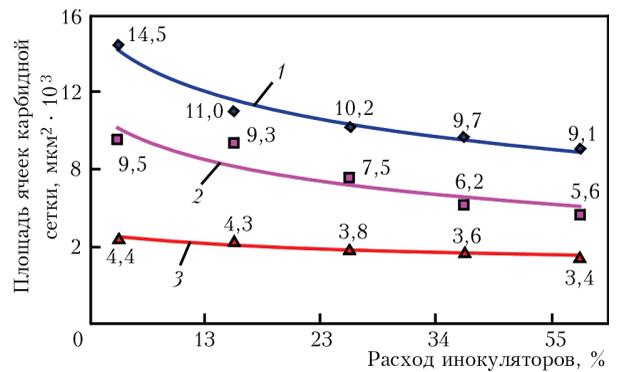


Рис. 8. Изменение площади ячеек карбидной сетки в слитке диаметром 300 мм стали X12МФ-Ш в зависимости от количества инокуляторов (1 — центр; 2 — 1/2R; 3 — край), вводимых в жидкую металлическую ванну при ЭШП

параметров сетки эвтектических карбидов проводили с использованием компьютерной металлографии — программно-аппаратного комплекса «ВидеоТест-Металл» на базе оптического микроскопа «ZEISS Axiovert 200MAT» при 50-кратном увеличении.

Химический состав определяли спектральным методом. Полученные данные приведены в таблице. Установлено, что изменение химического состава стали X12МФ при ЭШП с вводом инокуляторов аналогичны изменениям при переплаве по стандартной заводской технологии. Химический состав полученного металла ЭШП соответствует требованиям ТУ ДСС 003, гармонизированным с зарубежными стандартами на поставку продукции на экспорт.

В результате количественных металлографических исследований установлено, что наибольший эффект диспергирования литой структуры слитка диаметром 300 мм достигнут при вводе в металлическую ванну 55 % инокуляторов от массовой скорости сплавления расходуемого электрода (рис. 7). В частности, площадь ячеек эвтектических карбидов в среднем уменьшилась в центре слитка на 37 %, в области половины радиуса — на

Химический состав стали X12МФ (расходуемых электродов, инокуляторов) и слитка стали X12МФ-Ш, мас. %									
Объект исследований	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V	Al
Расходуемый электрод	1,54	0,26	0,32	0,025	0,005	11,21	0,74	0,96	0,028
Инокуляторы	1,50	0,27	0,36	0,027	0,012	11,15	0,75	0,95	0,030
Металл ЭШП	1,57	0,26	0,28	0,025	0,003	11,17	0,74	0,93	0,013
Требования ТУ ДСС 003	1,50	0,15	0,10	не более	не более	11,00	0,70	0,70	—
(DIN EN ISO 4957)	1,60	0,45	0,40	0,030	0,015	13,00	1,00	1,00	—

41 %, в краевой зоне — на 22 % по сравнению со структурой серийного слитка (рис. 8).

Воздействие инокуляторов на диспергирование литой структуры в большей степени проявляется в центре и на половине радиуса слитка.

Уменьшение средней площади ячеек в зависимости от расхода инокуляторов в центре слитка составило от 24 до 37 %, на половине радиуса — от 2 до 41 %, в краевой зоне — от 2 до 22 % (см. рис. 8).

Ввод инокуляторов в количестве 13 % оказывает наименьшее влияние на уменьшение ячеек карбидов. В центре слитка площадь ячеек уменьшилась на 24 %, на половине радиуса и в краевой зоне — на 2 %.

Ввод инокуляторов в количестве 13 и 23 % оказывает менее эффективное воздействие на размеры сетки эвтектических карбидов (в сравнении с 55 %) и уменьшает площадь ячеек в центре слитка на 29...33 %, в области половины радиуса — на 21...34 % и в краевой зоне — на 13...18 %.

Эффект от ЭШП с инокуляторами (уменьшение размера ячеек) в краевой зоне наименьший. Это объясняется соизмеримым диспергирующим действием существующей системы охлаждения на периферию слитка.

Таким образом, в результате проведенной работы для слитка диаметром 300 мм стали X12МФ-Ш установлено, что введение в металлическую ванну в процессе ЭШП изоморфных гранул инокуляторов обеспечивает:

измельчение ячеек эвтектической сетки на 41 % (максимальное);

уменьшение глубины металлической ванны в 1,5 раза;

возможность снижения головной обрезки на 40...60 %;

экономии электроэнергии от 8 до 16 %.

Полученные результаты целесообразно использовать для решения важной практической

задачи — разработки промышленной технологии электрошлакового переплава с вводом инокуляторов, обеспечивающей как улучшение структуры литого металла и соответственно качественных характеристик поковок и проката, так и повышение технико-экономических показателей плавки.

Список литературы

1. Геллер Ю. А. (1983) *Инструментальные стали*. Москва, Металлургия.
2. Патон Б. Е., Лакомский В. И., Григоренко Г. М., Медовар Л. Б. (2003) Специальная электрометаллургия: полвека в действии. Что дальше? *Современная электрометаллургия*, 4, 3–7.
3. Баландин Г. Ф. (1965) *Формирование кристаллического строения отливок*. Москва, Машиностроение.
4. Голубцов В. А., Лунев В. В. (2009) *Модифицирование стали для отливок и слитков*. Запорожье, ЗНТУ.
5. Медовар Б. И., Цыкуленко А. К., Дяченко Д. М. (1990) *Качество электрошлакового металла*. Киев, Наукова думка.
6. Попов В. С., Билоник И. М., Бережный С. П., Капустян А. Е. (2004) Улучшение структуры и свойств литых инструментальных сталей при электрошлаковой выплавке с инокуляторами. *Современная электрометаллургия*, 2, 8–9.
7. Попов В. С., Билоник И. М., Давиденко С. В., Панченко А. И., Логозинский И. Н., Сальников А. С., Зыков И. Ю. (2007) *Способ получения слитка электрошлаковым переплавом*, Украина, Пат. 28530.

References

1. Geller, Yu.A. (1983) *Tool steels*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Paton, B.E., Lakomsky, V.I., Grigorenko, G.M., Medovar, L.B. (2003) Special electrometallurgy: Half a century of activity. What next? *Advances in Electrometallurgy*, 4, 2–6.
3. Balandin, G.F. (1965) *Formation of crystalline structure of castings*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
4. Golubtsov, V.A., Lunev, V.V. (2009) *Modification of steel for castings and ingots*. Zaporoshie, ZNTU [in Russian].
5. Medovar, B.I., Tsykulenko, A.K., Dyachenko, D.M. (1990) *Quality of electroslag metal*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Popov, V.S., Bilonik, I.M., Berezhny, S.P. and Kapustyan, A.E. (2004) Improvement of structure and properties of cast tool steels in electroslag melting with inoculators. *Advances in Electrometallurgy*, 2, 7–8.
7. Popov, V.S., Bilonik, I.M., Davidchenko, S.V. et al. (2007) *Method of production of ingot by electroslag remelting*. Pat. 28530, Ukraine [in Russian].

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІНОКУЛЯТОРІВ НА ДИСПЕРГУВАННЯ ЛИТОЇ СТРУКТУРИ СТАЛІ Х12МФ-Ш

С. В. Давидченко¹, О. І. Панченко¹, І. М. Білонік², І. М. Логозинський¹, А. С. Сальніков¹, О. Г. Федьков¹

¹ПАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» ім. А. М. Кузьміна».

69008, м. Запоріжжя, Південне шосе, 81. E-mail: info@dss.com.ua

²Запорізький національний технічний університет.

69061, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64. E-mail: znu@znu.edu.ua

Досліджено дисперсність структури литої сталі Х12МФ-Ш, обробленої інокуляторами в процесі виплавки зливка ЕШП діаметром 300 мм. Показано порівняння будови сітки евтектичних карбідів осьової частини зливка сталі Х12МФ-Ш з введенням і без інокуляторів в металеву ванну. Кількісно оцінено параметри сітки евтектичних карбідів в залежності від масової швидкості введення в розплав інокуляторів. Встановлено вплив введення інокуляторів на масову швидкість наплавлення зливка діаметром 300 мм сталі Х12МФ-Ш і сумарну продуктивність процесу ЕШП. Бібліогр. 7, табл. 1, іл. 8.

Ключові слова: електрошлаковий переплав; інокулятори; диспергування; лита структура; сітка евтектичних карбідів; карбідна неоднорідність

INVESTIGATION OF EFFECT OF INOCULATORS ON DISPERSION OF STEEL Kh12MF-Sh CAST STRUCTURE

S.V. Davidchenko¹, A.I. Panchenko¹, I.M. Bilonik², I.N. Logozinsky¹, A.S. Salnikov¹, A.G. Fedkov¹

¹PJSC «A.N. Kuzmin Electrometallurgical plant «Dneprospestal».

81 Yuzhnoye shosse, 69008, Zaporozhye. E-mail: info@dss.com.ua

²Zaporozhye National Technical University.

64 Zhukovsky Str., 69061, Zaporozhye. E-mail: znu@znu.edu.ua

Dispersion of structure of cast steel Kh12MF-Sh, treated by inoculators in the process of melting the ESR ingot of 300 mm diameter was investigated. The comparative structure of network of eutectic carbides of an axial part of Kh12MF-Sh steel ingot with and without adding of inoculators to a metal pool is shown. Parameters of network of eutectic carbides were evaluated quantitatively depending on mass rate of adding inoculators into the melt. The effect of adding inoculators on mass rate of deposition of 300 mm diameter ingot of steel Kh12MF-Sh and total efficiency of the ERS process was established. Ref. 7, Tabl. 1, Fig. 8.

Key words: electroslag remelting; inoculators; dispersion; cast structure; network of eutectic carbides; carbide heterogeneity

Поступила 05.03.2018

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є. О. ПАТОНА НАНУ
МІЖНАРОДНА АСОЦІАЦІЯ «ЗВАРЮВАННЯ»**





**Міжнародна конференція
«ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ – СЬОГОДЕННЯ І МАЙБУТНЄ»**

**Присвячується 100-річчю
Національної академії наук України**

5 – 6 грудня, 2018 р.
Україна, м. Київ
Голова:
академік НАН України Л. Лобанов

НАУКОВІ НАПРЯМКИ КОНФЕРЕНЦІЇ

- Технології, матеріали і обладнання для зварювання і споріднених процесів
- Міцність зварних конструкцій, теоретичні та експериментальні дослідження напружено-деформуючих станів та їх регулювання
- Вдосконалення зварних конструкцій, автоматизація їх розрахунку і проектування, оцінка і подовження ресурсу
- Нові конструкційні матеріали

- Неруйнівний контроль і технічна діагностика
- Інженерія поверхні
- Зварювання в медицині – технології, обладнання; наноматеріали і нанотехнології
- Проблеми екології зварювального виробництва
- Спеціальна електрометалургія
- Стандартизація, сертифікація продукції зварювального виробництва, підготовка і атестація спеціалістів