

669.187.087:621.791.796

Давидченко Станислав Владимирович <sup>(1)</sup>, начальник электросталеплавильной лаборатории  
 Логозинский Игорь Николаевич <sup>(1)</sup>, заместитель технического директора  
 Сальников Анатолий Семенович <sup>(1)</sup>, начальник центральной заводской лаборатории  
 Билоник Игорь Методиевич <sup>(2)</sup>, доцент, кандидат технических наук  
 Шумикин Сергей Александрович <sup>(2)</sup>, доцент, кандидат технических наук  
 Губарь Евгений Яковлевич <sup>(3)</sup>, доцент, кандидат технических наук

## ПОВЫШЕНИЕ ОДНОРОДНОСТИ И ДИСПЕРСНОСТИ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО СЛИТКА ЛЕДЕБУРИТНЫХ СТАЛЕЙ

<sup>(1)</sup> ЧАО «Электрометаллургический завод «Днепроспецсталь»

<sup>(2)</sup> Запорожский национальный технический университет

<sup>(3)</sup> Черкасский государственный университет

Исследована однородность и дисперсность структуры литой стали X12MФ-Ш, обработанной инокуляторами в процессе выплавки слитка ЭШП diam. 300 мм. Показано сравнительное строение сетки эвтектических карбидов осевой части слитка стали X12MФ-Ш без введения и с введением инокуляторов в металлическую ванну слитка ЭШП. Количественно оценены параметры сетки эвтектических карбидов в зависимости от массовой скорости введения в расплав инокуляторов. Установлено влияние ввода инокуляторов на производительность процесса ЭШП и расход электроэнергии.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав, инокуляторы, диспергирование литой структуры, сетка эвтектических карбидов, карбидная неоднородность

*Введение.* Специфика кристаллизации ледебуритных сталей заключается в том, что первичная структура или же так называемая «сетка» карбидной эвтектики формируется в зависимости от условий кристаллизации. Чем выше скорость кристаллизации и чем более равномернее градиент температуры перед фронтом кристаллизации по сечению слитка, тем более благоприятные условия для получения как дисперсной, так и однородной по сечению слитка структуры ледебуритной стали.

Электрошлаковый переплав является одним из наиболее эффективных металлургических процессов формирования однородной структуры слитков сталей. Кристаллизация в водоохлаждаемом медном кристаллизаторе обеспечивает направленный рост кристаллов, высокую физическую однородность и монолитность литого металла [1–6]. Однако, скорость кристаллизации электрошлакового слитка в большей степени определяется глубиной металлической ванны и изменяется от края к центру слитка. В классическом варианте технологии плавки принято, что оптимальные условия кристаллизации обеспечиваются, когда глубина металлической ванны равна радиусу кристаллизатора [4,5]. Однако, даже соблюдение этого условия при шлаковом переплаве ледебуритных сталей не приводит к достаточной однородности и дисперсности структуры слитка [6]. В центре слитка формируется более грубая карбидная сетка, а в непосред-

ственной близости к стенке кристаллизатора – однородная и дисперсная структура. Эта особенность кристаллизации слитка ледебуритных сталей при электрошлаковом переплаве часто приводит к ограничению диаметра слитка, что обусловлено возможностями оборудования деформационного передела.

При рассмотрении работ [7-9] по управлению процессом кристаллизации при электрошлаковом переплаве, а также работ в области суспензионной разливки, можно прийти к техническому решению, которое заключается в вводе инокулирующих частиц или же гранул гомогенных по составу к переплавляемому металлу с целью образования дополнительных центров кристаллизации. Следует также отметить, что вводимые при электрошлаковом переплаве инокуляторы (гранулы) в большинстве попадают в центральную часть слитка, что обусловлено конической формой металлической ванны. При этом, температурный градиент перед фронтом кристаллизации уменьшается, металлическая ванна должна стать менее глубокой. Эти факторы способствуют повышению однородности и дисперсности структуры слитка.

На ЧАО «Электрометаллургический завод «Днепроспецсталь» существует возможность применения в качестве гранул инокуляторов при электрошлаковом переплаве таких сталей как X12; X12MФ; P6M5; P6M5Ф3, которые производят в цехе порошковой металлургии.

Применяемые гранулы diam. 1,0-2,0 мм в процессе ЭШП можно рассматривать как часть

расходуемого электрода. Если сравнивать их с диаметром капель, стекающих с электродного торца (порядка 5-6 мм) [10], то можно предположить увеличение удельной поверхности реагирования шлака с металлом, а, следовательно, повышение эффекта рафинирования переплавляемого металла.

Ещё один фактор, который на наш взгляд должен способствовать повышению, как однородности, так и дисперсности структуры слитка – это высочайшее микрокристаллическое строение гранул. Однако, данные предположения требуют детальных исследований и не рассматриваются в данной работе.

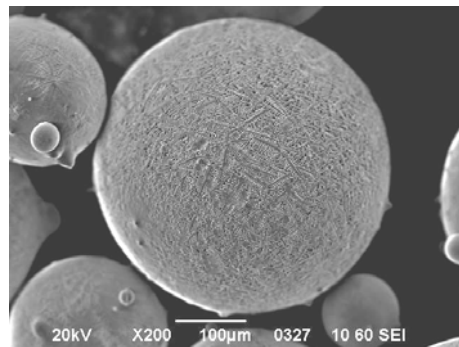
*Цель работы.* Целью работы является исследование возможности повышения однородности и дисперсности структуры стали X12МФ путем введения во время плавки гранул иноксидаторов, а также определение основных технико-экономических показателей плавки.

*Материалы и методики исследований.* Работу выполняли на ЧАО «Электрометаллургический завод «Днепрспецсталь». Электрошлаковый переплав электродов диам. 175 мм из стали X12МФ осуществляли на печи ОКБ 1065 в кристаллизатор диам. 300 мм на флюсе АНФ-6. Ввод гранул-иноксидаторов в металлическую ванну выполняли в процессе ЭШП дозатором «Доза-4».

Иноксидаторы представляли собой изоморфные гранулы из стали X12МФ диам. 0,8-1,2 мм, изготовленные распылением расплава по технологии цеха порошковой металлургии данного предприятия. Качество гранул соответствовало требованиям для изготовления прессовок. Характерной особенностью иноксидаторов является их мелкодисперсная структура (рис. 1), а также низкое содержание неметаллических включений, что обеспечивается способом производства и высокой скоростью кристаллизации при производстве гранул.

Опытную работу выполняли согласно требованиям заводских технологических инструкций по следующей схеме. Исходный металл для ЭШП стали X12МФ выплавляли в пятидесяти-тонных электродуговых печах с обработкой на УПК и разливкой в слиток массой 1,0 т. Затем предварительно отожженные слитки подвергали ковке в кузнечном цехе на электроды диам. 175 мм. Электрошлаковый переплав электродов диам. 175 мм осуществляли по стандартным электрическим режимам в соответствии с требованиями действующей технологии. В процессе ЭШП исследовали пять вариантов ввода иноксидаторов по расчету от массы, 0 % (стандартная

технология), 10, 20, 30, и 50 %. Фактически при выплавке опытных слитков было внесено иноксидаторов несколько больше: по второму варианту – 16,8 кг (13 %); третьему – 29,7 кг (23 %); четвертому – 43,6 кг (34 %); пятому – 70,4 кг (55 %).

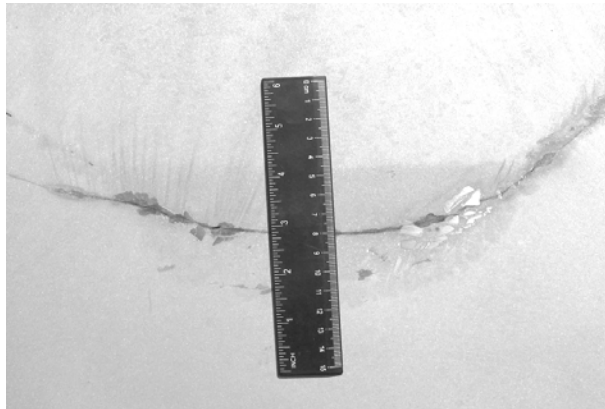


**Рисунок 1** – Дендритная структура гранул-иноксидаторов стали X12МФ (метод получения – порошковая металлургия)

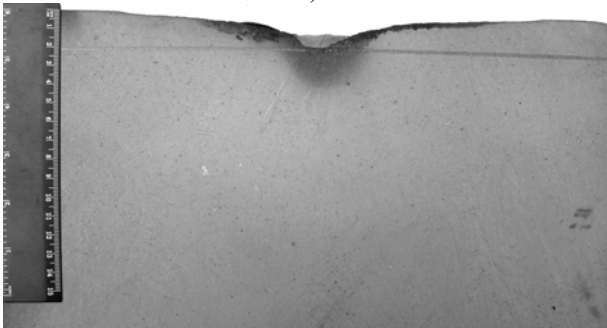
Линейную скорость сплавления электрода по каждому варианту фиксировали с помощью электронного устройства контроля скорости сплавления электрода ЛМ. 1790-1 РЭ разработки данного предприятия, а также по каждому варианту фиксировали глубину металлической ванны забросом вольфрамовой крупки. Процесс ЭШП опытных вариантов проходил стабильно, без отклонений от заданного режима плавления. При внесении в металлическую ванну порядка 60 % массы иноксидаторов зафиксированы всплески рабочего тока до 1,0 кА с переходом плавки в нестабильный режим.

*Основная часть исследований.* Исследования макроструктуры осуществляли на продольных темплетях, вырезанных по оси слитка. Зафиксировали плотную, однородную макроструктуру, без дефектов ликвационного характера (рис. 2,а). На рис. 2,б представлен темплет слитка полученного по пятому варианту. Видно, что дефекты усадочного характера отсутствуют, высота усадочной раковины от торца слитка составляет 20 мм (по массе 15 кг). Ниже области усадки макроструктура слитка, полученного с введением иноксидаторов, является плотной и однородной. По стандартной технологии величина главной обрезки составляет по высоте слитка 90 мм (50 кг), что дает основание и возможность снижения ее на 20-30 кг (от 40 до 60 %) [7]. Действие иноксидаторов оказывает положительное влияние на глубину металлической ванны. Так, глубина металлической ванны, зафиксированная в осевой части слитка по пятому варианту выплавки, составила 80 мм (рис. 2,а),

что в 1,5 раза меньше глубины ванны в слитке, получаемом по действующей технологии.



а)



б)

**Рисунок 2** – Макроструктура слитка диам. 300 мм из стали X12MF-III, выплавленного с введением инокуляторов в процессе ЭШП (пятый вариант): а) форма металлической ванны; б) головная часть слитка

Образцы для количественной оценки параметров сетки эвтектических карбидов отбирали из центра, на половине радиуса и от края слитка.

**Таблица 1** – Химический состав стали X12MF (расходуемых электродов, инокуляторов) и слитка стали X12MF-III.

Объект исследований	Массовая доля элементов, %								
	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 (DIN EN ISO 4957)	1,50- 1,60	0,15- 0,45	0,10- 0,40	≤ 0,030	≤ 0,015	11,00 13,00	0,70- 1,00	0,70- 1,00	-

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. табл. 2).

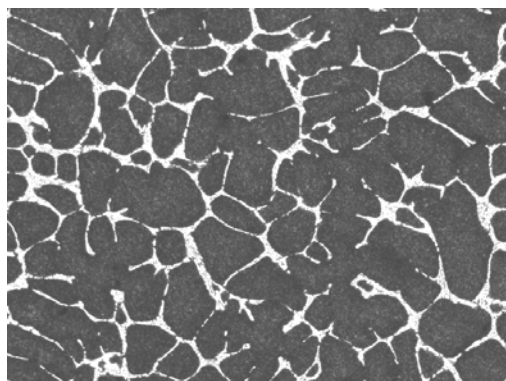
Ввод инокуляторов в количестве 13 % оказывает наименьшее влияние на уменьшение ячеек карбидов. В центре слитка площадь ячеек уменьшилась на 24 %, на половине радиуса и в краевой зоне – на 2 %.

ков, по каждому варианту выплавки. Оценку изменения указанных параметров выполняли с использованием компьютерной металлографии: программно-аппаратного комплекса «Видео-Тест-Металл» на базе оптического микроскопа «ZEISS Axiovert 200MAT» при пятидесятикратном увеличении.

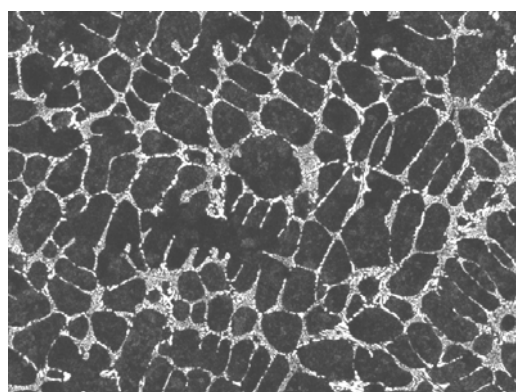
Химический состав определяли спектральным методом. Полученные данные приведены в табл. 1. Установлено, что изменения химического состава стали X12MF при электрошлаковом переплаве с вводом инокуляторов аналогично изменениям при переплаве по стандартной заводской технологии. Химический состав полученного металла ЭШП соответствует требованиям ТУ ДСС 003, согласованным с зарубежными стандартами на поставку продукции на экспорт.

Количественные металлографические исследования показали, что наибольший эффект диспергирования литой структуры в центре слитка диам. 300 мм достигается при вводе в металлическую ванну 55 % массы инокуляторов (рис. 3). В частности, площадь ячеек эвтектических карбидов в среднем уменьшается (табл. 2) в центре слитка на 37 %, в области половины радиуса – на 41 %, в краевой зоне на – 22 %, по сравнению со структурой серийного слитка. Воздействие инокуляторов на формирование однородной литой структуры в большей степени проявляется в центре и на половине радиуса слитка.

Ввод инокуляторов в количестве 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 %.



а)



б)

**Рисунок 3** – Строение сетки эвтектических карбидов осевой части слитка диаметром 300 мм стали X12MF-III: а) без введения инокуляторов; б) с введением 55 % инокуляторов;  $\times 50$

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

**Таблица 2** – Изменение площади ячеек карбидной сетки в слитке диам. 300 мм стали X12MF-III в зависимости от количества инокуляторов, вводимых в жидкую металлическую ванну при ЭШП

Площадь ячеек эвтектичных карбидов	Расход инокуляторов, %				
	0	13	23	34	55
Центр слитка	14,5	11,0	10,2	9,7	9,1
Половина радиуса слитка	9,5	9,3	7,5	6,2	5,6
Краевая зона	4,4	4,3	3,8	3,6	3,4

**Выводы.** В результате проведенной работы установлено, что для слитка диам. 300 мм стали X12MF-III введение в металлическую ванну в процессе ЭШП изоморфных гранул-инокуляторов обеспечивает измельчение ячеек эвтектической сетки на 35-40 %; уменьшение глубины металлической ванны в 1,4-1,5 раза; снижение головной обреза на 40-60 %.

При фиксации основных технико-экономических показателей плавок ЭШП с вводом инокуляторов установлено повышение производительности процесса на 13-55 % в зависимости от расхода инокуляторов, а расход электроэнергии находится в пределах 1345-1470 кВт·час/т, что на 8-16 % меньше по сравнению с серийной технологией.

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.

### Библиографический список

1. **Электрошлаковый металл** [Текст] / Под ред. Б. Е. Патона. – Киев : Наукова думка, 1981. – 680 с.
2. **Медовар, Б. И.** Качество электрошлакового металла [Текст] / Б. И. Медовар, А. К. Цыгуленко, Д. М. Дяченко. – Киев : Наукова думка, 1990. – 312 с.
3. **Патон, Б. Е.** Специальная электрометаллургия: полвека в действии. Что дальше? [Текст] / Б. Е. Патон, В. И. Лакомский, Г. М. Григоренко, Л. Б. Медовар // Современная электрометаллургия. – 2003. – № 4. – С. 7.
4. **Лахтин, Ю. В.** Электрошлаковый переплав [Текст] / Ю. В. Лахтин, Б. И. Медовар. – М. : Metallurgy, 1970. – 239 с.
5. **Хасин, Г. А.** О кристаллизации электрошлакового слитка [Текст] / Проблемы спецметаллургии. – Киев, 1970. – Вып. 3. – 310 с.
6. **Геллер, Ю. А.** Инструментальные стали [Текст] / Ю. А. Геллер. – М. : Metallurgy, 1983. – 527 с.
7. **Затуловский, С. С.** Суспензионная разливка [Текст] / С. С. Затуловский. – Киев : Наукова думка, 1981. – 260 с.
8. **Гольдштейн, Я. Г.** Инокулирование железо-углеродистых сплавов [Текст] / Я. Г. Гольдштейн, В. Г. Мизин. – М. : Metallurgy, 1993. – 436 с.
9. **Миронов, Ю. М.** Исследование процесса электрошлаковой наплавки со сжатым полем и подключенным нерасходуемым электродом [Текст] / Ю. М. Миронов // Исследование новых электротехнологических процессов в металлургии и металлообработке. – Чебоксары, 1969. – С. 38-40.

10. **Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве** [Текст] / Под ред. Б. И. Медовара. – Киев : Наукова думка, 1978. – 239 с.

**Давидченко Станіслав Володимирович**, начальник електросталеплавильної лабораторії ПрАТ «Дніпроспецсталь» (Україна, Запоріжжя). E-mail: davidchenko\_stan@ukr.net

**Логозинський Ігор Миколайович**, заступник технічного директора ПрАТ «Дніпроспецсталь» (Україна, Запоріжжя). E-mail: -

**Сальников Анатолій Семенович**, начальник центральної заводської лабораторії ПрАТ «Дніпроспецсталь» (Україна, Запоріжжя). E-mail: -

**Білоник Ігор Методійович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри обладнання та технології зварювального виробництва, Запорізький національний технічний університет (Україна, Запоріжжя). E-mail: kafedra\_otzv@zntu.edu.ua

**Шумикін Сергій Олександрович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри обладнання та технології зварювального виробництва, Запорізький національний технічний університет (Україна, Запоріжжя). E-mail: shusa1958@ukr.net

**Губар Євген Якович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри технології та обладнання машинобудівних виробництв, Черкаський державний університет (Україна, Черкаси). E-mail: -

### ПІДВИЩЕННЯ ОДНОРІДНОСТІ ТА ДИСПЕРСНОСТІ СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВИХ ЗЛИТКІВ ЛЕДЕБУРИТНИХ СТАЛЕЙ

Досліджено однорідність і дисперсність структури литої сталі X12МФ-Ш, обробленої інокуляторами в процесі виплавки злитка ЕШП діам. 300 мм. Показано порівняльну будову сітки евтектичних карбідів осьової частини злитка сталі X12МФ-Ш без введення та з введенням інокуляторів у металеву ванну злитка ЕШП. Кількісно оцінено параметри сітки евтектичних карбідів залежно від маси інокуляторів. Встановлено вплив введення інокуляторів на продуктивність процесу ЕШПі витрату електроенергії.

Ключові слова: електрошлаковий переплав, інокулятори, розпорошення литої структури, сітка евтектичних карбідів, карбідна неоднорідність

### ПІДВИЩЕННЯ ОДНОРІДНОСТІ ТА ДИСПЕРСНОСТІ СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВИХ ЗЛИТКІВ ЛЕДЕБУРИТНИХ СТАЛЕЙ

**Davidchenco Stanislav**, Head of Electric Melting Laboratory of PJSC «Dnipospetsstal» (Ukraine Zaporizhzhia). E-mail: davidchenko\_stan@ukr.net

**Logozinsky Igor**, Deputy Technical Director of PJSC «Dnipospetsstal», (Ukraine Zaporizhzhia). E-mail: -

**Sal'nikov Anatoly**, Head of Central Plant Laboratory of PJSC «Dnipospetsstal», (Ukraine Zaporizhzhia). E-mail: -

**Bilonik Igor**, candidate of technical sciences, Associate Professor of Department of the Equipment and Technology of Welding Production, Zaporizhzhia National Technical University (Ukraine Zaporizhzhia). E-mail: kafedra\_otzv@zntu.edu.ua

**Shumykin Sergey**, candidate of technical sciences, Associate Professor of Department of the Equipment and Technology of Welding Production, Zaporizhzhia National Technical University (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: shusa1958@ukr.net

**Gubar Evgeniy**, candidate of technical sciences, Associate Professor of Department of the Technology and Equipment of Machinbuilding Industries of Cherkasy State University (Ukraine Cherkasy). E-mail: -

### INCREASE OF UNIFORMITY AND DISPERSION OF THE STRUCTURE OF ELECTROSLAG INGOT LEDEBURIN STEELS

The uniformity and dispersion of the structure of X12MФ-Ш cast steel treated with inoculators during the process of smelting an ESR ingot with a diameter of 300 mm were investigated.

The comparative structure of the grid of eutectic carbides in the axial part of the X12MФ-Ш steel ingot without the introduction and introduction of inoculators into the metal bath of the ESR ingot is shown. The parameters of the grid of eutectic carbides are quantitatively estimated depending on the mass rate of injection of inoculators into the melt. The influence of input of inoculators on the performance of the ESR process, the power consumption is established.

Keywords: electroslag remelting, inoculators, dispersion of cast structure, grid of eutectic carbides, carbide heterogeneity

Стаття надійшла до редакції 19.01.2019 р.

Рецензент, проф. О.А. Митяєв