



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-56-60>
УДК 669

Поступила 17.11.2023
Received 17.11.2023

ОПЫТ ПРОИЗВОДСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ С НИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ КРЕМНИЯ МАРКИ Св-08А

В. О. МОРОЗОВ, С. В. КОНОВАЛЕНКО, А. А. КОВАЛЕВ, Г. В. ДЕРЕВЯНКО, К. Н. МИТРИЧЕНКО, А. В. ШАТОВСКИЙ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37.

В данной статье рассматривается проблема производства низкоуглеродистой стали с низким содержанием кремния, связанная с образованием подкорковых пузырей, возникающих при кристаллизации. Приведены результаты выполненной работы.

Ключевые слова. Внепечная обработка, вакуумная дегазация, раскисление, раскатанный пузырь.

Для цитирования. Морозов, В. О. Опыт производства низкоуглеродистой стали с низким содержанием кремния марки Св-08А / В. О. Морозов, С. В. Коноваленко, А. А. Ковалев, Г. В. Деревянко, К. Н. Митриченко, А. В. Шатовский // *Литье и металлургия*. 2023. № 4. С. 56–60. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-56-60>.

THE EXPERIENCE OF PRODUCING LOW-CARBON STEEL WITH LOW SILICON CONTENT OF GRADE Sv-08A

V. O. MOROZOV, S. V. KONOVALENKO, A. A. KOVALEV, G. V. DEREVYANKO, K. N. MITRICHENKO, A. V. SHATOVSKY, OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”, Zhlobin, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str.

Current paper examines the problem of low-carbon steel producing with low silicon content, which is associated with the formation of sub-surface bubbles during crystallization. The work results are presented.

Keywords. External processing, vacuum degassing, decarburization, rolled bubble.

For citation. Morozov V. O., Konovalenko S. V., Kovalev A. A., Derevyanko G. V., Mitrichenko K. N., Shatovsky A. V. The experience of producing low-carbon steel with low silicon content of grade Sv-08A. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 4, pp. 56–60. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-56-60>.

Введение

Современное развитие техники и экономики предъявляет повышенные требования к качеству материалов для изготовления производственного и транспортного оборудования, технических сооружений и других устройств. Несмотря на появление и рост применения в последнее время высокопрочных алюминиевых, титановых сплавов, пластмасс, композиционных материалов, основным материалом, определяющим технологическую базу современной цивилизации, является сталь. Сталь благодаря своему сочетанию физических и технологических свойств незаменима во многих отраслях техники и экономики. Достижение высоких качественных показателей производства стали обеспечивается за счет непрерывного совершенствования конструкций сталеплавильных, сталелитейных агрегатов и технологических процессов. Технический уровень современного производства стали предусматривает использование мощных дуговых печей, интенсификацию технологического процесса плавки, повышение стойкости огнеупорной футеровки, применение внепечных способов рафинирования стали и использование высокопроизводительных машин для непрерывной разливки литой заготовки. Результатом совершенствования производства стали является увеличение выхода годной продукции, расширение марочного сортамента и улучшение качества стали за счет рафинирования, модифицирования, легирования и термической обработки.

Правильный выбор путей повышения качества стали не возможен без знания природы явлений, которые при этом происходят. Для решения поставленных задач используются уже известные знания о протекающих процессах в металлургических расплавах.

Одним из процессов, оказывающих решающее влияние на качество, является операция раскисления металла, применяемая для связывания растворенного кислорода. Проведение операции раскисления с пониманием процессов, происходящих в металле, позволяет получить качественный слиток и требуемые свойства стали.

В связи с освоением металлургическими предприятиями непрерывной разливки специалисты сталкиваются с рядом проблем, характерных для данного процесса. Остаются не полностью решенными вопросы производства низко- и среднеуглеродистых сталей с низким содержанием кремния особенно с регламентированным содержанием алюминия. Проблемы таких марок связаны с образованием подкорковых пузырей, возникающих при кристаллизации.

Специалисты ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» в процессе освоения технологии низкоуглеродистых и низкокремнистых сталей с регламентированным содержанием алюминия столкнулись с проблемой образования подкоркового пузыря.

Основная часть

В 2023 г. поступил заказ на поставку катанки из стали марки Св-08А с ограничением от требований ГОСТ 2246-70 по содержанию $C \leq 0,06\%$, $Si \leq 0,02\%$, $Mn = 0,54 - 0,60\%$. В условиях электросталеплавильного цеха с февраля 2023 г. было проведено девять плавов стали марки Св-08А.

Производство стали осуществляли по нескольким схемам: без обработки на циркуляционном вакууматоре типа RH (плавка № 1) и с вакуумированием – проведением вакуум-кислородного обезуглероживания (естественного и принудительного).

Предварительно проводили опробование различных схем раскисления стали на выпуске из дуговой сталеплавильной печи (ДСП) при производстве сортамента ЭСПЦ-1. В процессе раскисления применяли ранее используемые стандартные материалы (ФСМн18, ФМн78, алюминий вторичный чушковый АВ87). После проведения окислительного периода выпуск осуществляли как с предварительным раскислением алюминием, так и без него. Опробованы схемы присадки материалов на выпуске стали с использованием ФСМн18, ФМн78, а также комбинирование ферросплавов (ФСМн18 и ФМн78).

Выплавка и внепечная обработка плавов

Плавка № 1 проведена без вакуумной обработки на вакууматоре RH. Выпуск из ДСП осуществляли при окисленности 1006 ppm ($C = 0,029\%$, $T = 1693\text{ }^{\circ}\text{C}$).

При доводке плавки проводили скачивание шлака во время внепечной обработки, связанное с трудностями раскисления шлака в условиях роста Si.

Трудность раскисления шлака заключалась в ограниченности использования имеющихся (штатно применяемых) материалов. Единственным раскислителем в условиях низкого марочного содержания кремния и углерода в готовой стали являлись шлакораскисляющая смесь на основе алюминия (содержание алюминия – не менее 20%), алюминий вторичный АВ87 в виде чушек либо фрагментированный («пирамидки»). Но присадка указанных алюмосодержащих материалов на основе вторичного алюминия, где содержание Si (согласно НД) может достигать 5%, повышает содержание кремния в стали. Также при высокой температуре наличие в шлаке алюминия, элемента, имеющего большее сродство к кислороду, способствует восстановлению кремния из шлака и росту его содержания в стали.

Дополнительно присаживали свежееобожженную известь (СаО) на установке продувки стали. При этом на данной плавке выявили отклонение по химическому составу металла ($C = 0,05\%$, $Si = 0,021\%$, $Mn = 0,44\%$) относительно требований потребителя. Такое несоответствие связано с отсутствием возможности корректировки химического состава «штатными» материалами из-за присутствия в их составе примесей (в ФМн78 – углерода, в ФСМн18 – углерода и кремния, в АВ87 – кремния).

В дальнейшем для получения требуемого химического состава в технологическую схему была включена дегазация с применением естественного вакуум-кислородного обезуглероживания. Одна плавка (плавка № 7) выпускалась с полным раскислением и последующим окислением углерода, кремния и алюминия при продувке кислородом с использованием продувочной фурмы (принудительное обезуглероживание). Химический состав металла (разливочная проба) приведен в табл. 1.

Как видно из таблицы, химический состав произведенного металла (за исключением плавки № 1) полностью соответствует требованию спецификации потребителя.

В результате корректировки процесса производства установлена следующая технологическая схема производства:

Таблица 1. Химический состав плавков (разливочная проба)

Номер плавки	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	N ₂
1	0,049	0,021	0,44	0,008	0,014	0,05	0,07	0,11	0,002	0,010
2	0,041	0,010	0,56	0,007	0,010	0,06	0,06	0,09	0,002	0,008
3	0,032	0,020	0,56	0,007	0,009	0,09	0,08	0,13	0,002	0,009
4	0,039	0,011	0,56	0,007	0,015	0,07	0,08	0,15	0,002	0,009
5	0,030	0,017	0,54	0,008	0,014	0,06	0,07	0,11	0,002	0,009
6	0,040	0,015	0,54	0,008	0,009	0,09	0,06	0,10	0,004	0,009
7	0,032	0,009	0,54	0,011	0,017	0,07	0,06	0,09	0,003	0,010
8	0,036	0,015	0,58	0,008	0,020	0,09	0,08	0,11	0,002	0,009
9	0,053	0,020	0,54	0,007	0,009	0,08	0,05	0,09	0,003	0,008

1. Выпуск из ДСП с температурой не менее 1680 °С. На выпуске материалы присаживали в следующей последовательности: алюминий вторичный в количестве согласно расчетному значению прибора Multi-Lab Celox, затем шлакообразующие и ФМн78. Для исключения вскипания и успокоения плавки дополнительно присаживали АВ87 после присадки материалов из высотных бункеров.

2. Нагрев стали на установке «печь-ковш» до температуры 1620 °С, измерение активности кислорода перед проведением обезуглероживания на установке RH ($[O] \geq 200$ ppm).

3. Проведение вакуум-кислородного обезуглероживания с контролем расхода отходящих газов до уровня менее 500 м³/ч, что свидетельствует об окончании процесса обезуглероживания. После достижения глубокого вакуума (менее 2 мбар) для окончательного раскисления стали присаживали алюминий вторичный (фрагментированный).

4. Далее на установке «печь-ковш» проводили нагрев и поддержание температуры стали в пределах 1615–1630 °С, десульфурацию присадками шлакообразующих материалов, доводку стали по содержанию марганца и окончательное раскисление металла и шлака, модифицирование неметаллических включений, усреднительную продувку стали аргоном [1].

Шлакораскисляющая смесь на основе алюминия (ШРС) в процессе производства оказалась малоэффективна из-за низкого содержания металлического алюминия ($\approx 20\%$). При присадке ШРС отмечалась низкая десульфурующая способность шлака из-за снижения основности присутствующим в смеси кварцитом. Также при увеличении оксидов кремния в шлаке повышается возможность прироста содержания кремния в стали при восстановлении последнего из шлака в процессе раскисления и модифицирования более сильным раскислителем, обладающим большим сродством к кислороду (Al, Ca), что подтверждает рост содержания кремния в пробах, отобранных при разливке, в сравнении с образцами стали в контроле на внепечной обработке.

Таким образом, раскисление шлака осуществляли не «на прямую» присадками алюмосодержащими материалами на шлак, а в основном диффузионно-растворенным в стали алюминием. Присадка проволоки с наполнителем «феррокальций» для раскисления шлака не эффективна и увеличивает стоимость обработки.

Присадка алюминиевой катанки (первичного алюминия) позволила снизить активность кислорода в металле и поддерживать содержание алюминия в стали не менее 0,005 %.

В процессе выполнения работы отбирали пробы шлака («на шомпол») для визуальной оценки раскисленности. «Белый» – высокоосновный, раскисленный шлак в ходе проведения работы не был получен ни на одной плавке. В основном после всех операций по раскислению и десульфурации шлак имел темно-коричневый цвет, что указывает на не достаточную основность и раскисленность.

Химический состав ковшевого шлака после доводки плавки № 3 приведен в табл. 2.

Таблица 2. Химический состав ковшевого шлака после доводки плавки № 3

Шлак, %	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	Расчетная основность
Плавка № 3	14,5	50,2	7,43	21,33	1,06	1,3	0,066	0,63	1,85

Химический состав отобранных образцов шлака плавки № 8 в разные периоды доводки приведен в табл. 3.

Таблица 3. Химический состав шлака

Шлак, %	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	Расчетная основность
Плавка № 8: после вакуумирования	16,0	35,8	12,92	14,89	5,19	0,003	0,085	0,335	1,46
после наведения шлака	15,6	49,5	9,12	14,99	0,23	1,71	0,091	0,038	2,03
перед проведением модифицирования	16,0	47,1	8,33	13,37	2,70	1,71	0,077	0,058	1,98

По результатам протоколов исследования химического состава шлака скорректированы шлаковый режим в части снижения доли присаживаемого ШРС и увеличение суммарного количества CaO.

Отметим, что при работе по указанной выше схеме среднее время внепечной обработки одной плавки составило 282 мин, что не вписывается в общий процесс производства и требует доработки технологических режимов внепечной обработки стали.

Разливку стали на машине непрерывного литья заготовки (МНЛЗ) осуществляли в соответствии с действующей технологической инструкцией. Скоростные и температурные режимы выдерживали согласно разработанному плану работ.

Для снижения насыщения металла атмосферным воздухом и во избежание вторичного окисления металла контролировали утепление «зеркала» стали в промежуточном ковше, в том числе в зоне металлоприемника.

Однако, несмотря на принятые меры от вторичного окисления металла на ручьях МНЛЗ в процессе разливки стали, на плавке №9 отмечалось постепенное снижение скорости в течение всей плавки (с 2,4 до 2,0 м/мин), что косвенно указывает на зарастание дозаторов продуктами вторичного окисления (алюминием) [2]. Данный факт при отсутствии замечаний по модифицированию неметаллических включений свидетельствует о предельном содержании алюминия в стали для разливки открытой струей (содержание алюминия перед началом разливки – 0,0062 %).

Для контроля макроструктуры стали осуществляли отбор темплетов с непрерывнолитых заготовок. На всех образцах в разной степени отмечается наличие подкоркового пузыря, что в процессе прокатки заготовки может оказать значительное влияние на качество поверхности катанки по установленному требованию – раскатанный пузырь не более 0,25 мм [3].

В табл. 4 приведены данные исследования качества поверхности опытной катанки.

Таблица 4. Данные исследования качества поверхности опытной катанки

Номер плавки	Диаметр катанки, мм	Раскатанный пузырь (максимальные значения по глубине в поперечном сечении), мм					
1	6,5	0,45	0,35	0,33	0,32	0,27	0,28
2	6,5	0,34	0,8	0,4	0,36	0,35	0,36
3	5,5	0,12	0,07	0,05	0,09	0,04	0,03
4	6,5	0,14	0,16	0,14	0,16	0,2	0,15
5	5,5	0,25	0,15	0,15	0,13	0,1	0,09
6	6,5	0,3	0,3	0,36	0,38	0,33	0,3
7	6,5	0,34	0,35	0,32	0,26	0,24	0,24
8	6,5	0,24	0,24	0,2	0,16	0,15	0,15
9	6,5	0,53	0,44	0,29	0,4	0,23	0,23

Как видно из таблицы, на плавках № 1, 2, 6, 7, 9, разлитых на МНЛЗ без защиты струи от вторичного окисления («открытой струей»), получены неудовлетворительные результаты по качеству поверхности относительно требованию стандартной спецификации. Глубина поверхностных дефектов «раскатанный пузырь» превышает допустимый уровень.

На плавках, где требования к качеству поверхности удовлетворяют требованию НД, отмечается глубина залегания дефектов, приближающаяся к допустимому уровню.

Выводы

В процессе выполнения работы в ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» установлена технологическая схема выпуска и внепечной обработки, позволяющая получить требуемый химический состав, используя применяемые материалы (ФМн78 и ФСМн18).

Разработанная схема внепечной обработки не в полной мере позволяет производить данную марку стали серийно из-за увеличенного времени обработки (≈ 3 ч), связанного с особенностями раскисления металла и шлака, применяющимися для производства материалами с учетом заданного химического состава стали.

ОАО «БМЗ» – управляющая компания холдинга «БМК» продолжает работу по совершенствованию технологии выплавки, доводки разливки стали марки Св-08А для производства конкурентоспособной продукции, востребованной потребителями на внешних и внутренних рынках металлопродукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Поволоцкий, Д.Я.** Внепечная обработка стали / Д.Я. Поволоцкий, В.А. Кудрин, А.Ф. Вишкарёв. – М.: МИСиС, 1995. – 256 с.
2. **Дюдкин, Д.А.** Производство стали. – Т. 1. Процессы выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки / Д.А. Дюдкин, В.В. Кисилёнок – М.: Теплотехник, 2008. – 508 с.
3. **Самойлович, Ю.А.** Стальной слиток. – Т. 1. Управление кристаллической структурой / Ю.А. Самойлович, В.И. Тимошпольский. – Мн.: Беларуская навука, 2000. – 583 с.

REFERENCES

1. **Povolockij D.Ja., Kudrin V.A., Vishkarev A.F.** *Vnepechnaja obrabotka stali* [Extra-furnace processing of steel]. Moscow, MISIS Publ., 1995, 256 p.
2. **Djudkin D.A., Kisilenko V.V.** *Proizvodstvo stali. T. 1. Processy vyplavki, vnepechnoj obrabotki i nepreryvnoj razlivki* [Steel production. Vol. 1. Smelting, post-furnace processing and continuous casting processes]. Moscow, Teplotehnik Publ., 2008, 508 p.
3. **Samojlovich Ju.A., Timoshpol'skij V.I.** *Stal'noj slitok. T. 1. Upravlenie kristallicheskoj strukturoj* [Steel ingot. Vol. 1. Crystal structure control]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2000, 583 p.