

ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ



Перевод с немецкого ЯНВАРЬ 2011

stahl
und
eisen

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ПО АКТУАЛЬНЫМ ПРОБЛЕМАМ МЕТАЛЛУРГИИ, МАШИНОСТРОЕНИЯ И ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
ЗАРУБЕЖНЫХ СТРАН



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗЛИВКИ КРУПНЫХ КУЗНЕЧНЫХ СЛИТКОВ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ*

В. Г. МИЛЮЦ, В. В. ЦУКАНОВ, А. А. КАЗАКОВ, Г. Д. МОТОВИЛИНА, С. Ю. АФАНАСЬЕВ**

Статья посвящена проблеме совершенствования технологии разлива крупных кузнечных слитков из высокопрочной судостроительной стали. Цель данной работы — разработка и освоение технологий разлива таких слитков сверху при атмосферном давлении в среде аргона и сифонным способом под шлакообразующими смесями с защитой струи металла от вторичного окисления аргоном. Применение этих технологий позволяет значительно снизить загрязненность стали неметаллическими включениями, сократить вторичное окисление металла, исключить образование строчечных оксидных включений и повысить уровень пластичности проката в Z-направлении.

Ключевые слова: слиток, высокопрочная судостроительная сталь, толстый лист, неметаллические включения, аргон, вакуум, сифонный способ разлива, пластичность проката, вторичное окисление.

При производстве толстых листов судостроительной стали из кузнечных слитков, отливаемых в вакууме, главным свойством, определяющим выход годного, является пластичность стали в Z-направлении (сопротивляемость слоистым разрывам) [1, 2], которая в значительной степени зависит от состава, морфологии и характера распределения неметаллических включений, образующихся в процессе раскисления стали [2, 3].

Совершенствование технологии внепечной обработки электростали путем отсечки печного шлака при переливе металла из ковша в ковш, снижения в 1,5–2 раза расхода кускового алюминия, вводимого в ковш, без уменьшения его содержания в металле, и оптимизации содержания в стали алюминия и кальция, прецизионно вводимых порошковой проволокой, позволило управлять составом, количеством и формой неметаллических включений. Образующиеся включения состоят в основном из алюминатов кальция округлой формы с высокой долей эквимольных алюминатов кальция, легко коалесцирующих и удаляющихся из жидкой стали. Образование бедных по содержанию кальция гекса- и биалюминатов кальция, трудноудаляемых из жидкой стали, сведено к минимуму [4].

Производство толстолистного проката по схеме: кузнечный слиток — кованный сляб — прокат с использованием разработанной технологии внепечного рафинирования, вакуумирования и модифицирования показало увеличение пластичности стали в Z-направлении за счет значительного повышения чистоты стали [1, 3].

Минимизация количества продуктов раскисления, оптимизация их формы и состава при внепечной обработке стали являются необходимыми, но недостаточными условиями получения качественного слитка. Для дальнейшего повышения чистоты стали по неметаллическим включениям необходимо совершенствовать технологию ее разлива, при которой взаимодействие легкоокисляющихся элементов стали с кислородом воздуха должно быть сведено к минимуму за счет подавления процессов вторичного окисления.

Цель данной работы — разработка и освоение технологии разлива крупных кузнечных слитков из высокопрочных судостроительных сталей сверху при атмосферном давлении в среде аргона и сифоном под шлакообразующими смесями с защитой струи металла от вторичного окисления аргоном.

Разливка кузнечных слитков массой более 20 т сверху при атмосферном давлении в среде аргона

В течение ряда лет при производстве толстолистного проката из высокопрочных судостроительных сталей отливку крупных кузнечных слитков выполняли по традиционной технологии с использованием вакуумной камеры.

* Работа выполнена в рамках государственного контракта с Федеральным агентством по науке и инновациям от 15 марта 2007 г. № 02.531.11.9002.

** В. Г. Милюц, В. В. Цуканов, Г. Д. Мотовилина, ЦНИИ КМ «Прометей»; А. А. Казаков, Санкт-Петербургский политехнический университет; С. Ю. Афанасьев, ООО «ОМЗ-Спецсталь», Россия; kazakov@thixomet.ru

Наряду с известными достоинствами эта технология имеет и ряд недостатков: низкую скорость разливки, необходимую для поддержания рабочего объема металла в промежуточном ковше, и значительное насыщение металла кислородом и водородом при переливе стали из сталеразливочного ковша в промежуточный. В результате не всегда обеспечивалось необходимое качество готового металла: пластические свойства проката в Z-направлении, оцениваемые показателем относительного сужения (Ψ_z), снижались с 40–50 до 25 % и менее, выходя за рамки технических требований.

Совершенствование технологии внепечной обработки судостроительной стали и использование аргона для защиты металла от вторичного окисления при разливке позволило приступить к освоению разливки крупных кузнечных слитков сверху при атмосферном давлении в среде аргона.

Гарантией отсутствия флокенов в готовой продукции служили качественная вакуумная обработка металла в ковше с обеспечением содержания водорода менее 2 ppm ($\times 10^{-4}$ %) и обязательное применение противоблокенной обработки слитков, брам и листов.

В данной работе для защиты металла от окисления при отливке опытных кузнечных слитков сверху при атмосферном давлении в среде аргона на прибыльную надставку плотно без зазоров укладывали толстый стальной лист с отверстием посередине. На него устанавливали керамический конус с отверстием, при этом центры отверстий в листе, конусе и центр кюмпеля располагались на одной вертикальной оси.

Разливку металла производили в изложницы, крашенные каменноугольной смолой, через стакан-коллектор шиберного затвора диаметром 60 мм.

Перед началом отливки слитка изложницу заполняли аргоном через металлическую трубку. В процессе разливки металла выдерживали минимальное расстояние между шиберным затвором и керамическим конусом. Открытую поверхность струи металла защищали аргоном с помощью специального устройства, закрепленного на подвижной части шиберного затвора.

Утепление прибыли производили вермикулитом на затвердевшую корочку металла.

Для сравнения кузнечные слитки разливали в вакууме по обычной технологии с использованием промежуточного стопорного ковша со стаканом диаметром 40 мм.

Прокат высокопрочной судостроительной стали, полученный из кузнечных слитков, отлитых в вакууме, характеризовался низкой пластичностью в Z-направлении. При этом неудовлетворительные результаты по пластичности в направлении толщины листа наблюдались только в нижней половине проката, соответствующей донной части слитка. Верхняя часть листов имела пластичность, соответствующую техническим требованиям (табл. 1).

Различие показателей пластичности по толщине листа, соответствующей высоте слитка, позволяет предположить, что повышенная загрязненность донной части слитка связана с процессами, в которых участвуют как продукты раскисления металла, в первую очередь алюминий и кальций, так и гидродинамические потоки металла в кристаллизующемся слитке.

При небольшой скорости разливки происходит слабое движение металла в изложнице, в том числе и после окончания отливки слитка. Поэтому продукты раскисления, укрупняясь в затвердевающем слитке, всплыть и удалиться успевают только из головной его части. В донной части слитка накапливаются крупные включения алюминатов кальция.

Увеличение массовой скорости разливки слитков в среде аргона до 3,5 т/мин по сравнению с 2,4 т/мин при разливке в вакууме позволяет значительно интенсифицировать перемещение металла в затвердевающем слитке, что создает благоприятные условия для удаления неметаллических включений и приводит к повышению чистоты стали, в том числе в донной части слитка.

Исследования методами растровой электронной микроскопии с использованием SEM «Philips 535» поверхности разрушения образцов, взятых в направлении толщины листов, прокатанных из слитков, отлитых в среде аргона и в вакууме, подтвердили справедливость этих предположений (рис. 1).

Анализ изломов образцов, вырезанных из верхних и нижних частей листов, прокатанных из слитков, отлитых в вакууме, показал, что на поверхности

Таблица 1.

Z-свойства толстых листов высокопрочной судостроительной стали, прокатанных из слитков массой более 20 т, отлитых в вакууме и при атмосферном давлении в среде аргона

Технология отливки слитков	Число прокатанных листов, ед.	Число (доля) листов, имеющих неудовлетворительные результаты первичных определений Z-свойств, ед (%)	
		Место отбора пробы	
		Верх листа	Низ листа
Отливка в вакууме, диаметр разливочного канала 40 мм	13	Нет	5 (38,5)
Отливка в среде аргона, диаметр разливочного канала 60 мм	16	Нет	Нет

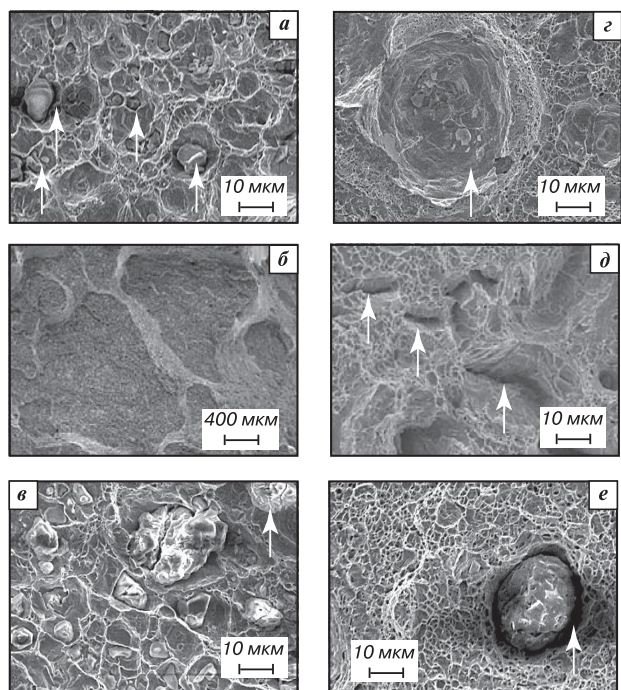


Рис 1. Неметаллические включения в изломах образцов, вырезанных в направлении толщины листа и испытанных на растяжение; вакуумная разливка (а – верхняя часть листа, б, в – нижняя часть листа); разливка в среде аргона (г – верхняя часть листа, д, е – нижняя часть листа):

а – включения, образующие скопления размерами 2–15 мкм, отмечены стрелками ($\Psi_z = 42\%$) $\times 1010$; б – излом с площадками на скоплениях включений диаметром более 500 мкм ($\Psi_z = 15,5\%$) $\times 36$; в – крупные оксидные включения сложного состава с сульфидными пленками на поверхности размерами 15–30 мкм отмечены стрелками ($\Psi_z = 15,5\%$) $\times 1010$; г – единичное скопление мелких включений, не приводящее к охрупчиванию, ($\Psi_z = 51\%$) $\times 36$; д – расслоения по отдельным границам зерен отмечено стрелками ($\Psi_z = 63\%$) $\times 1010$; е – одиночное крупное включение, не приводящее к охрупчиванию ($\Psi_z = 63\%$) $\times 1010$

изломов имеются неметаллические включения различного химического состава и формы, образующие скопления округлого и вытянутого вида в плоскости, параллельной плоскости прокатки. В нижних частях листов размеры этих скоплений превышают 500 мкм и способствуют образованию трещин, которые облегчают процесс разрушения и приводят к резкому снижению значений относительного сужения. В верхних частях листов, где обнаружены небольшие скопления мелких неметаллических включений, относительное сужение соответствует техническим требованиям (табл. 2).

Изломы образцов, изготовленных из верхних и нижних частей листов, прокатанных из слитков, отлитых при атмосферном давлении в среде аргона, имеют более вязкое чашечное строение с незначительными расслоениями вдоль границ зерен. Единичные неметаллические включения размерами до 40 мкм, обнаруженные на поверхности разрушения, приводят к охрупчиванию прилегающих к ним областей, но не оказывают заметного влияния на уровень пластичности металла в Z-направлении (см. рис. 1).

Следует отметить значительное повышение уровня пластичности металла при переходе на разливку кузнечных слитков в среде аргона.

Анализ элементного состава неметаллических включений, проведенный методом рентгеноспектрального микроанализа на сканирующем электронном микроскопе «CAMSCAN-4DV», оснащенный рентгеновским энергодисперсионным спектрометром «INCA Energy-350», показал, что наблюдаемые частицы представляют собой конгломераты, образованные из различных фаз, что характерно для продуктов раскисления стали. В подавляющем большинстве исследованных включений были обнаружены алюминий, кальций, сера и кислород. Наиболее часто наблюдались алюминаты кальция. Сера

Таблица 2.
Результаты первичных испытаний механических свойств листов из судостроительной стали

Условный номер листа	Технология отливки слитков	Толщина листа, мм	Место отбора пробы	Механические свойства			
				Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Относительное сужение в направлении толщины, %	Работа удара, Дж
1	В вакууме	49	Верх	16,5	65,0	44; 42; 33	134; 169
			Низ	19,0	66,0	9,1; 13,5; 9,5	175; 197
2	То же	49	Верх	18,5	64,0	41; 42; 40	134; 169
			Низ	17,5	62,0	15,5; 24,0; 24,5	170; 176
3	–	49	Верх	17,5	65,0	41; 41; 39	194; 187
			Низ	19,0	69,0	21,5; 29,0; 26,0	222; 193
4	В среде аргона	80	Верх	17,0	68,0	50; 50; 51	209; 187
			Низ	18,5	69,0	59; 55; 55	214; 203
5	То же	64	Верх	18,0	65,0	54; 52; 51	201; 211
			Низ	18,5	68,0	52; 54; 54	208; 221
6	То же	48	Верх	17,0	67,0	54; 60; 58	191; 189
			Низ	17,5	66,0	52; 63; 60	202; 197

в большей степени присутствовала в составе включений в виде сульфида кальция, который образуется на поверхности ранее образованных алюминатов.

Методами оптической металлографии установлено, что металл, разлитый в вакууме, загрязнен строчечными оксидами 5-го балла по ГОСТ 1778-70, ответственными за уровень пластичности в Z-направлении. В металле, разлитом в среде аргона, включения этого вида не обнаружены. Оксиды точечные, преимущественно 2–3 балла (по результатам автоматического анализа на анализаторе изображения Thixomet.Pro в соответствии с ГОСТ 1778-70 загрязненность по точечным оксидам составляет 0,5–1,5 балла), равномерно распределены в металле обоих видов разливки. Выявленные крупные включения силикатов и отдельные шлаковые включения до 5 баллов по ГОСТ 1778-70 не образуют скоплений и не оказывают отрицательного влияния на величину относительного сужения в направлении толщины листа. Объемный процент неметаллических включений, определенный на ста полях зрения в соответствии с методикой ASTM E1245, составляет 0,026–0,058 %. Микрошлифы для исследований брали на торцах половинок ударных образцов от верхней и нижней частей листа. Поверхности микрошлифов были расположены в направлении прокатки перпендикулярно плоскости листов.

Листы после окончательной термической обработки подвергали ультразвуковому контролю по методике ГОСТ 22727-88. Нарушений сплошности металла, превышающих технические требования, выявлено не было как при разливке в вакууме, так и при разливке в среде аргона.

Внедрение разработанной технологии разливки крупных кузнечных слитков судостроительных сталей сверху при атмосферном давлении в среде аргона в сочетании с ранее освоенной усовершенствованной внепечной обработкой позволило обеспечить существенное снижение загрязненности толстых листов скоплениями строчечных оксидных включений и, как следствие, повысить уровень Z-свойств по всей длине готового проката.

Сифонная разливка кузнечных слитков

Применение технологии разливки кузнечных слитков в среде аргона сверху без промежуточных устройств и вакуума, наличие высококачественных огнеупорных материалов, разливочных и утепляющих смесей зарубежного производства позволили приступить к освоению разливки слитков сифонным способом, который обеспечивает лучшее качество поверхности слитков и повышение выхода годного за счет снижения головной и донной обрези.

Таблица 3.
Результаты оценки загрязненности неметаллическими включениями стали, разлитой сифонным способом

Условный номер листа	Толщина листа, мм	Место отбора проб	Тип неметаллических включений	Балл
7	68	Верх	Оксиды точечные	1
		Низ	То же	2
8	100	Верх	Силикаты хрупкие	1
		Низ	Оксиды точечные То же	2

Кузнечные слитки массой до 30 т отливали сифонным способом с защитой струи металла аргоном по одному или по два на поддоне в некрашенные изложницы под шлакообразующей смесью Egotherm 22 (C — 22–25 %, Al₂O₃ — 16–20 %, SiO₂ — 32–37 %, T_{плавл} — 1330 °C) с расходом 1,5–2 кг/т стали через стакан-коллектор шибера диаметром 60 мм.

Сразу после окончания разливки в прибыли равномерно подсыпали 5–6 кг этой же шлакообразующей смеси для создания промежуточного слоя, а затем выполняли утепление прибыльной части теплоизолирующей смесью Nermat (SiO₂ — 92–97 %, T_{плавл} — 1650 °C) из расчета 1–1,5 кг/т стали.

Исследования неметаллических включений с помощью методов оптической металлографии показали, что сталь, изготовленная по разработанной технологии, обладает высокой чистотой. Включения, преимущественно точечные оксиды, не превышают 2 баллов (по результатам автоматического анализа на анализаторе изображения Thixomet.Pro в соответствии с ГОСТ 1778-70 загрязненность по точечным оксидам составляет 0–0,5 балла) по ГОСТ 1778-70 во всех образцах, изготовленных из верхних и нижних частей листов (табл. 3), и распределены равномерно по телу зерен (рис. 2). Сульфидные включения в плоскостях, параллельных плоскости прокатки отсутствовали. Объемный процент неметаллических включений, определенный на ста полях зрения в соответствии с методикой ASTM E1245, составляет 0,014–0,021 %.

Применяемая технология внепечного рафинирования, а также раскисления и модифицирования стали путем ввода в металл порошковой проволоки с алюминием и кальцием обеспечивают формирова-

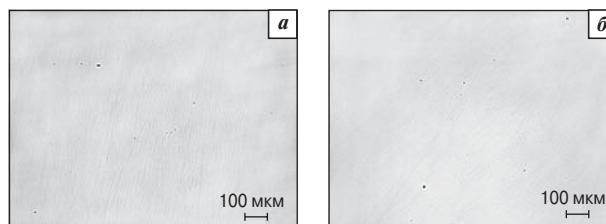


Рис. 2. Типичные неметаллические включения в стальных листах, прокатанных из слитков, разлитых сифонным способом (а — верх листа; б — низ листа)

ние неметаллических включений (главным образом, богатых кальцием алюминатов), которые легко коалесцируют и удаляются из жидкой стали уже в процессе внепечной обработки.

Надежная защита металла от вторичного окисления при разливке аргоном позволяет до минимума сократить образование неметаллических включений на этом этапе. Оставшиеся в металле продукты раскисления продолжают укрупняться как в процессе разливки, так и во время кристаллизации и затвердевания слитка.

При разливке стали сверху при атмосферном давлении в среде аргона эти включения переносятся мощными гидродинамическими потоками металла в кристаллизующемся слитке, и происходит усреднение их содержания по высоте слитка.

При разливке сифонным способом под шлакообразующей смесью поднимающиеся вверх потоки металла увлекают включения, способствуют их коалесценции и коагуляции, а также последующей ассимиляции шлаком как во время разливки, так и после ее окончания.

Небольшое содержание оставшихся мелких включений равномерно распределяется в слитке по высоте благодаря продолжающемуся движению металла в кристаллизующемся слитке.

Ультразвуковой контроль листов, изготовленных из опытных слитков, не выявил нарушений сплошности, превышающих технические требования.

Значения показателя Ψ_z свидетельствуют о высоком уровне пластичности в направлении толщины листов, изготовленных из слитков, разлитых сифонным способом (табл. 4).

Применение сифонной разливки крупных кузнечных слитков судостроительных сталей с защитой металла аргоном от вторичного окисления и использование современных разливочных и утепляющих смесей позволило значительно снизить загрязненность стали неметаллическими включениями и повысить уровень пластичности проката в Z-направлении.

Выводы

1. Разливка крупных кузнечных слитков сверху при атмосферном давлении в среде аргона позволяет до минимума сократить вторичное окисление металла и исключить образование строчечных оксидных включений.

Таблица.4.
Z-свойства листов высокопрочной судостроительной стали, прокатанных из слитков, разлитых сифонным способом

Толщина листа	Место отбора пробы	Ψ_z , %
60	Верх	53; 54; 55
	Низ	47; 47; 49
68	Верх	61; 60; 59
	Низ	58; 58; 58
100	Верх	64; 63; 64
	Низ	66; 64; 65

2. Разливка слитков сифонным способом под шлакообразующей смесью с защитой струи металла аргоном по сравнению с разливкой сверху в атмосфере инертного газа позволяет значительно снизить загрязненность стали неметаллическими включениями

3. Использование рассмотренных технологий разливки позволяет обеспечить равномерное распределение неметаллических включений по высоте слитка.

4. Применение технологии разливки крупных кузнечных слитков сифонным способом по сравнению с разливкой в вакууме позволило в 1,3–1,5 раза повысить уровень пластичности в Z-направлении, практически исключить получение брака по этому показателю и существенно увеличить выход годного при производстве высокопрочной судостроительной стали. ЧМ

Библиографический список

1. Владимиров Н. Ф., Луценко А. Н. От электрошлакового переплава к внепечному рафинированию // Сб. тр. ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей». 2009. Т. 2. С. 58–69.
2. Сулягин В. Р., Сулягин Р. В. К вопросу формирования качества донной части крупных кузнечных слитков // Электromеталлургия. 2004. № 5. С. 39–42.
3. Казаков А. А., Ковалев П. В. и др. Металлургическая экспертиза как основа определения природы дефектов металлопродукции // Черные металлы. 2007. № 7–8. С. 17–23.
4. Малахов Н. В., Мотовилина Г. Д. и др. Структурная неоднородность и методы ее снижения для повышения качества конструкционных сталей // Вопросы материаловедения. 2009. № 3 (59). С. 52–64.