



УДК 669.14.293:621.785:669.187.26:629.5

Разработка технологии изготовления высокопрочной корпусной стали, обеспечивающей сокращение цикла производства и высокое качество листов

В.Г.МИЛЛЮЦ¹, В.В.ЦУКАНОВ¹, Е.И.ПРЯХИН², Л.Б.НИКИТИНА¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Приведены результаты научно-исследовательских работ и промышленных экспериментов, направленных на разработку и освоение технологии, обеспечивающей сокращение цикла производства высокопрочной корпусной стали. Технология включает усовершенствованный сокращенный режим термической обработки слитков, изготовленных с применением редкоземельных металлов, и сифонную разливку крупных листовых слитков.

Предложенная технология на стадии предварительной технической обработки слитков исключает высокотемпературную операцию фазовой перекристаллизации, излишнюю, по мнению авторов, так как не достигается частичное дробление (измельчение) дендритного строения металла, не проходит гомогенизация, а фазовые и структурные напряжения резко снижаются при предложенном сокращенном режиме ПТО слитков – высоком отпуске. Эксперименты показали, что модифицирование стали с редкоземельными металлами оказывает положительное влияние на процесс кристаллизации слитков, изменяя макро- и микроструктуру легированной стали.

Разработанная технология изготовления высокопрочной корпусной стали обеспечивает высокий уровень качества листов и сокращение длительности цикла производства на 10-12 %.

Ключевые слова: высокопрочная корпусная сталь; термическая обработка слитков; сифонная разливка листовых слитков; редкоземельные металлы; качество листов; механические свойства; длительность цикла производства

Как цитировать эту статью: Разработка технологии изготовления высокопрочной корпусной стали, обеспечивающей сокращение цикла производства и высокое качество листов / В.Г.Миллюц, В.В.Цуканов, Е.И.Пряхин, Л.Б.Никитина // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 536-543. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.536

Введение. Кузнечные слитки большого развеса для производства листов высокопрочной корпусной стали получают в ООО «ОМЗ-Спецсталь» путем выплавки стали в дуговой электропечи ДСП-120 с применением внепечного рафинирования, вакуумирования и сифонной разливки под шлакообразующими смесями с защитой струи металла аргонном. Из-за низкой горячей деформируемости кузнечных слитков высокопрочной стали в технологии используется предварительная термическая обработка (ПТО) слитков [8-10, 12].

В результате применения этой технологии обеспечивается уровень качества листового проката, соответствующий требованиям технической документации, и высокая горячая деформируемость слитков без отсортировки на кузнечном переделе. В то же время цикл производства корпусной стали характеризуется значительной длительностью. Это нередко приводит к ограничению производственных возможностей предприятия из-за высокой загруженности технологического оборудования при выполнении заказов судостроительных верфей. В связи с этим в последние годы значительно возросла актуальность выполнения научно-исследовательских работ, направленных на разработку и освоение технологии, обеспечивающей сокращение длительности процессов изготовления высокопрочной корпусной стали и высокое качество продукции.

В данном исследовании приведены результаты научно-исследовательских работ и промышленных экспериментов, выполненных с этой целью в 2012-2016 гг.

Решение поставленной задачи осуществлялось по двум направлениям:

- Совершенствование технологии ПТО слитков высокопрочной корпусной стали, выплавленной с применением редкоземельных металлов (РЗМ).
- Освоение сифонной разливки крупных листовых слитков, при использовании которых существенно сокращается технологический цикл производства в результате исключения из него передела –ковки слитков на слябы.

Совершенствование технологии предварительной термической обработки слитков высокопрочной корпусной стали, модифицированной редкоземельными металлами. Кузнечные слитки высокопрочной корпусной стали после разливки характеризуются грубой кристаллической структурой литого металла и обогащением границ кристаллитов избыточными фазами с пониженной температурой кристаллизации, что объясняется системой легирования стали этого класса.

Грубая кристаллитная структура и большое количество избыточных фаз могут ослабить межкристаллитные связи и в результате термических напряжений при нагреве привести к образованию микротрещин и последующему их развитию при ковке слитков [1, 7]. Аналогичные процессы могут происходить и при охлаждении слитков до определенной температуры при передаче их из сталеплавильного цеха в кузнечный.

В это время при возможном захлаживании металла слитков, находящегося еще в аустенитном состоянии, могут происходить процессы выделений на междендритных границах по осям порядков 1-3 избыточных легкоплавких фаз, которые ослабляют междендритные границы и приводят к возможному трещинообразованию при нагреве слитков под ковку в связи с возникающими термическими напряжениями. При ковке возникшие микротрещины могут развиваться в макротрещины, приводящие к интенсивному трещинообразованию слитков на ранних стадиях процесса.

Выполнение ПТО слитков является необходимым условием для низколегированных сталей, легированных никелем, медью и карбидообразующими элементами (молибден, ванадий). Во время ПТО слитков необходимо сформировать более дисперсную структуру за счет фазовых превращений и частичной разбивки дендритной структуры, а также растворить в твердом растворе выделившиеся ранее на междендритных границах нестабильные фазы легкоплавких примесей и карбидные выделения. Следует отметить, что ПТО слитков корпусной стали характеризуется значительной длительностью процесса. Существенным резервом в сокращении цикла производства корпусной стали на этой стадии может быть совершенствование режима ПТО слитков с целью его оптимизации по длительности обработки.

Модифицирование стали РЗМ оказывает положительное влияние на процесс кристаллизации слитков, изменяя макро- и микроструктуру легированной стали [4-6, 11]. По литературным данным РЗМ относятся к числу наиболее поверхностно-активных элементов, которые, концентрируясь на границах фаз, снижают межфазное натяжение, уменьшают работу образования зародышей и увеличивают число центров кристаллизации. С этим, возможно, связано наблюдающееся уменьшение размеров дендритов и сужение столбчатой зоны при кристаллизации слитка. При этом улучшаются условия кристаллизации с формированием равномерной структуры по всему сечению слитка. Отсюда следует, что проходящие при обработке металла присадками РЗМ физико-химические процессы направлены на решение тех же проблем, что и применяемая ПТО слитков – повышение дисперсности дендритной структуры слитка и его горячей деформируемости. На схеме ПТО слитков высокопрочной корпусной стали, применяемой на практике, для этой цели служит состояние фазовой перекристаллизации на стадии 5 (рис.1, а).

Для высокопрочной корпусной стали, обработанной РЗМ, в настоящей работе была предложена усовершенствованная схема ПТО слитков (рис.1, б), в которой исключена стадия фазовой перекристаллизации.

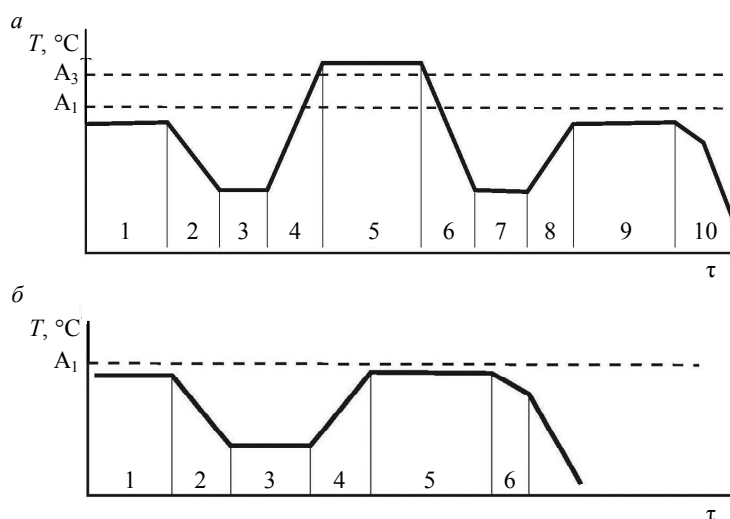


Рис.1. Схема предварительной термической обработки слитков высокопрочной корпусной стали: а – штатная; б – опытная



На стадии 1 разработанной схемы производится накопление слитков в термической печи и выравнивание температуры по сечению, в связи с тем, что высокопрочная корпусная сталь обладает повышенной устойчивостью аустенита, слитки находятся в переохлажденном состоянии без заметных превращений. При охлаждении (стадия 2) начинает происходить бейнитное превращение, которое продолжается в изотермических условиях (стадия 3). При этом происходит смешанное бейнитно-мартенситное превращение. Дальнейший нагрев, изотермическая выдержка и охлаждение слитков (стадии 4, 5 и 6) способствуют отпуску полученных структур и значительному снижению структурных и температурных напряжений, в результате чего обеспечивается значительное сокращение длительности процесса термической обработки.

Исследования, направленные на разработку и освоение технологии изготовления листовой высокопрочной корпусной стали, обеспечивающей сокращение длительности производственного цикла путем совершенствования ПТО слитков, обработанных РЗМ, выполняли на валовых плавках текущего производства.

Технология производства слитков высокопрочной корпусной стали, обеспечивающая сокращение длительности производственного цикла, а основным соответствовала разработанной ранее [9, 12]. Отличие состояло в материалах, используемых при внепечной обработке и в применяемом усовершенствованном сокращенном режиме ПТО слитков (рис.1, б).

При изготовлении опытного металла применяли комплексный микрокристаллический модификатор, содержащий 7-9 % церия и 9-12 % кальция, а также феррокальций с содержанием 40 % кальция. В конце обработки в металл сначала вводили порошковую проволоку с феррокальцием, затем – проволоку с комплексным модификатором из расчета получения кальция и церия в стали в пределах 0,002-0,004 % каждого. Фактическое содержание кальция и церия в металле ковшевых проб, определенное на высокоточном рентгенофлуоресцентном спектрографе AXIOS Advanced фирмы PANalytical.B.V., находилось в заданных пределах.

Ранее [2, 3] было показано, что модифицирование высокопрочной судостроительной стали совместно феррокальцием и РЗМ с обеспечением содержания кальция и церия в металле в указанных пределах позволяет снизить загрязненность стали включениями и повысить уровень механических свойств листов. Кроме того, можно ожидать снижения физической и химической неоднородности металла крупных слитков, обработанных РЗМ, с повышением их горячей деформируемости.

Кузнечные слитки, изготовленные по разработанной технологии, имели высокое качество поверхности при ковке их на слябы.

Механические испытания ударной вязкости и пластичности в Z-направлении листов опытных плавов проводили на образцах, вырезанных из проб, отобранных из средней трети и обеих кромок по ширине от верхнего и нижнего концов одного листа от плавки. Результаты испытаний механических свойств трех опытных листов показали высокий уровень и стабильность по ширине листа (табл.1).

Исследование макроструктуры выполняли на макрошлифах, изготовленных из проб, отобранных от трех листов разных плавов. Пробу для изготовления макрошлифа отбирали от головной части листа в средней трети ширины на всю толщину листа. Макроструктура всех листов по толщине плотная, равномерная, дефекты макроструктуры отсутствуют.

Исследование содержания и распределения неметаллических включений (НВ) выполняли методами оптической металлографии в соответствии с ГОСТ 1778 с помощью оптических микроскопов «Olympus BX-51» и «Axiovert 40MAT» фирмы ZEISS.

Загрязненности металла НВ определяли методом сравнения со шкалами по ГОСТ 1778 (метод Ш4) при увеличении в 100 раз на шести микрошлифах от каждой пробы, изготовленных в продольном направлении прокатки перпендикулярно плоскости листов, в состоянии без травления. Результаты оценки загрязненности включениями опытной стали представлены в табл.2.

Сталь, изготовленная по разработанной технологии, обладает высокой степенью чистоты, НВ во всех образцах распределены равномерно и не превышают балл 3 по ГОСТ 1778. Наиболее крупные включения представляют собой силикаты недеформирующиеся (СН) (табл.2, рис.2). По остальным видам включений загрязненность не превышает балл 1 по ГОСТ 1778. Рентгеновский микроанализ НВ показал, что округлые включения, классифицированные по ГОСТ 1778 как силикаты недеформирующиеся, представляют собой оксисульфиды.

Таблица 1

Результаты испытаний механических свойств по ширине листов высокопрочной корпусной стали, изготовленных из кузнечных слитков с применением РЗМ и усовершенствованного режима ПТО

Условный номер листа/толщина листа, мм	Место вырезки проб по ширине листа		Ударная вязкость KCV^{+20} , Дж/см ²	Относительное сужение в Z-направлении Ψ_z , %
1/57	Верх листа	Кромка	213-215	64-58-65
		Средняя часть	198-211	60-54-62
		Кромка	201-227	57-62-63
	Низ листа	Кромка	200-203	60-63-62
		Средняя часть	210-211	56-54-54
		Кромка	215-223	56-58-58
2/64	Верх листа	Кромка	233-236	61-66-63
		Средняя часть	207-210	59-59-63
		Кромка	225-233	58-61-62
	Низ листа	Кромка	242-248	66-65-67
		Средняя часть	213-218	63-59-64
		Кромка	236-245	66-58-66
3/42	Верх листа	Кромка	202-211	58-57-59
		Средняя часть	230-249	55-53-54
		Кромка	200-206	59-61-61
	Низ листа	Кромка	208-215	59-63-63
		Средняя часть	200-220	52-57-58
		Кромка	203-215	65-59-60

Таблица 2

Результаты оценки загрязненности стали неметаллическими включениями, баллы*

Условный номер плавки	Верх листа						Низ листа					
	Оксиды		Сульфиды	Силикаты			Оксиды		Сульфиды	Силикаты		
	ОС	ОТ	С	СХ	СП	СН	ОС	ОТ	С	СХ	СП	СН
1	0,0	0,5	0,0	0,3	0,0	1,7	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0	2,7
2	0,0	1,0	0,2	0,2	0,0	2,3	0,0	1,0	0,0	0,2	0,0	2,5
3	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	2,3	0,0	0,5	0,2	0,0	0,0	1,3

* Приведены средние значения загрязненности по шести образцам.

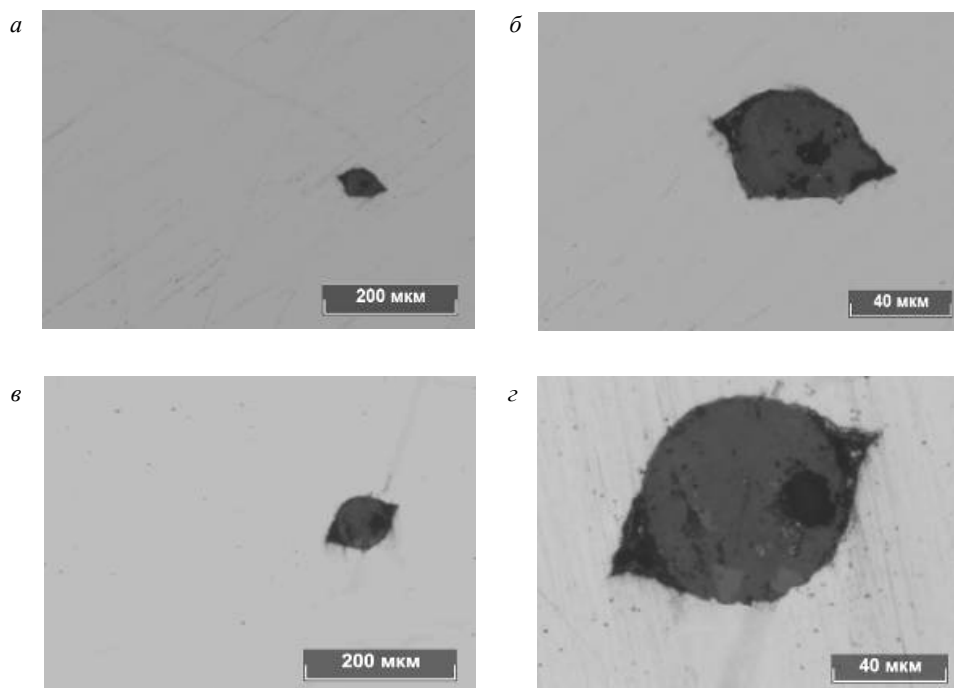


Рис.2. Неметаллические включения – силикаты недеформирующиеся в металле образцов опытной плавки высокопрочной корпусной стали при разных увеличениях: а, б – верх листа; в, г – низ листа



Таким образом, обработка металла комплексными модификаторами с РЗМ позволила обеспечить низкую загрязненность стали наиболее опасными, с точки зрения образования микротрещин, недеформирующимися силикатами.

Выполненные эксперименты показали, что сталь, изготовленная с применением РЗМ и усовершенствованного сокращенного режима ПТО слитков, обладает высоким уровнем качества.

Для подтверждения полученных результатов по разработанной технологии изготовили 15 опытно-промышленных плавок, из металла которых прокатали 93 листа. Для сравнения обрабатывали данные 13 валовых плавок (75 листов), изготовленных по штатной технологии в тот же период времени, что и опытно-промышленные.

Анализ результатов сертификационных испытаний механических свойств (ударной вязкости и пластичности в Z-направлении) листов опытно-промышленных и валовых плавок высокопрочной корпусной стали показал, что они находятся практически на одном уровне и соответствуют требованиям действующей технической документации (табл.3).

Таблица 3

Результаты сертификационных испытаний механических свойств листов высокопрочной корпусной стали*

Вариант технологии	Количество листов	Место отбора проб	Механические свойства	
			Ударная вязкость KCV ⁺²⁰ , Дж/см ²	Относительное сужение в Z-направлении Ψ_z , %
Опытный	93	Верх	210,6	54,2
		Низ	214,6	55,1
Штатный	75	Верх	207,2	54,5
		Низ	211,6	54,9

* Приведены средние значения.

Применение усовершенствованной технологии изготовления высокопрочной корпусной стали, включающей обработку металла РЗМ и ПТО слитков по сокращенному режиму, обеспечивает высокую горячую деформируемость слитков, позволяет сократить длительность ПТО слитков на 25-30 % в зависимости от их массы и значительно снизить затраты на производство листов.

Листовой прокат, изготовленный по разработанной технологии, полностью соответствует требованиям действующей технической документации.

Сифонная разливка листовых слитков. Литье слитков является сложившейся технологией, однако существуют потенциальные возможности ее совершенствования. За последние 6-10 лет в ООО «ОМЗ-Спецсталь» технология разлива высокопрочной корпусной стали претерпела значительные изменения. Была разработана и освоена технология разлива крупных кузнечных слитков сверху при атмосферном давлении в среде аргона с применением высококачественных утепляющих смесей, что позволило обеспечить существенное снижение загрязненности листов скоплениями строчечных оксидных включений, а также оптимизировать технологию разлива, улучшить условия труда в разливочном отделении сталеплавильного цеха и уменьшить затраты на производство стали [12].

Освоение технологии разлива кузнечных слитков сверху в среде аргона без промежуточных устройств и вакуума, наличие на предприятии высококачественных материалов, разливочных и утепляющих смесей зарубежного производства позволили приступить к освоению разлива кузнечных слитков сифонным способом.

Применение технологии разлива крупных кузнечных слитков сифонным способом по сравнению с разливкой в вакууме позволило в 1,2-1,3 раза повысить уровень пластичности в Z-направлении, практически исключить получение брака по этому показателю и существенно увеличить выход годного при производстве высокопрочной корпусной стали [8, 12].

На основе результатов исследований, проведенных при освоении сифонной разлива кузнечных слитков, были выполнены опытно-промышленные работы по разработке и внедрению сифонной разлива листовых слитков массой до 34 т высокопрочной корпусной стали, при использовании которых значительно сокращается цикл производства за счет исключения из него

передела –ковки слитков на слябы. Это, в свою очередь, ведет к получению дополнительной экономии при производстве корпусного металла.

Целью исследования является изучение качества листов высокопрочной корпусной стали, изготовленных из крупных листовых слитков, отлитых сифонным способом под шлакообразующими смесями с защитой струи металла аргонном.

Изготовление металла исследуемых плавов выполняли по штатной технологии за исключением отливки опытных крупных листовых слитков. Отливку этих слитков производили сифонным способом с защитой струи металла аргонном. Металл разливали в некрашенные изложницы под шлакообразующей смесью с расходом 2 кг/т через стакан-коллектор шиберного затвора диаметром 60 мм. Сразу после окончания отливки слитка в прибыль равномерно подсыпали 5-7 кг шлакообразующей смеси для создания промежуточного слоя, после чего выполняли засыпку в прибыльную часть слитка утепляющей смеси из расчета 1,5-2,0 кг/т стали.

Качество металла исследовали на листах высокопрочной корпусной стали толщиной 80 и 100 мм, изготовленных из листовых слитков массой 33,3 и 20,4 т, отлитых сифонным способом.

Результаты испытаний ударной вязкости и пластичности в Z-направлении по ширине сверху и снизу листов (ось поперечных ударных образцов проходит на расстоянии 1/3 толщины листа от поверхности) приведены в табл.4. Вид изломов технологических проб от верха и низа листа толщиной 100 мм представлен на рис.3.

Таблица 4

Результаты испытаний ударной вязкости и Z-свойств по ширине сверху и снизу трех листов высокопрочной корпусной стали

Масса слитка, т	Толщина листа, мм	Место отбора пробы		Ударная вязкость KCV ⁺²⁰ , Дж/см ²	Относительное сужение в Z-направлении Ψ_z , %
20,4	80	Верх листа	Кромка	231-234	64-65-65
			Средняя часть	215-217	61-63-63
			Кромка	222-224	63-65-67
		Низ листа	Кромка	233-234	64-64-66
			Средняя часть	230-244	60-63-63
			Кромка	235-237	63-65-65
20,4	100	Верх листа	Кромка	215-216	63-64-65
			Средняя часть	209-210	61-62-64
			Кромка	209-213	62-64-67
		Низ листа	Кромка	211-216	66-66-66
			Средняя часть	223-224	61-61-66
			Кромка	217-228	63-64-64
33,3	80	Верх листа	Кромка	179-191	50-54-56
			Средняя часть	187-191	48-48-49
			Кромка	178-185	51-52-56
		Низ листа	Кромка	200-216	55-56-55
			Средняя часть	197-207	60-61-64
			Кромка	197-201	57-60-61

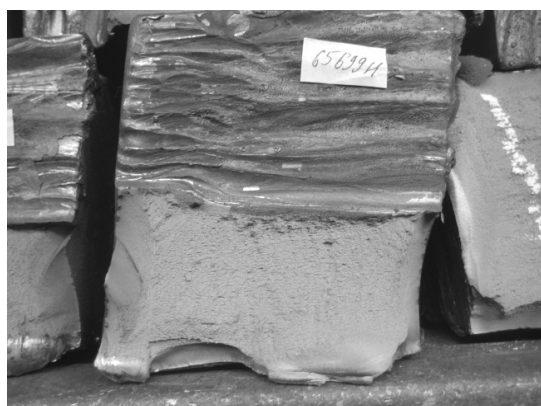


Рис.3. Вид изломов технологических проб от верха и низа листа толщиной 100 мм, изготовленного из листового слитка высокопрочной корпусной стали массой 20,4 т



Таблица 5

Результаты оценки загрязненности неметаллическими включениями*

Условный номер листа	Тип неметаллических включений	Величина включений, балл					
		Верх листа			Низ листа		
		Кромка	Середина	Кромка	Кромка	Середина	Кромка
4	Оксиды точечные	0,7	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8
	Силикаты недеформированные	1,8	1,7	1,8	1,6	1,7	1,7
5	Оксиды точечные	1,0	0,8	0,9	1,0	1,0	0,9
	Силикаты недеформированные	2,3	2,3	2,3	2,2	2,3	2,3
6	Оксиды точечные	0,6	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8
	Силикаты недеформированные	1,9	2,0	1,8	1,7	1,8	1,9

* Приведены средние значения загрязненности по шести образцам.

Приведенные результаты характеризуют высокое качество листов толщиной 80 и 100 мм как по периметру, так и по толщине.

Исследование макроструктуры проводили на макрошлифах двух листов толщиной 80 мм. Пробу для изготовления макрошлифа отбирали от головной части листа в средней трети ширины на всю толщину листа. Макроструктура по всей толщине обоих листов плотная, равномерная, дефекты макроструктуры отсутствуют.

Исследование содержания и распределения НВ выполняли методами оптической металлографии в соответствии с ГОСТ 1778 на трех листах толщиной 80 мм, изготовленных из металла трех плавок. Результаты оценки загрязненности включениями опытной стали представлены в табл.5.

На основании выполненных исследований можно сделать вывод, что корпусная сталь, изготовленная из крупных листовых слитков разлитых сифонным способом, обладает высокой степенью чистоты, включения по ширине сверху и снизу листов распределены равномерно. Наиболее опасные включения недеформирующихся силикатов не превышают балл 2,5 по ГОСТ 1778.

Применение технологии разлива листовых слитков сифонным способом под шлакообразующей смесью с защитой струи металла аргоном обеспечивает высокий уровень качества листов высокопрочной корпусной стали.

Заключение. В результате выполненных исследований разработаны основные положения усовершенствованной технологии изготовления высокопрочной корпусной стали, обеспечивающие сокращение цикла производства:

- обработка металла комплексными модификаторами содержащими РЗМ;
- усовершенствованный сокращенный режим предварительной термической обработки слитков;
- отливка сифонным способом листовых слитков массой до 34 т.

Испытания металла, изготовленного с использованием элементов усовершенствованной технологии, показали высокую степень чистоты проката по неметаллическим включениям. Уровень качества листов полностью соответствует требованиям действующей технической документации. Длительность технологического цикла производства высокопрочной корпусной стали за счет внедрения разработанных мероприятий сокращается на 10-12 %, а по отдельным фазам цикла до ~ 30,0 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акименко А.Д. К вопросу о термических напряжениях в зарождающейся корочке непрерывного слитка. / Физико-химические и теплофизические процессы кристаллизации стальных слитков: Труды II конференции по слитку; А.Д.Акименко, А.А.Скворцов. М.: Металлургия. 1967. С. 457-462.
2. Влияние комплексного модифицирования высокопрочной судостроительной стали на состав и морфологию неметаллических включений / В.Г.Миллюц, В.В.Цуканов, О.Ю.Мальхина, А.Б.Насоновская, А.Г.Владимиров, В.А.Голубцов, Е.Ю.Левагин // Вопросы материаловедения. 2013. № 4 (76). С. 5-14.
3. Голубцов В.А. Влияние комплексного модифицирования на загрязненность неметаллическими включениями судостроительной стали / В.А.Голубцов, В.Г.Миллюц, В.В.Цуканов // Тяжелое машиностроение. 2013. № 1. С. 6-9.
4. Голубцов В.А. Повышение степени химической однородности крупных слитков высокоуглеродистой стали / В.А.Голубцов, Н.Н.Кузькина, А.Х.Кадарметов // Сталь. 2000. № 12. С. 11-12.



5. Голубцов В.А. Теория и практика введения добавок в сталь вне печи. Челябинск, 2006. 423 с.
6. Гольдштейн Я.Е. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали / Я.Е.Гольдштейн, В.Г.Мизин. М.: Металлургия. 1986, 272 с.
7. Лейтес А.В. Трещины в стальных слитках / А.В.Лейтес, Н.М.Лапотышкин. М.: Металлургия. 1969. 111 с.
8. Миллюц В.Г. Исследование качества сверхтолстых листов высокопрочной судостроительной стали / В.Г.Миллюц, В.В.Цуканов, Н.Ф.Владимиров // Металлург. 2013. № 3. С. 60-65.
9. Миллюц В.Г. Развитие технологии производства слитков высокопрочной корпусной стали для изготовления толстых листов. Ч. 1 / В.Г.Миллюц, Н.Ф.Владимиров, Ю.М.Батов // Электрометаллургия. 2014. № 9. С. 16-22.
10. От электрошлакового переплава к внепечному рафинированию / Н.Ф.Владимиров, А.Н.Луценко, В.А.Дурынин, Ю.М.Батов, Н.В.Малахов, А.Б.Милейковский, В.Г.Миллюц // Сб. трудов «По пути созидания». Т. 2 / ЦНИИ КМ «Прометей». СПб, 2009. С. 58-69.
11. Приданцев М.В. Влияние редкоземельных металлов на структуру и свойства сталей 18Н10Т, Х17Н1М2Т, 00Х17Н1 / М.В.Приданцев, Т.В.Остапенко // Известия АН СССР. Металлы. 1974. № 3. С. 136-140.
12. Совершенствование технологии разливки крупных кузнечных слитков высокопрочной судостроительной стали / В.Г.Миллюц, В.В.Цуканов, А.А.Казаков, Г.Д.Мотовилина, С.Ю.Афанасьев // Черные металлы. 2011. № 1. С. 9-13.

Авторы: **В.Г.Миллюц**, ведущий инженер, mail@crism.ru (НИИ «Курчатовский институт – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, Россия), **В.В.Цуканов**, д-р техн. наук, начальник лаборатории, mail@crism.ru (НИИ «Курчатовский институт – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, Россия), **Е.И.Пряхин**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой, mthi@spti.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **Л.Б.Никитина**, ведущий инженер, mail@crism.ru (НИИ «Курчатовский институт – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 21.01.2019.

Статья принята к публикации 20.03.2019.