

УДК 669.046:621.74.04

*Е.В. Протопопов¹, Ю.А. Селезнев¹, А.Н. Черепанов²,
Д.В. Фойгт³, Р.С. Айзатулов³, Л.А. Ганзер¹*

¹ Сибирский государственный индустриальный университет

² Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск)

³ ОАО «ЕВРАЗ объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»

МОДИФИЦИРОВАНИЕ МЕТАЛЛА НАНОПОРОШКОВЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СЛЯБОВОЙ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ*

Аннотация. Исследование влияния модифицирования металла нанопорошковыми материалами на качество слябовой непрерывнолитой заготовки показало, что введение в промежуточный ковш МНЛЗ порошковой ленты с наполнителем из карбонитрида титана снижает ликвацию химических элементов по сечению заготовки, повышает химическую и структурную однородность, сокращает область дендритного строения слитка, уменьшает развитие дефектов макроструктуры, повышает плотность и механические свойства литой стали.

Ключевые слова: модифицирование, нанопорошковые материалы, слябовая непрерывнолитая заготовка, ликвация элементов, плотность, дефекты макроструктуры, механические свойства.

METAL MODIFICATION WITH NANOPOWDER MATERIALS FOR THE QUALITY OF SLAB CONTINUOUS CASTING IMPROVEMENT

Abstract. Investigation of the influence of the modification with metal nanopowder materials on the quality of slab continuous casting showed that the introduction of an intermediate ladle MNLZ powder tapes filled with titanium carbonitride reduces the segregation of chemical elements in the cross section, increases its chemical and structural homogeneity, reduces zone of the dendritic structure of the ingot, reduces development macrostructure defects, increases the density and mechanical properties of cast steel.

Keywords: modification, nanopowder materials, slab continuous casting, segregation of elements, density, macrostructure defects, mechanical properties.

Исследование влияния модифицирования металла нанопорошковыми материалами на качество металлопродукции показало, что введение в расплав микродобавок ультрадисперсных керамических порошков перед кристаллизацией значительно улучшает характеристики структуры и свойств литого и деформированного металла [1 – 4].

При получении слябовой заготовки в условиях разливки на машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) ККЦ 2 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» разливают в основном низкоуглеродистые низкокремнистые стали, раскисленные алюминием. Неметаллические включения, образующиеся при этом, представляют собой соединения оксида алюминия $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ или соединения оксида алюминия с другими оксидами в стали. Включения этого типа представляют собой высокодисперсную фазу, которая при распределении включений приводит к возникновению крупных дефектов и снижению раскисленных коэффициентов стали.

В условиях текущего производства в ККЦ 2 проведена опытно-промышленная кампания разливки на МНЛЗ стали С063 в заготовки сечением 250×1250 мм, при этом металл опытных заготовок при разливке модифицировали нанопорошковыми инокуляторами

(НПИ) в виде карбонитрида титана с размером частиц 0,015 – 0,040 мкм. Предварительно НПИ получали методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в плакирующей матрице из углеродистой стали $\text{TiC}_x\text{N}_y\text{-Fe}$, гранулировали и закатывали в порошковую ленту. В процессе обработки металла порошковую ленту вручную вводили в пространство между защитными трубами промежуточного ковша, а металл, разливаемый без НПИ, использовали в качестве сравнительного.

Параметры разливки опытных плавов на МНЛЗ: температура ликвидуса стали 1527 – 1528 °С; температура металла в промежуточном ковше 1557 – 1562 °С; скорость вытягивания слитка 0,95 – 1,00 м/мин; скорость подачи порошковой ленты 4,5 – 6,0 м/мин; концентрация НПИ в заготовках 0,018 %; концентрация основного вещества НПИ – 0,009 %.

Содержание титана в стали в промежуточном ковше на сравнительных и опытных разливах составляло 0,0010 и 0,0018 %, азота – 0,0067 и 0,0069 % соответственно (табл. 1).

После разливки плавов на адьюстаже МНЛЗ с помощью пил холодной резки из заготовок вырезали поперечные пробы для определения химического состава и плотности стали, изучения макроструктуры и продольные пробы для проведения механических испытаний.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение № 14В37.21.0071).

**Химический состав стали в пробах перед выдачей на МНЛЗ (числитель)
и из промежуточного ковша (знаменатель)**

Сталь в ковше	Содержание, %, элемента в стали								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	N	Al _{общ}	Ti
опытном	<u>0,069</u>	<u>0,007</u>	<u>0,317</u>	<u>0,012</u>	<u>0,019</u>	<u>0,019</u>	<u>0,0044</u>	<u>0,056</u>	<u>0,0011</u>
	0,075	0,008	0,316	0,012	0,019	0,021	0,0069	0,048	0,0018
сравнительном	<u>0,083</u>	<u>0,019</u>	<u>0,325</u>	<u>0,009</u>	<u>0,012</u>	<u>0,019</u>	<u>0,0052</u>	<u>0,054</u>	<u><0,0010</u>
	0,089	0,020	0,323	0,008	0,011	0,022	0,0067	0,049	0,0010

С целью изучения степени ликвации элементов по сечению слитка из поперечных проб вырезали по девять образцов высотой 40 и шириной 35 мм из краевой, промежуточной и осевой зон сечения слитка. Химический состав стали опытных и сравнительных заготовок, по номерам ручьев и зонам поперечного сечения слитка представлен в табл. 2.

Видно, что ликвация химических элементов по сечению непрерывнолитого слитка размером 250×1250 мм в целом снижается последовательно от сравнительных заготовок к опытным, от осевой зоны к краевой и про-

межуточной зонам как по широкой, так и по узкой грани слитка, что показательно и подтверждает данные, полученные ранее на сортовой МНЛЗ [3].

По результатам исследования качества опытных непрерывнолитых заготовок, модифицированных НПИ, как и в работах [3, 4], плотность увеличивается в среднем до 58 – 89 кг/м³ (или 0,74 – 1,14 %), что, очевидно, является следствием дробления дендритов.

В табл. 3 представлены результаты изучения макроструктуры опытных и сравнительных слябовых заготовок. Действительно, после модифицирования ме-

Распределение химических элементов в поперечном сечении непрерывнолитых заготовок

Зона поперечного сечения заготовки	Содержание, %, элемента в металле								
	C	Si	Mn	S	P	N	Ti	Al _{общ}	Al _{раст}
Опытные заготовки, ручей 1									
1	0,071	0,022	0,324	0,007	0,010	0,0063	<0,0010	0,053	0,050
2	0,075	0,022	0,324	0,007	0,010	0,0061	0,0010	0,053	0,051
3	0,080	0,022	0,324	0,008	0,010	0,0051	0,0010	0,054	0,053
4	0,079	0,022	0,327	0,007	0,010	0,0046	0,0010	0,053	0,051
5	0,079	0,022	0,322	0,008	0,010	0,0050	0,0010	0,053	0,052
6	0,078	0,023	0,322	0,007	0,011	0,0055	0,0010	0,053	0,049
7	0,071	0,022	0,325	0,008	0,011	0,0052	0,0010	0,054	0,052
8	0,076	0,022	0,326	0,007	0,010	0,0051	<0,0010	0,053	0,051
9	0,084	0,022	0,323	0,008	0,011	0,0058	0,0010	0,054	0,052
Опытные заготовки, ручей 2									
1	0,081	0,022	0,321	0,008	0,010	0,0066	0,0010	0,053	0,049
2	0,082	0,022	0,322	0,007	0,010	0,0063	<0,0010	0,053	0,050
3	0,081	0,022	0,322	0,008	0,010	0,0063	<0,0010	0,052	0,048
4	0,082	0,022	0,324	0,008	0,010	0,0060	<0,0010	0,052	0,048
5	0,086	0,022	0,324	0,007	0,010	0,0066	0,0010	0,053	0,050
6	0,080	0,022	0,325	0,007	0,010	0,0063	0,0010	0,052	0,049
7	0,078	0,022	0,324	0,007	0,010	0,0064	0,0010	0,053	0,050
8	0,079	0,022	0,326	0,008	0,011	0,0064	<0,0010	0,053	0,050
9	0,076	0,022	0,324	0,007	0,010	0,0060	0,0010	0,053	0,050
Среднее по опытным заготовкам									
	0,078	0,022	0,324	0,008	0,010	0,0059	0,0010	0,053	0,050

Т а б л и ц а 2 (продолжение)

Распределение химических элементов в поперечном сечении непрерывнолитых заготовок

Зона поперечного сечения заготовки	Содержание, %, элемента в металле								
	C	Si	Mn	S	P	N	Ti	Al _{общ}	Al _{раст}
Сравнительные заготовки, ручей 1									
1	0,067	0,009	0,309	0,011	0,019	0,0066	0,0019	0,055	0,051
2	0,062	0,009	0,311	0,011	0,018	0,0060	0,0019	0,054	0,052
3	0,069	0,009	0,308	0,011	0,018	0,0062	0,0018	0,055	0,052
4	0,063	0,009	0,312	0,011	0,019	0,0063	0,0019	0,054	0,051
5	0,077	0,009	0,314	0,012	0,020	0,0067	0,0019	0,053	0,052
6	0,070	0,009	0,315	0,012	0,019	0,0066	0,0019	0,054	0,052
7	0,067	0,009	0,315	0,011	0,019	0,0063	0,0020	0,056	0,054
8	0,065	0,009	0,310	0,011	0,018	0,0070	0,0019	0,057	0,053
9	0,070	0,009	0,314	0,011	0,019	0,0064	0,0019	0,054	0,051
Сравнительные заготовки, ручей 2									
1	0,069	0,010	0,314	0,012	0,019	0,0064	0,0020	0,053	0,051
2	0,068	0,010	0,313	0,012	0,019	0,0064	0,0020	0,053	0,050
3	0,066	0,010	0,314	0,012	0,019	0,0067	0,0020	0,052	0,050
4	0,063	0,010	0,313	0,012	0,019	0,0066	0,0020	0,053	0,051
5	0,068	0,010	0,313	0,012	0,019	0,0065	0,0020	0,053	0,051
6	0,064	0,010	0,313	0,012	0,019	0,0064	0,0020	0,053	0,051
7	0,071	0,010	0,313	0,012	0,019	0,0067	0,0020	0,052	0,050
8	0,068	0,010	0,311	0,012	0,019	0,0063	0,0020	0,054	0,051
9	0,068	0,010	0,311	0,012	0,019	0,0062	0,0020	0,053	0,051
Среднее по сравнительным заготовкам									
	0,068	0,010	0,313	0,012	0,019	0,0065	0,0020	0,054	0,052

Т а б л и ц а 3

Макроструктура непрерывнолитых заготовок

Заготовки	Размер, мм, зоны		
	Корочка	Дендритная зона	Зона равноосных кристаллов
Опытные, ручей 1	25,7/26,5	47,1/45,0	104,4/1107,0
Опытные, ручей 2	23,8/25,0	51,2/50,8	100,0/1098,4
Среднее по опытным заготовкам			
	24,8/25,8	49,2/47,9	102,2/1102,7
Сравнительные	20,8/22,7	55,1/58,2	98,2/1088,2

П р и м е ч а н и е. Через косую приведены значения для узкой и широкой грани.

талла карбонитридом титана улучшилась структура непрерывнолитого слитка: увеличилась толщина корочки плотного металла на 3,1 – 4,0 мм и зоны равноосных кристаллов в среднем на 4,0 мм, соответственно уменьшилась длина зоны столбчатых кристаллов на 5,9 – 10,3 мм. При этом увеличение площади поперечного сечения слитка, занимаемой корочкой плотного металла, составило в среднем 17,7 %; площадь, зани-

маемая зоной дендритных кристаллов, уменьшилась на 11,5 %. Увеличение зоны, занимаемой равноосными кристаллами по площади поперечного сечения слитка, составило в среднем 5,3 %.

Необходимо отметить и снижение балльности развития внутренних дефектов слитка (табл. 4). Видно, что улучшены показатели по осевой химической неоднородности (ОХН) на 16,7 %, неметаллическим вклю-

Дефекты макроструктуры непрерывнолитых заготовок

Заготовки	Балльность макроструктуры (СТО 107-15 – 2008)							
	ОХН	Неметаллические включения		Трещины				
		алюминаты	точечные	угловые, перпендикулярные широкой грани	на узкой грани	поперечные	продольные	гнездообразные
Опытные, ручей 1	2	1	1	1	1	2	2	1
Опытные, ручей 2	3	2	2	1	2	2	2	1
Среднее по опытным заготовкам								
	2,5	1,5	1,5	1	1,5	2	2	1
Сравнительные, ручей 1	3	2	2	1	2	2	2	1
Сравнительные, ручей 2	3	2	2	1	2	2	2	1
Среднее по сравнительным заготовкам								
	3	2	2	1	2	2	2	1

чениям (алюминатам и точечным включениям) и трещинам – на 25 %.

Анализируя результаты, полученные на сортовой МНЛЗ [3, 4], можно предположить, что при введении нанопорошковых материалов в промежуточный ковш с помощью трайбаппарата и увеличении концентрации основного вещества до 0,002 – 0,003 % показатели должны быть еще выше.

Результаты механических испытаний образцов литой стали (табл. 5) свидетельствуют об улучшении прочностных и пластических характеристик модифицированных непрерывнолитых заготовок: временное сопротивление разрыву (σ_b) повысилось на 3,5 %, относительное удлинение δ – на 3,4 % (23,4 – 26,2 %), относительное сужение ψ – на 6,3 %.

Выводы. Исследования показали, что введение в промежуточный ковш МНЛЗ нанопорошковых добавок TiC_xN_y-Fe положительно влияет на качество непрерывнолитой заготовки, при этом снижается ликвация элементов по сечению слитка, повышается его химическая и структурная однородность, уменьшается балльность развития дефектов макроструктуры, повышаются плотность и механические свойства литой стали.

Т а б л и ц а 5

Результаты механических испытаний образцов стали

Показатель	Значение показателя для заготовки		Изменение показателя
	опытной	сравнительной	
σ_b , Н/мм ²	325,3	314,4	3,5
δ , %	33,7	32,6	3,4
ψ , %	62,5	58,8	6,3

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mughrabi H., Hoppel H.W., Kautz M. // Scripta materialia. 2004. Vol. 51. P. 807 – 812.
2. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Технологии современной металлургии. – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.
3. Комшуков В.П., Черепанов А.Н., Протопопов Е.В. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 8. С. 57 – 63.
4. Протопопов Е.В., Селезнев Ю.А., Черепанов А.Н. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 6. С. 33 – 35.

© 2013 г. Е.В. Протопопов, Ю.А. Селезнев, А.Н. Черепанов, Д.В. Фойт, Р.С. Айзатулов, Л.А. Ганзер
Поступила 26 сентября 2013 г.