

УДК 669.046:621.74.04

**Е.В. Протопопов¹, Ю.А. Селезнев¹, А.Н. Черепанов²,
В.Я. Чинокалов³, Д.В. Фойгт³, Л.А. Ганзер¹**

¹ Сибирский государственный индустриальный университет

² Институт теоретической и прикладной механики СО РАН

³ ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»

МОДИФИЦИРОВАНИЕ МЕТАЛЛА НАНОПОРОШКОВЫМИ ИНОКУЛЯТОРАМИ НА СОРТОВОЙ МНЛЗ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОКАТА*

Аннотация. Исследование влияния модифицирования металла нанопорошковыми материалами на качество сортовой непрерывнолитой заготовки, фасонного и арматурного проката показало, что введение в промежуточный ковш МНЛЗ добавок $TiC_xN_y - Fe$ снижает ликвацию элементов по сечению слитка и загрязненность неметаллическими включениями, повышает его химическую и структурную однородность. Применение нанопорошковых инокуляторов приводит к изменению структуры фасонного и арматурного проката; формы, размера и топографии расположения неметаллических включений, а также измельчению зерна и повышению механических свойств металлопроката.

Ключевые слова: модифицирование, нанопорошковые инокуляторы, непрерывнолитая заготовка, плотность, макроструктура, неметаллические включения, фасонный и арматурный прокат, микроструктура, механические свойства.

MODIFICATION OF METAL BY NANOPOWDER INOCULATORS AT THE ROLLED SECTION STEEL CONTINUOUS CASTING MACHINE TO IMPROVE THE QUALITY OF ROLLED STEEL

Abstract. Investigation of the effect of metal modifying with nanopowder materials on the quality of rectangular continuously cast billets, structural shapes and reinforcing bar showed that the introduction of $TiC_xN_y - Fe$ admixture in tundish ladle of continuous casting machine reduces segregation of elements in the ingot and pollution by non-metallic inclusions, increases its chemical and structural homogeneity. NPI application alters the structure of shapes and rebar; shape, size and topography of the location of non-metallic inclusions; as well as grain refining and improvement of the metal-roll mechanical properties.

Keywords: modification, nanopowder inoculators, rectangular billet, density, structure, non-metallic inclusions, structural shapes and reinforcing bars, mechanical properties.

Перспективным направлением улучшения характеристик структуры и свойств литого металла является ввод в расплав перед кристаллизацией нанопорошковых инокуляторов [1 – 3].

Выполненные ранее исследования модифицирования металла в кристаллизаторе и промежуточном ковше сортовой МНЛЗ ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» показали высокую эффективность процесса и положительное влияние микродобавок нанопорошков тугоплавких соединений, введенных в жидкую сталь, на качество непрерывнолитой заготовки [4]. Полученные результаты, тем не менее, требуют уточнения и научного обоснования, а также исследования качества готовой продукции после прокатки модифицированных заготовок.

В условиях текущего производства в ККЦ № 2 проведена опытно-промышленная кампания разлива на МНЛЗ стали СтЗсп в заготовки сечением 150×150 мм, при этом металл опытных заготовок при разливе 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 – $TiC_xN_y - Fe$, гранулировали и закатывали в порошковую ленту. В процессе обработки металла порошковую ленту вводили в приемную ванну одного из промежуточных ковшей трайб-аппаратом, а металл, разливаемый через второй промежуточный ковш, использовали в качестве сравнительного.

Параметры разлива опытных плавов на МНЛЗ: температура ликвидус стали 1515 °С; температура металла в промежуточном ковше 1557 – 1565 °С; скорость вытягивания слитка 2,1 – 2,3 м/мин; скорость подачи порошковой ленты 3,75 м/мин; расход НПИ 980 г/мин, в том числе основного вещества (ОВ) 490 г/мин; концентрация НПИ/ОВ в слитках 0,046 – 0,068 / 0,023 – 0,034 %.

Прокатку опытных и сравнительных сортовых заготовок вели на стане 450 по различным технологическим вариантам: уголок 7,5×6,0 горячекатаный и ускоренно-охлажденный; арматура № 32 горячекатаная и термически упрочненная¹.

Химический анализ проб металла, отобранных из промежуточного ковша, и образцов металла, полученных по зонам в поперечных темплетях, подтвердил, что

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

¹ В работе принимали участие Е.О. Казырский, Е.В. Шитик, Е.А. Иванов, Н.В. Мысцова.

Таблица 1

Результаты изучения макроструктуры сортовых заготовок опытных (числитель) и сравнительных (знаменатель)

Балльность макроструктуры (ОСТ 14-1-235-91)			Изменение, %			
			площади зоны поперечного сечения слитка			длины дендритной оси 1-го порядка
ЦП	ОХН	ЛПТ _{общ}	корочки	дендритной зоны	равноосных кристаллов	
<u>0,9</u> 1,1	<u>1,05</u> 1,3	<u>1,1</u> 1,1	<u>+26,9</u> –	<u>–29,6</u> –	<u>+86,0</u> –	<u>–31,7</u> –

Пр и м е ч а н и е. Приведены средние значения по образцам; отрицательное значение изменения параметра означает его уменьшение, положительное – увеличение.

в заготовках с НПИ заметно снижается ликвация химических элементов по сечению слитка.

Результаты исследования качества опытных непрерывнолитых заготовок, модифицированных НПИ, показали увеличение плотности в среднем до 70 – 80 кг/м³ (или 0,85 – 1,00 %), что, очевидно, является следствием дробления дендритов.

В табл. 1 представлены результаты изучения макроструктуры опытных и сравнительных сортовых заготовок. Действительно, после модифицирования металла материалом TiC_xN_y – Fe увеличение площади поперечного сечения слитка, занимаемой корочкой плотного металла, составило в среднем 26,9 %, при этом площадь, занимаемая зоной дендритных кристаллов, уменьшилась на 29,6 %, а длина дендритных осей первого порядка – соответственно на 31,7 %.

Увеличение зоны, занимаемой равноосными кристаллами, по площади поперечного сечения слитка составило в среднем 86 %. Необходимо отметить и снижение балльности развития внутренних дефектов слитка. Из табл. 1 видно, что улучшены показатели по центральной пористости (ЦП) и осевой химической неоднородности (ОХН), при этом стабильным осталось развитие ликвационных полосок и трещин (ЛПТ_{общ}).

Анализ результатов металлографических исследований показал, что в образцах модифицированных заготовок преобладающим типом неметаллических включений являются сульфиды, силикаты и оксиды. При этом сульфиды располагаются по границам литого зерна в виде цепочек и имеют округлую форму размером 12,5 – 25,0 мкм. Силикаты присутствуют в виде дезориентированных глобулей, размер которых колеблется от 2,5 до 12,8 мкм. Оксидные глобулярные включения размером 2,56 – 12,80 мкм располагаются преимущественно группами на стыках зерен. В то же время в образцах сравнительных заготовок преобладают оксиды, затем силикаты и далее сульфиды. Топография их распределения по сечению также отличается: глобулярные силикаты и оксиды в виде строчек располагаются преимущественно по границам литого зерна, а размер отдельных включений колеблется от 2,5 до 12,8 мкм. Сульфиды располагаются по границам литого зерна в

виде строчек длиной до 71,68 мкм и группами на стыках зерен.

В целом в образцах модифицированных заготовок неметаллические включения имеют более благоприятную для всплывания и удаления из металла глобулярную форму, меньшие размеры и дезориентированное расположение в объеме металла.

На следующем этапе работы исследовали влияние модифицирования металла НПИ на изменение количественного соотношения элементов структуры (перлита и феррита) в фасонном (уголок 7,5×6,0) и арматурном (арматура № 32) прокате в горячекатаном и упрочненном состояниях (табл. 2).

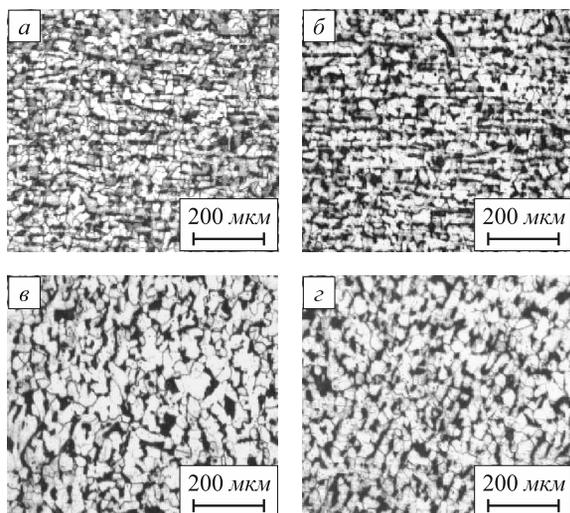
Как видно из данных табл. 2, максимальное содержание перлита наблюдается в структуре ускоренно-охлажденного уголка и термически упрочненной арматуры, прокатанных из модифицированных сортовых заготовок. В опытных образцах фасонного и арматурного проката в горячекатаном состоянии наблюдается

Таблица 2

Изменение структуры образцов деформированной стали модифицированных НПИ сортовых заготовок опытных (числитель) и сравнительных (знаменатель)

Режим охлаждения	Элементы структуры, %		Ферритное зерно, мкм
	перлит	феррит	
Фасонный прокат			
Горячекатаный	<u>38,5</u>	<u>64,5</u>	<u>15,91</u>
	42,0	58,0	15,40
Ускоренно-охлажденный	<u>40,7</u>	<u>59,3</u>	<u>15,69</u>
	47,6	52,4	16,21
Арматурный прокат			
Горячекатаный	<u>34,9</u>	<u>65,1</u>	<u>19,59</u>
	36,2	63,8	18,66
Термически упрочненный	<u>36,8</u>	<u>63,2</u>	<u>15,39</u>
	36,2	63,8	18,66

Пр и м е ч а н и е. Приведены средние значения по образцам.



Структура горячекатаных уголка 7,5×6,0 и арматуры № 32: *а* и *в* – уголок и арматура без НПИ; *б* и *г* – уголок и арматура, модифицированные материалом TiC_xN_y-Fe

повышенное до 59 – 67 % содержание феррита, а также тенденция к уменьшению среднего размера ферритного зерна (см. рисунок). Необходимо отметить, что эти структурные изменения также положительно влияют на механические свойства.

Сравнение результатов механических испытаний образцов литой и деформированной стали (табл. 3) подтвердило улучшение прочностных и пластических характеристик модифицированных заготовок. В литом металле наблюдали увеличение предела прочности σ_b на 1,7 % (0,7 – 2,7 %), относительного удлинения δ – на 24,8 % (23,4 – 26,2 %). В готовом прокате изменение механических свойств несколько ниже полученных значений для литой стали, что, видимо, связано с повторным нагревом металла, однако и здесь заметно улучшены пластические свойства. В частности, увеличение относительного удлинения в горячекатаном и упрочненном состояниях составило соответственно: для уголка 7,5×6,0 – на 4,8 % (3,5 – 5,7 %) и 3,5 % (2,2 – 4,7 %); для арматуры № 32 – на 5,0 % (2,8 – 7,1 %) и 5,4 % (2,5 – 7,9 %).

Выводы. Введение в промежуточный ковш сортовой МНЛЗ нанопорошковых добавок TiC_xN_y-Fe положи-

Сравнительные результаты механических испытаний образцов литой и деформированной стали модифицированных НПИ сортовых заготовок

Вариант обработки	Изменение показателя, %		
	σ_b	σ_T	δ
Модифицирование металла TiC_xN_y-Fe	1,7	н.д.	24,8
Фасонный прокат			
Горячекатаный	0,3	0,5	4,8
Ускоренно-охлажденный	0	0,6	3,5
Арматурный прокат			
Горячекатаный	0,3	1,0	5,0
Термически упрочненный	0,2	0,8	5,4

Пр и м е ч а н и е. Приведены средние значения по всем опытным заготовкам и образцам; н.д. – нет данных.

тельно влияет на качество непрерывнолитой заготовки, при этом снижаются ликвация элементов по сечению слитка и загрязненность неметаллическими включениями, повышается его химическая и структурная однородность. Применение нанопорошковых инокуляторов приводит к изменению структуры фасонного и арматурного проката; формы, размера и топографии расположения неметаллических включений, а также измельчению зерна и повышению механических свойств металлопроката.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gleiter H. // Acta mater. 2000. Vol. 48. P. 1 – 29.
2. Mughrabi H., Höppel H.W., Kautz M. // Scripta materialia. 2004. Vol. 51. P. 807 – 812.
3. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Технологии современной металлургии. – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.
4. Комшуков В.П., Черепанов А.Н., Протопопов Е.В. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2008. № 8. С. 10, 11; № 10. С. 21 – 24; 2010. № 8. С. 57 – 63.

© 2013 г. Е.В. Протопопов, Ю.А. Селезнев, А.Н. Черепанов, В.Я. Чинокалов, Д.В. Фойт, Л.А. Ганзер
Поступила 15 февраля 2013 г.