

## Библиографический список

1. Beitelman L. Effect of mold EMS design on billet casting productivity and product quality //Canadian Metallurgical Quarterly. 1999. № 5. P. 301–309.
2. Влияние электромагнитного перемешивания на качество макроструктуры и поверхности непрерывнолитых заготовок производства МЦ ОАО "ММК"/ Казаков А.С., Суспицин В.Г., Зимица Л.А., Ушаков С.Н. // Совершенствование технологии в ОАО "ММК": Сб. трудов Центральной лаборатории ОАО "ММК". Вып. 9. Магнитогорск: Дом печати, 2005. С. 95–98.

УДК 621.771

Сычков А.Б.

## НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Качественные параметры высокоуглеродистой катанки нормируются в нормативной документации (НД) и требованиями потребителей. К этим параметрам можно отнести химический состав стали, дефектность поверхности, степень обезуглероживания, чистоту стали по неметаллическим включениям (НВ), макро- и микроструктуры, механические характеристики и т.п. [1–5]. Однако имеется ряд проблем, которые следует разрешить, чтобы повысить, в целом, комплекс свойств катанки и технологичность её переработки на металлургическом предприятии. Одной из этих проблем является чистота стали по НВ, повышение которой способствует улучшению исходной пластичности катанки и деформируемости её при волочении в проволоку и при свивке в пряди, канатные конструкции и металлокорд [6–11].

В процессе освоения высокоуглеродистой катанки наблюдалось устойчивое и монотонное снижение загрязненности стали НВ. Однако в последнее время наблюдается обратная картина: постепенно повышаются параметры, связанные с увеличением загрязненности стали НВ. Это, по видимому, обусловлено неэффективной технологией вакуумирования стали: применением так называемой обратной схемы. Эта схема предусматривает вакуумирование стали на вакууматоре камерного типа (VD), обработку стали на установке ковш-печь (УКП). Когда вакуумирование металла проводится до его выпечки, металл может получить НВ из материалов, присаживаемых после вакууматора на УКП. Не отлажена также и технология с применением полностью магнезиальных сталеразливочных ковшей (СК), а склонность при разливке к затягиванию ручьев алюминийсодержащими настылями предопределяет значительный перегрев стали над расчетной температурой ликвидуса, что формирует развитую дендритную ли-

квационную макроструктуру НЛЗ и способствует увеличению загрязненности стали НВ.

С целью повышения чистоты высокоуглеродистой стали по НВ и выработки критериев предельно допустимой загрязненности металла было проведено несколько мероприятий. К ним относятся применение полностью магнезиальных кирпичных сталеразливочных ковшей, в том числе и днища СК (плавка 1, сталь марки С82Д), обработка стали на сливе из ДСП в СК белыми, синтетическими шлаками (плавки 2 и 3, сталь 80КРД), модифицирование НВ смешанной лигатурой, содержащей кальций и редкоземельные металлы (серия плавов 4...11, сталь марки С82Д – опытные и контрольные плавки).

## Применение полностью магнезиального СК

Неметаллические включения в НЛЗ (плавка 1) количественно оценивались на кованых пробах от 6-ти темплетов, отобранных от каждого ручья МНЛЗ, по ГОСТ 1778, метод Л1. Следует отметить, что во всех образцах подавляющее большинство НВ (97...98.7% оксидов и 91.5...99.2% сульфидов) имеют размеры 0...5.6 мкм (1-я группа НВ по методу Л1 ГОСТ 1778); остальные НВ распределены по размерам таким образом:

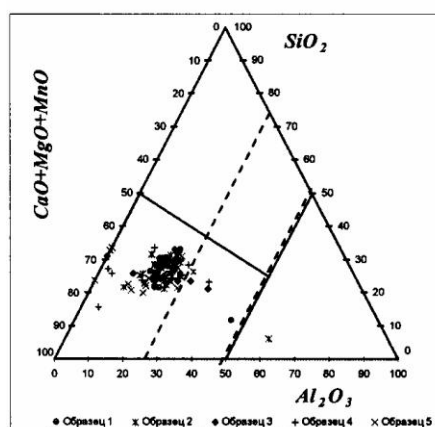
- 2 группа (5.9...11.2 мкм) – 0.7...4.2% для оксидов и 0.8...6.7% для сульфидов;
- 3 группа (11.5...16.8 мкм) – 0...0.9% – оксиды и 0...1.8% – сульфиды;
- 4 группа (17.1...22.4 мкм) – 0...0.9% – оксиды, сульфидов нет;
- 5 группа (22.7...28 мкм) – 0...0.3% – оксиды, сульфидов нет;
- 7 группа (33.8...39.2 мкм) – 0...0.7% оксиды, сульфидов нет.

То есть в кованых образцах НЛЗ наблюдаются достаточно мелкие НВ (оксиды протяженностью до 11.5 мкм в 97.7...100% случаев по отдельным образцам; сульфиды – 16.8 мкм в 100%

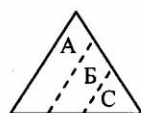
случаев). Расчетные индексы (оксиды – до  $6.5 \cdot 10^{-3}$ , сульфиды – до  $4.2 \cdot 10^{-3}$ , общий –  $8.6 \cdot 10^{-3}$ ) загрязненности литой стали НВ (то есть удельная длина НВ на 1 мкм длины исследуемого участка, другими словами, – от 0.65 до 0.86% базовой длины) также доказывают незначительность пораженности металла опытной плавки НВ оксидного и сульфидного видов/типов.

Диаграмма Pirelli (рис. 1) и конкретный анализ химического состава каждого НВ в катанке, участвующего в построении этой диаграммы, показывают удовлетворительное распределение НВ, которое может обеспечить высокую деформационную пластичность при волочении высокоуглеродистой катанки в проволоку диаметром до 0.15 мм без существенной обрывности. Так, запретная зона С ( $h_{НВ} \leq 10$  мкм; плотность

$НВ \leq 20 \dots 40 \text{ см}^{-2}$ ) в опытной плавке включает всего 1 НВ протяженностью 1 мкм – 1% с плотностью  $\sim 18 \text{ см}^{-2}$ . Остальные НВ находятся в оптимальной зоне В и имеют плотность  $1395 \dots 2441/1808 \text{ см}^{-2}$ , но весьма малых размеров – не более 6 мкм. Фирма Pirelli признала, что плотность НВ не является представительной характеристикой и в 2004 г. заменила этот показатель на простое процентное соотношение; например, для металлокорда (см. спецификацию фирмы Pirelli N18.V.008, рев. № 7 от 16.06.04 г.) допускается в зоне С ( $Al_2O_3 \geq 50\%$ ) не более 4% НВ максимальным размером 10 мкм, в зоне В ( $Al_2O_3 = 25 \dots 50\%$ ) – не более 20% и в зоне А ( $Al_2O_3 = 0 \dots 25\%$ ) – остальные НВ; в зоне А и В протяженность НВ допускается до 30 мкм. На рис. 1 для плавки 1 количество НВ (по новой

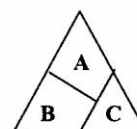


Новая схема



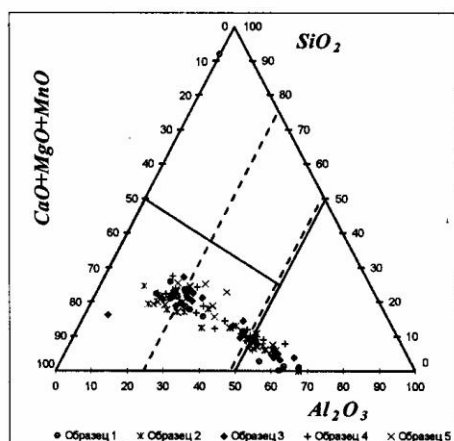
А – 94 шт. – 94 %  
В – 5 шт. – 5 %  
С – 1 шт. – 1 %  
Σ – 100 %

Старая схема



№ образца	Кол-во полей	Кол-во включений	Плотность вкл/см <sup>2</sup>	Хим. состав, %		
				А	В	С
1	8	20	2441		20	
2	12	20	1628		19	1
3	12	20	1395		20	
4	12	20	1776		20	
5	12	20	2170		20	
Сумма	56	100	1808		99	1
%				0 %	99 %	1 %
$h_{НВ \max} = 6 \text{ мкм}$						

Рис. 1. Диаграмма ф. Pirelli для катанки диаметром 11.0 мм из стали марки С82Д, микролегированной ванадием (плавка 1)

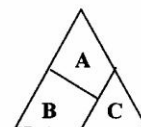


Новая схема



А – 42 шт. – 42 %  
В – 27 шт. – 27 %  
С – 31 шт. – 31 %  
Σ – 100 %

Старая схема



№ образца	Кол-во полей	Кол-во включений	Плотность вкл/см <sup>2</sup>	Хим. состав, %		
				А	В	С
1	26	20	751	1	12	7
2	28	20	698		14	6
3	18	20	1085		15	5
4	16	20	1221		14	6
5	18	20	1085		13	7
Сумма	106	100	921	1	68	31
%				1 %	68 %	31 %
$h_{НВ \max} = 5 \text{ мкм}$						

Рис. 2. Диаграмма ф. Pirelli для катанки диаметром 5.5 мм из стали марки 80КРД

Оценка НВ в катанке из стали 80КРД,  
обработанной белыми шлаками, по ГОСТ 1778  
(метод Ш4)

Условный номер бунта	Оксиды		Силикаты			Суль- фиды
	то- точ- ные	стро- че- вые	недефор- мирую- щиеся	хрупкие	плас- тич- ные	
1	2	3	4	5	6	7
Плавка 2						
6.1	0.5	0.0	2.0 (13 мкм)	1.5	0.0	1.0
6.2	0.5	0.0	1.0	1.5	2.0 (4 мкм)	1.0
6.3	0.5	0.0	1.5 (12 мкм)	1.0	0.0	0.5
6.4	0.5	0.0	1.5 (12 мкм)	1.0	0.0	0.5
6.5	0.5	0.0	0.5	1.0	0.0	0.5
6.6	0.5	0.0	1.0	1.0	0.0	1.0
Средний балл плавки	0.5	0.0	1.3	1.2	0.3	0.8
Плавка 3						
6.1	0.5	0.0	1.5 (22 мкм)	3.0	1.0	1.0
6.2	0.5	0.0	0.5	1.5	1.0	1.0
6.3	0.5	0.0	0.5	1.0	0.5	1.0
6.4	0.5	0.0	0.5	1.0	0.5	0.5
6.5	0.5	0.0	3.0 (62 мкм)	0.5	0.5	0.5
6.6	0.5	0.0	0.5	2.0 (16 мкм)	0.5	1.0
Средний балл плавки	0.5	0.0	1.1	1.5	0.7	0.8

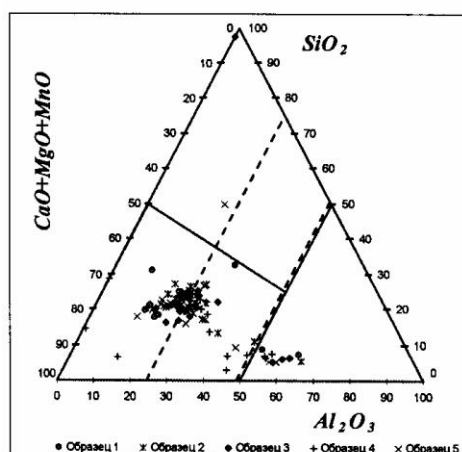
методике) в зоне С – 1%, в зоне В ~ 5% и в зоне А – 94%. Это подтверждает высокую чистоту по НВ катанки из стали, обрабатываемой в СК, полностью зафутерованного основной магнезиальной массой, обеспечившей наличие в металле мелких и пластичных НВ. Такой металл имеет высокую технологичность при переработке в тонкую проволоку и металлокорд.

#### Обработка стали белыми синтетическими шлаками при сливе металла из ДСП в СК

С целью снижения загрязненности стали НВ, ускорения процессов их модифицирования была опробована более ранняя обработка стали основными шлаками – на этапе слива металла из ДСП в СК. С этой целью провели опытное производство высокоуглеродистой стали марки 80КРД (плавки 2 и 3) и катанки из неё. При этом обработка осуществлялась белыми шлаками с У КП, полученными при производстве низкоуглеродистой стали с повышенным содержанием алюминия. Результаты металлографической оценки сведены в табл. 1 и на рис. 2, 3, анализ которых показывает следующее.

Загрязненность стали НВ в НЛЗ оценивали исследованием кованных темплетов по ГОСТ 1778, метод Л1. Следует отметить, что по индексам НВ (оксидов до  $9.9 \cdot 10^{-3}$ , сульфидов до  $8.0 \cdot 10^{-3}$  и суммарный до  $12.5 \cdot 10^{-3}$ ) плавка 2 несколько чище, чем плавки 3 и 1. НЛЗ плавки 3 наиболее загрязнены НВ. Это подтверждается и распределением НВ по размерным группам.

Диаграммы Pirelli катанки этих двух последних плавков характеризуются тем, что наблюдается очень много НВ в запретной зоне С – соответственно 31 и 11% для плавков 2 и 3. При этом размеры НВ небольшие: соответственно не бо-

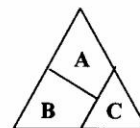


Новая схема



А – 68 шт. – 68 %  
В – 21 шт. – 21 %  
С – 11 шт. – 11 %  
Σ – 100 %

Старая схема



№ об- разца	Кол-во полей	Кол-во вклю- чений	Плотность вкл/см <sup>2</sup>	Хим. состав, %		
				А	В	С
1	11	20	1776		18	2
2	13	20	1502		19	1
3	14	20	1395	1	16	3
4	11	20	1776		17	3
5	12	20	1628	1	17	2
Сумма	61	100	1601	2	87	11
%				2 %	87 %	11 %
h <sub>НВ max</sub> = 7 мкм						

Рис. 3. Диаграмма ф. Pirelli для катанки диаметром 5.5 мм из стали марки 80КРД

лее 3 мкм (один выпад –  $h=5$  мкм в зоне В) для плавки 2 и 4 мкм (один выпад – 7 мкм в зоне В) для плавки 3. Максимальное содержание  $Al_2O_3$  (до ~ 68%) в НВ – это негативный результат, который обусловлен наличием в белых шлаках алюминия. Переход на белые шлаки, полученные в процессе внепечной обработки высокоуглеродистой стали, могут дать положительный эффект – освобождение от НВ зоны С диаграммы Pirelli. С другой стороны, имеется положительный эффект от опытной обработки стали синтетическими шлаками – прошло модифицирование НВ с их измельчением.

### Обработка стали Са + РЗМ лигатурой

В технической литературе [8, 12, 13] приводятся данные о положительном воздействии редкоземельных элементов (РЗМ) как модификаторов жидкой стали, благотворно влияющих на кристаллическую структуру непрерывного слитка и загрязненность стали НВ. В ряде случаев действие РЗМ признается более эффективным, чем таких элементов, как кальций и бор. Так, например, РЗМ сильнее бора влияют на снижение длины зоны столбчатых кристаллов (ЗСК), но бор [14] больше РЗМ влияет на внутреннее строение дендритов. Утверждается также, что РЗМ является более сильным модифика-

тором НВ, чем кальций. Поэтому в условиях СЗАО ММЗ была опробована в опытном порядке лигатура Са + РЗМ (примерный состав: 10...12% Са; 15% Mg; 40...45% Si; 10...12% РЗМ: из них до 50 – Се, 25% – La и 25% Nd – неодима или Pr – прозедиума) в серии плавов 4...11. При этом ввод опытной лигатуры несколько варьировался, а именно:

- плавки 4 и 5 – 100 м Са + РЗМ после ввода в сталь бора;
- плавки 6 – 100 м Са + РЗМ до отдачи FeV за 5 мин;
- плавки 7 и 8 – 150 м Са + РЗМ после отдачи FeV проволоки;
- плавки 9...11 без обработки Са + РЗМ – контрольный металл.

Следует отметить, что опыты проводились на стали марки С82D, микролегированной ванадием, из которой изготавливается высокопрочная катанка, а затем и проволока для производства арматурных канатов, натяжителей вантовых мостов и т.п. У такого металла предъявляются высокие требования к НВ и ликвационной однородности. Именно в этом направлении и предназначалось использование Са + РЗМ лигатуры.

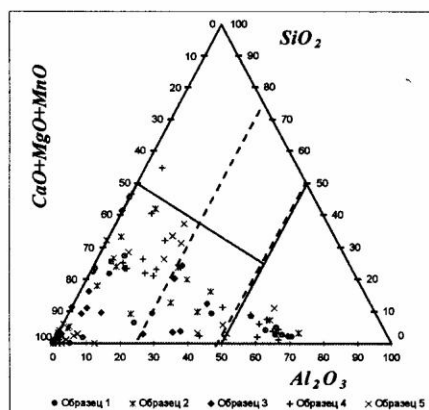
В табл. 2 и на рис. 4, а–з приведены результаты металловедческого исследования НВ, анализ которых показывает следующее.

Таблица 2

**Неметаллические включения в катанке диаметром 11.0 мм из стали С82D, обработанной или необработанной лигатурой с кальцием и редкоземельными металлами (ГОСТ 1778, метод Ш 4, оценка по методике ММЗ)**

Номер плавки	С (+), без лигатуры (-)	Оценка по удельным показателям всех типов НВ			$\Sigma$ НВ в одном образце min...max/ $X_{cp}$	Максимальная толщина $h_{НВ}$ , мкм, тип НВ	Максимальный балл НВ
		Удельные средние $\Sigma X_{cp}/n$	Удельные, максимальные $\Sigma X_{max}/n$	Сумма удельных НВ $\Sigma \Sigma$			
4	(+)	0.83	1.75	2.58	3...10/5	15-CH, 18-CX, 16-СП	4.5-CX, 4.0-СП
5	(+)	0.95	1.58	2.53	3.5...7.5/5.7	48-CX, 14-СП	4-CX, 3-СП
6	(+)	0.73	1.00	1.73	3...5.5/4.3	8-CX, 4-СП	2-CX, 2-СП
7	(+)	0.87	1.50	2.37	3...8/5.2	22-CH, 20-CX	2-CH, 4-CX
8	(+)	0.90	1.67	2.57	2...9.5/5.4	22-CH, 25-CX, 13-СП	2.5-CH, 3-CX, 3.5-СП
	$\Sigma$ (+)	0.73...0.95/0.86	1.00...1.75/1.50	1.73...2.58/2.34	2...10/5.1	CH-22, CX-48, СП-16	CX-4.5, CH-2.5, СП-4
9	(-)	0.58	1.00	1.58	2.5...4.5/3.7	11-CH, 13-CX	2-CH, 2-CX
10	(-)	0.63	1.08	1.71	3...4.5/3.8	15-CH, 9-CX	2-CH, 2-CX
11	(-)	0.70	1.00	1.70	3.5...5/4.3	16-CH, 16-CX	2-CH, 2.5-CX
	$\Sigma$ (-)	0.58...0.70/0.64	1.00...1.08/1.03	1.58...1.71/1.66	2.5...5/3.93	CH-16, CX-16	CX-2.5, CH-2.0
	$\Delta(+)-(-)$	+ 0.22	+ 0.47	+ 0.68	+ 1.17	CH = +6, CX = +32, СП = +16	CX = +2 CH = +0.5 СП = +4



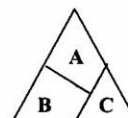


Новая схема



A – 64 шт. – 64 %  
B – 18 шт. – 18 %  
C – 18 шт. – 18 %  
Σ – 100 %

Старая схема

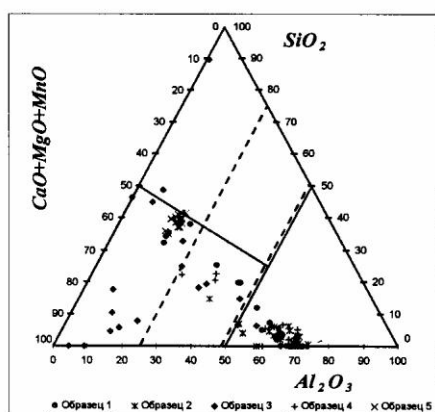


№ образца	Кол-во полей	Кол-во включений	Плотность вкл/см <sup>2</sup>	Хим. состав, %		
				A	B	C
1	33	20	592		14	6
2	34	20	574		18	2
3	32	20	610		19	1
4	12	20	651	1	11	8
5	30	20	692		19	1
Сумма	141	100	1601	1	81	18
%				1 %	81 %	18 %

$h_{HB \max} = 9 \text{ мкм}$

Плавка 4

а

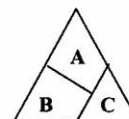


Новая схема



A – 28 шт. – 28 %  
B – 9 шт. – 9 %  
C – 63 шт. – 63 %  
Σ – 100 %

Старая схема

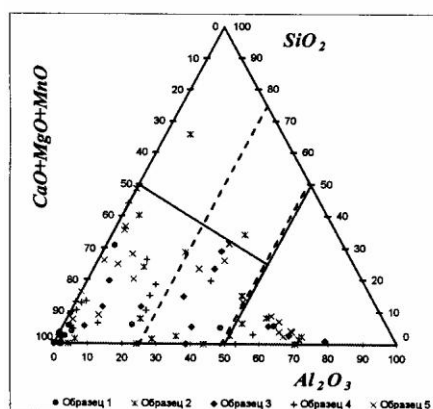


№ образца	Кол-во полей	Кол-во включений	Плотность вкл/см <sup>2</sup>	Хим. состав, %		
				A	B	C
1	8	20	2441		7	13
2	12	20	1628		1	19
3	16	20	1221	2	14	4
4	10	20	1953		3	17
5	12	20	1628	1	19	
Сумма	58	100	1683	3	44	53
%				3 %	44 %	63 %

$h_{HB \max} = 6 \text{ мкм}$

Плавка 6

б



Новая схема



A – 67 шт. – 67 %  
B – 15 шт. – 15 %  
C – 18 шт. – 18 %  
Σ – 100 %

Старая схема



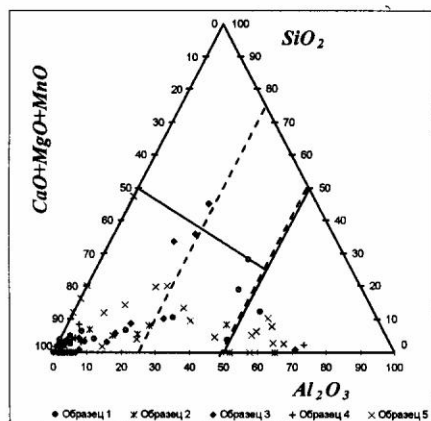
№ образца	Кол-во полей	Кол-во включений	Плотность вкл/см <sup>2</sup>	Хим. состав, %		
				A	B	C
1	27	20	723		19	1
2	18	20	1085	2	12	6
3	35	20	558		17	3
4	38	20	514		18	2
5	33	20	592		14	6
Сумма	151	100	646	2	80	18
%				2 %	80 %	18 %

$h_{HB \max} = 9 \text{ мкм}$

Плавка 5

в

Рис. 4. Диаграмма ф. Pirelli для катанки диаметром 11.0 мм из стали марки С82D (см. также с. 66 и 67)

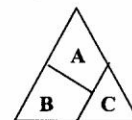


Новая схема



A – 79 шт. – 79 %  
 B – 9 шт. – 9 %  
 C – 12 шт. – 12 %  
 Σ – 100 %

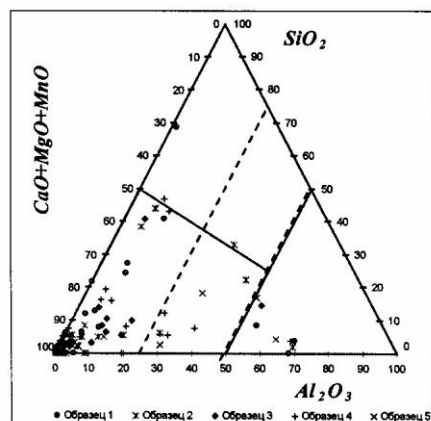
Старая схема



№ образца	Кол-во полей	Кол-во включений	Плотность вкл/см <sup>2</sup>	Хим. состав, %		
				A	B	C
1	19	20	1028		19	1
2	34	20	574		18	2
3	33	20	592	1	18	1
4	24	20	814		19	1
5	24	20	814		13	7
Сумма	134	100	728	1	87	12
%				1 %	87 %	12 %
h <sub>НВ max</sub> = 9 мкм						

Плавка 7

Г



Новая схема



A – 84 шт. – 84 %  
 B – 8 шт. – 8 %  
 C – 8 шт. – 8 %  
 Σ – 100 %

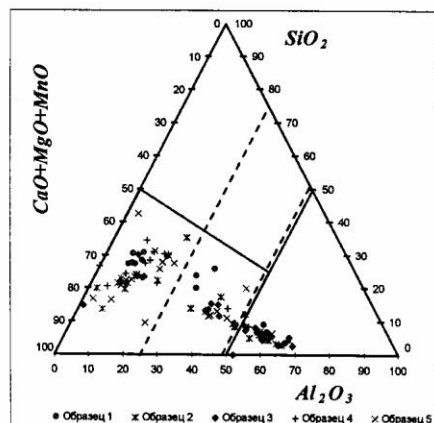
Старая схема



№ образца	Кол-во полей	Кол-во включений	Плотность вкл/см <sup>2</sup>	Хим. состав, %		
				A	B	C
1	26	20	751	1	16	3
2	20	20	977	1	18	1
3	33	20	592		19	1
4	26	20	751	1	18	1
5	29	20	673		18	2
Сумма	134	100	728	3	89	8
%				3 %	89 %	8 %
h <sub>НВ max</sub> = 9 мкм						

Плавка 8

Д

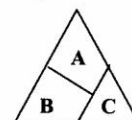


Новая схема



A – 49 шт. – 49 %  
 B – 19 шт. – 19 %  
 C – 32 шт. – 32 %  
 Σ – 100 %

Старая схема

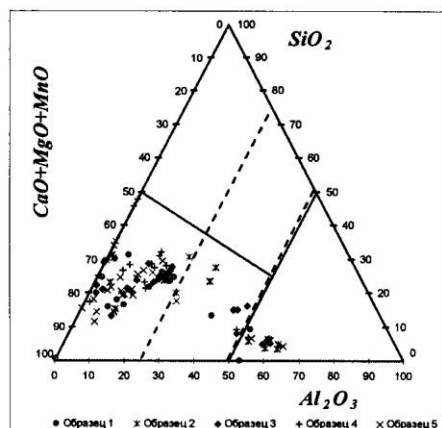


№ образца	Кол-во полей	Кол-во включений	Плотность вкл/см <sup>2</sup>	Хим. состав, %		
				A	B	C
1	29	20	673		11	9
2	13	20	1502		15	5
3	14	20	1395		12	8
4	25	20	781		12	8
5	20	20	977		18	2
Сумма	101	100	966		68	32
%				0 %	68 %	32 %
h <sub>НВ max</sub> = 4 мкм						

Плавка 9

е

Рис. 4. Продолжение



Новая схема



A – 75 шт. – 75 %  
B – 9 шт. – 9 %  
C – 16 шт. – 16 %  
Σ – 100 %

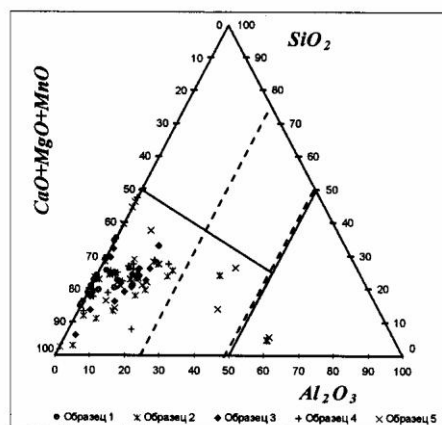
Старая схема



№ образца	Кол-во полей	Кол-во включений	Плотность вкл/см <sup>2</sup>	Хим. состав, %		
				A	B	C
1	35	20	558		18	2
2	16	20	1221		14	6
3	33	20	592		17	3
4	38	20	514		17	3
5	35	20	558		18	2
Сумма	157	100	622		84	16
%				0 %	84 %	16 %
h <sub>НВ max</sub> = 7 мкм						

Плавка 10

Ж

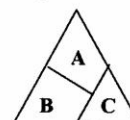


Новая схема



A – 94 шт. – 94 %  
B – 3 шт. – 3 %  
C – 3 шт. – 3 %  
Σ – 100 %

Старая схема

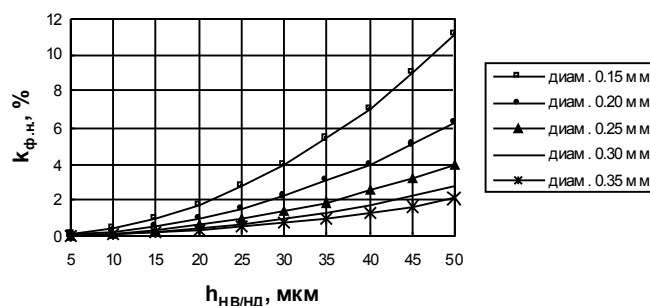


№ образца	Кол-во полей	Кол-во включений	Плотность вкл/см <sup>2</sup>	Хим. состав, %		
				A	B	C
1	24	20	814		20	
2	31	20	630		18	2
3	34	20	574		20	
4	23	20	849	1	19	
5	30	20	651		19	1
Сумма	142	100	687	1	96	3
%				1 %	84 %	3 %
h <sub>НВ max</sub> = 9 мкм						

Плавка 11

З

Рис. 4. Окончание



Ø 0.15 – k<sub>ф.н.</sub> ≤ 10 % - h ≤ 47 мкм; k<sub>ф.н.</sub> ≤ 5 % - h ≤ 33 мкм; k<sub>ф.н.</sub> ≤ 3 % - h ≤ 26 мкм;  
Ø 0.20 – k<sub>ф.н.</sub> ≤ 5 % - h ≤ 45 мкм; k<sub>ф.н.</sub> ≤ 3 % - h ≤ 35 мкм; Ø 0.25 – k<sub>ф.н.</sub> ≤ 3 % - h ≤ 43 мкм;  
Ø Ø 0.30 и 0.35 мм – все значения k<sub>ф.н.</sub> ≤ 3 % для всех h<sub>НВ/нд</sub>

Рис. 5. Зависимость коэффициента физической неоднородности (k<sub>ф.н.</sub>) от размера единичного недеформируемого НВ (h<sub>НВ/нд</sub>) и диаметра готовой проволоки (d, мм)

Лучшие результаты по чистоте катанки от НВ наблюдаются (см. табл. 2) на плавках 9, 10, 11, 6, в которых сумма удельных НВ соответственно равняется 1.58; 1.70; 1.71 и 1.73, что близко к требованиям к катанке под металлокорд. У остальных плавков этот показатель загрязненности стали НВ почти в 2 раза больше (2.37...2.58). Толщина НВ составляет в лучших плавках СХ – 13 мкм (9); СН – 16 и СХ – 16 мкм (11); СН – 15 мкм (10) и СХ – 8 мкм (6); в других плавках – СХ – 20 мкм (7); СХ – 48 мкм (5); СХ – 25 и

СН – 22 мкм (8); СН – 15 и СХ – 18 мкм (4). Вышеуказанные результаты подтверждаются и диаграммами Pirelli, но со своими оригинальными вариациями. Так, например:

- по толщине НВ: лучшие плавки – 9 ( $h_{НВ} \leq 4$  мкм), 10 ( $h_{НВ} \leq 7$  мкм) и 6 ( $\leq 6$  мкм), остальные плавки –  $\leq 9$  мкм;
- по плотности НВ: 10 ( $622 \text{ см}^{-2}$ ); 5 ( $647 \text{ см}^{-2}$ ); 11 ( $688 \text{ см}^{-2}$ ); 4 ( $693 \text{ см}^{-2}$ ); 7 и 8 ( $729 \text{ см}^{-2}$ ) и в плавке 6 ( $1684 \text{ см}^{-2}$ );

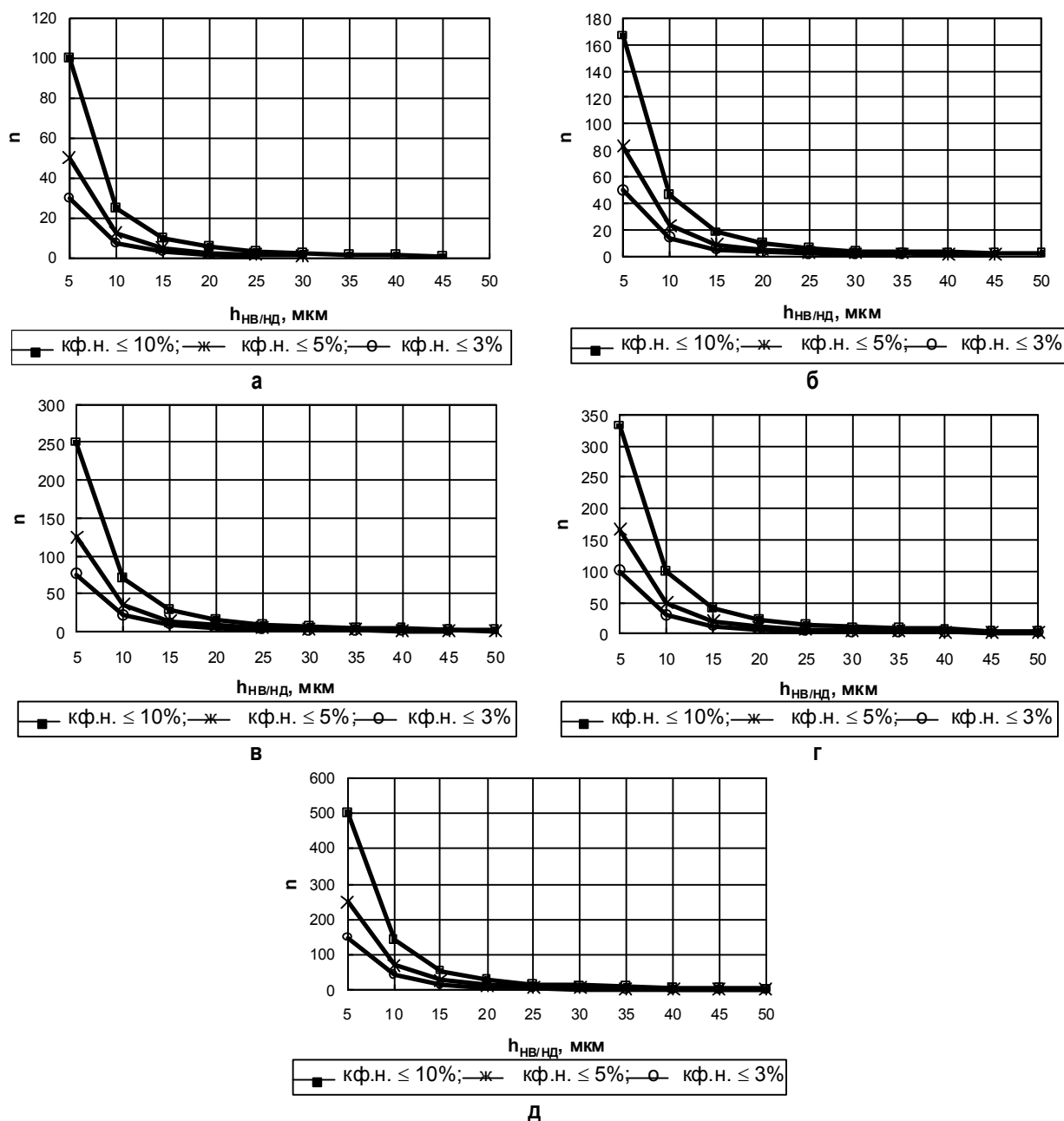


Рис. 6. Зависимость предельно допустимого значения количества НВ - [НВ] от размера НВ/НД, диаметра готовой проволоки и  $k_{ф.н.}$ :

а –  $\varnothing 0.15$  мм; б –  $\varnothing 0.20$  мм; в –  $\varnothing 0.25$  мм; г –  $\varnothing 0.30$  мм; д –  $\varnothing 0.35$  мм



- по загрязненности НВ в зоне С: 11 (3%); 8 (8%); 7 (23%); 10 (16%); 4 и 5 (18%); 9 (32%) и 6 (53%);
- по эффективности расположения НВ: по зонам диаграммы – плавки 10 и 11 (лучшая плавка).

Таким образом, модифицирование стали лигатурой, содержащей Са и РЗМ, при первичном опробовании не дало положительного эффекта. Тем не менее, наиболее оптимальными выглядят плавки 9 и 6 (оценка – по ГОСТ 1778, метод Ш4) и плавки 9 и 8 (оценка – по методике фирмы Pirelli). Однако плавки 9 и 6 не соответствуют требованиям к высококачественной катанке по химическому составу НВ (зона С –  $Al_2O_3 > 50\%$ ), плавка 8 имеет очень крупные единичные НВ. В целом, металл без лигатуры значительно чище по НВ.

Тем не менее, можно рекомендовать повторить опыты по модифицированию стали Са + РЗМ лигатурой с целью поиска наилучшего результата.

#### Оценка предельно допустимой загрязненности стали НВ с применением коэффициента физической неоднородности

В работах [8, 9, 15] доказывается, что применение для оценки НВ в стали коэффициента физической неоднородности  $k_{фн}$  ( $k_{фн} = S_{нв}/S$ , где  $S_{нв}$  – суммарная площадь, занимаемая недеформируемыми НВ,  $S$  – площадь поперечного сечения готовой проволоки) и эффективно, и универсально. Поэтому представляется целесообразным представить зависимость  $k_{фн}$  от предельных размеров единичных НВ и решить обратную задачу, а именно определить количество предельно допустимых НВ в функции от размера НВ и  $k_{фн}$ . Эти зависимости представлены на рис. 5, 6 и в табл. 3, 4. Используя эти данные, можно установить приемлемость катанки для конкретного назначения по уровню загрязненности стали НВ.

Анализ представленных данных показывает следующее. Расчетным способом установлены

Таблица 3

Значения  $k_{фн}$  (%) от толщины НВ –  $h_{нв}$  и диаметра готовой проволоки (d)

Диаметр проволоки, мм	$h_{нв}$ , мкм									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0.15	0.1	0.4	1.0	1.8	2.8	4.0	5.4	7.1	9.0	11.1
0.20	0.06	0.22	0.56	1.01	1.57	2.25	3.03	3.99	5.06	6.24
0.25	0.04	0.14	0.35	0.64	0.99	1.42	1.92	2.53	3.20	3.95
0.30	0.03	0.10	0.25	0.45	0.70	1.00	1.35	1.78	2.25	2.78
0.35	0.02	0.07	0.18	0.33	0.51	0.73	0.99	1.31	1.65	2.04

значения  $k_{фн}$  в зависимости от размера единичного недеформируемого НВ ( $h_{нв/нд}$ ), диаметра (0.35...0.15 мм) готовой проволоки кордового назначения. В работе [15] регламентировано допустимое значение  $k_{фн}$  в катанке, например для металлокорда, равное не более 5%. С учетом этого критерия (см. рис. 5, табл. 3) можно установить, что 5-процентный барьер проходят единичные НВ толщиной не более 35 мкм для диаметра проволоки 0.15 мм, 45 мкм – 0.20 мм и т.п. Однако, как правило, в реальном металле имеется множество мелких и более крупных НВ. В табл. 4 и на рис. 6 представлено допустимое количество НВ в катанке определенного диаметра в зависимости от  $k_{фн}$  и диаметра готовой проволоки. Так, для диаметра готовой проволоки 0.15 мм для обеспечения  $k_{фн}$  не более 5% допустимо наличие до 50 НВ протяженностью (условного максимального размера НВ) 5 мкм, примерно 13 НВ диаметром 10 мкм, 5 НВ диаметром 15 мкм... 1 НВ протяженностью 30 мкм. НВ размером более 35 мкм не допустимы. Для точного расчета предельных критерияльных значений необходимо определить площадь всех недеформируемых НВ в поперечном сечении катанки и рассчитать реальное значение  $k_{фн}$ . Идеальная оценка загрязненности стали НВ, по-видимому, состоит в сочетании вышеописанного метода с использованием  $k_{фн}$  и новой методики фирмы Pirelli, ограничивающей НВ по содержанию  $Al_2O_3$ .

Таблица 4

Зависимость допускаемого количества [НВ] от толщины НВ и диаметра готовой проволоки

Диаметр проволоки, мм	$k_{фн}$ , ≤	$h_{нв}$ , мкм									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.15	10	100	25	10	6	4	3	2	1	1	-
	5	50	13	5	3	2	1	-	-	-	-
	3	30	8	3	2	1	-	-	-	-	-
0.20	10	167	46	18	10	6	4	3	3	2	2
	5	83	23	9	5	3	2	2	1	1	-
	3	50	14	5	3	2	1	1	-	-	-
0.25	10	250	71	29	16	10	7	5	4	3	3
	5	125	36	14	8	5	4	3	2	2	1
	3	75	21	9	5	3	2	2	1	1	-
0.30	10	333	100	40	22	14	10	9	8	4	3
	5	167	50	20	11	7	5	4	3	2	2
	3	100	30	12	7	4	3	2	2	1	1
0.35	10	500	143	56	30	17	14	10	8	6	5
	5	250	71	28	15	10	7	5	4	3	3
	3	150	43	17	9	6	4	3	2	2	1

### Выводы

С целью снижения загрязненности высокоуглеродистой стали НВ проведено опытное опробование применения полностью магнезиальных СК, обработки стали синтетическими шлаками при сливе металла из ДСП в СК, а также лигатурой с содержанием кальция и редкоземельных металлов. Кроме того, проанализированы методы оценки НВ и выбора критериев их нормирования.

Использование полностью магнезиальных СК

дало положительный эффект – количество НВ с  $Al_2O_3$  более 50% минимально и отвечает требованиям фирмы Pirelli для катанки под металлокорд.

Обработка синтетическими шлаками обеспечивает модифицирование НВ, однако необходимо применять «белые» шлаки без алюминия.

Лигатура на базе кальция и редкоземельных металлов не дала положительных результатов.

Наиболее оптимальным для оценивания НВ является сочетание  $k_{фн}$  и методики фирмы Pirelli.

### Библиографический список

1. Сравнительный анализ нормируемых показателей качества катанки, проволоки и проволочных изделий из углеродистой стали / А.Б. Сычков, О.В. Парусов, А.М. Нестеренко, М.А. Жигарев // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2002. № 1. С. 52–55.
2. Разработка сквозной технологии производства катанки из качественной углеродистой стали в условиях ММЗ / В.В. Парусов, А.М. Нестеренко, А.Б. Сычков, Р.В. Старов, И.В. Деревянченко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2002. № 2. С. 52–54.
3. О целесообразности ограничения содержания примесей цветных металлов в углеродистой катанке / Н.А. Богданов, А.В. Кутаков, А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, В.В. Парусов, А.М. Нестеренко // *Сталь*. 2000. № 1. С. 67–69.
4. Парусов В.В., Вилипп А.И., Сычков А.Б. Влияние примесных элементов на качество углеродистой стали // *Сталь*. 2002. № 12. С. 53–55.
5. Глубина обезуглероженного слоя на углеродистой катанке различных заводов-изготовителей / В.В. Парусов, В.А. Луценко, А.Б. Сычков, В.А. Тищенко, А.И. Сивак // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2003. № 5. С. 61–64.
6. Изменения химического состава неметаллических включений на всех этапах производства стали / Р.В. Старов, И.В. Деревянченко, В.В. Парусов, А.Б. Сычков, С.Ю. Жукова, Д.Н. Тогобицкая // *Сталь*. 2005. № 1. С. 79–82.
7. Технологичность высокоуглеродистой катанки на метизном переделе / Э.В. Парусов, В.В. Парусов, В.А. Луценко, А.Б. Сычков, В.В. Артемов, Л.И. Демьянова // *Стальные канаты: Сб. науч. тр. Одесса: Астропринт*, 2005. С. 110–115.
8. Скок Ю.Я. Повышение качества стали путем модифицирования // *Сталь*. 1992. № 8. С. 13–17.
9. Губенко С.И., Парусов В.В., Деревянченко И.В. Неметаллические включения в стали. Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2005. 536 с.
10. Сычков А.Б. Разработка комплексной технологии производства эффективных видов катанки из непрерывно-литой заготовки малого сечения с повышенным содержанием примесей цветных металлов и азота: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.01 и 05.16.02. Минск, 2005. 380 с.
11. Обеспечение показателей качества катанки для металлокорда / В.В. Парусов, И.В. Деревянченко, А.Б. Сычков, А.М. Нестеренко, Э.В. Парусов, М.А. Жигарев // *Металлург*. 2005. № 11. С. 45–51.
12. Малиночка Я.Н., Ковальчук Г.З. Сульфиды в сталях и чугунах. М.: Металлургия, 1988. 248 с.
13. Малиночка Я.Н., Титова Т.М., Курасова А.Н. Состав и структура глобулярных сульфидов в сталях с РЗМ // *Сталь*. 1986. № 4. С. 78–83.
14. Лякишев Н.П., Плинер Ю.Л., Лаппо С.И. Борсодержащие стали и сплавы. М.: Металлургия, 1986. 192 с.
15. Белалов Х.Н. Формирование свойств канатной проволоки // *Стальные канаты: Сб. науч. тр. Одесса: Астропринт*, 2001. С. 105–116.

УДК 669.018.9

Чуманов В.И., Пятагин Д.А., Чуманов И.В.

## УПРОЧНЕНИЕ СТАЛИ ТУГОПЛАВКОЙ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗОЙ\*

Современные металлические материалы работают в сложных условиях, характеризующихся широким интервалом температурных, в условиях высокого абразивного износа, скоростных и механи-

ческих воздействий. Анализ причин абразивного износа деталей, работающих в условиях сухого трения, показал, что в зоне контакта создаются высокие температуры, приводящие к отпуску закаленной стали и резкому снижению твердости и износостойкости. Одним из путей увеличения ме-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 07-08-00207-а.