

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., Зимина 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 металлизированном переделе. 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 внепечной обработки на УКП, металл может получить НВ из материалов, присаживаемых после вакууматора на УКП. Не отложена также и технология с применением полностью магнезиальных сталеразливочных ковшей (СК), а склонность при разливке к затягиванию ручьев аллюминийсодержащими настылями предопределяет значительный перегрев стали над расчетной температурой ликвидус, что формирует развитую дендритную ли-

квационную макроструктуру НЛЗ и способствует увеличению загрязненности стали НВ.

С целью повышения чистоты высокоуглеродистой стали по НВ и выработки критерииев 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 бельми, синтетическими шлаками (плавки 2 и 3, сталь 80КРД), модифицирование НВ смешанной лигатурой, содержащей кальций и редкоземельные металлы (серия плавок 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 ($h_{\text{НВ}} \leq 10$ мкм; плотность

$\text{HB} \leq 20 \dots 40 \text{ см}^{-2}$) 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 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 50\%$) не более 4% НВ максимальным размером 10 мкм, в зоне В ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 25 \dots 50\%$) – не более 20% и в зоне А ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 0 \dots 25\%$) – остальные НВ; в зоне А и В протяженность НВ допускается до 30 мкм. На рис. 1 для плавки 1 количество НВ (по новой

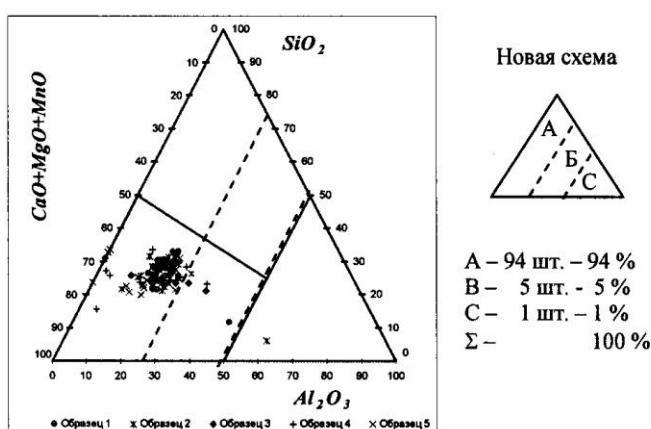


Рис. 1. Диаграмма ф. Pirelli для катанки диаметром 11.0 мм из стали марки С82Д, микролегированной ванадием (плавка 1)

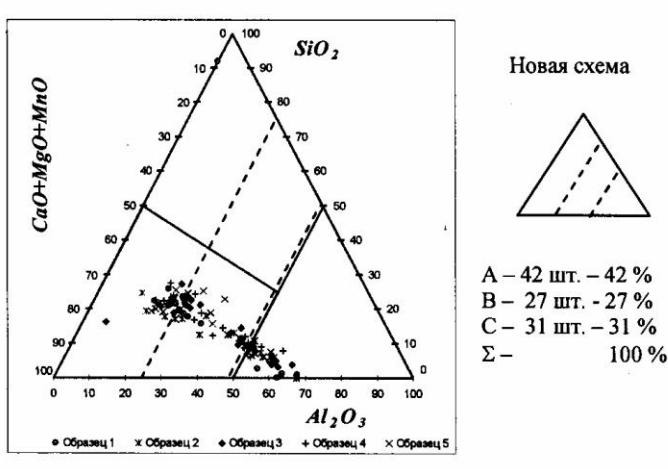
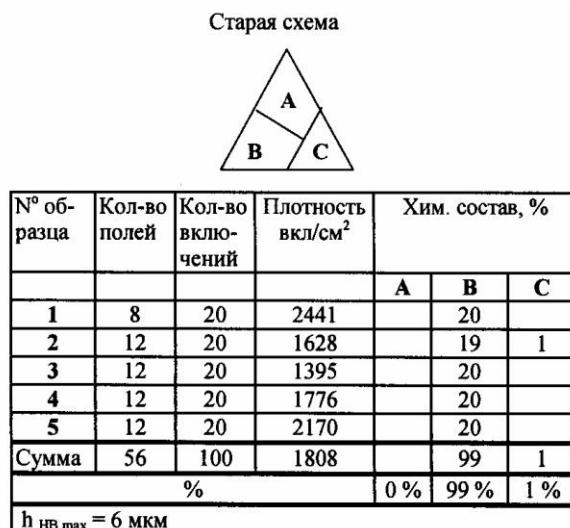


Рис. 2. Диаграмма ф. Pirelli для катанки диаметром 5.5 мм из стали марки 80КРД

Таблица 1

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

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.

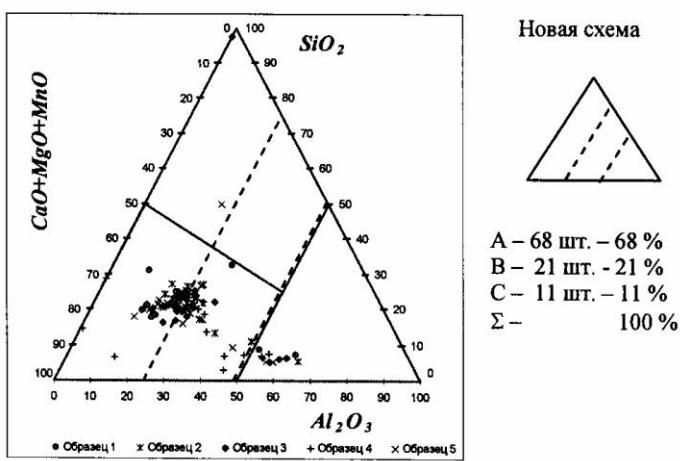
Обработка стали белыми синтетическими шлаками при сливе металла из ДСП в СК

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. Причем обработка осуществлялась белыми шлаками с УКП, полученным при производстве низкоуглеродистой стали с повышенным содержанием алюминия. Результаты металлографической оценки сведены в **табл. 1** и на **рис. 2, 3**, анализ которых показывает следующее.

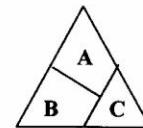
Загрязненность стали НВ в НЛЗ оценивали исследованием кованых темплетов по ГОСТ 1778, метод Л1. Следует отметить, что по индексам НВ (оксидов до $9.9 \cdot 10^{-3}$, сульфидов до $8.0 \cdot 10^{-3}$ и суммарный до $12.5 \cdot 10^{-3}$) плавка 2 несколько чище, чем плавки 3 и 1. НЛЗ плавки 3 наиболее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

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

Условный номер бунта	Оксиды		Силикаты			Сульфиды
	точечные	строчечные	недеформирующиеся	хрупкие	пластичные	
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



Старая схема



A – 68 шт. – 68 %
B – 21 шт. – 21 %
C – 11 шт. – 11 %
Σ – 100 %

№ образца	Кол-во полей	Кол-во включений	Плотность вкл/см ²	Хим. состав, %		
				A	B	C
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 %
			$h_{NVI_{max}} = 7 \text{ мкм}$			

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 Ca + 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 модифи-

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

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

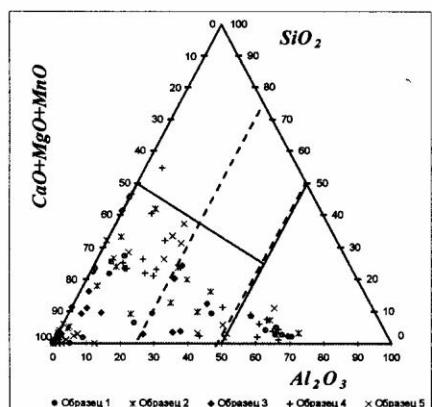
Следует отметить, что опыты проводились на стали марки С82D, микролегированной ванадием, из которой изготавливается высокопрочная катанка, а затем и проволока для производства арматурных канатов, натяжителей вантовых мостов и т.п. У такого металла предъявляются высокие требования к НВ и ликвационной однородности. Именно в этом направлении и предназначалось использование Ca + 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 Ш4, оценка по методике ММЗ)

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

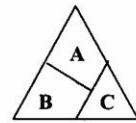


Новая схема



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

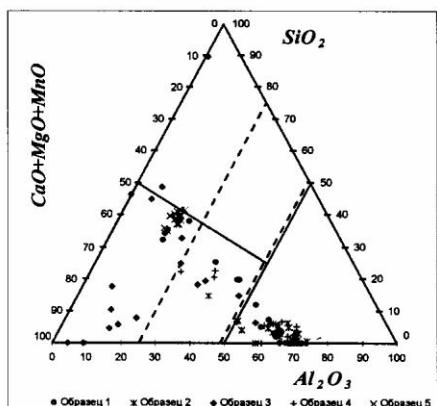
Старая схема



№ образца	Кол-во полей	Кол-во вклю-чений	Плотность вкл/см ²	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	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

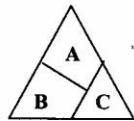


Новая схема



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

Старая схема

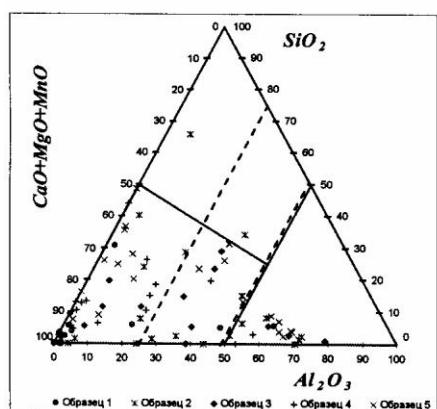
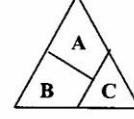


№ образца	Кол-во полей	Кол-во вклю-чений	Плотность вкл/см ²	Хим. состав, %		
				A	B	C
1	8	20	2441	7	13	
2	12	20	1628	1	19	
3	16	20	1221	2	14	4
4	10	20	1953	3	17	
5	12	20	1628	1	19	
Сумма	58	100	1683	3	44	53
			%	3 %	44 %	63 %
				$h_{HB \max} = 6 \text{ мкм}$		

Плавка 6

б

Старая схема



Новая схема



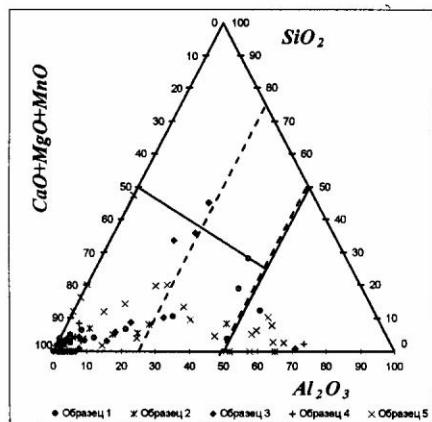
A – 67 шт. – 67 %
B – 15 шт. – 15 %
C – 18 шт. – 18 %
 Σ – 100 %

№ образца	Кол-во полей	Кол-во вклю-чений	Плотность вкл/см ²	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 С82Д
(см. также с. 66 и 67)

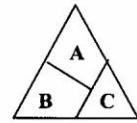


Новая схема



А – 79 шт. – 79 %
 В – 9 шт. – 9 %
 С – 12 шт. – 12 %
 Σ – 100 %

Старая схема

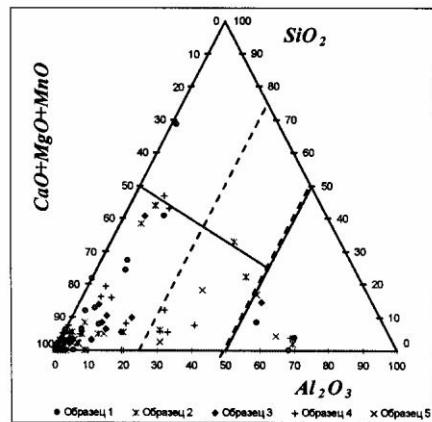
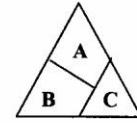


№ об-разца	Кол-во полей	Кол-во вклю-чений	Плотность вкл/см ²	Хим. состав, %		
				A	B	C
1	19	20	1028	19	1	
2	34	20	574	18	2	
3	33	20	592	1	18	1
4	24	20	814	19	1	
5	24	20	814	13	7	
Сумма	134	100	728	1	87	12
			%	1 %	87 %	12 %
				$h_{HB\ max} = 9$ МКМ		

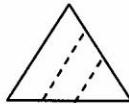
Плавка 7

Г

Старая схема



Новая схема



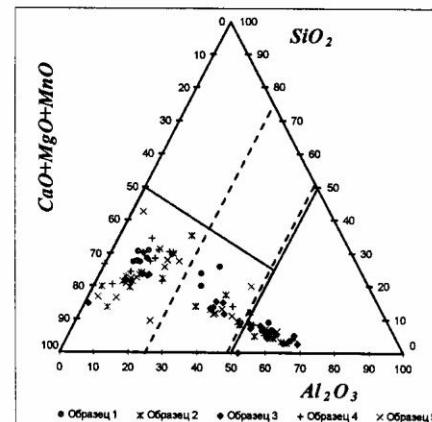
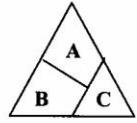
А – 84 шт. – 84 %
 В – 8 шт. – 8 %
 С – 8 шт. – 8 %
 Σ – 100 %

№ об-разца	Кол-во полей	Кол-во вклю-чений	Плотность вкл/см ²	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 %
				$h_{HB\ max} = 9$ МКМ		

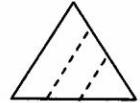
Плавка 8

Д

Старая схема



Новая схема



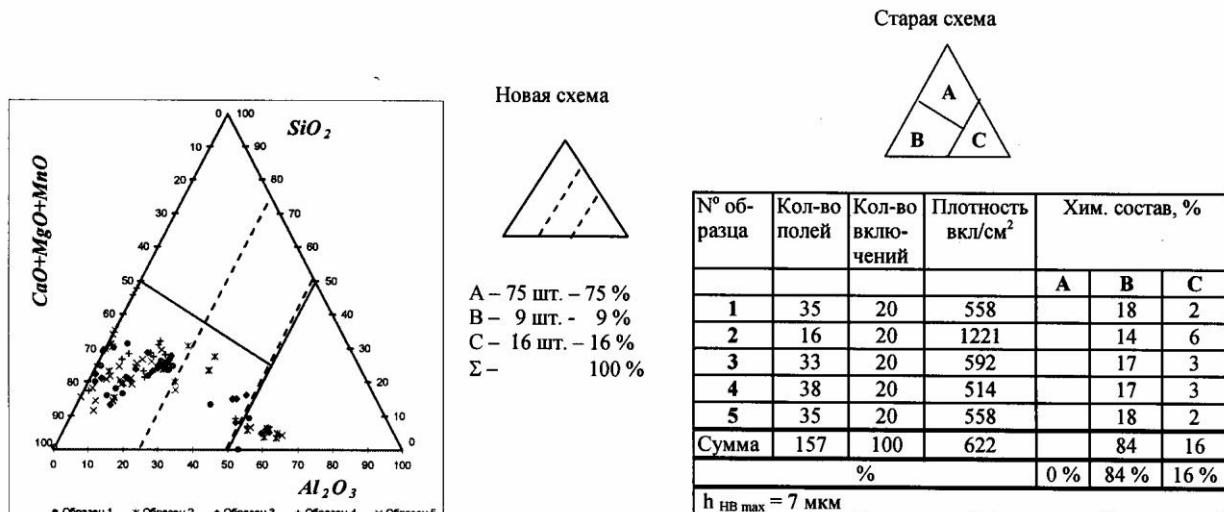
А – 49 шт. – 49 %
 В – 19 шт. – 19 %
 С – 32 шт. – 32 %
 Σ – 100 %

№ об-разца	Кол-во полей	Кол-во вклю-чений	Плотность вкл/см ²	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 %
				$h_{HB\ max} = 4$ МКМ		

Плавка 9

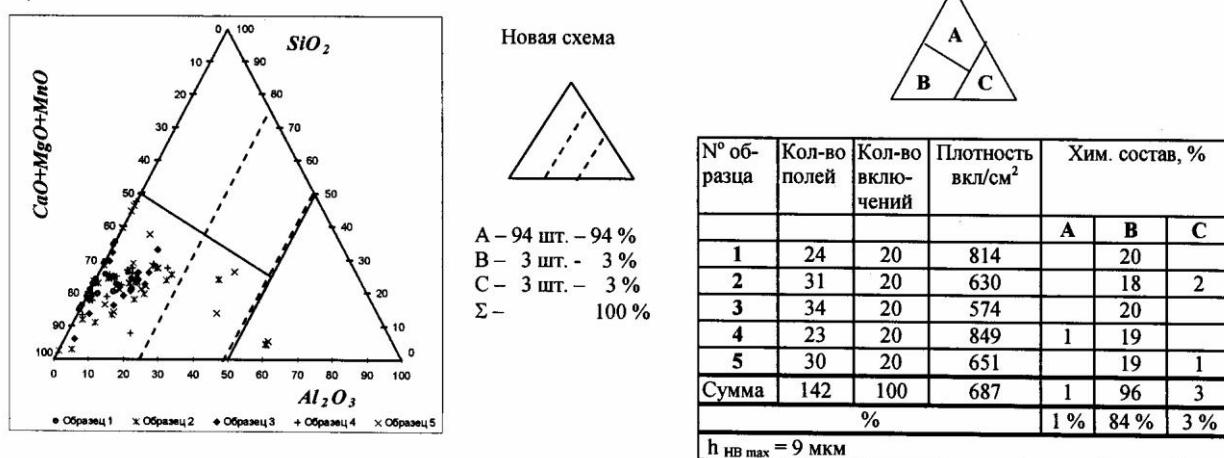
Е

Рис. 4. Продолжение



Плавка 10

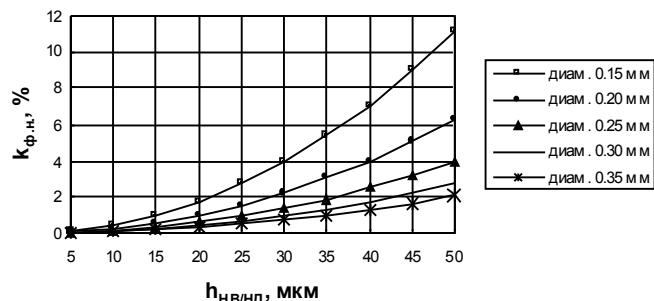
ж



Плавка 11

з

Рис. 4. Окончание



$\oslash 0.15 - k_{\text{Ф.н.}} \leq 10 \% - h \leq 47 \text{ мкм}; k_{\text{Ф.н.}} \leq 5 \% - h \leq 33 \text{ мкм}; k_{\text{Ф.н.}} \leq 3 \% - h \leq 26 \text{ мкм};$
 $\oslash 0.20 - k_{\text{Ф.н.}} \leq 5 \% - h \leq 45 \text{ мкм}; k_{\text{Ф.н.}} \leq 3 \% - h \leq 35 \text{ мкм}; \oslash 0.25 - k_{\text{Ф.н.}} \leq 3 \% - h \leq 43 \text{ мкм};$
 $\oslash\oslash 0.30 \text{ и } 0.35 \text{ мм} - \text{все значения } k_{\text{Ф.н.}} \leq 3 \% \text{ для всех } h_{\text{HB/НД}}$

Рис. 5. Зависимость коэффициента физической неоднородности ($k_{\text{Ф.н.}}$) от размера единичного недеформируемого HB ($h_{\text{HB/НД}}$) 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 плавок 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 ($h_{\text{НВ}} \leq 4$ мкм), 10 ($h_{\text{НВ}} \leq 7$ мкм) и 6 (≤ 6 мкм), остальные плавки – ≤ 9 мкм;
- по плотности НВ: 10 (622 см^{-2}); 5 (647 см^{-2}); 11 (688 см^{-2}); 4 (693 см^{-2}); 7 и 8 (729 см^{-2}) и в плавке 6 (1684 см^{-2});

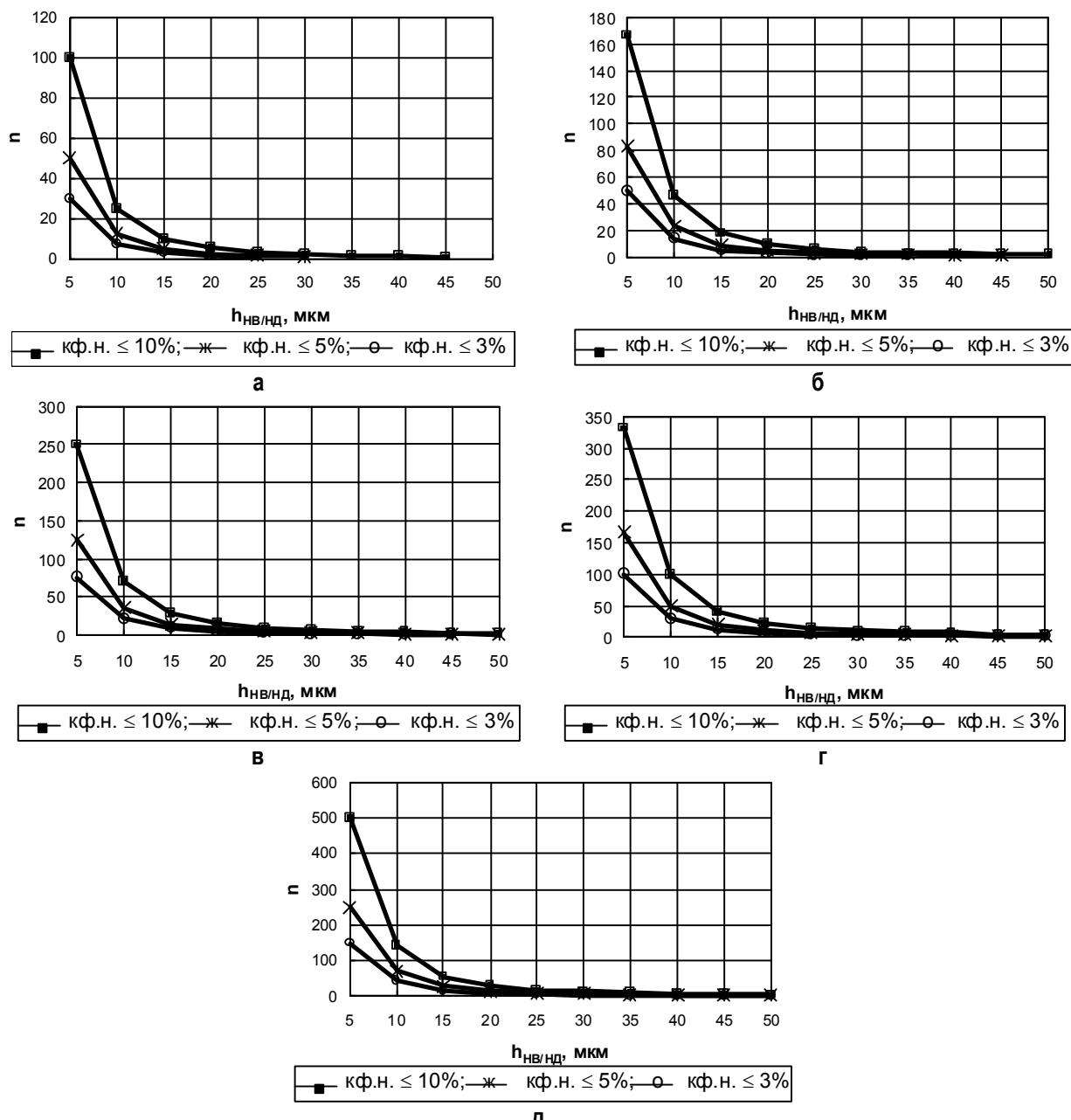


Рис. 6. Зависимость предельно допустимого значения количества НВ - [НВ] от размера НВ/НД, диаметра готовой проволоки и $k_{\text{ф.н.}}$:
 а – $\varnothing 0.15$ мм; б – $\varnothing 0.20$ мм; в – $\varnothing 0.25$ мм; г – $\varnothing 0.30$ мм; д – $\varnothing 0.35$ мм

- 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 $k_{\phi n}$ ($k_{\phi n} = S_{\text{НВ}}/S$, где $S_{\text{НВ}}$ – суммарная площадь, занимаемая недеформируемыми НВ, S – площадь поперечного сечения готовой проволоки) и эффективно, и универсально. Поэтому представляется целесообразным представить зависимость $k_{\phi n}$ от предельных размеров единичных НВ и решить обратную задачу, а именно определить количество предельно допустимых НВ в функции от размера НВ и $k_{\phi n}$. 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 $k_{\phi n}$ (%) от толщины НВ – $h_{\text{НВ}}$ и диаметра готовой проволоки (d)

Диаметр проволоки, мм	$h_{\text{НВ}}$, 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 $k_{\phi n}$ в зависимости от размера единичного недеформируемого НВ ($h_{\text{НВ/нД}}$), диаметра (0.35...0.15 мм) готовой проволоки кордового назначения. В работе [15] регламентировано допустимое значение $k_{\phi n}$ 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 $k_{\phi n}$ и диаметра готовой проволоки. Так, для диаметра готовой проволоки 0.15 мм для обеспечения $k_{\phi n}$ 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 критериальных значений необходимо определить площадь всех недеформируемых НВ в поперечном сечении катанки и рассчитать реальное значение $k_{\phi n}$. Идеальная оценка загрязненности стали НВ, по-видимому, состоит в сочетании вышеописанного метода с использованием $k_{\phi n}$ 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	$k_{\phi n}$, \leq	$h_{\text{НВ}}$, 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	-
0.15	5	50	13	5	3	2	1	-	-	-	-
0.15	3	30	8	3	2	1	-	-	-	-	-
0.20	10	167	46	18	10	6	4	3	3	2	2
0.20	5	83	23	9	5	3	2	2	1	1	-
0.20	3	50	14	5	3	2	1	1	-	-	-
0.25	10	250	71	29	16	10	7	5	4	3	3
0.25	5	125	36	14	8	5	4	3	2	2	1
0.25	3	75	21	9	5	3	2	2	1	1	-
0.30	10	333	100	40	22	14	10	9	8	4	3
0.30	5	167	50	20	11	7	5	4	3	2	2
0.30	3	100	30	12	7	4	3	2	2	1	1
0.35	10	500	143	56	30	17	14	10	8	6	5
0.35	5	250	71	28	15	10	7	5	4	3	3
0.35	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_{ph} и методики фирмы Pirelli.

Библиографический список

- 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.
- 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.
- 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.
- Парусов В.В., Вилипп А.И., Сычков А.Б. Влияние примесных элементов на качество углеродистой стали // Сталь. 2002. № 12. С. 53–55.
- 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.
- 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.
- Технологичность высокоуглеродистой катанки на метизном переделе / Э.В. Парусов, В.В. Парусов, В.А. Луценко, А.Б. Сычков, В.В. Артемов, Л.И. Демьяннова // Стальные канаты: Сб. науч. тр. Одесса: Астропринт, 2005. С. 110–115.
- Сок Ю.Я. Повышение качества стали путем модифицирования // Сталь. 1992. № 8. С. 13–17.
- Губенко С.И., Парусов В.В., Деревянченко И.В. Неметаллические включения в стали. Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2005. 536 с.
- 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.
- 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.
- Малиночка Я.Н., Ковальчук Г.З. Сульфиды в сталях и чугунах. М.: Металлургия, 1988. 248 с.
- Малиночка Я.Н., Титова Т.М., Курасова А.Н. Состав и структура глобуллярных сульфидов в сталях с РЗМ // Сталь. 1986. № 4. С. 78–83.
- Лякишев Н.П., Плиннер Ю.Л., Лаппо С.И. Борсодержащие стали и сплавы. М.: Металлургия, 1986. 192 с.
- 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., Пятыгин Д.А., Чуманов И.В.

УПРОЧНЕНИЕ СТАЛИ ТУГОПЛАВКОЙ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗОЙ*

Современные металлические материалы работают в сложных условиях, характеризуемых 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.