



*The experimental testing of application of fully magnesia casting ladles is carried out with the purpose of reduction of high-carbon steel contamination with nonmetallic impurities. Methods of appraisal of nonmetallic impurities and choice of their rating criteria are analyzed.*

А. Б. СЫЧКОВ, М. А. ЖИГАРЕВ, А. В. ПЕРЧАТКИН, А. В. ПЕРЕГУДОВ,  
С. Ю. ЖУКОВА, О. Г. ГУНКИНА, О. Н. ВЕРЕЩАГИНА, СЗАО «ММЗ»,  
Е. П. БАРАДЫНЦЕВА, В. И. ГРИЦАЕНКО, РУП «БМЗ»

УДК 669.

## НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Качественные параметры высокоуглеродистой катанки нормируются в нормативной документации (НД) и требованиях 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 ее переработки на метизном переделе. Одной из этих проблем является чистота стали по НВ, повышение которой способствует улучшению исходной пластичности катанки и деформируемости ее при волочении в проволоку и 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 отлажена также и технология с применением полностью магнезиальных сталеразливочных ковшей (СК), а склонность при разливке к затягиванию ручьев алюминийсодержащими настывшими предопределяет значительный перегрев стали над расчетной темпера-

турой ликвидус, что формирует развитую дендритную ликвационную макроструктуру НЛЗ и способствует увеличению загрязненности стали НВ.

С целью повышения чистоты высокоуглеродистой стали по НВ и выработки критериев предельно допустимой загрязненности металла нами были проведены несколько мероприятий. К ним относятся применение полностью магнезиальных кирпичных сталеразливочных ковшей, в том числе и днища СК (плавка 1, сталь марки С82D), 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 С82D – опытные и контрольные плавки).

### Применение полностью магнезиального СК

Неметаллические включения в НЛЗ (плавка 1) количественно оценивались на кованых пробах от 6 темплетов, отобранных от каждого ручья МНЛЗ, по методике 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-я группа (5,9–11,2 мкм) – 0,7–4,2% – оксиды и 0,8–6,7% – сульфиды;
- 3-я группа (11,5–16,8 мкм) – 0–0,9% – оксиды и 0–1,8% – сульфиды;
- 4-я группа (17,1–22,4 мкм) – 0–0,9% – оксиды; сульфидов нет;
- 5-я группа (22,7–28 мкм) – 0–0,3% – оксиды; сульфидов нет;
- 7-я группа (33,8–39,2 мкм) – 0–0,7% – оксиды; сульфидов нет;

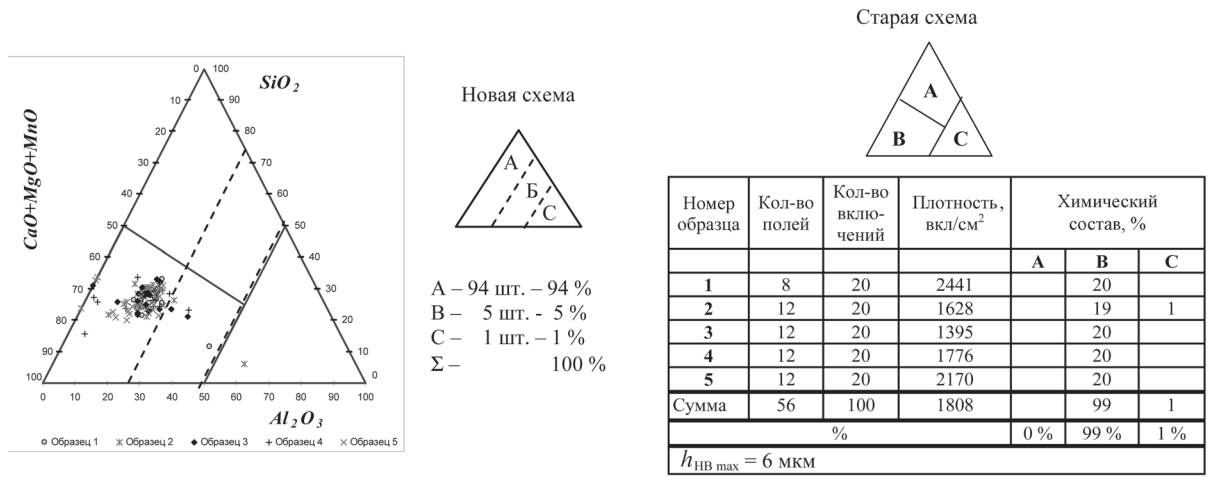


Рис. 1. Диаграмма фирмы «Pirelli» для катанки диаметром 11 мм из стали марки С82D, микролегированной ванадием (плавка 1)

т. е. в кованных 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 (т. е. 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 ( $h_{NB} \leq 10 \text{ мкм}$ ; плотность НВ  $\leq 20\text{--}40 \text{ см}^{-2}$ ) 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  $1395\text{--}2441/1808 \text{ см}^{-2}$ , 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 16.06.2004 г.) допускается в зоне С ( $Al_2O_3 \geq 50\%$ ) не более 4% НВ с максимальным размером 10 мкм, в зоне В ( $Al_2O_3 = 25\text{--}50\%$ ) – не более 20% и в зоне А ( $Al_2O_3 = 0\text{--}25\%$ ) – остальные НВ; в зонах А и В протяженность НВ допускается до 30 мкм. На рис. 1 для плавки 1 количество НВ (по новой методике)

Таблица 1. Оценка НВ в катанке из стали 80КРД, обработанной белыми шлаками, по ГОСТ 1778 (метод Ш4)

| Условный номер бунта | Оксиды   |            | Силикаты          |              |             | Сульфиды |
|----------------------|----------|------------|-------------------|--------------|-------------|----------|
|                      | точечные | строчечные | недеформирующиеся | хрупкие      | пластичные  |          |
| Плавка 2             |          |            |                   |              |             |          |
| б.1                  | 0,5      | 0          | 2.0 (13 мкм)      | 1,5          | 0           | 1,0      |
| б.2                  | 0,5      | 0          | 1.0               | 1,5          | 2.0 (4 мкм) | 1,0      |
| б.3                  | 0,5      | 0          | 1.5 (12 мкм)      | 1,0          | 0           | 0,5      |
| б.4                  | 0,5      | 0          | 1.5 (12 мкм)      | 1,0          | 0           | 0,5      |
| б.5                  | 0,5      | 0          | 0.5               | 1,0          | 0           | 0,5      |
| б.6                  | 0,5      | 0          | 1.0               | 1,0          | 0           | 1,0      |
| Средний балл         | 0,5      | 0          | 1.3               | 1,2          | 0,3         | 0,8      |
| Плавка 3             |          |            |                   |              |             |          |
| б.1                  | 0,5      | 0          | 1.5 (22 мкм)      | 3,0          | 1,0         | 1,0      |
| б.2                  | 0,5      | 0          | 0.5               | 1,5          | 1,0         | 1,0      |
| б.3                  | 0,5      | 0          | 0.5               | 1,0          | 0,5         | 1,0      |
| б.4                  | 0,5      | 0          | 0.5               | 1,0          | 0,5         | 0,5      |
| б.5                  | 0,5      | 0          | 3.0 (62 мкм)      | 0,5          | 0,5         | 0,5      |
| б.6                  | 0,5      | 0          | 0.5               | 2.0 (16 мкм) | 0,5         | 1,0      |
| Средний балл         | 0,5      | 0          | 1.1               | 1,5          | 0,7         | 0,8      |

в зоне С составляет 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 магниезальной 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. Для этого провели опытное производство высокоуглеродистой стали марки 80КРД (плавки 2 и 3) и катанки из нее. Причем обработку осуществляли белыми шлаками с УКП, полученными при производстве низкоуглеродистой стали с повышенным содержанием алюминия. Результаты металлографической оценки приведены в табл. 1 и на рис. 2, 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 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 более 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, может дать положительный эффект – освобождение от НВ зоны С диаграммы Pirelli. С другой стороны, име-

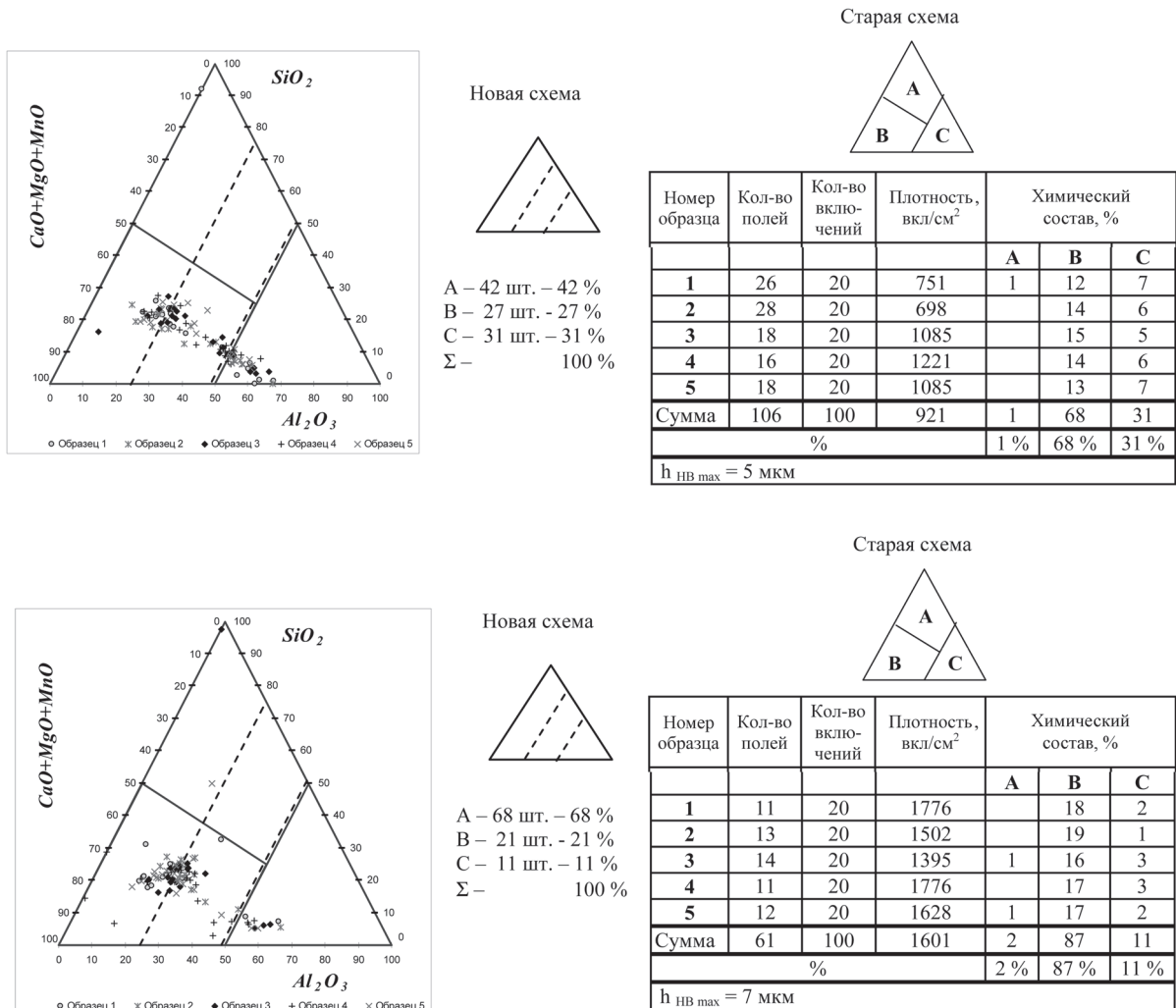
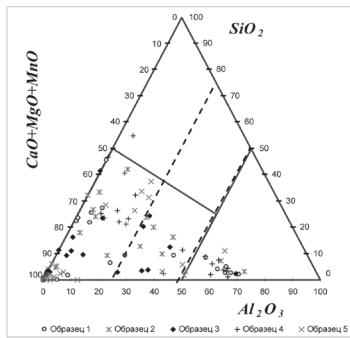


Рис. 2. Диаграмма фирмы «Pirelli» для катанки диаметром 5,5 мм из стали марки 80КРД

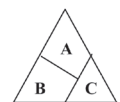


Новая схема



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

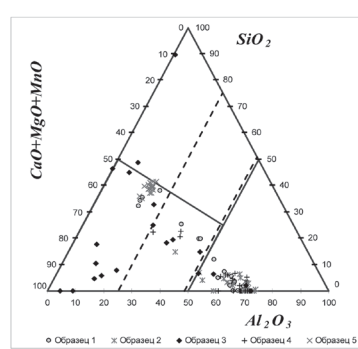
Старая схема



| № 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<sub>НВ max</sub> = 9 МКМ

а

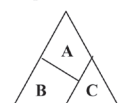


Новая схема



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

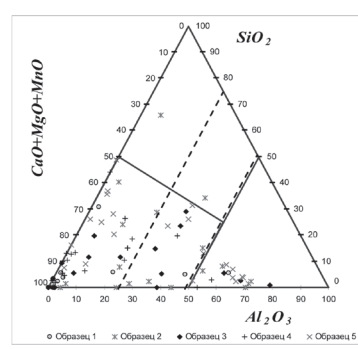
Старая схема



| № 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<sub>НВ max</sub> = 6 МКМ

б



Новая схема



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

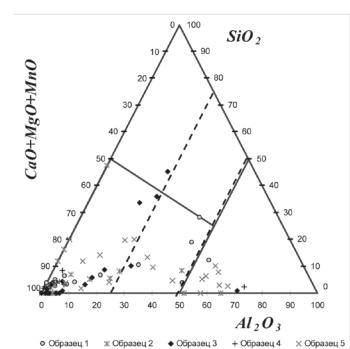
Старая схема



| № 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<sub>НВ max</sub> = 9 МКМ

в

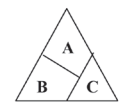


Новая схема



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

Старая схема

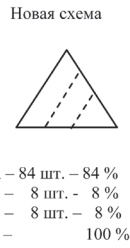
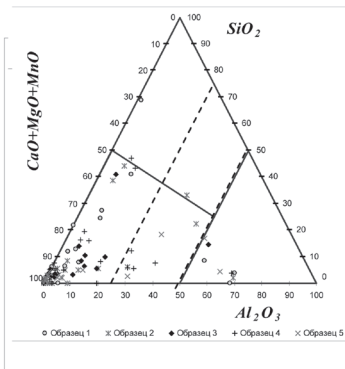


| № образца | Кол-во полей | Кол-во включений | Плотность вкл/см <sup>2</sup> | Хим. состав, % |      |      |
|-----------|--------------|------------------|-------------------------------|----------------|------|------|
|           |              |                  |                               | 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 % |

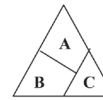
h<sub>НВ max</sub> = 9 МКМ

г

Рис. 3. Диаграмма фирмы «Pigelli» для катанки диаметром 11,0 мм из стали марки С82D: а – плавка 4;



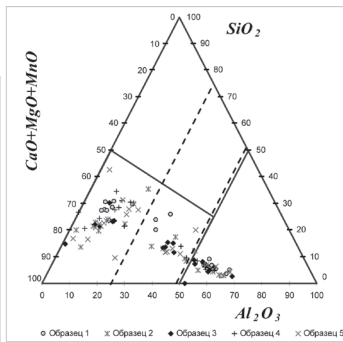
Старая схема



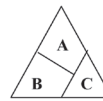
| № образца | Кол-во полей | Кол-во включений | Плотность вкл/см <sup>2</sup> | Хим. состав, % |      |     |
|-----------|--------------|------------------|-------------------------------|----------------|------|-----|
|           |              |                  |                               | A              | 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

д



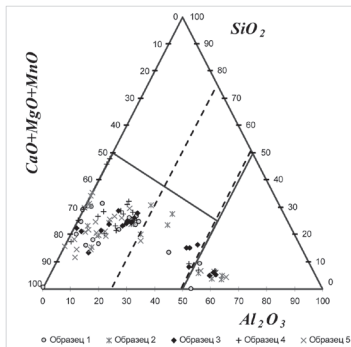
Старая схема



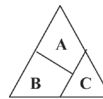
| № образца | Кол-во полей | Кол-во включений | Плотность вкл/см <sup>2</sup> | Хим. состав, % |      |      |
|-----------|--------------|------------------|-------------------------------|----------------|------|------|
|           |              |                  |                               | 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

е



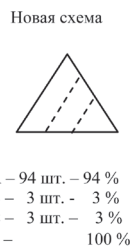
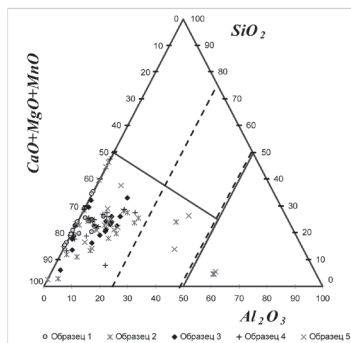
Старая схема



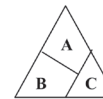
| № образца | Кол-во полей | Кол-во включений | Плотность вкл/см <sup>2</sup> | Хим. состав, % |      |      |
|-----------|--------------|------------------|-------------------------------|----------------|------|------|
|           |              |                  |                               | 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

ж



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

з

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 |   |                       | Σ НВ в одном образце, min-max/Х <sub>ср</sub> | Максимальная толщина, h <sub>НВ</sub> , мкм, тип НВ | Максимальный балл НВ            |
|--------------|-------------------------|--|---|-----------------------|---|---|---------------------------------|
|              |                         | Удельные средние, ΣХ <sub>ср</sub> /n        | Удельные, максимальные ΣХ <sub>max</sub> /n | Сумма удельных НВ, ΣΣ |   |   |                                 |
| 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                  |
|              | Δ(+)-(-)                | +0,22  | +0,47                                       | +0,68                 | +1,17   | СН = +6, СХ = +32, СП = +16                         | СХ = +2<br>СН = +0,5<br>СП = +4 |

ется 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 модификатором 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 или Pr прозедиума) в серии плавов 4–11. При этом ввод опытной лигатуры несколько варьировался:

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

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

В табл. 2 и на рис. 3 приведены результаты металлургического исследования НВ, анализ которых показывает следующее.

Лучшие результаты по чистоте катанки от НВ наблюдаются (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 плавов этот показатель загрязненности стали НВ почти в 2 раза больше (2,37–2,58). Толщина НВ составляет в лучших плавках СХ – 13 мкм (плавка 9); СН – 16 и СХ – 16 мкм (плавка 11); СН – 15 мкм (10) и СХ – 8 мкм (плавка 6); в других плавках – СХ – 20 мкм (плавка 7); СХ – 48 мкм (плавка 5); СХ – 25 и СН – 22 мкм (плавка 8); СН – 15 и СХ – 18 мкм (плавка 4).

Приведенные результаты подтверждаются и диаграммами Pirelli, но со своими оригинальными вариациями. Так, например:

- по толщине НВ лучшие плавки 9 (h<sub>НВ</sub> ≤ 4 мкм), 10 (h<sub>НВ</sub> ≤ 7 мкм) и 6 (≤ 6 мкм), остальные плавки ≤ 9 мкм;

- по плотности НВ – плавки 10 (622 см<sup>-2</sup>); 5 (647 см<sup>-2</sup>); 11 (688 см<sup>-2</sup>); 4 (693 см<sup>-2</sup>); 7 и 8 (729 см<sup>-2</sup>) и в плавке 6 (1684 см<sup>-2</sup>);

- по загрязненности НВ в зоне С: плавки 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<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > 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**

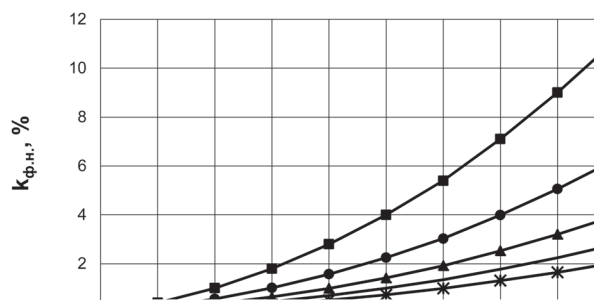


Рис. 4. Зависимость коэффициента физической неоднородности  $k_{фн}$  от размера единичного недеформируемого НВ  $h_{НВ/НД}$  и диаметра готовой проволоки ( $d$ , мм): диаметр 0,15 мм –  $k_{фн} \leq 10\%$  –  $h \leq 47$  мкм;  $k_{фн} \leq 5\%$  –  $h \leq 33$  мкм;  $k_{фн} \leq 3\%$  –  $h \leq 26$  мкм; диаметр 0,20 мм –  $k_{фн} \leq 5\%$  –  $h \leq 45$  мкм;  $k_{фн} \leq 3\%$  –  $h \leq 35$  мкм; диаметр 0,25 мм –  $k_{фн} \leq 3\%$  –  $h \leq 43$  мкм; диаметр 0,30 и 0,35 мм – все значения  $k_{фн} \leq 3\%$  для всех  $h_{НВ/НД}$

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 единич-

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 |  |

Таблица 4. Зависимость допускаемого количества НВ от толщины НВ и диаметра готовой проволоки  $d$

| Диаметр проволоки, мм | $k_{фн} \leq$ | $h_{НВ}$ , мкм |     |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------------------|---------------|----------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                       |               | 5              | 10  | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| 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  |

ных 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. 4, 5 и 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 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 (рис. 4, табл. 3) можно установить, что 5%-ный барьер проходят единичные НВ толщиной не более 35 мкм

для диаметра проволоки 0,15 мм, 45 мкм – 0,20 мм и т. д. Однако, как правило, в реальном металле имеется множество мелких и более крупных НВ.

В табл. 4 и на рис. 5 приведено 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 диаметром 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-

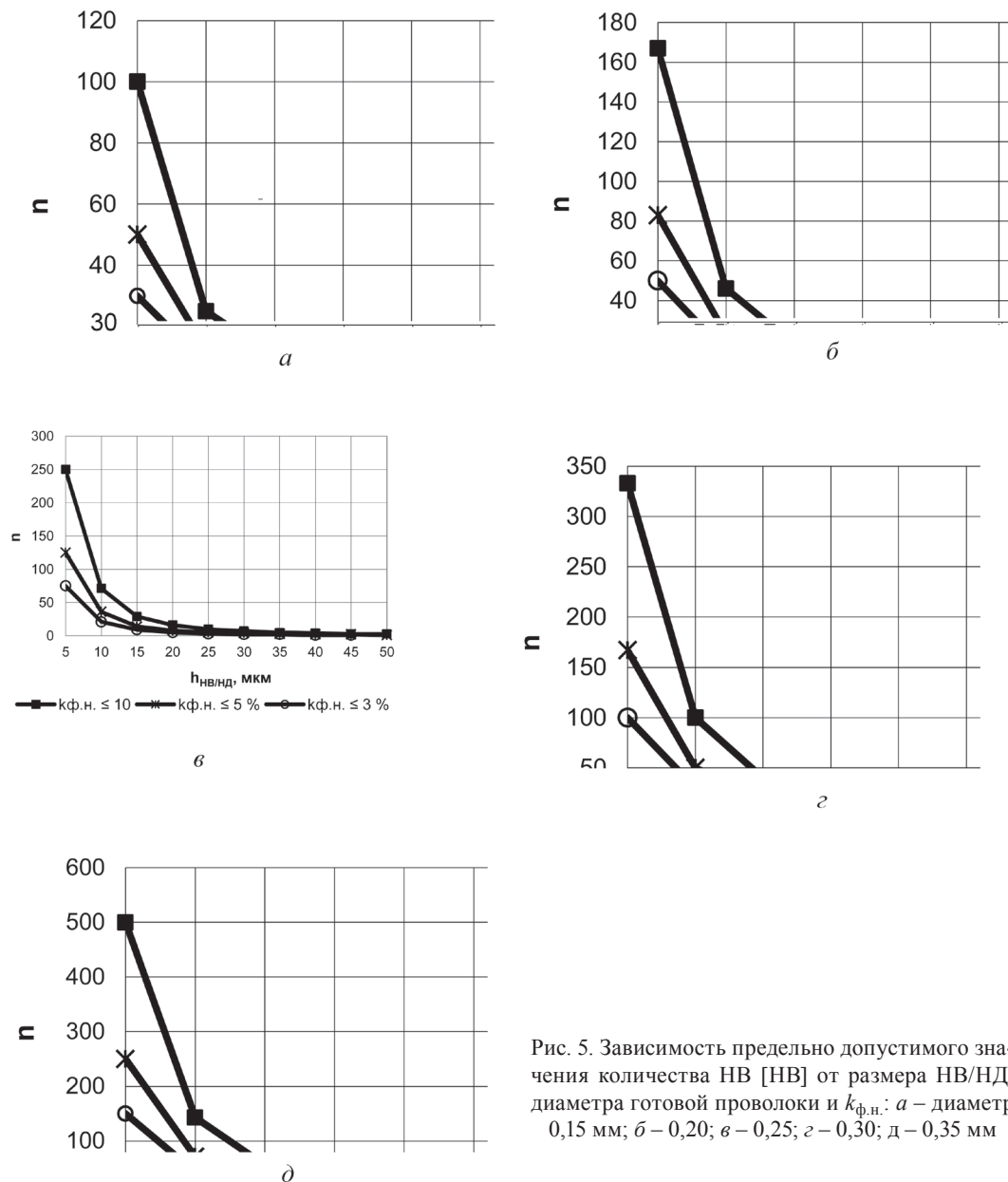


Рис. 5. Зависимость предельно допустимого значения количества НВ [НВ] от размера НВ/НД, диаметра готовой проволоки и  $k_{фн}$ : а – диаметр 0,15 мм; б – 0,20; в – 0,25; г – 0,30; д – 0,35 мм



видимому, состоит в сочетании описанного выше метода с использованием  $k_{\text{фн}}$  и новой методики фирмы «Pirelli», ограничивающей НВ по содержанию  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

### Выводы

1. С целью снижения загрязненности высокоуглеродистой стали НВ проведено опытное опробование применения полностью магниезальных 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.

2. Использование полностью магниезальных СК дало положительный эффект – количество НВ с  $\text{Al}_2\text{O}_3$  более 50% минимально и отвечает требованиям фирмы «Pirelli» для катанки под металлокорд.

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

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

5. Наиболее оптимальным для оценивания НВ является сочетание  $k_{\text{фн}}$  и методики фирмы «Pirelli».

### Литература

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 и др. // *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 и др. // *Сталь*. 2005. № 1. С. 79–82.
7. Технологичность высокоуглеродистой катанки на метизном переделе / Э. В. Парусов, В. В. Парусов, В. А. Луценко и др. // *Сб. науч. тр. Стальные канаты*. 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.
10. Сычков А. Б. Разработка комплексной технологии производства эффективных видов катанки из непрерывнолитой заготовки малого сечения с повышенным содержанием примесей цветных металлов и азота: Дис. ... д-ра техн. наук. Мн., 2005.
11. Обеспечение показателей качества катанки для металлокорда / В. В. Парусов, И. В. Деревянченко, А. Б. Сычков, А. М. Нестеренко // *Металлург*. 2005. № 11. С. 45–51.
12. Малиночка Я. Н., Ковальчук Г. З. Сульфиды в сталях и чугунах. М.: Металлургия, 1988.
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.
15. Белалов Х. Н. Формирование свойств канатной проволоки // *Сб. науч. тр. Стальные канаты*. Одесса: Астропринт, 2001. С. 105–116.