

УДК 669.184

*А.А. Уманский, Я.В. Денисов***Сибирский государственный индустриальный университет****ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОИЗВОДСТВА СЛИТКОВ
КОНВЕРТЕРНОЙ СТАЛИ НА КАЧЕСТВО ИХ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ**

Процесс производства и обработки стали является многостадийным, что предопределяет сложный и неоднозначный характер влияния отдельных технологических параметров на показатели качества стальных слитков [1, 2]. Указанный факт обуславливает необходимость комплексного подхода к анализу процессов формирования качества стальных слитков с применением современных методов статистической обработки данных [3, 4].

С целью определения закономерностей влияния параметров выплавки, внепечной обработки и разлива конвертерной стали на величину отбраковки слитков в условиях АО «ЕВРАЗ – Западно-Сибирский металлургический комбинат» («ЕВРАЗ ЗСМК») проведены статистические исследования с использованием методики множественного регрессионного анализа. В качестве параметра оптимизации использовали величину дополнительной обрезки слитков по внутренним дефектам.

Базой для проведения анализа явились 200 плавов стали марки Зпс текущего производства кислородно-конвертерных цехов № 1 и № 2 (ККЦ-1 и ККЦ-2 соответственно).

В результате установлено значимое влияние следующих параметров на количество брака по внутренним дефектам слитков: температура разлива стали (в интервале 1533 – 1550 и 1536 – 1557 °С для плавов ККЦ-1 и ККЦ-2); продолжительность разлива плавки (в интервале 18 – 45 и 17 – 45 мин для плавов ККЦ-1 и ККЦ-2); длительность «искрения» (газовыделения) слитков при разливе (в интервале 6 – 60 и 4 – 38 с для плавов ККЦ-1 и ККЦ-2).

Уравнения регрессии в натуральном масштабе для плавов ККЦ-1 и ККЦ-2 со значащими коэффициентами имеют вид:

$$D_{\text{в}} = 73,425 - 0,047t_{\text{разл}} + 0,037T_{\text{разл}} - 0,021T_{\text{искр}};$$

$$D_{\text{в}} = 54,232 - 0,035t_{\text{разл}} + 0,043T_{\text{разл}} - 0,019T_{\text{искр}}$$

где $D_{\text{в}}$ – количество дополнительной обрезки слитков по внутренним дефектам, т/плавка; $t_{\text{разл}}$ – температура разлива стали, С; $T_{\text{разл}}$ – продолжительность раз-

ливы плавки, мин; $T_{\text{искр}}$ – длительность «искрения» (газовыделения) слитков при разливе, с.

Из полученных уравнений регрессии следует, что повышение температуры разлива слитков и продолжительности «искрения» (газовыделения) слитков в рассматриваемых интервалах изменения этих параметров снижают количество дополнительной обрезки слитков по внутренним дефектам, а увеличение продолжительности разлива плавки способствуют увеличению дополнительной обрезки со слитков.

Механизм влияния температуры разлива на количество дополнительной обрезки слитков заключается в следующем: при пониженной температуре разлива повышается вязкость стали, в результате затрудняется процесс всплывания неметаллических включений и последующего их удаления при технологической обрезки головной части слитка. В соответствии с известными закономерностями затвердевания стали неметаллические включения концентрируются в образующихся внутренних несплошностях слитка, которые в слитках полуспокойной стали расположены до уровня 35 – 45 % высоты слитка. Как правило, неметаллические включения представляют собой сложные оксиды с низкой температурой плавления и при температурах прокатки слитков находятся в жидкой фазе. В результате при технологической обрезки слитков после прокатки на блюминге обнаруживается так называемый «жидкий шлак», представляющий собой скопление неметаллических включений в расплавленном состоянии. В ряде случаев неметаллические включения находятся в твердой фазе: тогда причина дополнительной обрезки фиксируется как расслой или рыхлость. При отсутствии значительных скоплений неметаллических включений расслой и рыхлость в процессе прокатки на блюминге полностью завариваются и необходимость дополнительной обрезки не возникает. Механизм влияния продолжительности разлива на количество дополнительной обрезки аналогичен влиянию вышерассмотренного параметра с той разницей, что длительность разлива определяет не начальную, а конечную температуру разлива стали (то есть температуру разлива последних слитков).

Результаты металлографических исследований проб стали 3пс на выпуске из конвертера

| Образец | Загрязненность неметаллическими включениями по видам, максимальный балл | | | |
|---------|---|---------------------|-----------------|-------------------|
| | Силикаты недеформирующиеся | Силикаты пластичные | Оксиды точечные | Оксиды строчечные |
| 1 | 3а, 3б | - | 2а | - |
| 2 | 3а | - | 2а | - |
| 3 | 5а | - | 3а | - |
| 4 | 2б | 3а | 4а | - |
| 5 | 3б | - | 4а | 4а |
| 6 | 3б | - | 4а | - |
| 7 | 2б | - | 2а | - |
| 8 | 3а | - | 1а | - |
| 9 | 1а; 1б | - | 2а | - |
| 10 | 2б | - | 2а | - |
| 11 | 4а; 4б | - | 1а | - |
| 12 | 2б | 1а | 1а | - |

Влияние длительности «искрения» (газовыделения) при разливе слитков полуспокойной стали на количество дополнительной обрести объясняется тем фактом, что этот параметр служит показателем оптимальной степени раскисленности стали. В свою очередь от степени раскисленности полуспокойной стали напрямую зависит расположение усадочных пустот в слитке. При нормальной раскисленности, когда интенсивность газовыделения достаточна, над усадочной раковиной формируется «мост» пузыристого металла толщиной, достаточной для надежной изоляции раковины от атмосферы, благодаря чему последняя заваривается при прокатке. В случае перераскисления, показателем которого служит незначительная длительность «искрения» металла в изложнице, в слитках наблюдаются незначительная толщина «моста» и недостаточно изолированная усадочная раковина, что ведет к появлению дополнительной обрести.

С целью определения вида и количественного состава неметаллических включений в стали на выпуске из конвертера и в деформированных слитках проведены металлографические исследования. Для проведения исследований использовали оборудование Центра коллективного пользования «Материаловедение» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», в частности металлографический микроскоп OLIMPUS GX-51, оснащенный цифровой металлографической камерой и предназначенный для получения в отраженном свете светлопольных изображений микроструктуры, а также изображений в поляризованном свете и рентгенофлюоресцентный волнодисперсионный спектрометр Shimadzu XRF-1800. Отбор проб жидкого металла для проведения исследований проводили после окончания продувки с использованием одноразовых погружных пробоотборников. Анализ неметаллических включений в пробах проводили по стандартной методике по-

луколичественного анализа по ГОСТ 1778 – 70 (увеличение 100 крат.). Сущность указанной методики заключается в сравнении наблюдаемых в нетравленном микрошлифе включений со стандартными эталонными пятибалльными шкалами. При этом шкалы охватывают неметаллические включения нескольких видов, наиболее часто встречающихся в стали (оксиды строчечные, оксиды точечные, силикаты хрупкие, силикаты пластичные, силикаты недеформирующиеся, сульфиды, нитриды и карбонитриды строчечные, нитриды и карбонитриды точечные, нитриды алюминия). Применяемые для оценки шкалы являются пятибалльными. При этом наименее загрязненный металл оценивается баллом 1, а наиболее загрязненный – баллом 5. В основу первого балла положена определенная площадь, занимаемая включениями и возрастающая при переходе к последующим баллам в геометрической прогрессии с множителем 2.

По полученным в результате металлографического анализа данным наиболее распространенными видами неметаллических включений в стали марки 3пс являются силикаты недеформирующиеся и оксиды точечные: указанные виды неметаллических включений зафиксированы во всех анализируемых пробах (см. таблицу).

При этом загрязненность включениями существенно отличается от балла 1а (единичные включения минимально фиксируемого размера) до баллов 4б (множественные крупные включения) и 5а (наиболее крупные единичные включения) (рис. 1).

Силикаты пластичные в виде единичных включений присутствуют только в двух пробах, оксид строчечный выявлен только в одной пробе. С целью анализа влияния химического состава стали на загрязненность неметаллическими включениями проведены дополнительные исследования. По полученным данным повышение со-

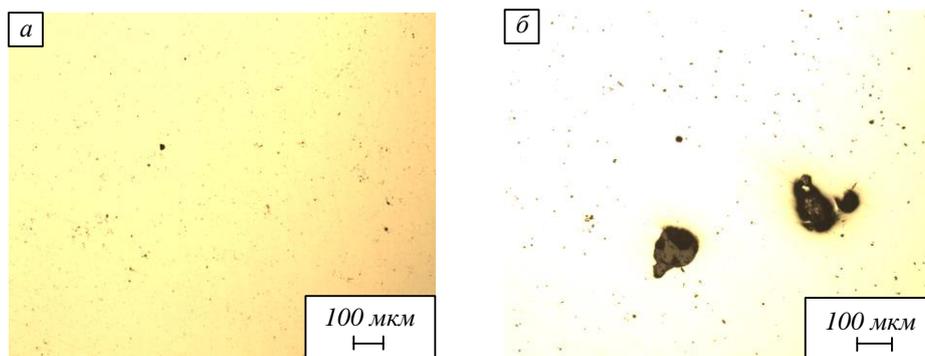


Рис. 1. Неметаллические включения в конвертерной стали:

a – силикаты недеформирующиеся и оксиды точечные, балл 1а; *б* – силикаты недеформирующиеся, балл 5а, и оксиды точечные, балл 2а

держания углерода на выпуске от 0,04 до 0,09 % и марганца от 0,07 до 0,15 % обуславливает значимое снижение загрязненности неметаллическими включениями (рис. 2). Влияние углерода на содержание и активность кислорода в конвертерной стали очевидно и не требует пояснений, а влияние марганца обусловлено замедлением процесса кипения в конце продувки при низком (менее 0,08 – 0,10 %) содержании углерода, что подтверждается данными работ [5 – 7].

Повышение концентрации марганца в стали в конце продувки приводит к снижению содержания кислорода, что объясняется обратной зависимостью между активностью закиси железа в шлаке и содержанием марганца в металле [8 – 11].

Таким образом, можно констатировать, что повышение содержания углерода и марганца в стали на выпуске из конвертера способствует снижению загрязненности стали неметаллическими включениями в виде силикатов недеформирующихся и оксидов точечных.

Проведенными исследованиями образцов подтверждено наличие значительного количества неметаллических включений в заготовках

стали марки 3пс, прокатанных из разлитых в изложницы слитков (рис. 3): силикаты недеформирующиеся (балл до 3а); оксиды точечные (балл до 2а); силикаты пластичные (балл до 2а). Также обнаружено незначительное количество сульфидов (балл 1а).

Выводы. По результатам проведенных в условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК» исследований установлено значимое влияние на количество дополнительной обрезки слитков стали марки 3пс параметров их разливки. Так, повышение температуры разливки слитков и продолжительности «искрения» (газовыделения) слитков снижают количество дополнительной обрезки слитков по внутренним дефектам, а увеличение продолжительности разливки плавки способствует увеличению количества дополнительной обрезки со слитков. По полученным в результате металлографического анализа данным наиболее распространенными видами неметаллических включений в стали марки 3пс на выпуске из конвертера и в деформированных слитках являются силикаты недеформирующиеся и оксиды точечные.

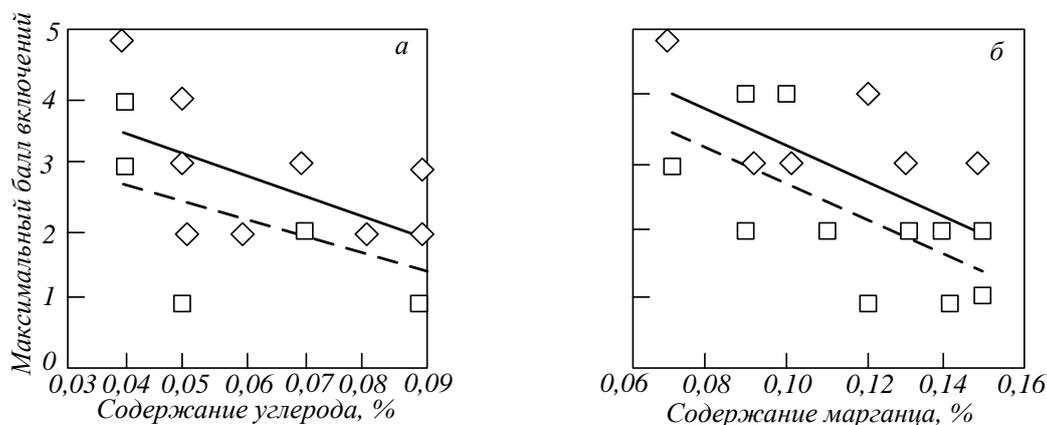


Рис. 2. Влияние содержания углерода (*a*) и марганца (*б*) в стали на выпуске из конвертера на загрязненность неметаллическими включениями:

◇ – силикаты недеформирующиеся; □ – оксиды точечные;
 — — — — линейный (силикаты недеформирующиеся); - - - - - линейный (оксиды точечные)

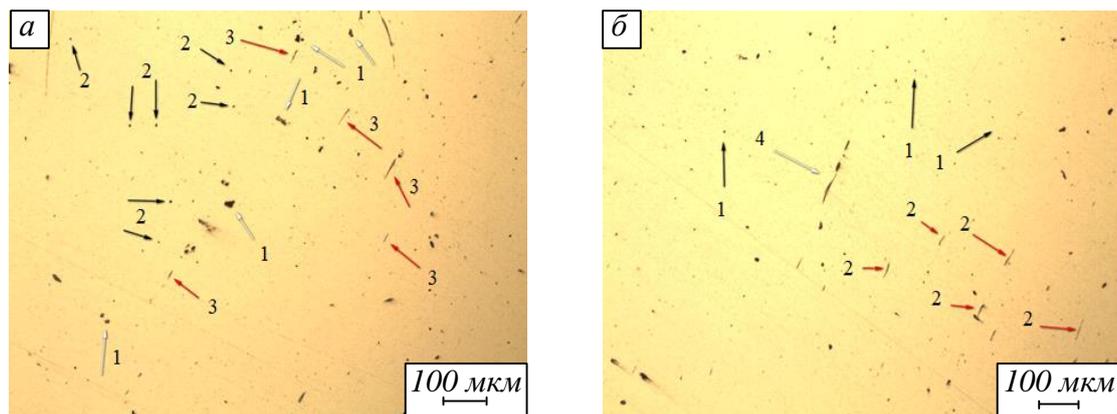


Рис. 3. Микроструктура слитков стали марки 3пс после деформации:
1 – силикаты недеформирующиеся; 2 – оксиды точечные; 3 – силикаты пластичные; 4 – сульфиды

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Уманский А.А. Исследование процессов формирования качества металлопродукции ответственного назначения на переделе сталь-прокат // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 8-2. С. 335 – 339.
2. Кадыков В.Н., Уманский А.А. Применение статистических моделей для оптимизации технологии производства заготовок из слитков // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2008. № 6. С. 20 – 22.
3. Кадыков В.Н., Уманский А.А., Протопопов Е.В. Формирование качества стальных заготовок. – Новокузнецк: изд. Сибирского государственного индустриального университета, 2012. – 220 с.
4. Кузнецов И.С., Прахов А.Е., Уманский А.А., Рубцов Ю.Т. Влияние технологических факторов на качество поверхности заготовок конструкционных сталей // *Сталь*. 2008. № 4. С. 43 – 46.
5. Казачков Е.А., Климанчук В.В. Окисленность конвертерной ванны в конце плавки низкоуглеродистой стали // *Вестник Приазовского государственного технического университета*. 2008. Вып. 18. С. 41 – 43.
6. Назюта Л.Ю., Денисенко В.С. Анализ окисленности конечного металла при выплавке стали в большегрузных конвертерах // *Вестник Приазовского государственного технического университета*. 2011. Вып. 22. С. 68 – 76.
7. Гальперин Г.С., Бученков А.К., Александров А.И., Болотников В.В. Исследование окисленности стали в 350-т конвертерах // *Сталь*. 1996. № 1. С. 28 – 29.
8. Баптизманский В.И. Теория кислородно-конвертерного процесса. – М.: Металлургия, 1975. – 376 с.
9. Баптизманский В.И., Охотский В.Б. Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса. – Киев; Донецк: Вища школа, 1981. – 184 с.
10. Бойченко Б.М., Охотский В.Б., Харлашин П.С. Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция материалов и экология: учебник. – Днепропетровск: Днепр-ВАЛ, 2006. – 454 с.
11. Шишкин Ю.И., Торговец А.К., Григорова О.А. Теория и технология конвертерных процессов. – Алматы: Ғылым, 2013. – 192 с.

© 2019 г. А.А. Уманский, Я.В. Денисов
Поступила 27 апреля 2019 г.