

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»
Российская академия естественных наук

*90-летию Сибирского государственного
индустриального университета посвящается*

**ВЕСТНИК
ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ СЕКЦИИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

Отделение металлургии

Сборник научных трудов

Издается с 1994 г. ежегодно

Выпуск 42

Москва
Новокузнецк
2019

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.....	7
<i>А.А. Уманский, Я.В. Денисов</i>	
Исследование влияния параметров производства слитков конвертерной стали на качество их внутренней структуры.....	8
<i>А.А. Уманский, А.В. Головатенко, А.С. Симачев, О.А. Решетнев</i>	
Анализ влияния параметров производства электростали на качественные показатели рельсов.....	16
<i>А.А. Уманский, А.В. Головатенко, А.С. Симачев</i>	
Исследования состава и распределения неметаллических включений по сечению рельсовых профилей	22
<i>В.Б. Деев, А.И. Куценко, О.Г. Приходько, Е.С. Прусов, А.А. Сокорев</i>	
Влияние внешних воздействий на процессы кристаллизации сплавов и затвердевания отливок.....	28
<i>А.Г. Никитин, К.С. Медведева, П.Б. Герике</i>	
Экспериментальное исследование процесса разрушения кусков ферросплава в одновалковой дробилке с упором на валке	37
<i>А.Г. Никитин, А.В. Абрамов, В.В. Гаряшин</i>	
Исследование работы щековой дробилки с устройствами выборки зазоров в шарнирах.....	40
ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	43
<i>Т.И. Алексеева, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, С.Г. Галевский</i>	
Освоение технологии производства нанокристаллического карбида циркония.....	44
ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ.....	49
<i>С.С. Мишуроев, В.Б. Деев, Н.А. Белов, А.А. Сокорев</i>	
Разработка высокопрочного литейного сплава на основе системы легирования Al-Zn-Mg-Fe-Ni	50
<i>С.С. Мишуроев, В.Б. Деев, С.М. Дубинский, А.А. Сокорев</i>	
Исследование литейных свойств, структуры и свойств высокопрочных сплавов системы Al-Zn-Mg-Ni-Fe	54
<i>В.В. Дорошенко, В.Б. Деев, Н.А. Белов</i>	
Исследование жидкотекучести сплавов на основе алюминиево-кальциевой эвтектики.....	63
<i>В.В. Дорошенко, В.Б. Деев, Н.А. Белов</i>	
Исследование возможности использования шихты с повышенным содержанием железа при получении сплавов на основе алюминиево-кальциевой эвтектики.....	66

УДК 621.771.65

А.А. Уманский¹, А.В. Головатенко², А.С. Симачев¹, О.А. Решетнев¹

¹ ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Россия

² АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОСТАЛИ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РЕЛЬСОВ*

Проведенными в условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК» исследованиями установлен характер и степень влияния технологических параметров производства рельсовой стали Э76ХФ на отбраковку рельсов по результатам ультразвукового контроля. Определены преобладающие неметаллические включения в рельсах рассматриваемой стали, являющиеся причиной отбраковки рельсов.

Conducted in the conditions of "EVRAZ ZSMK" studies established the nature and degree of influence of technological parameters of production of rail steel E76HF on rejection of rails on the results of ultrasonic testing. The predominant nonmetallic inclusions in the rails of the steel under consideration, which are the cause of rejection of the rails, are determined.

* Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Материаловедение» СибГИУ в рамках базовой части Государственного задания Минобрнауки РФ №11.6365.2017/8.9.

Проведенная реконструкция рельсового производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (строительство нового универсального рельсобалочного стана, модернизация оборудования электросталеплавильного цеха) позволила существенно повысить качество рельсовой продукции, однако при этом отмечаются существенные проблемы, связанные с высоким уровнем отбраковки рельсов. Решение указанной проблемы требует соответствующей теоретической проработки процессов формирования качества рельсовой продукции.

С целью получения научно-обоснованных зависимостей качества рельсов от технологических параметров производства рельсовой стали в условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК» проведены комплексные статистические исследования. Использована стандартная методика множественного регрессионного анализа, эффективность применения которой ранее неоднократно подтверждена при анализе влияния металлургических параметров на качество готовой продукции [1-4].

На основании имеющихся литературных данных, а также с учетом фактически фиксируемых в паспортах плавок электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» параметров для анализа выбраны следующие технологические факторы:

- доля чугуна в металлозавалке;

- температура выпуска стали из дуговой сталеплавильной печи (ДСП);
- химический состав стали на выпуске;
- длительность обработки стали на агрегате «ковш-печь» (АКП);
- продолжительность продувки аргоном при обработке на АКП;
- интенсивность продувки аргоном при обработке на АКП;
- температура стали после обработки на АКП;
- химический состав стали после обработки на АКП;
- основность и окисленность шлака при обработке на АКП (первая и вторая пробы);
- продолжительность обработки на вакууматоре;
- длительность продувки при обработке на вакууматоре;
- химический состав стали после обработки на вакууматоре;
- химический состав готовой стали.

В качестве объекта исследований использовали случайную выборку из 200 плавок рельсовой стали марки Э76ХФ. Выбор указанной марки стали обусловлен ее наибольшей долей в общем производстве. В качестве параметра оптимизации выбрали отбраковку рельсов на установке «мокрого» ультразвукового контроля (МУЗК).

По результатам анализа выявлено, что значимое влияние на брак МУЗК оказывают следующие факторы:

- содержание серы на выпуске из ДСП;
- длительность продувки при обработке на АКП;
- основность шлака при обработке на АКП;
- содержание водорода в стали после вакуумирования;
- содержание меди в готовой стали;
- содержание олова в готовой стали.

Уравнение регрессии в натуральном масштабе со значащими коэффициентами имеет вид:

$$\text{Б}_{\text{МУЗК}} = 20,5 + 30,23 \cdot [\text{S}]_{\text{вып}} - 0,03 \cdot \text{Д}_{\text{ПРОД}} - 1,16 \cdot (\text{Основ}_{\text{АКП}}) + 7,70 \cdot [\text{H}] + 31,12 \cdot [\text{Cu}] + 210,86 \cdot [\text{Sn}],$$

где $\text{Б}_{\text{МУЗК}}$ – отбраковка рельсов на МУЗК, %; $[\text{S}]_{\text{вып}}$ – содержание серы в стали на выпуске из ДСП, %; $\text{Д}_{\text{ПРОД}}$ – продолжительность продувки при обработке на АКП, %; $(\text{Основ}_{\text{АКП}})$ – основность шлака при обработке на АКП, %; $[\text{H}]$ – содержание водорода в стали после вакуумирования, ppm; $[\text{Cu}]$ – содержание меди в готовой стали; $[\text{Sn}]$ – содержание олова в готовой стали.

Из полученного уравнения регрессии видно, что повышение основности шлака и увеличение длительности продувки стали на АКП при обработке на АКП снижает отбраковку рельсов на МУЗК, а повышение содержание серы в стали на выпуске из ДСП, водорода в стали после вакуумирования, меди и олова в готовой стали увеличивает брак.

В количественном выражении степень влияния указанных факторов в рассматриваемом интервале их изменения составила:

- повышение содержание серы в стали на выпуске из ДСП с 0,019% до 0,078% приводит к увеличению отбраковки рельсов на 1,8 %;

- увеличение продолжительности продувки аргоном при обработке на АКП с 7,2 мин. до 268 мин. приводит к снижению брака рельсов на 8,6 %;
- повышение основности шлака при обработке на АКП от 1,2 до 5,1 позволяет снизить отбраковку рельсов на 7,1 %;
- увеличение содержания водорода в стали с 0,6 ppm до 1,5 ppm приводит к повышению отбраковки рельсов на 6,9 %;
- повышение содержания меди в готовой стали с 0,06 % до 0,16 % увеличивает брак рельсов на 3,1 %;
- увеличение содержания олова в готовой стали с 0,003 % до 0,014 % обуславливает повышения отбраковки рельсов на 2,3 %.

Влияние содержания серы в стали на выпуск из ДСП на уровень брака связано с выделением ее из раствора в виде включений сульфидов FeS или оксисульфидов FeS-FeO в процессе охлаждения, что обусловлено изменением растворимости серы при понижении температуры. Оплавление оксисульфидов и сульфидов по границам зерен при последующей горячей деформации заготовок рельсовой стали в процессе производства рельсов вызывает понижение технологической пластичности, («красноломкость») и приводит к образованию поверхностных дефектов в процессе прокатки.

Механизм влияния основности шлака на качество рельсов связан с известной зависимостью десульфурирующей способности шлака от данной характеристики. Удаление серы из расплава в шлак происходит в большинстве случаев в результате образования CaS:



при этом сера, растворенная в металле, реагирует с CaO в шлаке.

Полученные данные о снижении брака при увеличении длительности продувки аргоном на АКП объясняются известным явлением флотации – прилипания неметаллических включений к пузырькам инертного газа, с последующей ассимиляцией шлаком. Кроме того, вышеупомянутая реакция удаления серы из расплава протекает на поверхности раздела фаз, и увеличение этой поверхности за счет перемешивания металла со шлаком при продувке аргоном способствует более глубокой десульфурации.

Повышение содержание водорода способствует увеличению риска образования флокенов. Согласно существующих представлений водород оказывает значимое влияние на процесс образования флокенов при его концентрации в стали более 2 ppm. Хотя существует мнение, что флокены могут образовываться и при меньшей концентрации водорода и определенном сочетании технологических параметров производства стали. Наиболее часто флокены образуются в катаных заготовках и изделиях с относительно большим сечением [5, 6]. Следует отметить, что фактическое содержание водорода на рассматриваемых плавках рельсовой стали после вакуумирования не превышало 1,5 ppm и в среднем составило 0,96 ppm, что является низкими показателями. Таким образом, можно сделать вывод, что в образовании дефектов помимо водорода значимую роль сыграли другие технологические факторы, например, наличие значительных внутренних напряжений (структурные и т.д.).

Механизм отрицательного влияния меди на качество рельсов заключается в следующем. При кристаллизации медь, как и ряд других примесей цветных металлов, имеет свойство концентрироваться в межзеренном пространстве. Ситуация усугубляется склонностью меди к диффузии, что приводит к значительному увеличению ее концентрации в приповерхностных слоях «выпотевание меди» [7, 8]. Поскольку температура плавления меди (1083°C) ниже температуры начала прокатки рельсов, то находящаяся в жидким состоянии медь распространяется в межзеренных границах, ослабляет связь между зернами и охрупчивает металл. В результате возникает, так называемая «поверхностная красноломкость», приводящая к образованию дефектов при прокатке.

Отрицательное влияние олова связано с низкой температурой плавления, склонностью к ликвации в междендритных пространствах и к диффузии в поверхностные слои отливок. При этом максимально допустимые концентрации данной примеси, по мнению авторов работ [9, 10] составляет 0,006 %. Фактический диапазон изменения содержания олова на рассматриваемой выборке составил 0,003-0,014%, что говорит о совпадении с имеющимися литературными данными.

Поскольку наибольшую долю в отбраковке рельсов по результатам МУЗК составляют неметаллические включения, с целью установления их природы и происхождения проведены дополнительные исследования.

При проведении исследований использовали металлографический микроскоп OLIMPUS GX-51 и рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD-6000. Исследованиями дефекта в шейке рельса плавки стали Э76ХФ, отбракованного на МУЗК обнаружено расслоение металла. При подробном изучении было установлено нахождение внутри расслоя скоплений неметаллических включений различной формы и цвета, характерные зоны локализации которых представлены на рисунке 1.

По результатам рентгенофазового анализа (рисунок 2) по межплоскостному расстоянию определены типы неметаллических включений в зоне расслоя: Al_2SiO_5 (Силлиманит (Al: 33%; Si: 18%; O: 49%)); SiO_2 ((Si: 47%; O: 53%) с различной длиной ребер); Al_2O_3 (Корунд (Al: 53%; O :47%)); MnS (Алабандин (Mn: 67-70%; S: 33-30%)).

Исходя из полученных данных причиной образования расслоения в рельсе плавки стали Э76ХФ явилось скопление непластичных неметаллических включений [11, 12] SiO_2 , Al_2O_3 , Al_2SiO_5 .

Таким образом, по результатам проведенных исследований для условий электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» установлено значимое влияние на отбраковку рельсов стали марки Э76ХФ следующих технологических параметров: содержание серы на выпуске из дуговой сталеплавильной печи, длительность продувки при обработке на агрегате «ковш-печь», основность шлака при обработке на агрегате «ковш-печь», содержание водорода в стали после вакуумирования, содержание меди и олова в готовой стали. Установлено, что силикаты недеформирующиеся, а именно алюмосиликаты и

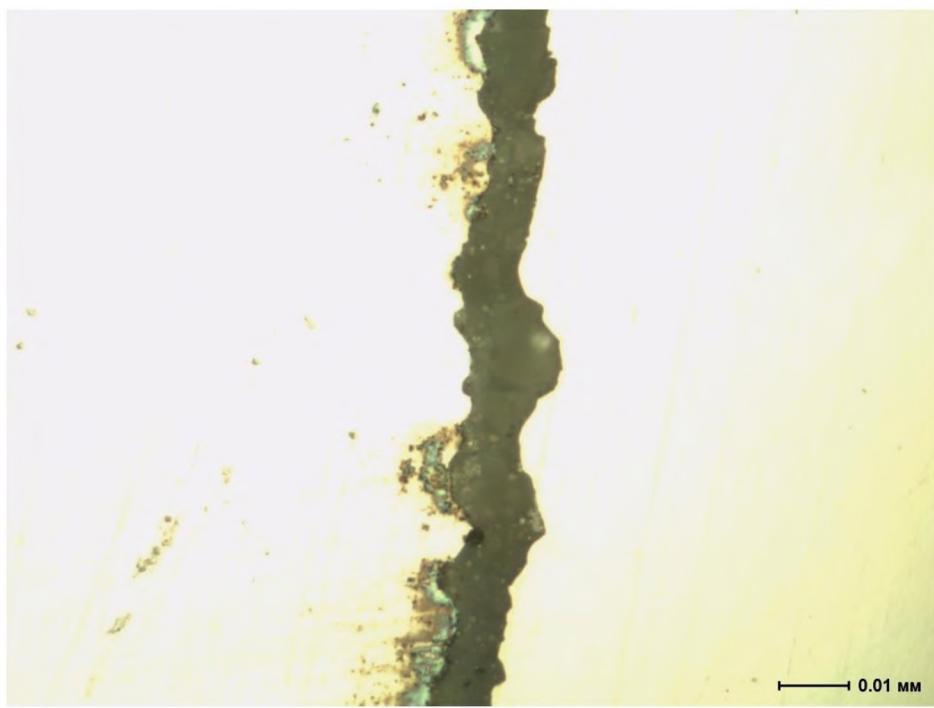


Рисунок 1 – Локализация неметаллических включений в зоне расслоения рельса плавки стали Э76ХФ

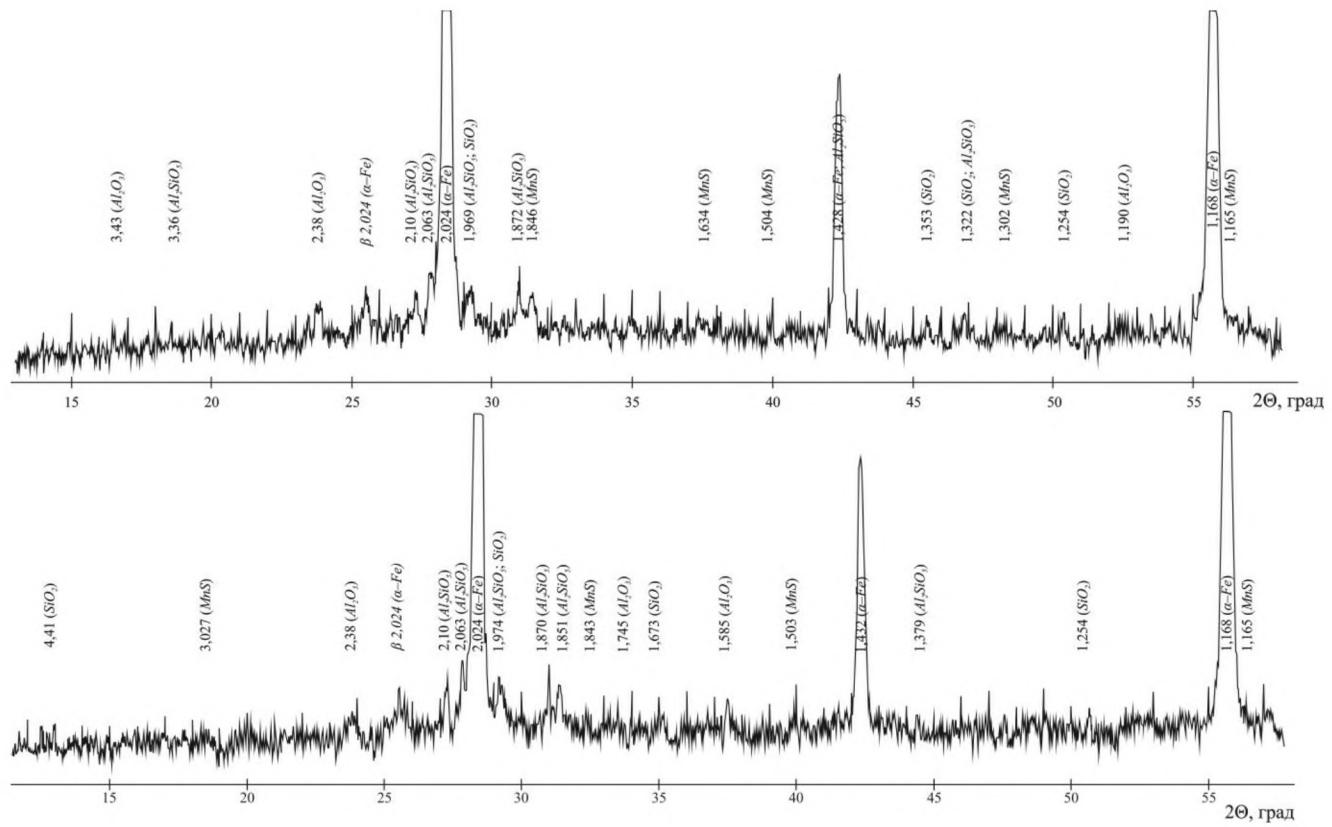


Рисунок 2 – Фрагменты дифрактограмм в местах локализации неметаллических включений в расслоении рельса плавки стали Э76ХФ

шпинели, являются преобладающим типом неметаллических включений в непрерывнолитых заготовках рельсовой стали марки Э76ХФ и обуславливают отбраковку рельсов по результатам ультразвукового контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уманский А.А. Исследование процессов формирования качества металлопродукции ответственного назначения на переделе сталь-прокат / А.А. Уманский // Фундаментальные исследования. – 2014. – №8-2. – С. 335-339.
2. Кадыков В.Н. Применение статистических моделей для оптимизации технологии производства заготовок из слитков / В.Н. Кадыков, А.А. Уманский // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2008. – №6. – С. 20-22.
3. Кузнецов И.С. Влияние технологических факторов на качество поверхности заготовок конструкционных сталей / И.С. Кузнецов, А.Е. Прахов, А.А. Уманский, Ю.Т. Рубцов // Сталь. – 2008. – №4. – С. 43-46.
4. Кадыков В.Н. Исследование влияния технологических факторов на качество поверхности заготовок конструкционных марок сталей / В.Н. Кадыков, А.А. Уманский // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. – 2007. – №18. – С. 40-48.
5. Влияние химического состава металла на содержание водорода и флокеночувствительность рельсовой стали / А.А. Дерябин [и др.] // Электрометаллургия. – 2003. – №9. – С.10-18.
6. Шаповалов В.И. Влияние водорода на структуру и свойства железоуглеродистых сплавов / В.И. Шаповалов. – М.: Металлургия, 1982. – 235 с.
7. Медь в черных металлах / Под ред. И. Ле Мэя и Л. М. Д. Шетки: Пер. с англ. И. Д. Марчуковой и А. Н. Штейнберга. М.: Металлургия, 1988.
8. Гинцбург Я. С. Прокатка качественной стали / Я.С. Гинцбург, К.К. Андрацкий. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по чёрной и цветной металлургии, 1953. – 464 с.
9. Влияние микропримесей цветных металлов на качество непрерывнолитой стали / В.П. Харченков [и др.] // Сталь. – 2001. – №5. – С. 60–62.
10. Голубцов В.А. Теория и практика введения добавок в сталь вне печи / В.А. Голубцов. – Челябинск, 2006. – 423 с.
11. Старов Р.В. Изменения химического состава неметаллических включений на всех этапах производства стали / Р.В. Старов [и др.] // Сталь. – 2005. – № 1. – С. 79-82.
12. Добужская А.Б. Изучение состава неметаллических включений в рельсах / А.Б. Добужская, Л.А. Смирнов, Н.В. Мухранов, М.С. Фомичев, Е.В. Белокурова // Сталь. – 2015. – № 7. – С. 82-86.