

05.16.02

16

Челябинский политехнический институт  
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

НАГАМАЗЬЯНОВ Рафик Загизьянович

УДК 669.187.28:621.822

УМЕНЬШЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ПОДШИПНИКОВОЙ  
СТАЛИ ОБРАБОТКОЙ МЕТАЛЛА ШЛАКОМ С ПОВЫШЕННЫМ  
СОДЕРЖАНИЕМ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА

Специальность 05.16.02 - "Металлургия черных металлов"

Автореферат диссертации на  
соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск - 1984

**ЧПИ**

Работа выполнена на кафедре металлургии стали Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола и на Челябинском металлургическом заводе (ныне ЧМК).

Научный руководитель - заслуженный деятель науки и техники РСФСР, лауреат Государственной премии УССР и премии Совета Министров СССР, доктор технических наук, профессор Д.Я.Поволоцкий.

Научный консультант - кандидат технических наук, доцент Ю.А.Гудин.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Б.В.Линчевский;  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник В.С.Галай.

Ведущее предприятие - Златоустовский металлургический завод.

Защита диссертации состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1984 года на заседании специализированного совета К-053.13.03 Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола по адресу: 454044, г. Челябинск, проспект им. В.И. Ленин, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института. Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1984 года.

Ученый секретарь совета  
кандидат технических наук,  
доцент

О.К.Токовой

Актуальность работы

Основными направлениями экономического и социального развития СССР на XI и XII пятилетки предусмотрено обеспечить рост выпуска электростали в 1,6 раза. Вопросы выплавки подшипниковых сталей в открытых дуговых печах постоянно привлекают внимание исследователей из-за непрогнозируемой поражаемости готового сорта крупными кислородсодержащими включениями. Применяемые в отечественной практике способы массового производства подшипниковой стали не гарантируют получение стали без крупных глобулярных включений, в значительной мере влияющих на служебные характеристики подшипников качения. Учитывая большой объем производства и недостаточно высокое качество готового металла, работа, направленная на улучшение качества и технико-экономических показателей производства подшипниковой стали, является важной и актуальной проблемой.

Цель работы. Разработка способов уменьшения загрязненности подшипниковой стали крупными кислородсодержащими включениями на основе определения времени появления и генезисов крупных глобулярных включений в металле, изучения влияния состава шлага и других факторов на процессы рафинирования металла от включений.

Научная новизна

На основании комплексного изучения поведения неметаллических включений в процессе выпуска-разливки-кристаллизации-пластической деформации зафиксировано время появления крупных кислородсодержащих включений в подшипниковой стали и установлена их природа. Показано, что увеличение окисленности шлага перед выпуском уменьшает размеры и изменяет характер кислородсодержащих включений в подшипниковой стали.

Практическая ценность

Получены количественные зависимости, характеризующие влияние содержания отдельных компонентов шлага на общую загрязненность металла в ковше и в готовом сорте кислородсодержащими включениями. Разработана и опробована технология плавки, позволяющая иметь высокие технико-экономические показатели и получать металл с невысокой загрязненностью кислородсодержащими включениями при практически полном отсутствии крупных глобулярных включений. Предложенная технология защищена авторским свидетельством СССР № 580228. Результаты работы использованы при разра-

ботке усовершенствованной технологии плавки подшипниковой стали в 40-тонных печах ЭСПЦ-I Челябинского металлургического завода. Экономический эффект составил 45 тысяч рублей в год без учета эффективности от улучшения качества продукции у потребителей.

#### Публикации и апробация работы

По результатам исследований опубликовано 7 статей. Материалы диссертации доложены на II и III Всесоюзных научных конференциях по современным проблемам электрометаллургии стали (1974 и 1977 годы, г. Челябинск), на XI пленарном заседании постоянно действующего Всесоюзного семинара "Сталь и неметаллические включения", 1982 год, г. Довецк, на ряде научно-технических конференций Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола (1973-76 гг., г. Челябинск).

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения и приложений. Изложена на 180 страницах машинописного текста, включая 47 рисунков, 24 таблицы, I приложение. Библиография содержит 175 наименований.

#### I. Исследование времени образования и природы крупных глобулярных включений в подшипниковом металле

Для разработки рациональной технологии выплавки подшипниковой стали, обеспечивающей низкую загрязненность кислородсодержащими и особенно крупными глобулярными включениями, необходимо было четко установить время появления и генезис крупных глобулярных включений. Для этого исследовали металлы на всем технологическом переделе жидкая сталь - готовый сорт с целью установления времени появления и природы крупных глобулярных включений.

#### I.1. Образование и удаление неметаллических включений при предварительном раскислении в печи

Кинетику оседающего раскисления изучали в ванне 5-тонной электропечи. После окончания окислительного периода локально в жестяной банке под электроды вводили раскислители ( $Al$  или  $Al+FeSi$ ). После ввода раскислителей через 30 сек начали отбирать разнесенными по высоте ( $H=300$  мм) пробницами из двух горизонтов по центру, справа и слева (на расстоянии по 900 мм) пробы. В каждой исследованной точке в течение 4 минут отобрали по 4 пробы.

Содержание раскислителей в разных точках ванны выравнивалось через три минуты после присадки.

Во всех пробах металла, отображенных после введения  $Al$ , пре-

обладающим типом включений были идиоморфные включения корунда. Количество их превышало 90% общего количества включений, встречающихся на микрошлифах.

В пробах из центральной части ванны размер включений корунда не превышал 5 мкм. В пробах из периферийных объемов металла встречались более крупные включения корунда (10÷12 мкм). При совместном раскислении ( $Al + FeSi$ ) первые пробы металла из центральной и периферийной части ванны преимущественно (на 90%) загрязнены мелкими включениями силикатного стекла (2÷5 мкм) и отдельными кристаллами корунда (3÷5 мкм). В последующих пробах количество силикатных глобулей быстро уменьшалось и появлялись агрегаты включений корунда с линейными размерами отдельных включений до 5 мкм. При металлографическом исследовании под большим увеличением на поверхности силикатных глобулей было видно образование новой фазы, которая кристаллооптическим анализом была идентифицирована как корунд.

При обоих вариантах раскисления наибольшая загрязненность кислородсодержащими включениями и повышенное содержание кислорода в течение контролируемого промежутка времени было в центральной части ванны, в периферийных частях содержание кислорода и продуктов раскисления было меньше.

Изучение кинетики раскисления металла в начале восстановительного периода показало: содержание кислорода и продуктов раскисления снижается в течение нескольких минут, в металле не образуются устойчивых крупных кислородсодержащих включений.

Характер изменения загрязненности металла при плавке подшипниковой стали в случае предварительного раскисления в начале восстановительного периода в 40-тонных печах принципиально не отличается от случая раскисления металла в 5-тонной электропечи.

В пробах, отобранных через 3-4 мин после предварительного раскисления, неметаллические включения представлены идиоморфными кристаллами корунда, магнезильной шпинели (размерами 5÷7 мкм) и отдельными (до 10 мкм) силикатсодержащими глобулями с включениями корунда и магнезильной шпинели. Загрязненность этих проб кислородсодержащими включениями (технология ЦНИИЧМ-КМК) в среднем равнялась  $J_0 = 0,67 \cdot 10^{-3}$ . Характер загрязнения металла типовой технологии после осаждающего раскисления не отличается от загрязненности металла после предварительного раскисления по технологии ЦНИИЧМ-КМК. К концу восстановительного периода (технология ЦНИИЧМ-КМК и типовая) индексом загрязненности кислородсодержащими вклю-

чениями возрастали. Причинами этого могут быть включения, образовавшиеся в металле в результате осаждающего раскисления порошковым ферросилицием через шлак и легирования металла кремнием и, возможно, включения, образующиеся в результате взаимодействия металла с разрушающейся футеровкой ванны печи. Исследование проб металла перед выпуском (на серии из 10 плавов) после окончательного раскисления  $Fe$  показало, что включения представлены, в основном, идиоморфными кристаллами корунда, кристаллами магнетитовой шпинели и небольшими (до 10 мкм) многофазными глобулами. Средний индекс загрязненности ( $J_{окс.}$ ) этих проб оксидами равен  $1,05 \cdot 10^{-3}$ . Металл, выплавленный по типовой технологии, загрязнен однотипными включениями.

Изучение кинетики осаждающего раскисления металла в начале восстановительного периода, поведения неметаллических включений после окончательного раскисления показало, что количество кислорода и кислородсодержащих включений понижается очень быстро и состав оксидной фазы также быстро стабилизируется. Это свидетельствует о возможности быстрого раскисления металла в печи и в ковше осаждающим методом и быстрого удаления продуктов раскисления. Изучение проб металла, отобранных в разных точках ванны электропечи при глубинном раскислении и в ходе восстановительного периода, показало, что в металле перед выпуском не содержится крупных кислородсодержащих включений.

## 1.2. Поведение включений во время выпуска плавки.

### Влияние печного шлака

На серии плавов стали ХХТ5 изучали влияние рафинировочных шлаков на загрязненность стали кислородсодержащими включениями. Установлено влияние окисленности печного шлака перед выпуском на общее количество кислородсодержащих включений в пробах металла перед выпуском. Полученная зависимость удовлетворительно описывается уравнением первого порядка:

$$J_{пер. вып} \cdot 10^{-3} = 0,32 + 0,76 (FeO)\%$$

при коэффициенте корреляции  $r = 0,855$  и критерии надежности  $\mu = 9,03$ . Высокие значения коэффициента корреляции и критерия надежности указывают на достаточно высокую тесноту установленной связи и высокую степень ее вероятности. Содержание оксида магния ( $MgO$ ) в печном шлаке перед выпуском влияет на загрязненность кислородсодержащими включениями металла в печи перед выпуском:

$$J_{пер. вып} \cdot 10^{-3} = 0,537 + 0,035 (MgO)\% \quad (r = 0,813 \text{ и } \mu = 6,3).$$

Равнозначное влияние на загрязненность металла перед выпуском кислородсодержащими включениями ( $FeO$ ) и содержания в нем окиси магния объясняется связью между содержанием окиси магния в шлаке и окисленностью шлака в конце восстановительного периода:  $(FeO)\% = 0,167 (MgO)\% - 0,97$  ( $Z=0,873$  и  $\mu=11,7$ ).

Количество оксида магния в шлаке конца восстановительного периода зависит от его длительности. Основной причиной повышения содержания  $MgO$  в шлаке является разрушение огнеупорной футеровки, возрастающее с увеличением продолжительности восстановительного периода и уменьшением содержания окиси кальция в шлаке.

С уменьшением  $CaO$  в шлаке увеличивается содержание  $MgO$ :

$$(MgO)\% = 50,2 - 0,722 (CaO)\% \quad (Z = -0,692 \text{ и } \mu = 4,18).$$

Однако нужно отметить, что значительное увеличение содержания  $CaO$  в шлаках конца восстановительного периода (до 60% и более) при сравнительно низком содержании  $CaF_2$  (4-5%) может вызвать уменьшение рафинирующей способности шлаков, вследствие повышения вязкости шлака. В процессе обработки металла печным шлаком во время выпуска, как правило, происходит уменьшение количества неметаллических включений. Однако на отдельных плавках индекс загрязненности металла, так же как и окисленность металла, изменяются различно. С увеличением окисленности печного шлака перед выпуском возрастает и индекс загрязненности кислородсодержащими включениями проб металла из ковша после окончания выпуска:  $J_{\text{ковш}} \cdot 10^{-3} = 0,852 (FeO)\% + 0,16$  ( $Z=0,72$  и  $\mu=4,73$ ).

Аналогично, но несколько слабее, влияет на общее количество кислородсодержащих включений в пробах металла и содержание оксида магния в печном шлаке конца восстановительного периода:

$$J_{\text{ковш}} \cdot 10^{-3} = 0,121 (MgO)\% - 0,435 \quad (Z=0,54 \text{ и } \mu=2,4).$$

В то же время не удалось установить надежной связи между загрязненностью металла кислородсодержащими включениями перед выпуском и в ковше после выпуска ( $Z=0,162$  и  $\mu=0,59$  - связь недостоверна).

При математической обработке экспериментальных данных установлено, что преобладающее влияние на загрязненность металла в ковше кислородсодержащими включениями оказывает состав шлака конца восстановительного периода, влияющий на степень рафинирования металла.

1.3. Изменение характера и природы неметаллических включений в стали во время выпуска и разлива.

Параллельно с подсчетом общей загрязненности металла неме-

таллическими включениями изучали фазовый состав крупных кислородсодержащих включений с целью установления времени их появления, источников образования и их дальнейшей трансформации в процессе передела.

В процессе совместного выпуска металла со шлаком резко возрастает площадь межконтáктного взаимодействия металл-шлак за счет образования шлаковой эмульсии. Пробы во время выпуска металла (при заполнении ковша и по окончании выпуска) отбирали специальными медными и стальными пробниками. Для фиксации имевшихся в жидкой стали неметаллических включений отбор проб производили в медные пластинчатые пробники малого сечения, теплоизолированные асбестом. Это обеспечивало практически мгновенную кристаллизацию металла. Для сравнения использовали массивные стальные пробники.

В пробах металла, отобранных из ковша во время выпуска, появлялись средние и крупные гетерогенные и изотропные глобулярные включения, размеры которых достигали (50÷300 мкм). На части проб виден момент сближения частиц шлаковой эмульсии и коалесценция шлаковых глобулей с отчетливо видимой шейкой перехода. Мгновенная кристаллизация в толстостенной медной изложнице, по видимому, позволяла зафиксировать эти моменты. Кристаллооптический анализ крупных глобулярных включений, обнаруженных в пробах, показал, что цементирующей связкой в них служит силикатное стекло ( $SiO_2$ ) с примесью основных окислов ( $CaO$ ). Кристаллическими фазами, сцементированными в глобулярных включениях из ковша, являлись включения магнезильной шпинели ( $MgO \cdot Al_2O_3$ ), алюминатов кальция ( $nCaO \cdot mAl_2O_3$ ), геденбергита ( $CaO \cdot FeO \cdot 2SiO_2$ ), волластонита ( $\beta-CaO \cdot SiO_2$ ), периклаза ( $MgO$ ), корунда ( $Al_2O_3$ ), флюорита ( $CaF_2$ ). Гомогенные глобулярные включения имели показатель преломления  $N = 1,648 \div 1,650$ .

Для установления природы крупных глобулярных включений исследовали образцы шлака и отдельные крупные кислородсодержащие включения в пробах металла из ковша на микрорентгенанализаторе MS-46 "Камекс". Включения и образцы шлака сканировали по площади в характеристическом рентгеновском излучении элементов  $Ca, Mg, Al, Si, Mn, S$ . По относительной интенсивности излучения К, % с учетом поправок на атомный вес, флуоресценцию и т.д., подсчитали примерное процентное соотношение элементов во включениях и шлаке. Визуализация содержания элементов в кислородсодержащих включениях производилась на микроскопограммах, по-



лученных на фотопленке. По степени засвечивания фотопленки визуально определяли распределение элементов в массе глобулярного включения, что позволяло судить о их соотношении и фазовом строении. Преобладающими элементами в составе глобулярных включений являются кальций и магний. Результаты микрорентгеноспектрального, рентгеноструктурного и кристаллооптического анализов показали, что при обработке раскисленного металла хорошо раскисленным белым шлаком крупные неметаллические включения в стали по составу близки к частицам электропечного шлака.

Важно отметить наличие сульфидной оболочки на поверхности крупных как гетерогенных, так и гомогенных глобулярных включений. Быстрая кристаллизация проб позволяла зафиксировать первоначальный состав включений существующий в жидком металле и практически исключала возможность образования сульфидной оболочки в процессе кристаллизации. Это позволяет заключить, что сульфидная оболочка образовалась на частицах шлаковой эмульсии в результате протекания реакции десульфурации металла.

Десульфурация протекает на поверхности частиц шлаковой эмульсии, и проникновение серы в глубь частиц является функцией времени и скорости диффузии. Анализ микроскенограмм распределения S показал, что десульфурация протекает на всей поверхности частиц шлака.

Следует отметить, что наиболее крупные (200-300 мкм) глобулярные включения в пробах, отобранных непосредственно во время выпуска, в последующих пробах (взятых через 3-4 мин после окончания выпуска) отсутствуют. Это может свидетельствовать о их удалении из металла в ковше во время выпуска. В пробах металла, взятых из-под стопорного стакана на разливке, встречались однотипные (включениям из ковша), гомогенные (с показателем преломления от 1,630 до 1,655) и гетерогенные включения с выделениями следующих кристаллических фаз: шпинели, вкрапленов кальция, геденбергита, волластонита, корунда, периклаза, флюорита. Проведенные исследования показали, что включения в процессе разливки идентичны включениям из ковша по окончании выпуска. Наиболее крупные глобулярные включения успевали удалиться из металла в ковше. Часть крупных (40-100 мкм) глобулярных включений наблюдалась в металле в течение контролируемого промежутка времени (выпуск металла-разливка).

#### 1.4. Поведение включений при кристаллизации стали

Поведение неметаллических включений при кристаллизации стали изучали в процессе затвердевания слитка стали ВХ150Г массой

2,73т, выплавленной в 40-тонной электропечи (технология ЦНИИЧМ-КМК), а также при кристаллизации слитков серийных плавок (технология ЦНИИЧМ-КМК, типовая). Слиток разрезали вдоль на две части. Из одной части вырезали продольный темплет, из которого отобрали пробы литого металла на трех уровнях в шести горизонтах.

В пробах металла из маточного расплава кристаллизующегося слитка (10 проб, интервал 3-5 мин.) постепенно увеличивались индексы загрязненности оксидными и оксисульфидными включениями при примерно одинаковой окисленности металла (0,0019±0,0031% O). Так, загрязненность металла возрастала от I к X пробе: оксиды - от 0,69 до  $1,30 \cdot 10^{-3}$ , оксисульфиды - от 0,07 до  $0,93 \cdot 10^{-3}$ , оксиды крупные ( $\geq 20$  мкм) - от 0,17 до  $0,97 \cdot 10^{-3}$ . Кристаллооптический анализ осадков неметаллических включений, выделенных электролизом из проб по ходу кристаллизации слитка, показал, что основную часть устойчивых неметаллических включений составляет магнетитовая шпинель. Встречаются также единичные включения корунда и крупные глобулярные включения (30±100 мкм), в состав которых кроме шпинели входят палочки  $\beta$ -глинозема или иглы корунда. Начиная с 3-ей пробы появляются включения  $\beta$ -глинозема размерами до 15 мкм. Корунд находился в металле в виде гексагональных пластинок и обломков неправильной формы. Размеры их к концу кристаллизации увеличивались до 20±35 мкм.

Изучение проб литого металла слитка показало, что наиболее загрязненными неметаллическими включениями являлись верхние и нижние горизонты слитка. Данные металлографической оценки и химического определения объемного процента неметаллических включений в качественной оценке удовлетворительно совпадают. Средняя часть слитка загрязнена неметаллическими включениями в меньшей степени. Наименее загрязненной является корковая зона слитка. Зона равноосных кристаллов загрязнена неметаллическими включениями в большей степени. Микрошлифы металла из конуса оседания отличаются наибольшей чистотой. Характер изменения загрязненности слитка крупными оксидами от края к центру имел схожий характер с изменением загрязненности проб металла из маточного расплава по ходу кристаллизации. Загрязненность литого металла слитка оксинитридами на всех горизонтах слитка возрастает к I/2 R и затем уменьшается к центру, их размеры достигают в осевых зонах (в условиях свободного роста) 30±40 мкм.

Наиболее крупные оксидные включения в верхней части слитка наблюдались в краевых зонах слитка (до 50 мкм), а в средней и

нижней части слитка - в осевых зонах слитка (60±100 мкм). Характер загрязненности металла сульфидами и оксисульфидами адекватен загрязненности металла оксинитридами (возрастание к 1/2R и уменьшение к центру). Сложные конгломераты (нитрид-оксид-сульфид), встречающиеся в пробах металла маточного расплава, в литом металле укрупнились при сближении к центру слитка и в осевых зонах достигали значительных размеров (60±100 мкм). Кристаллооптическим анализом анодных осадков и локальным анализом с поверхности шлифов в крупных кислородсодержащих включениях идентифицированы следующие кристаллические фазы: магнезиальная шпинель, алюминаты кальция, геденбергит, волластонит, периклез, корунд в силикатной матрице с примесью основных окислов.

Микрохимический анализ анодных осадков неметаллических включений проб металла из слитка, выплавленного по технологии ЦНИИЧМ-КМК, показал, что в составе осадков преобладают  $Al_2O_3$  (от 17,08 до 60,07 %) и  $MgO$  (от 26,34 до 38,67 %). Большая часть этих оксидов связана в магнезиальную шпинель, что подтверждается кристаллооптическим анализом. На среднем и верхнем горизонтах слитка, во всех зонах в составе анодного осадка преобладает  $Al_2O_3$  (до 60%). В нижней части слитка кроме краевой зоны содержание  $Al_2O_3$  ниже, чем на вышележащих горизонтах слитка. Следует отметить в анодном осадке проб металла из нижнего горизонта слитка повышенное содержание кремнезема (до 42,67%). Зекись железа довольно равномерно распределена в составе анодных осадков на среднем и нижнем горизонтах слитка (от 0,86 до 1,75)%. Верхний горизонт слитка имеет повышенное содержание  $FeO$  (2,61%) в составе анодных осадков. Двоокись титана в составе неметаллических включений содержится в небольших количествах (от 0,18 до 1,36 %).

Исследование поведения неметаллических включений в процессе кристаллизации слитка показало, что крупные кислородсодержащие включения в разных зонах и горизонтах идентичны крупным включениям в пробах металла из маточного расплава слитка из разливки и в ковше во время выпуска.

Неуспешные удалиться из ковша крупные (от 40 до 100 мкм) кислородсодержащие включения поступают в тело слитка и могут фиксироваться в литом металле.

1.5. Неметаллические включения в деформированной стали  
Морфологию и изменение строения неметаллических включений в деформированном металле изучали в готовом сорте сериных

плавки и в кованом металле второй половины исследованного слитка. Пробы кованого металла отбирали на четырех уровнях соответствующих исследованным зонам литого металла первой половины слитка. При сопоставлении с результатами полученными для литого металла слитка установлено, что в целом химический состав анодного осадка и окисленность деформированного металла примерно одинаковы. Объемный процент неметаллических включений в деформированном металле несколько ниже, чем на соответствующих уровнях слитка, что может быть объяснено разобщением включений пластическим течением металла и соответственно уменьшением загрязненности отдельных объемов стали. Сложные комплексные включения (оксид-нитрид-сульфид), наблюдаемые в металле точного расплава и в теле слитка, вытягиваются в направлении деформации, приобретая чечевице- и веретенообразную, а в случае большого содержания кристаллических фаз - бочкообразную форму. Кристаллооптический анализ анодного осадка неметаллических включений деформированного металла показал, что основная масса включений - магнетитовая шпинель в виде отдельных зерен и октаэдров (1-20 мкм) и в составе крупных глобулярных включений (20-40 мкм). Часть глобулярных включений содержит в своем составе корунд и алюминаты кальция. При локальном кристаллооптическом анализе с поверхности шлифа крупных глобулярных включений дополнительно были идентифицированы следующие кристаллические фазы: воалестонит, монтичеллит ( $CaO \cdot MgO \cdot SiO_2$ ), геденбергит, клиноэнстатит ( $MgO \cdot SiO_2$ ), периклаз. В целом химический и фазовый состав неметаллических включений деформированного металла не отличается от химического и фазового состава включений в литом металле слитка, на разливке и в ковше.

На общее количество кислородсодержащих включений в сортовом прокате подшипниковой стали существенно влияет состав шлака перед выпуском. Установлена математически достоверная связь между осевой загрязненностью готового проката оксидными включениями и окисленностью печного шлака конце восстановительного периода. Для проб из верхней части слитка (штанга А) получена зависимость:

$$T_{\text{гот. прокат}} = 0,938 (FeO)\% - 0,017 \quad (\sigma = 0,707 \text{ и } \mu = 3,16).$$

Установлено сильное влияние содержания  $MgO$  в рафинировочном шлаке на общую загрязненность готового проката кислородсодержащими включениями. Для верхней части слитка (штанга А):

$$T_{\text{гот. прокат}} \cdot 10^{-3} = 0,145 (MgO)\% - 0,855 \quad (\sigma = 0,744 \text{ и } \mu = 3,72).$$

Для средней части слитка (штанга С):

Гот. прокат  $\cdot 10^{-3} = 0,114 (MgO)\%$  - 0,498 ( $\alpha = 0,85$  и  $\mu = 7,5$ ).

Для установления природы крупных кислородсодержащих включений готового сорта металла, выплавленного по технологии ЦНИИЧМ-КМК и типовой технологии заводов "Союзспецсталь", изучали распределение элементов *Ca, Mg, Al, Si, S* по площади включений на микрорентгенанализаторе МС-46 "Камека". По интенсивности излучения на микросканограммах видно, что крупные кислородсодержащие включения в готовом металле, обработанном в ковше раскисленным белым шлаком, содержат повышенные количества кальция, магния, алюминия и, очевидно, представлены включениями алюминатов кальция и магнезиальной шпинели, что в дальнейшем было подтверждено кристаллооптическим анализом. Важно отметить наличие сульфидной оболочки на частично разрушенных глобулярных включениях в металле по технологии ЦНИИЧМ-КМК. На микросканограммах оксидных строчек (типсовая технология) также видны вкрапления сульфидной фазы, которые могут быть участками разрушившейся сульфидной оболочки крупных глобулярных включений.

Крупные кислородсодержащие включения в деформированном металле идентичны крупным включениям, наблюдаемым в пробах литого металла слитке на разливке и в ковше. Часть крупных глобулярных включений разрушается полностью, превращаясь в оксидные строчки или частично - приобретает глыбообразную форму.

Предполагаемый механизм образования и природы крупных кислородсодержащих включений

Исследование поведения неметаллических включений в процессе технологического передела позволило установить, что крупные кислородсодержащие включения появляются при обработке раскисленного металла белым раскисленным шлаком в ковше и являются частицами шлаковой эмульсии. Исходя из установленного влияния оксидов железа и магния шлакового расплава на общую загрязненность кислородсодержащими включениями и шлакового происхождения крупных глобулярных включений, можно заключить, что рафинировочный шлак оказывает на металл двойное действие:

- с одной стороны, является адсорбентом по отношению к кислородсодержащим включениям,
- с другой - служит источником крупных глобулярных включений, идентифицированных как частицы шлаковой эмульсии, наблюдаемые в металле.

Образование слоя, содержащего серу ( $S$ ), на поверхности крупных кислородсодержащих включений при десульфурации существенно понижает межфазное натяжение на границе их с металлом. По данным ряда авторов межфазное натяжение при переходе серы из металла в шлак может быть снижено до  $1 \div 5 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^2}$ , тогда как межфазное натяжение между белым электропечным шлаком и сталью ШХ15 составляет  $1000 \div 1200 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^2}$ . Это уменьшает возможность перехода включений из металла в шлак на межфазной границе между ними. Следовательно, образование сульфидной оболочки в процессе десульфурации металла высокоосновным, содержащим малые количества закиси железа ( $FeO$ ) шлаком, может быть одной из причин неполного удаления частиц шлаковой эмульсии из-за их повышенной адгезии к металлу и фиксации в теле слитка в виде крупных глобулярных включений. Другой причиной загрязнения подшипникового металла являются продукты химического и механического разрушения сифонной проводки.

Таким образом, одним из путей борьбы с крупными глобулярными включениями является уменьшение адгезии шлаковых частиц к металлу путем подбора оптимального состава шлака, обладающего хорошими ассимилирующими свойствами к включениям - продуктам раскисления и хорошо удаляющимся из металла при эмульгировании.

## 2. РАЗРАБОТКА И ОПРОБОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАВКИ ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ НИЗКУЮ ЗАГРЯЗНЕННОСТЬ МЕТАЛЛА КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

### 2.1. Обоснование выбранной технологии

Учитывая результаты исследований, изложенных выше, разработали технологию выплавки шарикоподшипниковой стали (авторское свидетельство СССР № 580228), которая должна обеспечить выплавку металла с малой загрязненностью кислородсодержащими включениями. В основу технологии был положен полученный вывод о неудовлетворительном удалении шлаковых включений, на которых образуется сульфидная оболочка, повышающая их адгезию к металлу. Исходя из этого, необходимо было несколько уменьшить десульфурующую способность шлака, повысив его окисленность, что должно уменьшить образование развитой сульфидной оболочки на частицах шлаковой эмульсии. Поэтому было предложено выплавлять подшипниковую сталь под одним шлаком, доводку металла производить, не раскисляя ванну, перед выпуском повышать окисленность шлака присадками железной руды ( $FeO - 8 \div 20\%$ ), раскисление металла осуществлять в процессе выпуска и обработки окисленным шлаком в ковше, а после окончания выпуска продувать металл в ковше аргоном.

## 2.2. Технология опытных плавков и поведение неметаллических включений в процессе производства подшипниковой стали

Опытные плавки по разработанной технологии проводили в 40-тонных печах. Период плавления и окислительный период не отличались от типовых. В окислительный период особое внимание уделяли дефосфорации металла, следили за тем, чтобы часть шлака удалялась из печи через порог "самотеком". Легирование металла хромом и марганцем вели в печи во время доводки под окислительным шлаком. Металл и шлак в печи не раскисляли. Перед выпуском плавки часть шлака (до 30%) из печи удаляли (сливали) и повышали окисленность оставшегося шлака ( $FeO$  до 14%) присадкой на него железной руды. Ферросилиций (65%) и  $Al$  для раскисления стали помещали на дно ковша перед выпуском. Для лучшего усвоения раскислителей первые порции металла сливали в ковш без шлака. Затем сливали металл вместе со шлаком. По окончании выпуска в течение 3-4 минут металл продували  $Ar$  (расход  $0,2 \div 0,4 \text{ м}^3/\text{т}$  стали) через пористую пробку в дне ковша. Технология разливки металла не отличалась от типовой.

В процессе обработки окислительным шлаком в ковше раскислители, растворяющиеся в металлической ванне, восстанавливают закись железа шлака и ее содержание после продувки уже составляет в среднем около 3% (перед выпуском в среднем 12,5%). Усвоение кремния металлом было невысоким (60-65%) из-за воздействия окислительного шлака во время выпуска и обработки аргоном, но достаточно стабильным. Одношлаковый процесс выплавки обеспечил получение подшипникового металла, заданного ГОСТом состава, однако содержание серы в стали было довольно высоким (в среднем 0,012%). При обработке высокоокислительным шлаком в ковше в среднем удаляется до 30% серы. Ее содержание в металле снижалось с  $0,023 \div 0,028\%$  перед выпуском до  $0,012 \div 0,016\%$  в ковше после продувки.

Металл опытной технологии, по сравнению со стандартной, имел повышенное содержание сульфидов и меньшее содержание оксидов и глобулей. При практически одинаковой окисленности (ЦНИИЧМ-КМК - 0,0032; типовая "Союзспецстали" - 0,0039 и опытная - 0,0032% штанга "А") готовый металл опытных плавков имел меньший индекс загрязненности кислородсодержащими включениями  $J_0 = 0,18 \cdot 10^{-3}$  против  $J_0 = 0,54 \cdot 10^{-3}$  у металла, выплавленного по технологии ЦНИИЧМ-КМК и  $J_0 = 1,54 \cdot 10^{-3}$  у металла, выплавленного по типовой технологии "Союзспецстали" (среднее по 10 плавкам). В готовом прокате опытной технологии отсутствовали крупные включения оксидов титана, в то время как в металле стандартных технологий

загрязненность ими была значительна  $J_k = (0,16 \pm 0,35) \cdot 10^{-3}$ , и они достигали размеров  $30 \pm 40$  мкм.

По величине расхождения между двумя значениями индексов загрязненности готового сорта по технологии ЦНИИЧМ-КМК (10 плавок) и опытной (10 плавок) оценили случайна или закономерна разница в качестве металла (по загрязненности кислородсодержащими включениями) между двумя технологиями. Расчеты показали, что для штанги А величина расхождения  $t = 3,86$  и для штанги С -  $t = 4,38$ . Для 18 степеней свободы критерий Стьюдента ( $t$ ) должен быть не менее 2,88 при вероятности равной 0,01. Высокие значения критерия Стьюдента между двумя выборками характеризующими качество металла показали, что разница по двум сравниваемым технологиям закономерна, а не случайна и может быть объяснена лучшими результатами, получаемыми при выплавке по опытной технологии.

Готовый сорт металла опытной технологии при оценке по максимальному баллу имел следующую загрязненность: сульфиды (S) -  $(2 \pm 2,5)$ , оксиды (O) -  $(1 \pm 1,5)$ , глобулы (Г) -  $(0 \pm 1,0)$ . Металл стандартной технологии: ЦНИИЧМ-КМК - (S -1,5), (O - 1,8  $\pm$  2,0), (Г - 2  $\pm$  2,5), типовая - (S -1,5), (O -2,0), (Г -2,0).

Интересно, что во время выпуска и разливки металл опытных плавок также меньше загрязнен кислородсодержащими включениями, чем металл, выплавленный по стандартным технологиям и в нем практически отсутствуют крупные глобулярные включения ( $40 \pm 100$  мкм). Единичные крупные ( $40 \pm 60$  мкм) включения идиоморфной и глобулярной формы встречались только в пробах металла до продувки аргоном. Загрязненность металла опытной технологии кислородсодержащими включениями в ковше (после продувки) равна  $J_k = 0,26 \cdot 10^{-3}$  против  $J_k = 0,88 \cdot 10^{-3}$  металла технологии ЦНИИЧМ-КМК и  $J_k = 3,1 \cdot 10^{-3}$  - типовой технологии. Можно предположить, что продувка металла аргоном в значительной степени способствует более полному и быстрому удалению оксидных включений. Однако металлографическая оценка металла опытной технологии из ковша до продувки показала невысокую загрязненность стали кислородсодержащими включениями (в среднем  $0,39 \cdot 10^{-3}$ ). Таким образом, наряду с положительным влиянием аргона, быстрое рафинирование металла от оксидных включений может быть объяснено хорошей ассимилирующей способностью частиц шлаковой эмульсии, образовавшейся при обработке металла окислительным шлаком.

При микрорентгеноспектральном анализе единичных крупных оксидных включений в пробах металла из ковша (до продувки) уста-



новлено, что включения содержат повышенные количества  $Al$ , пониженные  $Ca$ ,  $Mg$  и не имеют развитой сульфидной оболочки при сопоставлении с крупными включениями в металле стандартных технологий.

Причиной более полного Удаления частиц шлаковой эмульсии может быть отсутствие на их поверхности развитой сульфидной оболочки не снижающей в значительной степени межфазное натяжение между шлаковыми включениями и металлом, что не препятствует их переходу через межфазную границу металл-шлак в шлаковую фазу.

Преимущественным типом включений в готовом сорте были отдельные зерна оксидов и оксидные строчки в обширной сульфидной оболочке. Оксидные включения без сульфидной оболочки встречались очень редко. Исследования включений в готовом сорте на микрорентгеноанализаторе  $MS-46$  идентифицировали оксидную фазу, содержащуюся в толще сульфидной оболочки как высокоглиноземистые включения. Кристаллооптический анализ также классифицировал оксидные включения в готовом сорте опытной технологии как состоящие из идиоморфных кристаллов корунда размерами  $5\div 7$  мкм. Идентификация сульфидной оболочки при сопоставлении интенсивности излучения элементов показала, что она состоит из сульфида марганца.

Исследования готового проката показали, что неметаллические включения в металле опытной технологии представлены высокоглиноземистыми включениями в обширной оболочке из сульфида марганца, в то время как включения в металле, выплавленном по стандартным технологиям, представлены большим набором кристаллических фаз. Наличие сульфидной ( $MnS$ ) амортизирующей оболочки, выпавшей на оксидных подложках при кристаллизации стали, снижает действие остроугольных включений корунда как концентраторов напряжений в металлической матрице.

Учитывая результаты ряда работ, в которых показано, что крупные глобулярные включения могут быть продуктами окисления  $Ca$  и  $Mg$ , восстановленными из шлака, рассчитали их активности в металле, выплавленном под белым и высокожелезистым шлаком. Для оценки вероятности восстановления  $Ca$  и  $Mg$  из шлака активными элементами металлического расплава  $Al$  и  $Si$  рассчитали активности оксидов  $Ca$ ,  $Mg$ ,  $Si$ ,  $Al$  в шлаках, которым обрабатывался металл в ковше и активности элементов - восстановителей  $Al$  и  $Si$  в металле. Расчеты активности оксидов  $Ca$ ,  $Mg$ ,  $Si$ ,  $Al$  проводили, используя теорию регулярных ионных растворов В.А. Кожеурова для шлаков, состоящих из семи оксидных компонентов ( $FeO$ ,  $MnO$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ). Недостающие значения теплот смешения,

необходимые для расчета активностей оксидов получили анализом двойных диаграмм состояния соответствующих оксидов.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что активности соответствующих оксидов кальция и магния незначительно разнятся в белых и окислительных шлаках.

Проведенные термодинамические расчеты показали, что активности  $Ca$  и  $Mg$  в металле, выплавленном под белыми и окислительными шлаками сопоставимы. В то же время в металле опытной технологии практически отсутствуют крупные кислородсодержащие включения, содержащие в значительных количествах кальций и магний, в то время как в металле, выплавленном под белыми шлаками, они преобладают. Это может служить косвенным подтверждением того, что крупные кислородсодержащие включения не могут быть продуктами совместного окисления  $Ca$  и  $Mg$ , восстановленными из шлака.

Полученные результаты были использованы при разработке усовершенствованной технологии плавки подшипниковой стали в 40-тонных электропечах ЧМЗ, позволившей улучшить качество и снизить себестоимость подшипниковой стали.

#### ВЫВОДЫ

1. Изучено поведение кислородсодержащих включений в процессе выплавки-разливки-кристаллизации-пластической деформации подшипниковой стали. Изучена морфология неметаллических включений в металле на всем пути жидкая сталь-готовый сорт.
2. Крупные глобулярные включения (однофазные и гетерофазные) появляются в ковше при обработке металла электропечным шлаком при выпуске. Наличие в части крупных глобулярных включений выделений флюорита ( $CaF_2$ ) и проведенная идентификация крупных включений в металле из ковша и проб шлака на микрорентгеноанализаторе MS-46 позволяет говорить о крупных глобулярных включениях как частицах запутавшегося электропечного шлака.
3. Состав конечных электропечных шлаков влияет на степень рафинирования металла от оксидных включений во время выпуска. Увеличение в составе шлаков перед выпуском содержания  $FeO$  и  $MgO$  вызывает повышенную общую загрязненность оксидными включениями стали в печи перед выпуском, в ковше и в готовом сорте. Не установлено математически достоверной связи между загрязненностью стали в печи перед выпуском и готового сорта, что свидетельствует о существенном влиянии шлаковой фазы на процессы рафинирования металла от оксидных включений.

4. На крупных глобулярных включениях зафиксирована сульфидная оболочка, образовавшаяся в результате взаимодействия шлаковых частиц с металлом при эмульгировании в ковше. Установлено, что эта оболочка образовалась во время выпуска и выдержки металла в ковше при десульфурации. Наличие сульфидной оболочки, а также развитие на поверхности включений реакции десульфурации вызывает возрастание сил адгезии, что затрудняет их переход в шлаковую фазу через межфазную границу металл-шлак и способствует фиксации в металле.

5. Показано, что в процессе кристаллизации слитка подшипниковой стали, выплавленной по типовым вариантам технологии, крупные глобулярные включения изменяются незначительно и идентичны включениям, обнаруживаемым в пробах металла, отобранных из ковша во время выпуска и разливки. Химический и фазовый состав неметаллических включений в процессе пластической деформации меняется незначительно.

6. Крупные глобулярные включения в готовом прокате подшипниковой стали, выплавленной по типовым вариантам технологии, содержат повышенные количества оксидов кальция и магния и, в основном, представлены фазами магнезиальной шпинели и алюминатов кальция. Все крупные включения имеют оболочку из андгамита ( $CaS$ ).

7. С учетом проведенных исследований причин повышенной загрязненности подшипниковой стали, обработанной белым шлаком, предложена и опробована новая технология выплавки, предусматривающая обработку металла в ковше высокожелезистым шлаком с одновременным раскислением  $Al$  и  $FeSi$  и продувкой  $Ar$  (а.с. № 580228). Разработанная технология обеспечила получение металла с невысокой общей загрязненностью оксидными включениями при практически полном отсутствии крупных глобулярных включений и более высокой загрязненностью сульфидными включениями при сопоставлении с металлом стандартных технологий. Достоверность разницы в степени загрязненности опытного и серийного металла подтверждается методами математической статистики.

Разработанная технология позволяет вести плавку одношлаковыми процессом, что сокращает длительность плавки, увеличивает производительность, уменьшает производственные затраты, улучшает культуру производства и упрощает технологический процесс.

8. Полученные результаты были использованы для усовершенствования действующей на ЧМЗ технологии плавки подшипниковой стали в 40-тонных печах, в частности, при разработке технологии

плавки с аргоно-шлаковым рафинированием.

Основное содержание работы опубликовано в следующих работах:

1. Гудим Ю.А., Поволоцкий Д.Я., Нагамазьянов Р.З., Зеленецкая Т.А. Исследование причин повышенной загрязненности шарико-подшипниковой стали неметаллическими включениями. - В сб.: Вопросы производства и обработки стали. - Челябинск. 1974, № 133, с. 98-105.

2. Поволоцкий Д.Я., Гудим Ю.А., Нагамазьянов Р.З., Колесов Н.Т. Об удалении продуктов раскисления металла алюминием в начале восстановительного периода плавки в дуговой электропечи. - В сб.: Вопросы производства и обработки стали. - Челябинск. 1974, № 133, с. 106-109.

3. Поволоцкий Д.Я., Гудим Ю.А., Нагамазьянов Р.З., Колесов Н.Т. Изменение и удаление продуктов раскисления металла алюминием и кремнием в начале восстановительного периода плавки. - В сб.: Вопросы производства и обработки стали. - Челябинск. 1974, № 147, с. 80-84.

4. Поволоцкий Д.Я., Гудим Ю.А., Нагамазьянов Р.З., Любимов В.И., Вайнштейн Б.Г. Неметаллические включения в слитке подшипниковой стали. - В сб.: Современные проблемы электрометаллургии стали. Труды II Всесоюзной конференции. - Челябинск. 1975, № 166, с. 123-130.

5. Гудим Ю.А., Нагамазьянов Р.З., Вайнштейн Б.Г., Поволоцкий В.Д. Неметаллические включения в подшипниковой стали, выплавленной одношлаковым процессом в дуговой электропечи. - В сб.: Вопросы производства и обработки стали. - Челябинск, 1976, № 177, с. 104-110.

6. Поволоцкий Д.Я., Гудим Ю.А., Нагамазьянов Р.З. Выплавка подшипниковой стали с обработкой металла окисленным шлаком и аргоном. - В сб.: Вопросы производства и обработки стали. - Челябинск. 1980, № 245, с. 50-58.

7. Поволоцкий Д.Я., Гудим Ю.А., Нагамазьянов Р.З., Пегов В.Г. Неметаллические включения в подшипниковой стали, выплавленной одношлаковым процессом с внепечной обработкой металла аргоном. - Тезисы докладов XI пленарного заседания постоянно действующего Всесоюзного семинара "Сталь и неметаллические включения". Донецк, июнь 1982.

8. А.с. 580226 (СССР). Способ плавки подшипниковой стали / Д.Я. Поволоцкий, Ю.А. Гудим, Р.З. Нагамазьянов, Г.Г. Ведерников и др. - Оpubл. в Б.И., 1977, № 42.