Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий, С. Б. Гаманюк, М. В. Кириличев, А. Э. Поповкина

**ВЛИЯНИЕ ОКИСЛЕННОСТИ МЕТАЛЛА И ОСОБЕННОСТЕЙ ВАКУУМИРОВАНИЯ
НА ФОРМИРОВАНИЕ И РАСПОЛОЖЕНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ
В КРУПНЫХ СЛИТКАХ СТАЛИ 38ХНЗМФА**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail.tecmat@vstu.ru

В статье рассматриваются вопросы влияния окисленности стали и особенностей вакуумирования на процессы образования и распределения неметаллических включений в крупных слитках и поковках, предназначенных для энергетического машиностроения. Показано, что распределение сульфидов и окисульфидов по сечению слитка связано между собой обратной зависимостью, что обусловлено изменением концентраций кислорода и серы в процессе кристаллизации расплава. Под воздействием интенсификации процесса дегазации при вакуумной отливке слитков за счет продувки струи металла аргоном образующиеся неметаллические включения имели минимальные размеры, более благоприятное распределение, что обусловило возрастание пластических характеристик получаемых поковок в среднем на 15–20 %.

Ключевые слова: стальной слиток, окисленность, неметаллические включения, окисульфиды, сульфиды, разливка, кристаллизация, механические свойства.

N. A. Ziuban, D. V. Rutskiy, S. B. Gamaniuk, M. V. Kirilichev, A. E. Popovkina

**INFLUENCE OF METAL OXIDATION AND FEATURES OF VACUUMING
ON THE FORMATION AND LOCATION OF NONMETALLIC INCLUSIONS
IN LARGE STEEL INGOTS 38XH3MFA**

Volgograd State Technical University

The article deals with the influence of steel oxidation and features of vacuuming on the processes of formation and distribution of non-metallic inclusions in large ingots and forgings intended for power engineering. It is shown that the distribution of sulfides and oxysulfides across the ingot cross-section is inversely related to each other, due to changes in oxygen and sulfur concentrations during the crystallization of the melt. Under the influence of intensification of degassing process at vacuum casting of ingots at the expense of purging of a jet of metal argon, the formed nonmetallic inclusions had the minimum sizes, more favorable distribution that caused increase in plastic characteristics of the received forgings on the average for 15–20 %

Keywords: steel ingot, oxidation, nonmetallic inclusions, oxysulfides, sulfides, casting, crystallization, mechanical properties.

Вектор развития энергетического машиностроения определяет приоритетные направления совершенствования технологии и улучшения качества продукции, связанные, прежде

всего, с производством крупных заготовок. Ротора паровых турбин крупных гидроэлектростанций, устойчиво работающих при температурах 300–600 °С, корпуса обечаек АЭС, судо-

вые валы атомных ледоколов в связи с активным освоением арктической зоны – все это требует от современных материалов повышенной надежности и работоспособности в условиях высоких и низких температур, а также воздействия агрессивных сред.

Как правило, при выплавке сталей для данных заготовок используют качественные шихтовые материалы, обеспечивающие минимальное содержание вредных примесей в готовых изделиях (особенно серы и фосфора). С другой стороны немаловажную роль оказывают на качество металла особенности формирования и расположения неметаллических включений, так как от этих факторов зависят прочностные и пластические характеристики материала, его анизотропия свойств, оценка потенциальной возможности развития микротрещин и т. п. Имея отличное от металла кристаллическое строение и свойства, неметаллические включения при кристаллизации образуют вокруг себя пограничную рыхлую «буферную» зону за счет различной усадки металла и самого включения. В этих микронесплошностях может скапливаться большая концентрация газов, в частности, водорода за счет его низкой растворимости в твердом металле, что впоследствии может приводить к возникновению значительных напряжений в локальных участках заготовки и возможному разрушению изделия в процессе его эксплуатации.

Чрезмерное расположение карбидов на границах зерен, или легкоплавких эвтектик может приводить к падению пластических характеристик изделий, или ослаблению межзеренных

границ и разрушению заготовки в процессе ее деформационной обработки.

Таким образом, для достижения соответствующего уровня качества крупногабаритных изделий энергетического машиностроения, наряду с повышением чистоты выплаваемого металла, необходимо стремиться к рациональному формированию и расположению неметаллических включений, как фактору, существенно повышающему ресурс надежности изделий в процессе их долговременной эксплуатации.

Целью работы являлось исследование распределения неметаллических включений – оксидов, оксисульфидов и сульфидов в крупном слитке стали 38ХНЗМФА в зависимости от степени раскисленности металла и особенностей вакуумирования при отливке слитков.

Для проведения исследований отлитый в вакууме крупный слиток массой 24,2 т стали 38ХНЗМФА после термообработки подвергался порезке – из него вырезали продольную осевую плиту толщиной 25 мм. Из этой плиты были получены темплеты размером 200×350 мм. Исследование загрязненности металла сульфидными, оксидными и оксисульфидными включениями проводилось по методу Л [1]. Предельная ошибка при определении загрязненности включениями составляет $0,75 \cdot 10^{-3}$. Идентификация включений проводилась с использованием металлографических методов и методов электронной микроскопии FEI Versa 3D.

Результаты проведенных исследований показывают (рис. 1), что распределение сульфидов и оксисульфидов по сечению половины высоты слитка происходит далеко неоднозначно.

Рис. 1. Точки регрессионного распределения сульфидов и оксидов по сечению половины высоты слитка из стали 38ХНЗМФА массой 24,2 т

Повышенное содержание оксисульфидов и малое количество сульфидов в корковой зоне и частично в зоне столбчатых кристаллов обусловлено еще достаточной активностью кислорода при разливке и начальных этапах затвердевания металла. Быстро продвигающийся фронт кристаллизации захватывает образующиеся в этот момент оксиды с формирующейся на них оболочки сульфидов. По мере расходования кислорода на формирование включений его концентрация в расплаве уменьшается, а количество сульфидной фазы за счет перемещения ее фронтом кристаллизации вглубь расплава возрастает. Такой механизм изменения концентраций кислорода и серы в процессе кристаллизации расплава создает условия для формирования сульфидной фазы в крайне неблагоприятной пленочной форме (легкоплавкой эвтектики), располагающейся по границам зерна. Таким образом, степень окисленности расплава играет ведущую роль в процессе образования неметаллических включений, в частности, сульфидов и оксисульфидов, и контролируя ее значение на завершающих стадиях обработки расплава можно добиться получения сульфосодержащих включений заданной формы и состава.

Далеко немаловажную роль на процесс формирования и распределения неметаллических включений оказывает вакуумирование расплава. Во многих работах показано, что за счет существенного уменьшения содержания кислорода в стали процесс формирования оксидов различного типа проходит в благоприятном режиме, т. е. образующиеся включения

имеют относительно небольшие размеры и имеют тенденцию к более равномерному распределению.

С целью улучшения полученного эффекта проводились исследования по интенсификации процесса струйного вакуумирования стали при отливке крупных слитков [2, 3]. При этом использовались разливочные стаканы с различной внутренней конфигурацией. Эксперименты проводились на холодной модели. Было установлено, что наибольшей эффективностью обладает стакан со спиральной внутренней полостью, где степень выделения газов из струи достигала 90 % [4]. В промышленных условиях наиболее эффективным способом повышения эффективности вакуумирования является продувка струи инертным газом при отливке слитков в вакууме. Этот способ применяется также и при непрерывной разливке стали. При отливке слитков в вакууме с продувкой аргоном количество выделяющихся газов увеличивалось в среднем на 30–35 %, и это оказало свое воздействие на размер и распределение неметаллических включений.

Для изучения количества и состава неметаллических включений была выбрана плавка Б-9876, металл которой разливался под вакуумом на два слитка массой 24,2 т, предназначенных для изготовления заготовок судовых валов. Марка стали 38Х2Н2МА. Первый слиток отливался с продувкой струи аргоном с расходом 150–160 л/мин. Химический состав металла слитков, а также режим и характеристики отливки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав и характеристика опытного и сравнительного слитков

№ слитка	Химический состав металла, %									Технологические параметры отливки				
	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Cu	T _{вып.} , °C	τ _{теп.} мин.	τ _{приб.} мин.	P _{нач.} кПа	P _{ср.} кПа
1	0,38	0,36	0,27	0,02	0,013	1,5	1,42	0,25	0,1	1630	6,5	5,4	0,4	0,5
2										1630	6,0	5,4	0,4	0,5

Распределение неметаллических включений изучалось на шлифах проб металла, отобранных из штатных дисков контроля макроструктуры с обоих концов поковок, полученных из исследуемых слитков. Пробы на неметаллические включения отбирались из центра диска, середины его радиуса и края (рис. 2). Качественный анализ производился посредством определения оптических характеристик включе-

ний при увеличениях $\times 100$ – 1000 . Объемный процент включений в 100 и 125 полях зрения определялся при увеличении $\times 200$.

На рис. 3 и 4 показано распределение включений по размерам (с донного и прибыльного концов поковок), а на рис. 5 и 6 – распределение суммарного количества включений по сечению диска, соответственно с донной и прибыльной части.

Рис. 2. Схема вырезки проб из штатных дисков для анализа неметаллических включений

Анализ распределения неметаллических включений показал, что в осевой зоне поковки со стороны донной части количество включений в металле опытного слитка по сравнению с обычным резко снижается. Из рис. 3 видно, что размеры включений металла осевой зоны опытной поковки в донной части не превышают 13,5 мкм, в то время как в металле обычного слитка диаметр включений доходит до 40 мкм. Соответственно и общее количество включений в донной части осевой зоны опытной поковки примерно в пять раз ниже, чем в обычной.

Рис. 3. Распределение включений по размерам в зависимости от радиуса диска с первого конца поковки, (донная часть)

Рис. 4. Распределение включений по размерам в зависимости от радиуса диска поковки со стороны второго конца (прибыльная часть)

По составу это оксисульфиды, имеющие форму как вытянутых нитей, так и глобулей, (рис. 7). В металле обычной поковки имелись оксиды сложного состава. На середине радиуса

диска первого конца поковки картина распределения включений была несколько иной. В опытном слитке количество включений увеличилось, но их размеры не превышали 28 мкм.

Рис. 5. Распределение суммарного количества включений в зависимости от радиуса диска с первого конца поковки (донная часть)

Рис. 6. Распределение суммарного количества включений в зависимости от радиуса диска со второго конца поковки (прибыльная часть)

Рис. 7. Неметаллические включения в исследуемых слитках

В обычном металле общее количество включений не изменилось, но преобладали средней величины включения с размером 13,5–19,4 мкм. В опытной поковке включения представляли собой хаотично расположенные вытянутые и глобулярной формы оксисульфиды, в то время как в металле обычной поковки встречались очень сложные по составу оксиды округлой и вытянутой формы.

На периферии исследуемого штатного диска анализ показал значительное возрастание числа включений в опытной поковке, причем это возрастание связано с резким увеличением количества мелких включений с размерами от 9 до 28 мкм. В металле обычной поковки количество включений снижалось по сравнению с осевой зоной и половиной радиуса диска, причем это снижение происходило в основном за счет отсутствия в металле крупных включений с размерами более 20 мкм.

По составу включения периферийных участков опытного и сравнительного дисков практически друг от друга ничем не отличались, хотя в обычном металле на границе включения с металлической матрицей отмечалось наличие мелких пор. Включения опытной поковки представляли собой оксисульфиды, причем мелкие из них, от 7,6 до 13,5 мкм, имели глобулярную форму, а более крупные – от 13,5 до 40 мкм, располагались в матрице металла в виде вытянутых нитей. Таким образом, ввод аргона в струю металла при вакуумной отливке слитков способствует уменьшению размеров неметаллических включений и снижению их количества в осевой зоне. Это способствовало повышению пластических свойств заготовок валов турбогенераторов и гребных валов – по относительному удлинению на 8–10 %, по ударной вязкости на 10–28 %, по относительному сужению до 23 %.

В исследованиях [5–7] с применением методов просвечивающей и растровой электронной микроскопии установлено наличие на дне чашек вязкого излома дисперсных неметаллических включений размером 10 мкм. Как отмечается в работах [8, 9], увеличение количества включений размером 30...60 мкм способствует зарождению трещины. Как видно из приведенных выше данных размер включений в опытной поковке практически не превышает 30 мкм, причем основная доля включений падает на размер 10–15 мкм. На втором конце поковки абсолютное количество включений увеличивается более чем в два раза, однако, их фракци-

онный состав остается аналогичным составу включений с первого конца. По иному распределяются включения в поковке, изготовленной по штатной технологии. Из диаграмм видно, что на прибыльном конце поковки, количество включений с размером более 30 мкм существенно возрастает и составляет большинство среди остальных включений. Скопление мелких и средних неметаллических включений в прибыльной части опытных поковок мало отражается на значении механических свойств, так как значительная часть этих включений удаляется вместе с отходами при ковке слитка.

Таким образом, образование и распределение неметаллических включений в слитке, в частности сульфидов и оксисульфидов, определяется степенью окисленности расплава, от чего зависит их формообразование и расположение. Ввод аргона в струю металла при вакуумной отливке слитков обеспечивает уменьшение размеров включений и, как следствие, возрастание пластических характеристик готовых изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 1778–70. Металлографические методы определения неметаллических включений. Государственный комитет стандартов Совета министров СССР. Москва. – 1970. 32 с.
2. Совершенствование технологии отливки крупных слитков с целью повышения надежности и эксплуатационной стойкости получаемых из них роторов турбогенераторов (Improvement of the casting technology for large ingots for rise of reliability and operating durability of a turbine set rotors manufactured of these ingots) / Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий // Черные металлы (Chemical Metallurgy). – 2018. – № 2 (1034). – С. 32–38.
3. Развитие технологии получения крупных слитков и проблемы качества металла / Н. А. Зюбан, С. И. Жульев // Металлург. – 2009. – № 6. – С. 48–50.
4. Формирование структуры струи при разливке стали в вакууме и анализ эффективности дегазации металла / Н. А. Зюбан, Н. В. Клячина, М. Н. Летников // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 9. – С. 20–23.
5. Смирнова, А. В. Электронно-микроскопическое исследование влияния неметаллических включений на характер разрушения стали / А. В. Смирнова, З. В. Баранцева, Г. П. Громова // Применение в металловедении просвечивающей и растровой электронной микроскопии. – М. : МДНТП, 1976. – С. 94–96.
6. Явойский В. И., Близнюков С. А., Вишкарёв А. Ф. [и др.] // Сталь. – 1975. – № 1. – С. 25–31.
7. Крюссар, Ш. Сравнение вязкого и усталостного разрушений / Ш. Крюссар, Ж. Плато, Р. Тамхонкар [и др.] // Атомный механизм разрушения. – М. : Металлургиздат, 1963. – С. 535–574.
8. Passoja D.E., Hill D.C. // Metallurgical Transaction. 1974. V.5. № 8. P. 1851–1854.
9. Иванов, В. П. Степень опасности неметаллических включений в стали / В. П. Иванов, А. М. Мордухович, В. М. Финель // Проблемы разрушения металлов. – М. : МДНТП, 1975. – С. 172–181.