

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАСКИСЛЕНИЯ СТАЛИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРУШЕНИЮ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Иванов Б.С.¹, Семериков К.А.², Шабалов И.П.¹, Филиппов Г.А.¹

¹ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина», г. Москва, Россия,
iqs12@yandex.ru

² ОАО «Трубная металлургическая компания», г. Москва, Россия

Как известно, раскисление жидкого металла алюминием обуславливает наименьшее содержание в стали кислорода по сравнению другими раскислителями, т.е. раскисление алюминием приводит к более полному очищению стали от включений. Размер частиц включений, оставшихся в металле после выполнения операции по раскислению расплава, около 10 мкм. Скорость всплывания таких мелких включений крайне мала. В то же время большая часть частиц глинозема, образующихся при раскислении расплава алюминием, достаточно велики, чтобы скорость их всплывания и перехода в шлак были на необходимом уровне для рафинирования металла. В этом можно убедиться, если определить размер включений глинозема после раскисления стали алюминием.

Для оценки размера частиц глинозема, образующихся в стали при раскислении ее алюминием, выполнили расчет возможных их значений по уравнению Кньюппеля:

$$r^2 = r_0^2 + 2D_0 \frac{M_{Al_2O_3}}{M_o \rho} [0] t,$$

где r_0 , r – начальный и конечный радиусы частицы в начале и конце ее формирования; $M_{Al_2O_3}$, M_o – молярный вес глинозема и кислорода; D_0 – коэффициент диффузии кислорода в стали; $[0]$ – концентрация кислорода в стали; t – время кристаллизации; ρ – плотность фазы, г/см³

Для выполнения расчета использовали следующие данные: $M_{Al_2O_3} = 102$ г; $M_o = 16$ г; $D_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ см²/сек; $\rho_{Al_2O_3} = 3,96$ г/см³; $[0]_1 = 0,002\%$ ($0,14 \cdot 10^{-3}$ г/см³); $[0]_2 = 0,003\%$; $t = 0,15 \cdot 10^4$ сек (25 мин).

Выполненные расчеты показали, что при содержании в расплаве 0,002-0,003% кислорода в стали образуются в основном частицы глинозема размером 60±70 мкм, а образовавшиеся включения глинозема такого размера должны легко удаляться из жидкой стали.

Также необходимо еще отметить следующие положительные факторы при использовании алюминия для раскисления стали. Известно, что силикатные включения, даже если они имеют большие размеры, плохо удаляются из расплава. Поэтому для получения чистой стали, с низким содержанием силикатов, необходимо к моменту ввода кремния иметь возможно низкое содержание кислорода в расплаве, которое в первую очередь можно достичь вводом алюминия в достаточном количестве, чтобы связать и удалить большую часть кислорода и только затем после раскисления алюминием присаживать кремний.

Поскольку частицы глинозема образуются в жидкой стали, то они равномерно распределены в объеме расплава и оказывают модифицирующее воздействие на структуру слитка. Наличие оставшихся частиц глинозема в расплаве способствуют увеличению центров кристаллизации в жидкой стали и уменьшению размеров дендритов (зерен) в слитке, увеличению плотности литой структуры.

Мелкодисперсные включения глинозема размером примерно 10 мкм, оставшиеся в расплаве после раскисления, могут в процессе разливки стали несколько укрупниться и служить подложками для осаждения сульфидной фазы. Поскольку сульфиды в подшипниковой стали образуются в процессе кристаллизации, то образовавшиеся частицы сульфидной фазы будут осаждаться и распределяться на большом числе готовых подложек. Это приведет к более равномерному распределению и измельчению частиц сульфидной фазы по объему металла.

Принимая во внимание положительные факты по улучшению качественного состояния металла при использовании алюминия в качестве раскислителя, был определен регламент выполнения исследований по совершенствованию технологии производства шарикоподшипниковой стали. Целью исследования являлось создание технологии, обеспечивающей получение проката с более плотной, мелкозернистой макроструктурой и с меньшей центральной пористостью. Для проведения исследований в существующую технологию производства подшипниковой стали были внесены дополнения и изменения по выплавке в 100-т дуговой печи, внепечной обработке, разливке и прокатному переделу, позволившие улучшить качественное состояние макроструктуры проката.

В основу концепции использования алюминия при выплавке подшипниковой стали для снижения осевой пористости непрерывнолитой заготовки заложено предположение о способностях алюминия наряду с раскислением расплава, оказывать также модифицирующее влияние на макроструктуру металла при его кристаллизации. Модифицирующее влияние на процессы кристаллизации алюминий оказывает через свои окисные соединения, которые выступают в качестве дополнительных центров кристаллизации, воздействуя на формирование литой макроструктуры и соответственно на центральную пористость, а также на содержание и размер различных неметаллических включений. Для подтверждения этой концепции были проанализированы результаты промышленных экспериментов.

По результатам даточного контроля металла опытных плавок было рассмотрено влияние содержания алюминия на качество макроструктуры трубных заготовок по таким показателям как центральная пористость, максимальный балл оксидов, сульфидов и глобулей.

Показано, что с увеличением содержания алюминия в металле снижается балл по центральной пористости заготовки. С увеличением содержания алюминия в металле прослеживается тенденция снижения максимального балла оксидов, содержащихся в стали.

Наиболее функционально существенная связь прослеживается между максимальным баллом сульфидной фазы в металле и содержанием алюминия. С увеличения содержания алюминия в металле происходит снижения размеров сульфидной фазы.

С увеличением содержания алюминия в металле возрастает количество мелких окисных частиц алюминия, которые при кристаллизации расплава являются готовыми подложками для образующихся сульфидных включений. При ограниченном содержании сульфидов в металле происходит их перераспределение на большее количество частиц глинозема, соответственно с уменьшением размеров сульфидной фазы и более равномерному ее распределению в заготовке. Этим явлением можно объяснить зависимость размеров сульфидной фазы в литом металле от количественного содержания алюминия.

Подобную зависимость также можно обнаружить между содержанием алюминия в металле и размером недеформирующихся силикатов (глобулей), хотя менее отчетливо выраженную. С увеличением содержания алюминия снижается величина максимального балла по глобулям.

Целью настоящей работы кроме того была оценка трещиностойкости стали ШХ-15, выплавленной на основе железа прямого восстановления, в зависимости от содержания алюминия и ее сопоставление со свойствами стали обычного способа производства.

Показано, что дополнительное введение в кристаллизатор алюминиевой проволоки повышает содержание алюминия в стали от 0,010–0,011 до 0,026–0,033%, что способствует повышению однородности структуры, уменьшению среднего размера исходного зерна в 2 раза.

Повышение содержания алюминия в стали ШХ-15 от 0,010 до 0,033% увеличивает прочность при изгибе на 280, 160, 140 Н/мм² в горячекатаном, отожженном и термоупрочненном состояниях соответственно, в 2 раза пластичность в отожженном состоянии.

Повышение содержания алюминия в стали ШХ-15 увеличивает работу разрушения от 7,3 до 10,2; от 15,7 до 24,6; от 2,8 до 3,4 и вязкость разрушения K_{Ic} от 84 до 102, от 97 до 107, от 28 до 37 МПа $\sqrt{м}$ в горячекатаном, отожженном и термоупрочненном состояниях соответственно.

Повышение содержания алюминия в стали ШХ-15 увеличивает водородостойкость в горячекатаном состоянии и сопротивление замедленному разрушению после закалки и отпуска, что является следствием возрастания сопротивления зарождению и распространению трещины.

Более высокий комплекс механических свойств, трещиностойкости и сопротивления замедленному разрушению стали ШХ-15 с повышенным содержанием алюминия является следствием измельчения структуры стали, снижения уровня остаточных микронапряжений и концентрации вредных примесей на границах исходных аустенитных зерен.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ ВОДОРОДА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЮ ЖЕЛЕЗА И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Ливанова Н.О., Филиппов В.Г., Шабалов И.П.

ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва, Россия,
igs12@yandex.ru

Механизм деформации и разрушения железа и стали в присутствии примесей внедрения зависит от их взаимодействия с дефектами кристаллического строения. Повышение содержания примесей внедрения (углерода, азота) в железе и стали увеличивает сопротивление пластической деформации, повышая склонность к хрупкому разрушению. Имеющиеся экспериментальные результаты по влиянию водорода на сопротивление деформации железа и стали нельзя объяснить эффектом торможения дислокаций за счет образования на них примесных атмосфер. Есть основания ожидать, что водород играет существенно отличную роль по сравнению с другими примесями в сопротивлении пластической деформации и хрупкому разрушению. Представляет интерес исследования влияние водорода на сопротивление деформации железа с применением методов, чувствительных к количеству примесей в металле, например, при испытаниях со скачкообразным изменением скорости деформации [1, 2].

На рис. 1 представлены диаграммы растяжения технического железа с различным содержанием водорода, покрытых медью для предотвращения десорбции водорода. В исходном состоянии (без водорода) железо имеет зуб и площадку текучести (кривая 1). При введении в железо 12,6 ppm водорода (кривая 2) зуб текучести «сглаживается» и площадка текучести уменьшается, кроме того, происходит уменьшение предела текучести. При наличии в образцах железа 28,1 ppm водорода (кривая 3) зуб текучести исчезает (рис. 2). Кривая 4 представляет диаграмму растяжения образцов железа с 45,1 ppm водорода, на которой площадка текучести едва намечается. При вылеживании (старении) образцов после наводороживания, площадка текучести увеличивается.