

ЭФФЕКТ УПРОЧНЕНИЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО МЕТАЛЛА

Жеребцов С.Н., Шабалин В.Н.

Общеизвестно положительное влияние электрошлакового переплава (ЭШП) на качество шарикоподшипниковых, конструкционных, нержавеющей, электротехнических и других сталей и сплавов. Улучшение свойств металла в результате ЭШП обычно объясняется очисткой металла от газов, вредных примесей и неметаллических включений (эффект рафинирования). Благодаря специфике направленной кристаллизации при ЭШП также улучшается макро- и микроструктура слитка и увеличивается плотность металла. Вместе с тем, при тщательных и всесторонних исследованиях конструкционных электрошлаковых сталей выявляется ряд фактов, объяснить которые с помощью двух вышеуказанных причин не представляется возможным. Так, например, многократно повторенные испытания конструкционных сталей 09Г2С, 17Г1С, 15Х5М, 16ГНМА, 25Х2ГНТА, 38ХГСНА, 30НМА и других различных способов производства и рафинирования на окклюзионную способность по водороду обнаружили, что электрошлаковые стали поглощают водорода намного больше вакуумных и примерно столько же, сколько исходные (электродуговые). Между тем электрошлаковые стали как более плотные и более чистые должны поглотить водорода намного меньше исходных, а при равной или чуть большей загрязненности и несколько большей плотности – примерно столько же, сколько вакуумные.

Аналогичные результаты показали многократно проведенные исследования окклюзионной способности по водороду (водородонасыщаемость) конструкционной стали 25Х2ГНТРА, переплавленной на флюсах АНФ-6 и АН-291, - в обоих случаях электрошлаковая сталь поглотила больше водорода, чем исходная.

Качественно идентичные результаты были получены при исследовании электродных потенциалов и коррозионной стойкости всех упомянутых сталей в 53%-ном водном растворе серной кислоты и в 3 %-ном водном растворе хлористого натрия.

С другой стороны, преимущество электрошлаковых сталей в выносливости и циклической прочности перед исходными и вакуумными является неоспоримым. Так, пределы выносливости электрошлаковых сталей

были на 15-30% выше, чем у вакуумных (загрязненность в баллах всех вакуумных сталей была ниже), и на 28-42 % выше аналогичных показателей исходных сталей. В результате испытаний на малоцикловую усталость определили, что долговечность электрошлаковой стали оказалась на 45-72 % выше, чем у вакуумной, и на 110-220 % выше исходной. Более того, испытания на растяжение с наводороживанием и на малоцикловую усталость в наводороживающей среде показали, что, несмотря на повышенное содержание водорода в результате более интенсивной его окклюзии, прочность и выносливость сталей ЭШП значительно (на 50-150 %) превосходили аналогичные показатели исходных сталей и были на 15-50 % выше, чем у вакуумных сталей. Несмотря на меньшую коррозионную стойкость и более отрицательные электродные потенциалы, электрошлаковые стали оказались более прочными и долговечными при коррозии под напряжением (при коррозионном растрескивании и коррозионной усталости).

Надо полагать, что металл ЭШП обладает каким-то специфическим для него свойством, которым не обладают остальные сравниваемые стали, что благоприятно влияет на выносливость высокопрочных конструкционных сталей. По нашему мнению, объяснить эти факты можно наличием мельчайших неметаллических включений, возникающих при кристаллизации слитка при ЭШП, и вызываемым ими эффектом упрочнения. Наиболее типичными неметаллическими включениями в электрошлаковых сталях следует считать мелкодисперсные включения оксидов и нитридов; именно они и обуславливают эффект упрочнения стали.

В результате существенных отличий физических свойств (прежде всего, коэффициента термического расширения α и модуля упругости E металлической матрицы и неметаллических включений) возникают в металле остаточные термические напряжения, величина которых зависит от соотношения E и α матрицы и включения, а также от размера включений.

В окрестности сравнительно крупных включений нитридов, глинозема, муллита, шпинели и других, обладающих высокими значениями E и малыми значениями α , эти

остаточные напряжения зачастую превышают предел текучести металла, происходит его локальная пластическая деформация, что вызывает появление зон предразрушения, т.е. потенциальных очагов разрушения металла. Именно в этом, а не в концентрации напряжений у включений при действии внешней нагрузки состоит главная опасность неметаллических включений при усталости металлов. Однако в том случае, когда включение весьма мало, возникающие в металле остаточные напряжения, как правило, не превышают предела текучести металла и зоны предразрушения не появляются, хотя напряженность металла сохраняется. Громадное количество таких мелкодисперсных включений и их равномерное распределение в матрице способствуют созданию более или менее однородного напряженного состояния в электрошлаковой стали, т.е. сталь ЭШП в конечном счёте оказывается как бы внутренне упрочненной.

Упрочненный (т.е. деформированный) электрошлаковый металл поглощает больше водорода, его электродный потенциал более отрицателен, а коррозионная стойкость ниже, чем у неупрочненного металла. Возможны также и некоторые другие отрицательные

эффекты упрочнения (например, увеличение водородной проницаемости, снижение гелиевой плотности и т.д.).

Однако положительное влияние мелкодисперсных неметаллических включений в

электрошлаковой стали и вызываемого ими упрочнения значительно перекрывает эти недостатки. Во-первых, в результате указанного упрочнения конструкционные стали ЭШП по своей циклической прочности (в том числе по выносливости при малоцикловой усталости) превосходят не только металл рядовой плавки, но и вакуумные стали. Это преимущество сохраняется при эксплуатации сталей в рабочих средах (адсорбционные, коррозионные, наводороживающие и др.). Во-вторых, упрочненная структура электрошлаковой стали более изотропна, т.е. менее чувствительна к анизотропии механических свойств (особенно выносливости), зависящей от направления действия сил относительно оси прокатки. Изотропность электрошлаковой стали превышает аналогичные показатели сталей после любых других металлургических рафинирующих процессов. В-третьих, упрочнение способствует существенному повышению стабильности механических свойств (особенно выносливости) металла электрошлаковых конструкционных сталей.

Наличие упрочненной структуры металла в окрестности мелкодисперсных неметаллических включений в целом является признаком специфичности электрошлаковой конструкционной стали и обуславливает ее существенное преимущество перед сталями других способов производства и рафинирования по ряду свойств.