

ОСОБЕННОСТИ ЛЕГИРОВАНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ С 12 % ХРОМА

Моляров А.В., Беломытцев М.Ю.

Национальный исследовательский технологический университет «НИТУ «МИСиС»,
г. Москва, Россия
amoliarovv_875@mail.ru

Разработка новых жаропрочных конструкционных материалов ответственного назначения основывается прежде всего на определении оптимального химического состава, способного обеспечить требуемые служебные характеристики тяжело нагруженного оборудования. При этом обязательным условием для создаваемых сталей является подбор и назначение благоприятных режимов термической обработки, от которых напрямую зависит их структурно-фазовый состав и, как следствие, получаемые механические свойства.

Однако для большинства экспериментальных 12 %-ных хромистых сталей ферритно-мартенситного класса с базовым химическим составом на основе марки стали ЭП-450 (12Х12М2БФР) условие необходимости и представление о решающей роли термической обработки не только не выполняются, но являются и необязательными, что объясняется высоким уровнем стабильности переохлажденного аустенита.

Как следствие, изменение температуры нагрева в интервале 1000-1175°C и скорости последующего охлаждения в очень широком диапазоне значений 300-0,3 °C/сек (укладывающихся в ряд типовых режимов: закалка – нормализация – отжиг) не оказывает какого-либо влияния на сдвиговый характер γ - α превращения и не приводит к распаду аустенита по диффузионному механизму с образованием ферритно-карбидной смеси. Содержание мартенсита в структуре таких сталей всегда остается на неизменном уровне максимально возможном для данного химического состава. Для некоторых исследуемых сталей с почти полностью мартенситной структурой в диапазоне температур их предполагаемой эксплуатации 680-720°C время минимального инкубационного периода до начала распада аустенита по диффузионному механизму может достигать сотен часов, что подтверждено изотермическими диаграммами распада переохлажденного аустенита [1].

Данное обстоятельство делает невозможным применение термической обработки в ее классическом варианте (с закалкой и последующим высоким отпускком) для создания определенного структурно-фазового состояния в сталях с длительным инкубационным периодом распада аустенита. Поэтому единственно возможным способом формирования требуемой структуры путем термического воздействия на сталь с высокой стабильностью переохлажденного аустенита остается лишь изотермическая закалка. Такая термическая операция, редко используемая на практике в качестве термообработки, позволяет регулировать содержание феррита и мартенсита в заданных пределах, вплоть до получения полностью ферритной структуры.

В ферритно-мартенситных сталях с малым инкубационным периодом γ - α превращения термическая обработка является обязательной и классической технологической процедурой, поскольку оказывает непосредственное воздействие на структуру и механические свойства. Например, замедление скорости охлаждения стали с температуры аустенизации способствует образованию феррита в структуре и, как следствие, снижению всех прочностных характеристик.

Таким образом, для экспериментальных 12 %-ных хромистых сталей с длительным инкубационным периодом распада аустенита варьирование основных параметров термической обработки (температуры нагрева и скорости охлаждения) практически не влияет на структуру и механические свойства в отличие от колебаний и изменений в содержании и композиции легирующих элементов. Подбор и оптимизацию химического состава этих жаропрочных сталей с целью получения требуемых механических характеристик при заданной структуре необходимо проводить в узком интервале легирования. Чем более широким является интервал легирования, тем

более вариативным может быть фазовый состав стали. Кроме того, исследуемые высоколегированные стали с 12 % хрома легко переходят из одного структурного класса в другой даже при малых колебаниях химического состава.

Высокая степень легированности этих сталей сильно усложняет процесс прогнозирования и оптимизации химического состава и обуславливает обязательное применение компьютерного моделирования с использованием нейронных сетей. Необходимый набор данных для оценки в первом приближении степени влияния химических элементов на механические свойства был получен непосредственно из экспериментов с учетом основных положений теории легирования жаропрочных сталей с 12 % хрома. В частности, комплексное легирование такими карбидообразующими элементами, как Mo, W, Nb и V оказалось значительно эффективнее, чем эквивалентное легирование одним элементом, но в гораздо большем количестве [2].

Проведенные исследования на экспериментальных сталях позволили качественно оценить характер изменения прочностных показателей ($\sigma_{0,2}$ и σ_B) при совместном и количественно разном содержании в них карбидообразующих элементов. Было установлено, что параметры прочности монотонно возрастают с увеличением содержания углерода от 0,07 % до 0,23 %. При этом количество углерода, как оказалось, должно быть не более 0,20-0,25 %, что связано с ограничением количества и скорости роста карбидов, а также необходимостью сохранения достаточной прочности твердого раствора железа при длительных термических выдержках.

Попытка снижения содержания молибдена вплоть до полного его исключения из химического состава за счет повышения концентрации вольфрама до 3 % показала отрицательный результат – пределы прочности и текучести снижаются в 1,5-2 раза. Повышение содержания марганца от 0,5 % до 3 % приводит к повышению прочностных характеристик металла с максимальным упрочняющим эффектом при концентрациях близких к 3 %. В этом отношении замена никеля, как высокоактивируемого элемента в условиях облучения металла, на марганец с малой наведенной остаточной радиоактивностью выглядит вполне оправданной.

Характер влияния ниобия на прочностные свойства исследуемых экспериментальных сталей проявляется только в совместной связке с другими легирующими элементами. Даже увеличение содержания ниобия до практически предельного количества (0,4 %) в связке с вольфрамом, доля которого устремлена к максимуму (3 %), при полном отсутствии молибдена и минимальной концентрации марганца (не более 0,5 %) оказалось не способно скомпенсировать нехватку двух последних из указанных легирующих элементов (Mo, Mn) и их благоприятное совместное влияние на металл, в том числе предотвратить снижение уровня прочности.

Список литературы

1. Беломытцев М.Ю., Образцов С.М., Моляров А.В. О соотношении жаропрочности и содержания феррита в 12 %-ных хромистых сталях с ферритно-мартенситной структурой // *Металлург.* - 2017. - № 9. - С. 46-51.
2. Ланская К.А. Высокохромистые жаропрочные стали. М.: *Металлургия*, 1976. - 216 с.