

шее превращение аустенита в мартенсит. Этот процесс продолжается вплоть до достижения температуры конца мартенситного превращения (таблица 3). Границы температур начала и конца мартенситного превращения существенно зависят от химического состава стали, наличия в ней легирующих примесей.

Таблица 2 – Средние значения коэффициентов расширения

Структурная составляющая стали	Термический коэффициент расширения, °С	
	$\alpha \cdot 10^6$	$\beta \cdot 10^6$
Аустенит Мартенсит	23,0	70,0
	11,5	35,0

Таблица 3 – Влияние криогенной обработки на свойства стали

Сталь	Мартенситные точки, °С		Количество аустенита, %		Прирост твердости (HRC) после обработки
	M _n	M _k	До обработки	После обработки	
У8	250-225	-55	4-8	1-6	1,0
У12	175-160	-70	10-20	5-14	3-4
Х	180-145	-90	9-28	4-17	3-6
ХВГ	155-120	-110	13-45	2-17	5-10

Охлаждение ниже температуры конца мартенситного превращения не вызывает дальнейшего превращения аустенита в мартенсит. Чем больше углерода и легирующих элементов в стали, тем выше температура закалки, тем большее количество остаточного аустенита получается в закаленной стали и, следовательно, тем ниже температура начала *M_n* и конца *M_k* мартенситного превращения (таблица 2). На количество остаточного аустенита оказывает влияние и скорость охлаждения стали в области температур мартенситного превращения. С уменьшением этой скорости количество остаточного аустенита увеличивается, поскольку основная его часть не успевает преобразоваться и фиксируется.

Поэтому в некоторых марках стали не весь аустенит превращается в мартенсит. Определенное количество его стабилизируется, причем, чем больше аустенита стабилизируется, тем выше температура закалки и ниже температура мартенситного превращения. Выдержка закаленной стали при нормальной температуре ведет к стабилизации остаточного аустенита. При последующем охлаждении такой стали превращение начинается не сразу, а после циклического гистерезиса в несколько десятков градусов. Продолжительность перерыва между закалкой и криогенной обработкой влияет на степень стабилизации аустенита.

Криогенную обработку целесообразно применять для стальных нерегулируемых разверток, расточных блоков, протяжек и прошивок, гладких и резьбовых калибров, концевых мер длины, установочных мер, рабочих деталей штампов и пресс-форм.

УДК 669-157.84

Стали криогенной техники

Студент группы 104210 Коротков А.С.
 Научный руководитель – Вейник В.А.
 Белорусский национальный технический университет
 г. Минск

Криогенные стали (от греческого *kryos* - холод, мороз) – металлические материалы для машин и оборудования предназначенные для получения, перевозки и хранения сжимае-

мых газов и эксплуатируемые до $t_{\text{кип}}$ газов, С: -183; O₂: -196; N₂: -247; Ne: -253; H₂: -296 Ne, а также сжижаемых углеводородов (метана, и др.), $t_{\text{кип}}$ которых равна – 80-180 °С.

Стали для криогенной техники должны обеспечивать необходимую прочность в сочетании с высокой вязкостью и пластичностью, обладать малой чувствительностью к концентрации напряжений и низкой склонностью к хрупкому разрушению. Учитывая технологию изготовления изделий, работающих при низких температурах, такие стали должны обладать хорошей свариваемостью. Важной характеристикой сталей является их высокая коррозионная стойкость.

Метастабильные аустенитные стали. Существует целый ряд деталей и узлов криогенной техники, к металлу которых не предъявляются требования по стабильности аустенитной структуры и магнитной проницаемости в процессе эксплуатации. К ним относятся емкости для хранения и транспортировки сжиженных газов, перспективные проекты топливных баков автомобилей, работающих на сжиженном природном газе, а также топливных баков авиакосмической техники. Основными характеристиками металла для их изготовления являются высокая удельная прочность и технологичность. Традиционно такие сосуды изготавливаются из аустенитной стали 12Х18Н10Т, однако удельная прочность стали невысока, что долгое время сдерживало широкое распространение сжиженного природного газа в качестве топлива.

Необходимой прочностью в сочетании с высоким комплексом пластических и вязких свойств при низких температурах могут обладать Cr – Ni – Mn метастабильные аустенитные стали, дополнительно легированные ванадием и азотом. Старение такого металла сопровождается упрочнением за счет выделения карбонитридных фаз V(C,N). В результате этого временное сопротивление и особенно предел текучести стали после старения возрастают.

Оптимальные механические характеристики Cr – Ni – Mn сталей с азотом и ванадием достигаются при соблюдении условия:

$$V/(C+N) = 3,1$$

Этим требованиям отвечает сталь 06Х15Н9Г8АФ для работающих под давлением сосудов криогенного назначения, содержащая не более, %: 0,06 С, 14 – 16 Cr, 8,5 – 9,5 Ni, 7 – 9 Mn, 0,2 – 0,4 N, 1,0 – 1,5 V.

Высокопрочные мартенситно-стареющие стали. Отличительной особенностью этой группы сталей является получение при закалке практически безуглеродистого легированного мартенсита и его последующее старение при температуре около 500 °С, сопровождающееся выделением интерметаллидных фаз. Это обеспечивает сочетание высоких прочностных свойств с достаточной пластичностью и вязкостью.

Опасность хрупких разрушений при низких температурах в отличие от других высокопрочных сталей уменьшается благодаря присутствию никеля и низкому содержанию углерода (не более 0,03%). Высокая концентрация легирующих элементов предотвращает образование немартенситных продуктов превращения аустенита независимо от скорости охлаждения при закалке. Для изготовления деталей криогенной техники в СНГ применяются мартенситно-стареющие стали 03Х9К14Н6МЗД (ЭП 921) и 03Х14К14Н4МЗ (ЭП 767) следующего состава, % :

	<i>C</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Co</i>	<i>Mo</i>	<i>Cu</i>	<i>Ti</i>	<i>V</i>
ЭП 921	<0,03	8,5-9,5	6,0-7,0	13,0-14,0	3,0-4,0	1,0-1,5	-	-
ЭП 767	<0,03	13,5-15,0	3,8-4,8	13,0-14,5	2,3-3,0	-	0,15-0,20	0,10-0,15

Сталь 03X9K14H6M3Д имеет более однородную мартенситную структуру. Ее применяют для изготовления высоконагруженных деталей, в том числе таких деталей уплотнительных узлов арматуры, как седла клапанов, а также элементов турбодетандеров (валиков, подпятников, лопаток), где требуется сочетание, высокой твердости и эрозионной стойкости.

Сталь 03X14K14H4M3 является сталью переходного класса и содержит до 20 – 30 % остаточного аустенита, благодаря чему высокий уровень вязкости $KCV > 50$ Дж/см² сохраняется до температуры 77 К. Эта сталь широко используется в ракетно-космической технике для изготовления тонколистовых конструкций сложной конфигурации и деталей арматуры, работающих при температуре до 77 К (золотники, втулки, штоки, опоры, стаканы, клапаны, тарелки и др.).

Недостатками сталей 03X9K14H6M3Д и ЭП 03X14K14H4M3 являются повышенное содержание дорогого и дефицитного кобальта, а также ограничение нижнего предела применения температурой 77 К.

Современная авиакосмическая техника требует расширения диапазона применения высокопрочных сталей до температуры кипения жидкого водорода 20 К. С этой целью, разработана новая высокопрочная мартенситно-стареющая коррозионностойкая экономнолегированная кобальтом сталь 03X12H7K6M4Б. После термической обработки (закалка от 1000°С, обработка холодом при –70°С, старение при температуре 520°С в течение 5 ч) сталь 03X12H7K6M4Б имеет следующие механические свойства:

	290 К	20 К
$\sigma_{в}$, МПа	1300	1900
$\sigma_{0,2}$, МПа	1200	1700
δ_5 , %	15	11
KCV , Дж/см ²	40	30

Эта сталь рекомендована для изготовления емкостей высокого давления, для хранения и транспортировки жидкого водорода.

УДК 621.357.75

Легирование никелем коррозионностойких сталей

Магистрантка Гарнашевич Ю.А., студентка гр.104512 Пиляева А.А.
 Научные руководители – Стефанович А.В., Борисов С.В.
 Белорусский национальный технический университет
 г. Минск

Никелю как легирующему элементу в коррозионностойких сталях принадлежит важная роль. Вода, водные растворы солей практически не оказывают коррозионного воздействия на никель. Кроме того введение никеля в стали повышает сопротивление коррозии действию серной и фосфорной кислот, щелочей.

Введение никеля в хромистые стали сказывается на структуре данных сталей, так как никель является аустенитообразующим элементом. Повышение содержания никеля в сталях с 18% хрома переводит данные стали из ферритного или мартенситного класса в аустенитный. На основе тройной системы железо-хром-никель было разработано большое количество аустенитных коррозионностойких сталей, которые нашли широкое применение в промышленности. Обычно данные стали содержат до 0,12% углерода, 17-19% хрома, 8-12% никеля и дополнительно легированы титаном или ниобием для устранения межкристаллитной коррозии. Данные стали обладают высокой коррозионной стойкостью в растворах солей,