

УДК 669.14.018.41

Перспективные коррозионностойкие аустенитные хромоникелевые стали для высоконагруженных деталей криогенной ТЕХНИКИ

Канд. техн. наук О.А. ФЕДОРОВА
СПбГУН и ПТ

The experimental data of strength, ductility and toughness properties of austenitic corrosion resistance steels are presented. The paper details the data priorities for the components of these alloys; most essential are Ni, Mn, N, Mo, Cr. The data are represented analytically in order to facilitate calculation of strength, yield and impact strength limits for steels under investigation. As an example a schematics diagram for the steel composition was developed. On the basis of the measurements new austenitic steel has been investigated for the design of efficient high loading cryogenic equipment.

Широкое распространение в технике низких температур получили хромоникелевые аустенитные стали, содержащие 17 – 25 % хрома и 10 – 20 % никеля, которые применяются уже давно [4, 6]. Они сохраняют высокую пластичность и вязкость в широком температурном диапазоне, коррозионную стойкость, обладают хорошими технологическими свойствами и в настоящее время наиболее распространены в качестве конструкционных материалов в криогенной технике.

Хромоникелевые аустенитные стали применяют для изготовления сварных элементов аппаратов, емкостей, трубопроводов (обечаек, днищ, патрубков, фланцев), деталей арматуры (штоков, клапанов, седел) и т.д. Рекомендованная температура эксплуатации сварных соединений без ограничения давления 4...870 К.

Недостатки этой группы сталей – низкая прочность при комнатной температуре, особенно по пределу текучести (около 250 МПа), а также сравнительно высокая стоимость, обусловленная большим содержанием дорогого никеля. В последние годы наблюдается тенденция к применению в криогенной технике аустенитных сталей, в которых никель полностью или частично заменен марганцем [3].

Значительное повышение прочности хромоникельмарганцевых стабильных аустенитных сталей может быть достигнуто за счет легирования азотом, образующим, как и углерод, твердые растворы вне-

дрения. Растворимость азота в γ -железе при температуре 830 °С составляет всего 0,027 %. Присутствие хрома и особенно марганца способствует увеличению его растворимости в стали.

Эффективность азота как элемента внедрения, блокирующего движение дислокаций и повышающего предел текучести, с понижением температуры возрастает. Повышая стабильность аустенита, азот препятствует также образованию δ -феррита при высоких температурах.

Введение азота в хромоникельмарганцевые стали позволяет более чем в 1,5 раза увеличить предел текучести при комнатной температуре. Хром, никель и марганец как элементы замещения меньше влияют на прочностные свойства, обеспечивая заданную аустенитную структуру.

К недостаткам азота как легирующего элемента относится склонность его к ликвации при кристаллизации стального слитка и некоторое осложнение процессов сварки. Присутствие азота в стали требует определенного ограничения погонной энергии для избежания выпадения карбонидов по границам зерен, что может приводить к снижению пластичности и вязкого сварного шва, повышению чувствительности к концентратам напряжений [5].

В свариваемых сталях с азотом необходимо более строго ограничивать концентрацию углерода. Содержание углерода должно приближаться к преде-

лу его растворимости в аустените, т.е. составлять не более 0,03 – 0,04 %. Низкая концентрация углерода в стали создает определенные трудности при выплавке. Диффузию углерода в твердом растворе замедляет присутствие молибдена.

Легирование молибденом сталей незначительно влияет на прочностные и вязкостные характеристики, но повышает трещиностойкость сварных швов. В процессе нагрева под сварку в микроструктуре сталей, легированных молибденом, происходит выделение мелкодисперсных частиц типа Mo_6C . Молибден также понижает термодинамическую активность углерода и азота в аустените, что приводит к изменению типа и морфологии избыточных фаз. Вместо карбида $Me_{23}C_6$ термодинамически более выгоден процесс образования нитридов хрома Cr_2N , равномерно распределяющихся по зерну [2].

Для исследования влияния состава на свойства аустенитных хромоникельмарганцевых сталей с азотом провели серию плавок с использованием методов планирования эксперимента и математико-статистической обработки экспериментальных данных [3]. Пределы варьирования основных легирующих элементов охватывали практически весь спектр аустенитных сталей, используемых в криогенной технике.

За основу приняты малоуглеродистые (<0,04 % C), коррозионно-стойкие (>13 % Cr), никельсодержащие (>10 % Ni) стали, дополнительно легированные молибденом (от 0 до 2,5 %), марганцем (от 0 до 10 %) и азотом (от 0,15 до 0,45 %). Металл опытных плавок ковали при температуре 1000...1200 °C на прутки диаметром 15 мм и подвергали аустенизации при 1050 °C с охлаждением в воде. По результатам испытаний образцов при температурах 293, 77,20 и 4 К с помощью метода планирования эксперимента получены следующие уравнения регрессии:

$$\sigma_{0,2}^{293K} = 376 + 33(N) - 10(N)(Mo) - 5(Mn)(N) - 16(Ni)(Mn) + 13(Cr)(Mn); \quad (1)$$

$$\sigma_b^{293K} = 686 + 60(N) + 46(Ni)(N) - 21(Cr)(N) + 18(Cr); \quad (2)$$

$$\delta_5^{293K} = 52 - 6(Ni) + 5(Ni)(Mn) - 1,6(Cr)(N); \quad (3)$$

$$\sigma_{0,2}^{20K} = 1000 + 74(N) + 40(Cr) - 16(Ni) - 104(Cr)(N); \quad (4)$$

$$\sigma_b^{20K} = 1574 + 89(N) + 29(Cr) - 103(Ni)(Mn); \quad (5)$$

$$\delta_5^{20K} = 35,2 - 3,9(N) + 2,7(Ni)(N) - 2,8(Cr)(Ni); \quad (6)$$

$$KCV^{20K} = 193 - 30(N) + 10(Cr) + 23(N)(Mn) + 15(Ni)(Mn); \quad (7)$$

$$KCV^4K = 121 - 14(N) + 71(Ni)(Mn) + 54(Mn)(N). \quad (8)$$

В скобках дана приведенная концентрация элемента, определяемая по формуле

$$x_{\text{привед}} = (x_{\text{факт}} - x_{\text{ср}}) / (x_{\text{макс}} - x_{\text{ср}}),$$

где $x_{\text{факт}}$ – фактическая концентрация элемента, %;

$x_{\text{макс}}$ – максимальная концентрация по матрице планирования;

$x_{\text{ср}}$ – средняя концентрация по матрице планирования;

$\sigma_{0,2}$ и σ_b , МПа;

δ_5 , %;

KCV, Дж/см².

Анализ уравнений регрессии позволил спрогнозировать новый состав стабильной аустенитной стали для работы при температуре до 4 К [1].

Состав стали выбирали с учетом следующих ограничений:

немагнитная аустенитная структура должна быть устойчивой в диапазоне температур до 4 К;

прочностные характеристики при комнатной температуре должны быть не ниже 500 МПа для предела текучести и 850 МПа – для временного сопротивления;

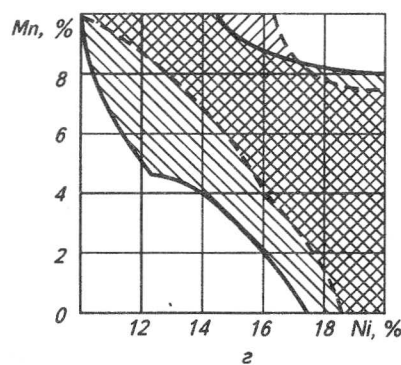
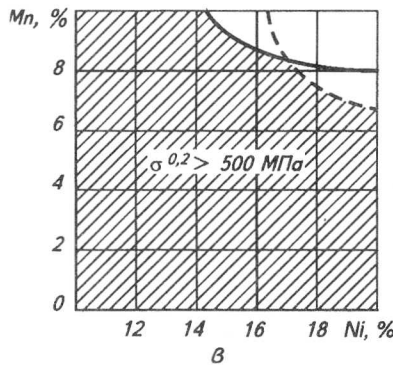
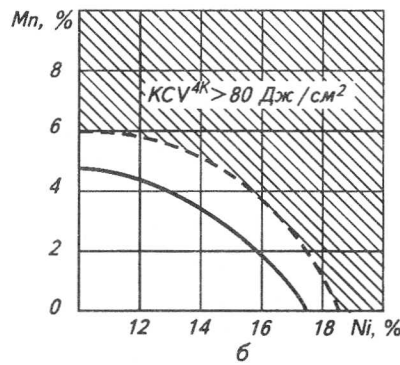
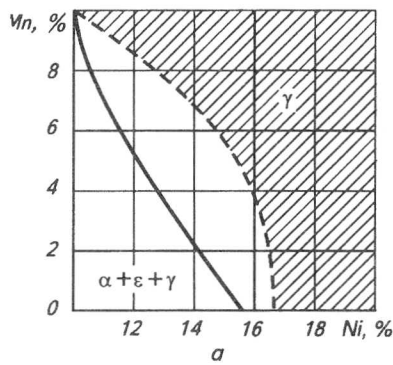
прочность при температурах 20 и 4 К должна быть выше 1200 и 1800 МПа для предела текучести и временного сопротивления соответственно;

пластичность δ при температуре 4 К должна составлять не менее 20 %, а ударная вязкость на образцах Шарпи – 80 Дж/см²;

материал должен обладать высокой коррозионной стойкостью в воздушной среде при изменяющихся температурных условиях работы, быть технологичным и хорошо свариваться.

Установлено, что увеличение содержания азота в стали позволяет получить наибольший рост прочности при комнатной температуре. Анализ уравнений регрессии (1) и (2) показал, что заданный уровень прочности обеспечивается при содержании не менее 0,4 % N.

Из уравнений (7) и (8) следует, что уровень удар-



Влияние содержания марганца, никеля и хрома стабильных аустенитных сталей с 0,4 % N и 2 % Mo на следующие характеристики:

а – структуру опытных составов после растяжения при температуре 77 К; б – ударную вязкость KCV при температуре 4 К; в – предел текучести при температуре 293 К; г – область составов с требуемыми свойствами (сплошные линии – сталь с 22 % Cr, пунктирные линии – с 17 % Cr)

ной вязкости при температуре 20 и 4 К может быть достигнут при увеличении содержания марганца и никеля в сталях. Повышению значений ударной вязкости при криогенных температурах способствует также увеличение содержания хрома. Поэтому при выборе состава была поставлена задача оптимизации содержания марганца, никеля и хрома в сталях с 0,4 % N и 2 % Mo (см. рисунок).

Для решения этой многофакторной задачи использовали графические интерпретации уравнений регрессии в виде проекций поверхности отклика на оси с координатами никель – марганец для трех рассматриваемых характеристик при минимальном и максимальном содержании хрома (см. рисунок а, б, в). Область составов, отвечающих заданным требованиям, представлена на рисунке г. Для сталей с максимальной концентрацией хрома диапазон легирования никелем и марганцем, позволяющий получить необходимые характеристики, более широк, чем для сталей с минимальной концентрацией хрома.

Целесообразно использовать составы, относящиеся к центральной части оптимизированной области, расчеты для которых наиболее достоверны. В качестве одного из возможных составов может быть предложена сталь 04Х21Н16АГ8М2ФД, расчетные и фактические характеристики которой приведены в таблице.

Механические свойства стали 04Х21Н16АГ8М2ФД

| Номер плавки | T _{исп} , К | σ _{0,2} , МПа | σ _т , МПа | δ ₅ , % | KCV, Дж/см ² |
|--------------|----------------------|------------------------|----------------------|--------------------|-------------------------|
| 1 | 293 | 500/512 | 860/878 | 55/45 | 360/294 |
| 2 | 293 | 500/510 | 890/883 | 54/49 | 390/302 |
| 1 | 77 | 1180/1195 | 1995/1962 | 24/22 | 110/124 |
| 2 | 77 | 1205/1164 | 2000/1980 | 24/23 | 160/120 |

Примечание. В числителе приведены фактические, в знаменателе – расчетные данные.

Аустенитные хромоникельмарганцевые стали с азотом и молибденом, обладающая почти вдвое более высокой прочностью по сравнению с обычными хромоникелевыми сталями, перспективны для изготовления высоконагруженных деталей машин и конструкций криогенной техники. Они технологичны, хорошо свариваются, коррозионно-стойки, характеризуются высокими вязкостью и пластичностью, вплоть до температуры жидкого гелия. Стали этой системы легирования сохраняют высокую стабильность аустенитной структуры в криогенных условиях.

Список литературы

1. АС 1379337 СССР «Немагнитная сталь» от 8.XI.1987.
2. Банных О.А. и др. Структура и свойства немагнитных сталей. – М.: Наука, 1992.
3. Кривцов Ю.С., Федорова О.А. Прочностные характеристики аустенитных Cr-Ni-Mn сталей для изделий криогенной техники // Актуальные проблемы прочности материалов и конструкций при низких и криогенных температурах. – СПб.: СПбГАХПТ, 1997.
4. Металловедение. Сталь. Изд. В 2-х т. / Пер. с нем. Т.2. Применение; Под ред. С.Б.Масленкова. – М.: Металлургия, 1995.
5. Солнцев Ю.П. Современные и перспективные стали криогенной техники. «Перспективные материалы», 1998, № 3.
6. Ульянин Е.А., Сорокина Н.А. Стали и сплавы для криогенной техники. – М.: Металлургия, 1984.