

СТАБИЛЬНОСТЬ АЗОТИСТЫХ ХРОМОНИКЕЛЬМАРГАНЦЕВЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ

Капуткина Л.М., Смарыгина И.В., Свяжин А.Г., Киндоп В.Э.
 НИТУ «МИСус», Москва, Россия, kaputkina@mail.ru

Исследования и практика последних десятилетий показали, что легирование азотом эффективно для повышения эксплуатационных свойств сталей различных структурных классов и разного назначения.

Наиболее эффективно применение азота в легированных и микролегированных сталях. Благодаря большей по сравнению с углеродом растворимости и снижению энергии дефекта упаковки в сплавах железа азот сильнее упрочняет феррит и аустенит, образуя более дисперсные карбиды, способствует получению более мелкого зерна, способствует повышению деформационного, дисперсионного и структурного упрочнения в более широком интервале температур. Азот повышает стабильность аустенита, снижает температуру M_n , повышает коррозионную стойкость сталей в ряде органических и неорганических сред [1–4].

В зависимости от назначения стали выбирается базовый состав, способ введения азота, термическая и термомеханическая обработка. Для получения плотного слитка (бездефектной литой структуры) содержание азота в расплаве должно быть не более его растворимости в расплаве и твёрдом сплаве при температуре кристаллизации, желательна также кристаллизация через аустенит [5].

Аустенитные стали применяются чаще всего в качестве коррозионностойких для работы при низких вплоть до криогенных температурах благодаря повышенной ударной вязкости и/или при повышенных температурах благодаря пониженной скорости диффузии и повышенной стабильности структуры, соответственно более высоким показателям сопротивления ползучести и длительной прочности.

При пониженной температуре эксплуатации одновременное повышение прочности, вязкости и коррозионной стойкости азотистых аустенитных сталей реализуется при обеспечении однородной мелкозернистой структуры без выделения избыточных фаз, т.е. при условии, что весь азот находится в твёрдом растворе. Отсюда и определяются рациональные содержание азота и режимы обработок. В частности заключительной операцией термической обработки может быть рекомендована закалка – обработка на твёрдый раствор. Повышение кратковременной и длительной прочности, тепло- и жаропрочности при повышении или сохранении коррозионной стойкости возможно достичь и при наличии вторых фаз, т.е. в результате регламентации процессов старения.

В настоящей работе исследовали стабильность структуры и механических свойств новых разработанных азотистых сталей 10X19Г10Н6АМ2 и 09X19Г10Н6АМ2Д2 (таблица 1) и, для сравнения, традиционной стали 04X18Н9 в условиях длительного термоциклирования и многоциклового механического нагружения.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых сталей, масс. % (остальное железо)

Марка стали	C	Cr	Ni	Mn	Mo	Cu	Si	Al	P	S	N
10X19Г10Н6АМ2	0,10	18,7	6,1	10,1	1,68	0,01	0,23	0,015	0,011	<0,005	0,31
09X19Г10Н6АМ2Д2	0,09	19,2	6,0	10,1	1,69	2,05	0,20	0,015	0,014	<0,005	0,35
04X18Н9	0,04	18,5	8,6	1,2	0,05	<0,01	0,20	<0,01	0,014	0,015	0,02

Термоциклирование проводили с помощью автоматизированной установки в температурном интервале $-100 \div +100$ °С с общим числом циклов 400 путем попеременного опускания образцов сталей в емкость с температурой -100 °С и $+100$ °С. Механическое циклическое нагружение сталей 10X19Г10Н6АМ2 и 09X19Г10Н6АМ2Д2 проведено на базе $N = 10^6$ циклов, цикл асимметричный с растягивающими напряжениями, $\sigma_{max} = 400$ МПа $\approx 0,9\sigma_R$, $\sigma_{min} = 0,1\sigma_{max}$, $\sigma_R \cong 450$ МПа.

Усталостные испытания и циклическое нагружение проводили при комнатной температуре на сервогидравлической машине для усталостных испытаний Instron 8801 при частоте 30 Гц. По результатам циклических испытаний разработанные стали отличаются более высоким сопротивлением циклическому нагружению, чем традиционная аустенитная хромоникелевая сталь 04X18H9: у сталей 10X19Г10Н6АМ2 и 09X19Г10Н6АМ2Д2 $\sigma_R \cong 450$ МПа. Образцы разработанных сталей после циклического нагружения оставались немагнитными аустенитными.

Разница значений прочностных характеристик новых сталей до и после циклического нагружения при $N = 1 \cdot 10^6$ циклов при $\sigma_{max} = 400$ МПа (таблица 2) составила 15–25 МПа по σ_B и менее 55–60 МПа по $\sigma_{0,2}$, что не превышает 10 %. Это говорит о стабильности прочностных свойств данных сталей при циклическом нагружении. Сталь 04X18H9 в результате предварительного циклического нагружения заметно упрочнилась: $\Delta\sigma_{0,2} = 115$ МПа, $\Delta\sigma_B = 170$ МПа (разница прочностных свойств до и после циклического нагружения 46 и 30 % соответственно), т.е. прочностные свойства стали 04X18H9 нестабильны при циклическом нагружении. Относительное удлинение δ сталей после циклического нагружения при во всех показало значения на 30–85 % выше, однако следует учитывать, что уровни показателей пластичности до и после циклического нагружения корректно не сравниваемы из-за существенно различных размеров испытываемых образцов.

Таблица 2 – Механические свойства исследуемых сталей в исходном состоянии (ИС), после термоциклирования (ТЦ) 400 циклов в интервале температур $+100 \div -100$ °С и циклического нагружения (ЦН) $N = 1 \cdot 10^6$ циклов при $\sigma_{max} = 400$ МПа для сталей 10X19Г10Н6АМ2, 09X19Г10Н6АМ2Д2 и $\sigma_{max} = 250$ МПа для стали 04X18H9

Марка стали	σ_B , МПа			$\sigma_{0,2}$, МПа			δ , %			КСУ ₋₁₀₀ , МДж/м ²	
	ИС	ЦН	ТЦ	ИС	ЦН	ТЦ	ИС	ЦН	ТЦ	ИС	ТЦ
10X19Г10Н6АМ2	925	950	925	690	630	745	33	53	30	2,20	2,25
09X19Г10Н6АМ2Д2	940	955	930	700	645	690	27	50	30	2,05	1,95
04X18H9	570	740	–	250	365	–	60	78	–	–	–

После растяжения до разрыва (как и в случае растяжения исходно ненагруженных образцов) образцы сталей 10X19Г10Н6АМ2 и 09X19Г10Н6АМ2Д2 оставались немагнитными, т.е. аустенит оставался механически стабильным вплоть до достаточно больших степеней деформации. Образцы стали 04X18H9 после растяжения (как и в случае растяжения образцов без предварительного циклического нагружения) стали магнитными, особенно в шейке.

По результатам испытаний на растяжение образцов исследуемых сталей, подвергнутых термоциклированию, разница значений прочностных характеристик сталей 10X19Г10Н6АМ2 и 09X19Г10Н6АМ2Д2 до и после термоциклирования при испытаниях при температурах $+20$ °С (таблица 2) и -100 °С не превышает 10 %, при температуре $+100$ °С разница по σ_B составляет 12–14 %. Разница значений относительного удлинения разработанных сталей до и после термоциклирования при испытаниях при температуре $+20$ °С и практически не превышает 10 %, при температурах -100 °С и $+100$ °С разница составляет 11–16 %. Сталь 10X19Г10Н6АМ2 магнитна в шейке после растяжения при -100 °С как до, так и после термоциклирования, во всех остальных случаях разработанные стали в исходном состоянии и после термоциклирования немагнитны до и после растяжения вплоть до разрушения. Результаты испытаний на ударный изгиб при температурах $+100$ °С, -100 °С (таблица 2) и -196 °С образцов исследуемых сталей, подвергнутых термоциклированию, подтверждают сохранение ударной вязкости и стабильности

аустенита после термоциклирования: разница значений ударной вязкости разработанных сталей не превышает 7 % при всех температурах испытаний, а образцы сталей после испытаний оставались немагнитными.

В результате рентгенографических исследований ни в одном случае: ни в одной из сталей, ни в исходном состоянии после ВТМО, ни после циклических обработок, ни после заключительных испытаний на растяжение, – не было обнаружено выделений избыточных фаз (карбидов или карбонитридов). Однако судя по изменениям (уменьшению) периода решётки и ширины рентгеновских линий аустенита при длительных циклических нагружениях и термоциклировании протекают процессы перераспределения дефектов за счёт релаксации напряжений и процессов возврата и, возможно, ранние стадии процессов старения. В стали 04X18H9, отличающейся наименьшей термической и механической стабильностью аустенита, уже в результате усталостных испытаний в структуре появляется α -мартенсит.

Несколько большие различия в показателях прочности и особенно пластичности при испытаниях при повышенной (+100 °С) и пониженной (-100 °С) при термоциклировании по сравнению с испытаниями при комнатной температуре скорее свидетельствуют протекании процессов старения при термоциклировании.

Таким образом, разработанные стали 10X19Г10Н6АМ2 и большей мере 09X19Г10Н6АМ2Д2 обнаружили термическую и механическую стабильность аустенита. Наблюдаемый после циклических нагрузок уровень механических свойств, близких к свойствам этих сталей в исходном состоянии, обусловлен сохранением структурного состояния и незначительными субструктурными изменениями.

Выводы:

1. Разработанные высокопрочные азотистые хромоникельмарганцевые коррозионностойкие стали 10X19Г10Н6АМ2 и 09X19Г10Н6АМ2Д2 с высокой термической и механической стабильностью аустенита отличаются более высокими показателями и большей стабильностью механических свойств в условиях длительных циклических нагрузок в широком интервале температур эксплуатации по сравнению с традиционной сталью типа X18H9.

2. В ходе циклического нагружения с $N = 10^6$ циклов и $\sigma_{\max} = 0,9\sigma_R$ ($\sigma_R \cong 450$ МПа) или 400 циклов в интервале температур $-100 \div +100^\circ\text{C}$ стали 10X19Г10Н6АМ2 и 09X19Г10Н6АМ2Д2 сохраняют аустенитную структуру, и протекающие субструктурные процессы перераспределения дефектов (релаксации напряжений, возврата) и, возможно, старения не снижают их прочности и ударной вязкости.

Список литературы:

1. Науменко В.В., Шлямнев А.П., Филиппов Г.А. // *Металлург.* – 2011. – № 6. – С. 46–53.
2. Gavriljuk V.G., Focht J., Petrov Yu.N., Polushkin Yu.A. // *Acta Materialia.*– 1998.– V. 46 (4).– P. 1157–1163.
3. Мушникова С.Ю., Костина М.В., Андреев Ч.А., Жекова Л.Ц. // *Металлы.*– 2009.– № 1.– С. 36–41.
4. Kaputkina L.M., Svyazhin A. G., Smarygina I. V., Kindop V. E. // *CIS Iron and Steel Review.* – 2016. – V. 11. – P. 30–34
5. Svyazhin A.G., Kaputkina L.M., Bazhenov V.E. et al. // *The Physics of Metals and Metallography.* – 2015. – V. 116 – No. 6. – P. 552–561.