

Сравнение показателей упругого последействия: углов  $\alpha$  и  $\beta$  и радиуса остаточной кривизны  $R$ , рассчитанных без учета и с учетом релаксационных процессов, с экспериментальными данными показало, что заметное влияние процесса релаксации напряжений на оценку упругого последействия особенно значимо для метастабильных сталей, в которых мартенситное превращение под нагрузкой происходило не полностью (стали А3, АМ2 и АМ3). Так, неучет процессов релаксации напряжений дает значимо худшую сходимость расчетных оценок с экспериментальными для сталей АМ2 и АМ3. Вследствие этого учет процессов релаксации напряжений в процессе деформации и при последеформационной выдержке желателен, так как позволяет лучше описывать механическое поведение и упругое последействие метастабильных сталей с развитым мартенситным превращением.

## **ПРОЧНОСТЬ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА КОМПЛЕКСНОЛЕГИРОВАННЫХ АЗОТОМ И МЕДЬЮ ИЛИ СЕРЕБРОМ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ**

**Капуткина Л. М., Свягин А. Г., Прокошкина В. Г., Медведев М. Г.,  
Бронз А. В.**

*НИТУ «МИСиС», г. Москва, Россия  
[klm@tmo.misis.ru](mailto:klm@tmo.misis.ru)*

Азот и углерод по сравнению с другими легирующими элементами наиболее сильно повышают прочностные свойства аустенитных нержавеющих сталей [1].

Общий вклад азота в упрочнение аустенитных нержавеющих сталей имеет две составляющие – сильную термическую, пропорциональную содержанию азота (преимущественно благодаря твердорастворному упрочнению), и атермическую, обычно связанную с зернограничным упрочнением и измельчением зерна, также пропорциональную содержанию азота [2]. Азот, имея несколько меньший диаметр атома по сравнению с углеродом, оказывает вместе с тем более сильное влияние на твердорастворное упрочнение [1]. Упрочнение азотистых сталей значительно увеличивается при температурах ниже 20 °C.

Эффективность азота как элемента, воздействующего на твердорастворное упрочнение менее чувствительна к повышению температуры в интервале 200–600 °C по сравнению с углеродом.

Конструкционные стали, легированные медью, приобрели большое значение в технике. Основанием для введения меди в сталь в первую очередь явилось достигаемое при этом повышение коррозионной стойкости в атмосфере и агрессивных средах (морская вода), а также предела прочности и предела текучести [3,4].

Одним из качеств серебра является его высокая биоцидность (способность противостоять развитию бактерий) [5]. С этой точки зрения представляет интерес влияние небольших добавок серебра на свойства стали (поскольку растворимость серебра в γ-твердом растворе не превышает 0,1–0,2 %).

Изучение изменения механических свойств при старении ряда аустенитных хромоникелевых сталей позволило сделать вывод, что нагрев при высоких температурах с последующим отпуском при 600–750 °C приводит к повышению предела текучести, твердости и предела прочности стали, но в то же время уменьшаются пластичность и ударная вязкость. Однако, о процессах выделения избыточных фаз (нитридов, карбонитридов), связанных с дополнительным легированием азотом, протекающих при температурах 400–550 °C, в литературе мало сведений и изучение процессов старения при

этих температурах представляет интерес с точки зрения возможности дополнительного повышения конструкционной прочности материала.

В настоящей работе методами металлографии, рентгенографии, дифференциальной сканирующей калориметрии, а также с помощью измерения твердости и построения диаграмм фазовых равновесий исследовали особенности структурообразования и свойства комплекснолегированных нержавеющих аустенитных азотсодержащих сталей в литом, термообработанном и деформированном состоянии. Проведен анализ влияния легирования азотом, медью, серебром, а также комплексно меди и серебра с азотом на прочность и технологическую пластичность сталей типа X18H10, определены рациональные параметры термической и термомеханической обработки. Изучены процессы старения, проходящие в сталях в интервале температур 400–550 °C, а также исследованы специальные свойства: стойкость к микробиологической коррозии и бактерицидная способность сталей.

Химические составы исследуемых сталей приведены таблице 1. Режим выплавки подбирался таким образом, чтобы он обеспечил получение достаточно плотного слитка без газовых пор. Азотсодержащие стали разливали в медные водоохлаждаемые изложницы цилиндрической формы диаметром от 5 до 50 мм при давлении азота над расплавом 0,1 МПа.

**Таблица 1.** Химический состав исследуемых сталей

Обозначение	Массовая доля легирующих элементов, %									
	C	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	Cu	Al	V	N
X18H10	0,02	17,8	8,8	1,45	0,15	0,38	0,27	-	0,15	0,02
X18H10+0,23% N	0,03	17,0	9,9	1,27	0,29	0,31	0,11	-	0,16	0,23
X18H10+0,1% Ag	0,06	18,0	8,1	1,07	0,15	0,38	0,22	0,01	0,04	0,20
X18H10Д5МФГС	0,03	17,9	9,8	1,6	0,26	0,70	5,00	0,007	0,12	0,02
X18H10Д5МФАГС	0,03	18,1	9,4	1,41	0,32	0,39	5,02	0,01	0,15	0,22
X19H10Д2МФАГС	0,03	18,7	10,1	1,22	0,29	0,50	2,47	0,004	0,15	0,27

Из анализа диаграмм фазовых равновесий, рассчитанных с помощью программы Thermo-Calc) следует, что для достижения максимального эффекта упрочнения в результате старения (при температурах 400–550 °C) температура нагрева под закалку отвечающая чисто аустенитной области для всех сталей находится в интервале температур 900 – 1200 °C. При этом нужно избегать перегревов и пережогов.

Для всех исследуемых сталей построены калориметрические кривые нагрева до температур приблизительно 550°C, определены температурные интервалы превращений. В легированных азотом сталях при температурах 400–425 °C протекают процессы старения. Дополнительное микролегирование серебром (до 0,1 %) снижает этот интервал приблизительно на 10 °C, а легирование медью растягивает интервал дисперсионного твердения до приблизительно 450 °C.

В «базовой» стали X18H10 в интервале температур нагрева от 25 до 450 °С не происходит превращений. Наибольший тепловой эффект зафиксирован у сталей, содержащих азот и серебро  $Q = 0,57$  Дж/г, медь и азот  $Q = 0,55$  Дж/г.

Распад аустенита сопровождается уменьшением периода решетки на 0,0014 Å для стали X19H10Д2МФАГС, что соответствует 0,23 % количества [C+N], выделившегося в карбонитриды и нитриды. Тепловой эффект при таком превращении составляет 0,5522 Дж/г. Для стали с серебром тепловому эффекту 0,5746 Дж/г соответствует изменение периода решетки 0,0010 Å и выделение в избыточные фазы 0,15% [C+N].

Оценки дисперсионного упрочнения по результатам измерения твердости показали следующие результаты: наибольшую твердость после старения имеет сталь, содержащая медь и азот ( $\approx 270$  HV). В базовой стали X18H10 в результате нагрева под закалку уровень твердости снизился и после нагрева до 550 °С практически не изменился ( $\approx 130$  HV). Эффект упрочнения при легировании исследуемых сталей практически полностью реализуется уже после закалки, после старения твердость азотсодержащих сталей увеличивается приблизительно на 5 – 10 HV.

На сталях, близких по составу к исследуемым, но с разным содержанием никеля, были проведены испытания на антиадгезивную способность к микроорганизмам в среде углеродообразующих, гетеротрофных и сульфатвосстанавливающих бактерий. Оказалось, что все стали имеют высокую антиадгезивную способность, при этом небольшое легирование азотом (до 0,27%) обеспечивает уменьшение склонности к адгезии примерно в 8 раз, в то время как повышение содержания никеля на 2% дает дополнительный эффект лишь в 2 раза. Этот факт позволяет рекомендовать азотсодержащие стали как стали повышенной стойкости к микробиологической коррозии.

Оценка дезинфицирующих свойств сталей по отношению к желтому стафилококку и кишечной палочке с разными параметрами испытания на бактерицидность (среда, объем, экспозиция, концентрация) показала, что с увеличением микробной концентрации только образцы с медью и азотом, а также серебром и азотом проявляют бактерицидную активность.

Бактерицидная активность образцов исследованных сталей проявляется только при непосредственном контакте микробных клеток с поверхностью образцов и растет с увеличением количественного содержания меди и серебра.

## Список литературы

1. Рашев Ц. Высокоазотистые стали. – София.: Металлургия под давлением, 1995.
2. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов, и их композиций. - М.:Мир, 1968.
3. Гудремон Э. Специальные стали. – М.: Металлургия, 1966.
4. Л.М Капуткина, В.Г Прокошкина, А.Г Свяжин, Д.А.Романович, Д.В. Кремянский, М.Г. Медведев, С.В. Никифоренко. Структура и свойства нержавеющей стали, легированной азотом и медью. //Металловедение и термическая обработка. 2009. №6. с. 23 - 29.
5. Yoshihiro Sato. Biofilms and antibacterial effects of metals // Ferrum (Japan). – 2007. – vol.12, №10, p.639 – 643.