

## Механические свойства коррозионно-стойкой стали после двойного старения

© Л.В. Тарасенко, М.В. Унчикова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 105005, Россия

*Для коррозионно-стойкой мартенситно-стареющей стали 06X14H6Д2МБТ (ЭП 817), из которой изготавливают силоизмерительные упругие элементы, которые работают в атмосферных условиях, изучено изменение механических свойств после оди-  
нарного и двойного старения. Выбран режим двойного старения, обеспечивающий максимальную степень упрочнения при испытаниях на изгиб и меньшую степень разупрочнения после воздействия циклических нагрузок.*

**Ключевые слова:** *коррозионно-стойкая мартенситно-стареющая сталь, силовой упругий элемент, основное и дополнительное старение, прочность при изгибе, ста-  
бильность механических свойств.*

**Введение.** Для силоизмерительных упругих элементов (СУЭ), работающих в конструкциях весов различного назначения, было предложено [1] использовать взамен углеродистых сталей с цинковым покрытием коррозионно-стойкие стали, которые разработаны для силовых деталей, применяемых в авиационной промышленности. Эти стали являются мартенситно-стареющими: обычно режим старения находится в области перестаривания, когда наряду с выделением упрочняющих частиц  $\epsilon$ -Си происходит обратное мартенситное превращение, что приводит к образованию до 25 % аустенита [2]. Такой режим обеспечивает благоприятное сочетание прочности, надежности и коррозионной стойкости материала. Однако аустенит снижает упругие свойства, поэтому его присутствие в сталях для СУЭ является недопустимым. В связи с этим режимы старения коррозионно-стойких мартенситно-стареющих сталей должны соответствовать либо области максимального упрочнения, либо области недостаривания. Для достижения высокого уровня прочности в данной работе предлагается использовать двойное старение, включающее основное старение и дополнительное, более низкотемпературное: известно, что для дисперсионно-твердеющих сплавов, например, на основе никеля, титана, алюминия, а также пружинных сплавов и сталей, сочетание высоко- и низкотемпературного старения улучшает свойства материала.

В предыдущих исследованиях влияния двойного старения на твердость и ударную вязкость предложенной для СУЭ стали 06X14H6Д2МБТ было установлено, что при втором, более низкотемпературном нагреве распад мартенсита происходит полнее, вызывая дополнительное упрочнение. Следует отметить, что при этом упрочнение не сопровождается снижением ударной вязкости; это связано как с процессом отдыха мартенситной матрицы, так и с более однородным распределением частиц упрочняющей фазы в объеме зерна [3].

Однако для разработки корректных рекомендаций по режиму двойного старения необходимо провести механические испытания, максимально приближенные к условиям работы измерительного датчика. В используемой конструкции СУЭ тензорезистор прикрепляют на поверхность той части детали, которая работает в условиях изгиба, поэтому первая серия механических испытаний включала определение критериев прочности при изгибе.

В то же время известно, что основной характеристикой силоизмерительного элемента при эксплуатации является стабильность упругих свойств, т.е. отсутствие таких явлений, как ползучесть, гистерезис и обратное последствие, связанных с микропластической деформацией. К сожалению, в настоящее время на территории РФ отсутствуют испытательные установки для исследования этих процессов, поэтому вторым методом испытаний, который может характеризовать стабильность структуры и механических свойств при эксплуатации СУЭ, выбран метод циклического деформирования при напряжениях, меньших предела пропорциональности, с последующим измерением прочностных свойств при растяжении [4].

**Материал и методика исследования.** Изучена сталь ЭП817, которая относится к коррозионно-стойким низкоуглеродистым мартенситно-старяющим сталям с карбидно-интерметаллидным упрочнением [5]. Химический состав исследованного сплава включает, %: 0,06 С; 13,5 Cr; 5,2 Ni; 0,08 Ti; 1,4 Mo; 2,2 Cu; 0,3 Nb.

Сталь выплавлена с применением вакуумно-дугового переплава. Образцы для механических испытаний изготовлены из горячекатаных прутков диаметром 90 мм. Предварительная термическая обработка состояла из отжига при 650 °С с выдержкой в течение 2 ч. При упрочняющей обработке проведены закалка от 1000 °С, основное старение при температурах 425, 450, 475, 500, 515 °С и второе, низкотемпературное старение при 400 °С. Время выдержки при старении составляло 1 ч.

Твердость металлов HRC<sub>3</sub> измерена с помощью прибора ТК-2М в соответствии с ГОСТ 9013–59.

Продольные и поперечные образцы подвергали испытаниям на статический изгиб на универсальной испытательной машине Instron мо-

дели ТТ-DM со скоростью нагружения 2 мм/мин согласно ГОСТ 14019–80. База испытаний составляла 15 мм. После каждого режима упрочняющей термической обработки измеряли свойства на трех образцах. В результате определены характеристики прочности при изгибе: предел пропорциональности  $\sigma_{\text{пц}}^{\text{изг}}$  и условный предел текучести  $\sigma_{0,2}^{\text{изг}}$ .

Испытания образцов на растяжение (ГОСТ 1497–84) проводили на испытательной машине фирмы Instron модели ТТ-DM со скоростью нагружения 5 мм/мин. Начальная расчетная длина рабочей части образца составляла 15 мм, а диаметр — 2,95 мм. Часть образцов перед испытаниями на растяжение подвергали воздействию циклического нагружения при пульсирующем растяжении с амплитудой нагрузки 3500 Н до числа циклов  $2 \times 10^5$ .

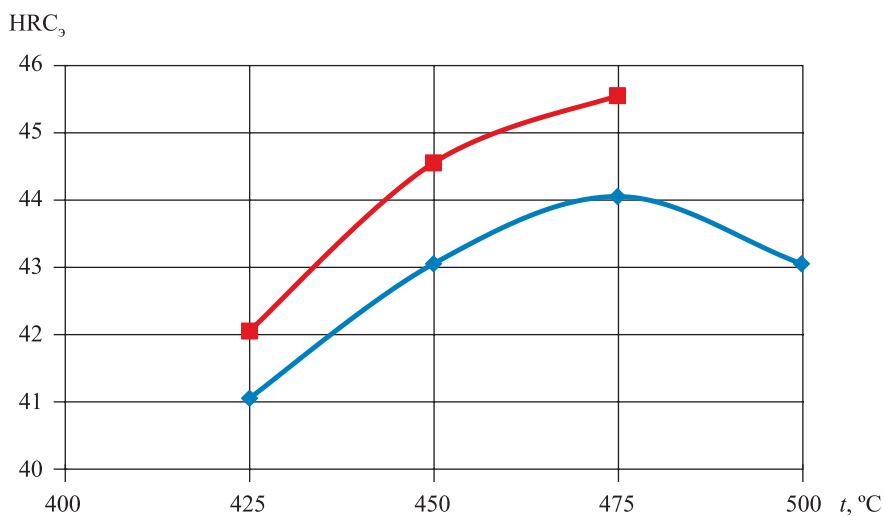
Контроль количества аустенита на разных этапах проведения термообработки осуществляли с помощью рентгеноструктурного анализа образцов на компьютеризированном аппарате ДРОН-4-07. Дифракционные отражения фиксировали в диапазоне значений углов  $2\theta = 50 \dots 54^\circ$ , в котором находятся отражения от плоскости (110) мартенсита и (111) аустенита.

Металлографический анализ продольных и поперечных образцов проводили с помощью микроскопа Leitz Metallovert: получаемые изображения передавались на монитор компьютера. Образцы предварительно подвергали электролитическому травлению в 5%-ном растворе HF с плотностью тока  $0,5 \text{ А/см}^2$ . Продолжительность травления составляла 20 с.

Количественный анализ зеренной структуры выполнен на компьютеризированном микроскопе с использованием программы, разработанной на кафедре «Материаловедение» в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Твердость стали ЭП817 изучена после закалки в зависимости от температуры основного старения. В области недостаривания, в диапазоне значений температур  $400 \dots 475^\circ\text{C}$  происходит повышение твердости. По достижении максимального значения при  $475^\circ\text{C}$  твердость снижается, что соответствует стадии перестаривания (рис. 1). При двойном старении твердость повышается во всем исследуемом диапазоне значений температур  $425 \dots 475^\circ\text{C}$ .

Испытания на изгиб проведены после основного и двойного старения на продольных и поперечных образцах стали ЭП817 (рис. 2). На продольных образцах в случае основного старения предел текучести  $\sigma_{0,2}$  (рис. 2, а) и предел пропорциональности  $\sigma_{\text{пц}}^{\text{изг}}$  (рис. 2, б) увеличиваются существенно при переходе от температуры  $425^\circ\text{C}$  к  $450^\circ\text{C}$ . Двойное старение ( $t_{\text{осн}} + 400^\circ\text{C}$ ) приводит к повышению значений всех характеристик прочности (см. рис. 2). Особенно значительный рост предела текучести и предела пропорциональности наблюдается на по-



**Рис. 1.** Влияние температуры старения на твердость стали 06X14H6Д2МБТ:  
 ◆ — основное старение; ■ — двойное старение

перечных образцах, что имеет важное практическое значение, так как поверхность, на которую наклеивают тензорезистор, расположена перпендикулярно направлению прокатки.

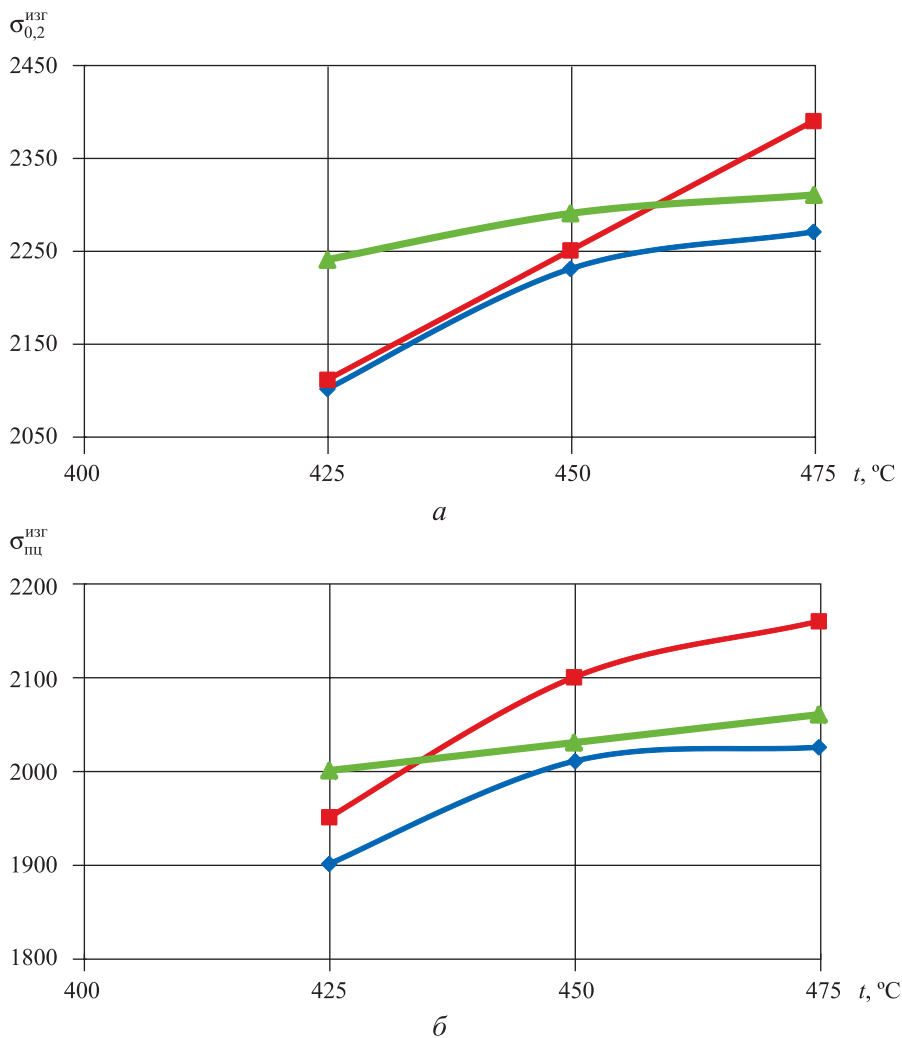
Различие свойств продольных и поперечных образцов, очевидно, является следствием неоднородности зеренной структуры: согласно проведенному количественному анализу средний размер зерна в центральной части прутка на 33...35 % больше по сравнению с размером зерна в периферийной зоне.

Применение двойного старения сопровождается также повышением отношения  $\sigma_{\text{пл}}/\sigma_{0,2}$  до значений 0,90...0,92, что свидетельствует об уменьшении склонности сплава к микропластической деформации и подтверждает повышение упругих свойств стали.

На основании проведенных исследований максимальное упрочнение обеспечивает режим двойного старения  $475^\circ\text{C} + 400^\circ\text{C}$ , который позволяет получать следующие механические свойства стали:  $\sigma_{\text{пл}}^{\text{изг}} = 2060$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 2310$  МПа на продольных образцах и  $\sigma_{\text{пл}} = 2160$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 2390$  МПа на поперечных образцах.

Влияние предварительного циклического нагружения изучено на образцах после двойного старения при температурных режимах  $425^\circ\text{C} + 400^\circ\text{C}$  и  $475^\circ\text{C} + 400^\circ\text{C}$ . Проведенные исследования подтвердили известное положение о том, что циклическое нагружение сталей с ОЦК-структурой приводит к разупрочнению их [4].

Предварительное циклическое деформирование стали ЭП817 вызывает ухудшение всех прочностных свойств при незначительном изменении пластических характеристик (таблица). Если после двойного



**Рис. 2.** Влияние температуры старения на прочность при изгибе стали 06X14N2Д2МБТ:

*а* — предел текучести; *б* — предел пропорциональности;  $\blacklozenge$  — основное старение;  $\blacksquare$  — двойное старение на поперечных образцах;  $\blacktriangle$  — двойное старение на продольных образцах

старения при температурном режиме 425 °С + 400 °С снижение  $\sigma_{нц}$  и  $\sigma_{0,05}$  составляет 73 МПа и 95 МПа соответственно, то после двойного старения при температурном режиме 475 °С + 400 °С эти свойства снижаются не более чем на 25 МПа.

Режим 425 °С + 400 °С соответствует стадии недостаривания, что и является причиной более низкой прочности.

Наименьшее снижение уровня прочности имеет место при температурном режиме двойного старения 475 °С + 400 °С. Применение этого режима позволяет получать более высокие прочностные характери-

**Влияние предварительного циклического деформирования  
на механические свойства стали ЭП817 при растяжении**

Температура старения, °С	Механические свойства					
	$\sigma_{\text{тц}}$ , МПа	$\sigma_{0,05}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
425+400	1420*	1445	1480	1520	15	49
	1345	1350	1365D	1490	13	47
475+400	1460	1475	1490	1595	14	49
	1435	1450	1460	1550	14	49

\* В числителе указаны свойства без циклического деформирования, в знаменателе — после циклического деформирования

стики по сравнению с характеристиками как после одноступенчатого старения при температуре 475 °С, так и после двухступенчатого старения при температурном режиме 425 °С + 400 °С. Таким образом, сталь ЭП817 в состоянии максимального упрочнения незначительно разупрочняется при циклическом нагружении, что свидетельствует о более стабильной структуре сплава.

**Заключение.** Для коррозионно-стойкой мартенситно-стареющей стали ЭП817, предназначенной для изготовления СУЭ, после закалки рекомендуется проводить двойное старение при температурном режиме 475 °С + 400 °С, что по сравнению с одинарным основным старением обеспечивает: повышение твердости; повышение прочности при испытаниях на статический изгиб, в том числе и предела упругости; наименьшую степень разупрочнения после воздействия циклических нагрузок. Установлено, что максимальных прочностных свойств достигают на поперечных образцах, что позволяет рекомендовать проводить разработку технологического процесса изготовления СУЭ таким образом, чтобы поверхность наклейки тензорезистора была ориентирована в поперечном направлении горячекатаного прутка. Это будет способствовать более надежной работе СУЭ в условиях эксплуатации.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тарасенко Л.В., Красов Т.А., Унчикова М.В. Термическая обработка коррозионно-стойкой стали для изготовления силоизмерительных упругих элементов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2007, № 2, с. 82–88.
- [2] Братухин А.Г., Гурвич Л.Я. *Коррозионная стойкость высокопрочных нержавеющей сталей*. Москва, Авиатехинформ, 1999, 288 с.
- [3] Тарасенко Л.В., Красов Т.А., Унчикова М.В. Влияние двухступенчатого старения на свойства мартенситно-старяющейся стали 06Х14Н6Д2МБТ для силоизмерительных упругих элементов. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2004, № 10, с. 7–11.
- [4] Терентьев В.Ф. *Усталость металлических материалов*. Москва, Наука, 2002, 248 с.
- [5] Братухин А.Г., Погосян М.А., Тарасенко Л.В. *Конструкционные и функциональные материалы современного авиастроения*. Москва, Изд-во МАИ, 2007, 304 с.

Статья поступила в редакцию 24.04.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Л.В. Тарасенко, М.В. Унчикова. Механические свойства коррозионно-стойкой стали после двойного старения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/hidden/730.html>

**Тарасенко Людмила Васильевна**, окончила МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1962 г., д-р техн. наук, профессор кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 публикаций и 2 учебных пособий. Работает в области исследования фазового состава, структуры и свойств жаропрочных сталей и сплавов для деталей ГТД, высокопрочных сталей авиационного назначения, алюминий-литиевых сплавов. e-mail: tarasenko@bmstu.ru

**Унчикова Марина Васильевна**, окончила МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1980 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных трудов в области термической и химико-термической обработки коррозионно-стойких сталей и жаропрочных никелевых сплавов. e-mail: unchikova\_mv@mail.ru