

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА КОРРОЗИОННО-СТОЙКОЙ СТАЛИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Мартенситно-стареющие хромоникелевые стали относятся к перспективным материалам для изготовления силоизмерительных элементов. Приведены результаты механических и коррозионных испытаний, а также данные рентгено-структурного анализа стали ЭП 817 после закалки и старения при различных температурах. Проведенные исследования позволяют выбрать режим упрочняющей термической обработки с учетом специфики эксплуатационных свойств указанных изделий и обосновывают необходимость последующей механической обработки для повышения коррозионной стойкости.

В последнее десятилетие в измерительных конструкциях, работающих в атмосферных условиях, наблюдается расширение применения электронных весов. Класс точности весов определяется не только высоким пределом упругости материала датчика (более 900... 1000 МПа при растяжении), но и долговечностью конструкции во влажной атмосфере, а также ее надежностью при климатических колебаниях температуры. Среди различных классов коррозионно-стойких сталей таким требованиям в наибольшей мере удовлетворяют мартенситно-стареющие хромоникелевые стали системы Fe-Cr-Ni-Cu, к которым принадлежит и сталь ЭП 817(08X14H6Д2МБТ).

Традиционная упрочняющая термическая обработка этой стали включает закалку и старение. Старение проводится при 515°С; при этом, наряду с выделением частиц ϵ -Cu, упрочняющих мартенсит, образуется ревертированный аустенит в количестве до 25 % [1]. Такая структура обеспечивает благоприятное сочетание прочности, надежности и коррозионной стойкости основного металла и сварных соединений в деталях авиастроения, для которых и была разработана данная сталь. Однако в силоизмерительных упругих элементах присутствие аустенита, вызывающего снижение релаксационной стойкости и увеличение неупругих эффектов, недопустимо [2].

Цель настоящей работы — разработать режимы старения, обеспечивающие необходимую коррозионную стойкость в отсутствие аустенита, а также установить влияние состояния поверхности после термической и механической обработки на коррозионные свойства.

Исследования проводились на стали ЭП 817 промышленной плавки, химический состав которой приведен в таблице. Термическая обработка включала следующие операции: закалку от 1000°С, обработку

холодом при -70°C в течение 2 ч, а также варьирование температур старения: 425, 450, 475, 500, 515°C в течение 1 ч с последующим охлаждением на воздухе.

Таблица

Химический состав стали ЭП 817 (% масс.)

C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	Cu	Ti	Nb
0,066	14,50	6,00	1,64	0,50	0,62	2,03	0,08	0,37

Твердость измеряли на приборе Роквелл (HRC) по ГОСТ 9013-59, испытания на ударную вязкость с определением характеристик KCU проводили на маятниковом копре МК-30 по ГОСТ 9454-60.

Рентгено-структурные исследования выполняли на компьютеризированном аппарате ДРОН-4 в кобальтовом K_{α} -излучении. Количество аустенита определяли на различных этапах термической обработки, а также определяли ширину линии $(220)_{\alpha}$, параметр кристаллической решетки и профиля линии $(220)_{\alpha}$.

Коррозионную стойкость оценивали по критическим точкам анодной поляризационной кривой (АПК) (рис. 1), в качестве которых использовали потенциал начала пассивации $E_{\text{нп}}$, максимальный ток пассивации $i_{\text{нп}}$, потенциал полной пассивации $E_{\text{пп}}$, потенциал питтингообразования $E_{\text{пт}}$. Потенциодинамические испытания проводили в хлорсодержащих электролитах 3% NaCl (электролит 1) или в 0,01 н. NaCl + 0,01 н. HCl (электролит 2), первый из которых можно считать нейтральной, а второй — кислой средой. Анодные поляризационные кривые снимались на потенциостате П-5848 в режиме автоматической развертки потенциала со скоростью 0,25 мВ/с. Поляризационные кривые, которые последовательно снимались на трех гранях каждого образца, показали удовлетворительную повторяемость результатов.

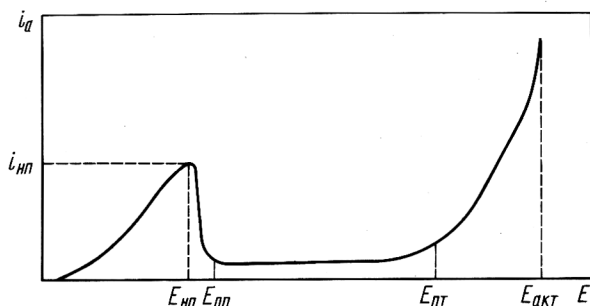


Рис. 1. Обобщенная анодная поляризационная кривая для пассивирующихся сплавов

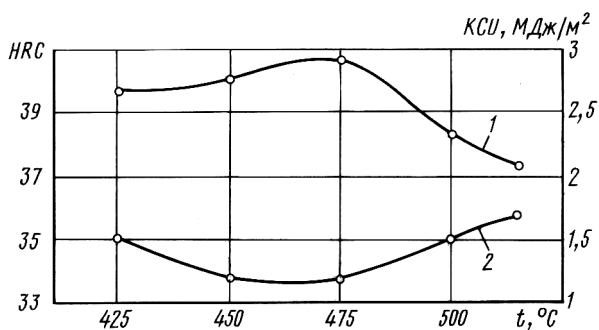


Рис. 2. Графики зависимости твердости (1) и ударной вязкости (2) стали ЭП 817 от температуры старения

Проведенные исследования позволили установить, что после закалки сталь 06X14H6D2MBT содержит 70 % остаточного аустенита, а после обработки холодом структура становится полностью мартенситной. По характеру изменения твердости и ударной вязкости при старении (рис. 2) можно выделить три области: I — повышение твердости и снижение ударной вязкости (стадия “недостаривания”); II — максимальная твердость и пониженная ударная вязкость; III — снижение твердости и повышение ударной вязкости (стадия “перестаривания”). В процессе старения при 425, 450 и 475°C аустенит не образуется, а прирост твердости за счет дисперсионного твердения составляет соответственно 9,3; 10,4 и 11,4 % (см. рис. 2). Максимальная твердость достигнута после старения при 475°C и составила 44 HRC; ударная вязкость при этом минимальна и составляет 1,2 МДж/м². Дальнейшее повышение температуры приводит к образованию остаточного аустенита (до 25 %), что наряду с коагуляцией частиц ϵ -Си вызывает разупрочнение стали.

Известно, что гетерогенная структура с высокодисперсными частицами, образующаяся при старении и вызывающая повышение прочности, как правило, отрицательно влияет на коррозионную стойкость [3]. Поэтому было исследовано анодное поведение сталей после старения при различных температурах. Анодные поляризационные кривые, снятые в электролите 1, показывают (рис. 3, а), что с повышением температуры старения потенциал растворения растет. Аналогичное влияние температуры старения проявляется при испытаниях в электролите 2, когда четко прослеживаются все стадии процесса коррозии (рис. 3, б). С повышением температуры старения от 425 до 475°C облегчается переход металла в пассивное состояние, о чем свидетельствует уменьшение потенциала начала пассивации $E_{\text{пп}}$ с 240 до 80 мВ. Старение при 425°C не приводит к полной пассивации стали в данном электролите. При повышении температуры старения до 450 и 475°C достигается полная пассивация поверхности при электродных потенциалах

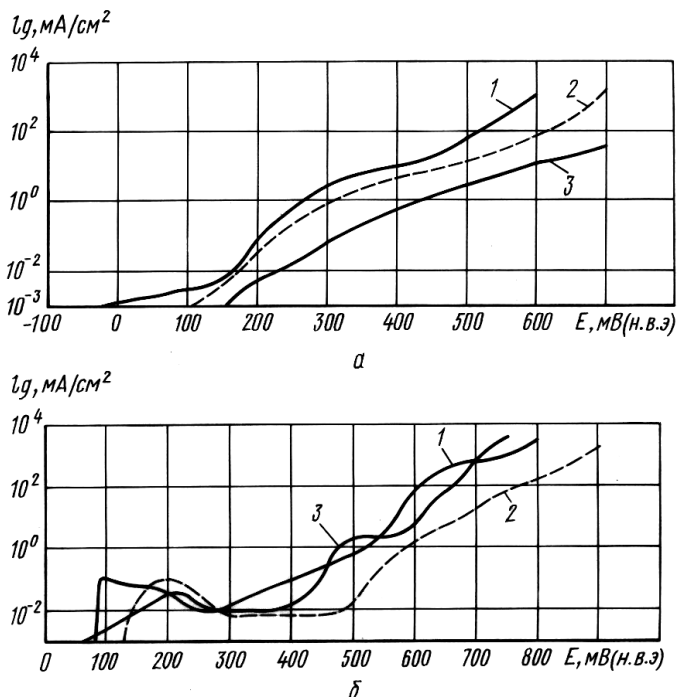


Рис. 3. Анодные поляризационные кривые (электролиты: 3% NaCl — *a*; 0,01% н. NaCl + 0,01% н. HCl — *б*) стали ЭП 817 после старения при температурах 425 (1), 450 (2) и 475°С (3)

300... 480 и 220... 400 мВ соответственно. Сопротивление питтинговой коррозии, определяемое потенциалом питтингообразования и током коррозии, максимально после старения стали при температуре 450°С. Таким образом, в исследуемом интервале температур наиболее низкая коррозионная стойкость на стадии недостаривания соответствует температуре 425°С, наиболее высокая — температуре 450°С. Старение при 475°С, когда характеристики прочности максимальны, снижает устойчивость пассивного состояния и усиливает питтингообразование.

При объяснении результатов коррозионных испытаний необходимо учитывать, что на анодное поведение стали влияют различные факторы, в том числе размер и количество частиц, выделяющихся при старении, характер их связи с матрицей, химическая природа частиц, равномерность распределения частиц на поверхности, снижение микронапряжений в результате отпуска мартенсита. Рентгено-структурные исследования показали, что ширина линии $(220)_\alpha$, определяющая искаженность кристаллической решетки, остается практически постоянной на стадии недостаривания, а асимметрия профиля дифракционной линии, являющаяся следствием химической неоднородности твердого раствора, наблюдается после старения при 425 и 475°С и отсутствует после старения при 450°С. В связи с этим можно предположить, что на

коррозионные свойства, в том числе на процесс питтингообразования, в наибольшей мере влияет характер распределения частиц ϵ -Си на поверхности стали. Равномерный распад мартенсита и, следовательно, равномерное распределение частиц ϵ -Си обуславливает образование более однородной по толщине пассивной пленки и повышает коррозионную стойкость. Другим структурным изменением, способствующим улучшению анодных характеристик стали после старения при 450°C , по всей вероятности, является снижение микронапряжений в мартенситной матрице.

Была проведена оценка влияния оксидных пленок, образующихся на поверхности при различных температурах старения, на склонность стали к пассивации. С этой целью проведено сравнение АПК образцов

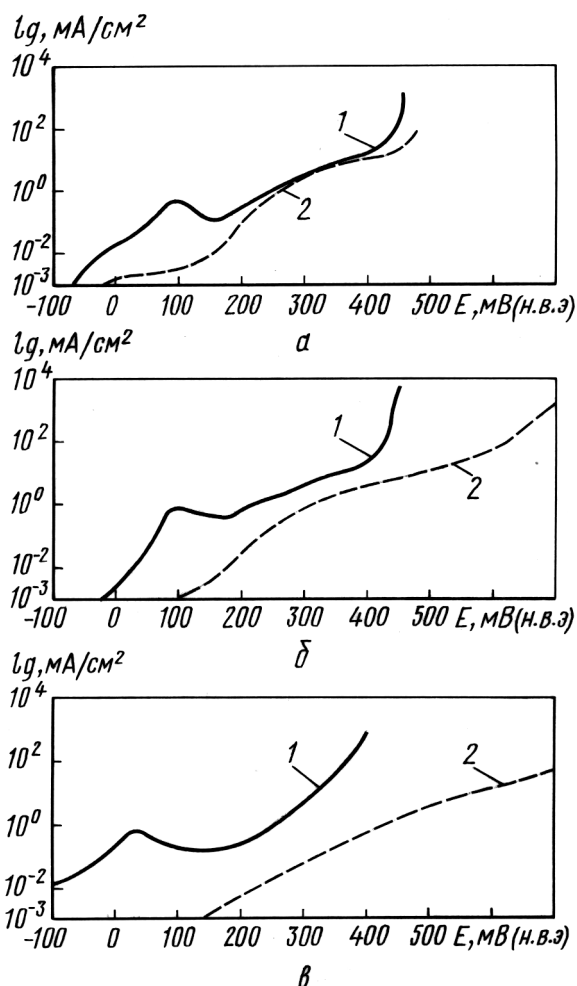


Рис. 4. Анодные поляризационные кривые (АПК) (электролит 3 % NaCl) стали ЭП 817 при температурах 425 (а), 450 (б) и 475°C (в): 1 — с оксидной пленкой, образовавшейся на поверхности при старении; 2 — после снятия оксидной пленки шлифованием

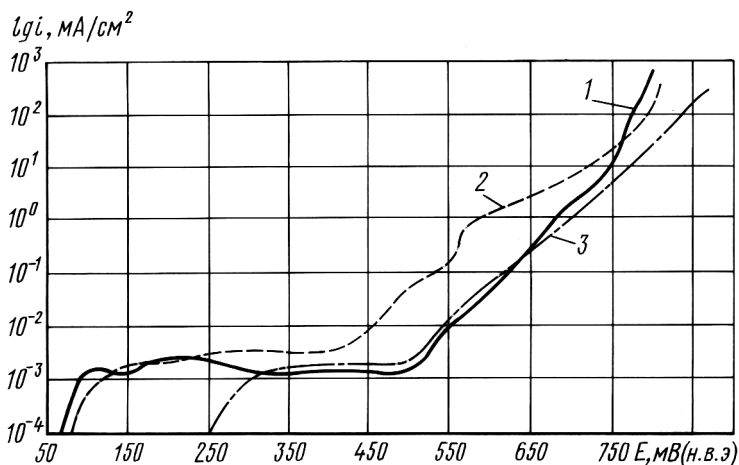


Рис. 5. Анодные поляризационные кривые (электролит 0,01 % н. NaCl + 0,01 % н. HCl) стали ЭП 817 после старения при температуре 450°C и различной механической обработки поверхности:

1 — шлифование с последующим механическим полированием; 2 — шлифование; 3 — шлифование с последующим электрохимическим полированием

с окисленной и шлифованной поверхностями (рис. 4). После старения при температуре 425°C АПК образцов с оксидной пленкой и без нее различаются незначительно. После старения при 450 и 475°C образцы с оксидной пленкой имеют худшие электрохимические свойства: ток коррозии повышается на два-три порядка, существенно снижается потенциал перехода стали в активное состояние. Причина ухудшения коррозионных свойств, очевидно, связана с обеднением поверхностного слоя хромом в результате его диффузии в оксидный слой и последующего взаимодействия с кислородом. С повышением температуры старения отрицательное влияние оксидных пленок на коррозионное поведение стали становится более значительным, поэтому после старения оксидные пленки нужно удалять с поверхности детали. Для удаления оксидных пленок применяют шлифование, шлифование с последующим механическим полированием и шлифование с последующим электрохимическим полированием. После старения при температуре 450°C и последующей поверхностной обработки образцов АПК, представленные на рис. 5, показывают, что удаление оксидных пленок, не изменяя формы кривой, существенно влияет на положение критических точек. Наиболее благоприятно на коррозионную стойкость влияет шлифование поверхности с последующим механическим полированием. Так, после механического полирования пассивация начинается при наименьшем потенциале, пассивная область имеет наибольшую протяженность, потенциал питтингообразования максимальный. Положительное влияние механического полирования на коррозионную стойкость, вероятно, связано с притуплением выступающих участков

микрорельефа и повышением электрохимической однородности поверхности. Кроме того, согласно работе [4], на поверхности образцов возникают значительные напряжения сжатия, что также может повысить коррозионную стойкость.

Проведенные исследования показали, что оптимальное сочетание коррозионных и механических свойств стали ЭП 817, в случае ее использования для изготовления силоизмерительных упругих элементов, достигается при проведении упрочняющей обработки по режиму: закалка на воздухе с температуры 1000°C, обработка холодом при –70°C в течение 2 ч, старение при 450°C в течение 1 ч. Для удаления оксидных пленок и повышения коррозионной стойкости рекомендуется использовать шлифование поверхности с последующим механическим полированием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. П о т а к Я. М. Высокопрочные стали. – М.: Металлургия, 1972. – 208 с.
2. Р а х ш т а д т А. Г. Пружинные стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1982. – 400 с.
3. Б р а т у х и н А. Г., Г у р в и ч Л. Я. Коррозионная стойкость высокопрочных нержавеющей сталей. – М.: Авиатехинформ, 1999. – 208 с.
4. Г р и л и х е с С. Я., Р а х ш т а д т А. Г., Р я б н и к о в А. Н. Термоэлектрохимическая обработка упругих элементов. – М.: Машиностроение, 1978. – 136 с.

Статья поступила в редакцию 14.04.2006

В издательстве МГТУ вышла в свет книга

Лысенко Л.Н. Наведение и навигация баллистических ракет: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 672 с.

Изложены научные и методологические основы наведения и навигации летательных аппаратов баллистического типа. Рассмотрены вопросы программирования движения (задачи наведения) и информационно-навигационного обеспечения управления (задачи навигации), а также проблемы статистической динамики полета — оценивание движения и определение точности стрельбы (задачи оценки точности возмущенного движения). Показаны направления решений соответствующих задач при создании существующих ракетных комплексов тактического, оперативно-тактического и стратегического назначений, возможные пути совершенствования баллистико-навигационного обеспечения полета ракет последующих поколений.

Для студентов технических вузов, слушателей военных академий, а также аспирантов, инженеров и научных работников, специализирующихся в области баллистики, динамики полета и управления движением летательных аппаратов.