

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО СТАРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ АРМКО-ЖЕЛЕЗА*

О. В. Алехин, В. П. Алехин

В статье представлены результаты исследования кинетики и основных закономерностей естественного и искусственного деформационного старения после поверхностной упрочняющей обработки армко-железа при варьировании содержания углерода в армко-железе, времени и температуры старения, глубины поверхностного слоя. Был обнаружен эффект необычно высокого дополнительного упрочнения поверхностных слоев толщиной 1 мкм, выражающийся в приросте микротвердости на 200–300% по сравнению с исходным состоянием (без старения). Также был установлен оптимальный температурно-временной режим искусственного старения ($T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 20\text{ ч}$), приближающийся по упрочняющему эффекту к процессу естественного деформационного старения на базе одного года.

Ключевые слова: деформационное старение, кинетическая микротвердость, поверхностные слои, упрочняющая обработка.

Введение

Как было показано различными структурными методами [1], приповерхностные слои материала деформируются и упрочняются раньше внутренних слоев и оказывают существенное влияние на общий характер макроскопической деформации материала в целом. Учитывая склонность объемноцентрированных кубических (ОЦК) материалов к деформационному старению (ДС), в случае поверхностной упрочняющей обработки (ПУО) следует ожидать закрепления дислокационной структуры и усиления эффекта упрочнения в поверхностных слоях за счет протекания процессов ДС [2–4].

Цель настоящей работы – уточнение механизма деформационного старения поверхностных слоев армко-железа, которое не упрочняется термически в следствие малого содержания углерода.

Постановка задачи

Актуальность проблемы очевидна, поскольку данный материал термически не упрочняем из-за малого содержания углерода. Следовательно, единственным способом его деформационного упрочнения является деформационное старение.

Необходимость более детального исследования кинетики ДС в приповерхностных слоях α -Fe была обусловлена следующими обстоятельствами.

1. Процесс ДС не исследовался ранее применительно к поверхностной упрочняющей обработке.

2. В литературе отсутствуют данные по совместному упрочняющему действию двух процессов – непосредственно поверхностной обработки и процесса ДС в поверхностных слоях.

* Работа выполнена при финансовой поддержке проекта № 2.1.2/6727 в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научных потенциалов высшей школы (2009–2010 годы)».

3. Явление естественного ДС ранее изучалось, как правило, на малой временной базе, и поэтому представляет интерес исследование упрочняющего эффекта при значительно больших временах выдержки, вплоть до одного года.

Экспериментальные исследования закономерностей деформационного старения

Задача экспериментальных исследований заключалась в определении обычной и кинетической микротвердости кинетики и основных закономерностей естественного и искусственного деформационного старения после поверхностной упрочняющей обработки армко-железа при варьировании содержания углерода в α -Fe, времени и температуры старения, глубины поверхностного слоя. Исследовалась зависимость азимутального пятна рентгеновских линий b_A от толщины поверхностного слоя при различных временах ДС, а также зависимость ширины рентгеновских линий от времени старения по сечению образцов армко-железа.

Эксперименты показали [2–4], что естественное ДС проявляется на временной базе порядка 1 года, после чего оно практически прекращается. Обнаружен необычно сильный эффект упрочнения в тонких поверхностных слоях α -Fe толщиной порядка 1 мкм, выражающийся в приросте микротвердости более чем на 200–300% по сравнению с исходным состоянием (рис. 1). Это, по-видимому, связано с тем, что появляющийся в результате механической обработки приповерхностный градиент плотности дислокации, а также соответствующий градиент внутренних остаточных напряжений

вблизи поверхности резко усиливают эффект старения за счет ускорения восходящей диффузии и осаждения примесных атомов внедрения (углерода и азота) в приповерхностном слое.

Повышение микротвердости происходит при увеличении времени старения, уменьшении нагрузки P на индентор (см. рис. 1), а также повышении содержания углерода и азота.

В целях практического использования эффекта ДС в приповерхностных слоях для дополнительного повышения физико-механических свойств низкоуглеродистых сталей после поверхностной упрочняющей обработки экспериментально был подобран оптимальный температурно-временной режим искусственного ДС ($T = 100^\circ\text{C}$, $t = 20$ ч), приближающийся по упрочняющему эффекту к процессу естественного ДС на базе одного года (см. рис. 1, б). Наблюдалось также явление перестаривания, выражающееся в уменьшении микротвердости при превышении этой температуры.

Аналогичные эффекты естественного и искусственного ДС и увеличения твердости в приповерхностных слоях были получены на образцах из Ст45 и Ст3 после поверхностной обработки стальным роликом, а также на монокристаллах Mo и Nb. Однако для этих монокристаллов эффект ДС не проявлялся при 20°C без проведения отжига. Он проявляется только после отжига при $T = 1500^\circ\text{C}$, $t = 1$ ч для монокристалла Mo и $T = 2000^\circ\text{C}$, $t = 2$ ч – для монокристалла Nb, что может быть связано с эффектом геттерирования, сущность которого состоит в том, что при температуре отжига поверхностные слои Mo и Nb насыщаются примесями внедрения, захватываемыми из несовершенного ва-

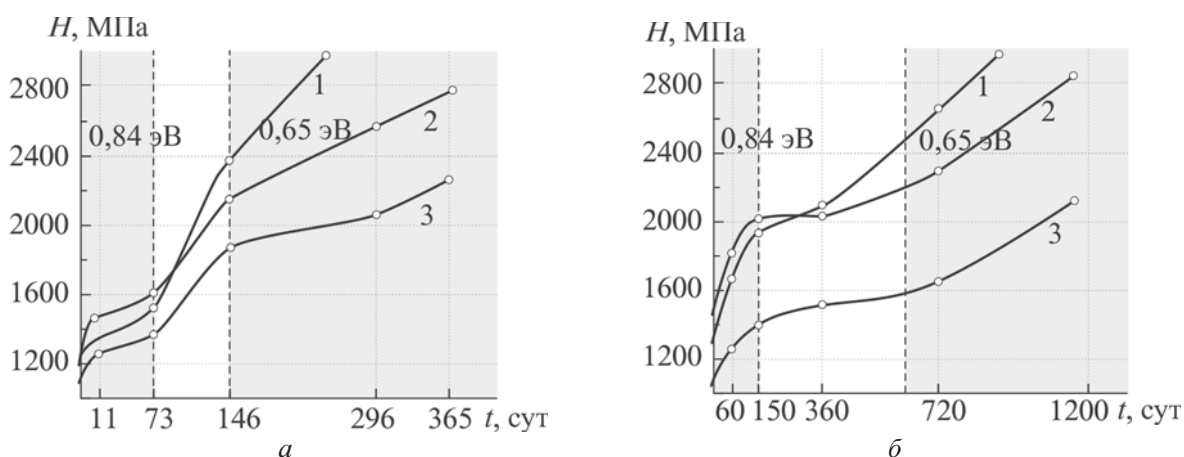


Рис. 1. Изменение микротвердости H армко-железа от времени t естественного (а) и искусственного при 100°C (б) ДС (P – нагрузка на индентор, t – время ДС):
1 – $P = 0,2$ Н; 2 – $P = 0,3$ Н; 3 – $P = 2$ Н

куума (10^{-2} Па), и создается пересыщенный по отношению к комнатной температуре твердый раствор.

Экспериментальные данные показали, что эффект упрочнения образцов Ст3 выше, чем образцов Ст45. При малых глубинах индентирования упрочнение растет. Так, для Ст45 при $h = 1$ мкм относительный прирост микротвердости составляет 1,5 против 1,3. При содержании углерода 0,005 и 0,033% в α -Fe этот прирост равен 1,9 и 2,4 соответственно. Таким образом, упрочнение в зависимости от содержания углерода проходит через максимум, который ориентировочно должен находиться в интервале $C = 0,05\text{--}0,1\%$.

В работах [3, 4] проводилось определение энергии активации U процесса ДС. В расчетах U использовались результаты измерения микротвердости при температуре естественного ДС ($T = 20$ °С, см. рис. 1, а) и искусственного ДС ($T = 100$ °С, см. рис. 1, б). Полученные данные свидетельствуют о том, что процесс ДС в приповерхностных слоях α -Fe протекает в две стадии, разделенные инкубационным периодом. Для первой стадии значение $U = 0,84$ эВ можно связать с энергией активации диффузии углерода к дислокациям с образованием атмосфер. Наличие инкубационного периода однозначно говорит о двустадийности процесса, при этом энергия активации (второй стадии) заметно ниже и составляет в среднем 0,65 эВ. Таким образом, результаты определения энергии активации подтверждают предположение о том, что на второй стадии образуются выделения второй фазы.

Анализ кривых релаксации нормальных напряжений, полученных при растяжении образцов на испытательной машине «Инстрон», показал, что глубина релаксации максимальных нормальных напряжений $\sigma_{\max}$ монотонно возрастает с увеличением степени деформации и значительно уменьшается после поверхностного упрочнения (ПУ), а также после ПУ и последующего искусственного ДС по сравнению с исходным неупрочненным состоянием. Величина активационного объема для исходного состояния (без ПУ) равна $25b^3$ (b – вектор Бюргерса). После ПУ активационный объем снижается до $20b^3$, а после последующего ДС при $T = 100$ °С, $t = 20$ ч – до значения $15b^3$, что свидетельствует о более жестком закреплении дислокационной структуры примесными атомами внедрения.

На рисунке 2 представлено влияние упроч-

нения поверхностных слоев стальным роликом и искусственного старения на кривую σ – ϵ армо-железа. Из него видно, что с увеличением контактной нагрузки на ролике кривые (2 и 3) смещаются вверх. Еще большее упрочнение материала и соответствующее смещение кривых σ – ϵ получается при последующем деформационном старении (кривые 4, 5).

Данные, полученные при измерении механических свойств, были подтверждены экспериментами по исследованию внутреннего трения (ВТ) (рис. 3). Поверхностное упрочнение образцов из α -Fe (0,033% С) осуществлялось стальным роликом (СР).

Испытание исходных неупрочненных, упрочненных и состаренных проволоочных образцов на релаксаторе типа обращенного крутильного маятника с амплитудой $\gamma = 7,87 \cdot 10^{-6}$ на частоте 1 Гц показало уменьшение внутреннего трения Q^{-1} при деформации и последующем старении при $T = 200$ °С, $t = 1$ ч по сравнению с исходным уровнем. При этом пик ВТ сместился в область более высоких температур. Кроме того, была оценена энергия активации процесса, которая оказалась равной энергии активации диффузии U углерода в α -Fe (0,9 эВ):

$$U = \frac{R \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot \ln(\frac{\omega_1}{\omega_2})}{T_2 - T_1} = 0,9 \text{ эВ}, \quad (1)$$

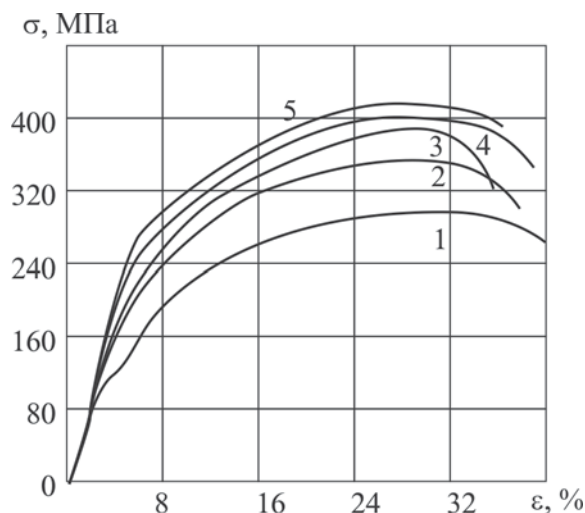


Рис. 2. Влияние упрочнения стальным роликом и искусственного старения на кривую σ – ϵ армо-железа:

- 1 – исходный образец (без упрочнения);
- 2 – упрочнение образца при $P = 400$ Н;
- 3 – упрочнение образца при $P = 650$ Н;
- 4 – старение при $T = 100$ °С, $t = 12$ ч;
- 5 – старение при $T = 100$ °С, $t = 20$ ч,

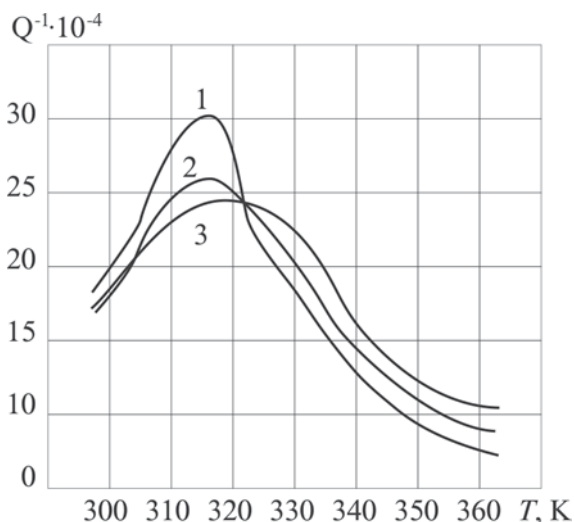


Рис. 3. Температурная зависимость внутреннего трения $Q^{-1} \cdot 10^{-4}$ в армко-железе: 1 — исходное состояние, 2 — упрочнение стальным роликом, 3 — ДС при $T = 100^\circ\text{C}$, $t = 1$ ч.

где R — универсальная газовая постоянная, T_1 и T_2 — температуры измерения внутреннего трения, ω_1 и ω_2 — частоты колебаний при температурах T_1 и T_2 .

Заключение

Полученные результаты имеют несомненную практическую ценность в том плане, что показывают наличие существенного резерва повышения твердости и прочностных свойств непосредственно после проведения различных видов ПУО. Это особенно важно для низкоуглеродистых сталей, неупрочняемых обыч-

ными способами термической обработки из-за низкого содержания углерода. С другой стороны, можно рекомендовать способ повышения технологической пластичности холодно- или горячекатанного тонколистового проката в случае его длительного хранения перед использованием за счет проведения соответствующего гомогенизирующего отжига.

Список литературы

1. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. — М.: Наука, 1983. — 280 с.
2. Алехин О.В. Резервы повышения физико-механических свойств материалов и изделий после поверхностной упрочняющей обработки. // Сб. докл. междунар. конгресса «Механика и трибология транспортных систем — 2003», сентябрь 2003 г. — Ростов-на-Дону, 2003, Т. 1. С. 39—41.
3. Булычев С.И., Тумасян В.С., Алехин О.В. Исследование кинетики процессов естественного и искусственного деформационного старения армко-железа методами обычной и кинетической микротвердости и мессбауэровской спектроскопии // Физика и химия обработки материалов. 1988. № 5. С. 136—141.
4. Рыбакова Л.М., Тумасян В.С., Куксенова Л.И., Алехин О.В. Деформационное старение в поверхностных слоях низколегированной стали // Металловедение и термическая обработка металлов. 1990. № 11. С. 32—38.

Материал поступил в редакцию 10.09.2010

АЛЕХИН Олег Валентинович

E-mail: alehin_valentin@mail.ru
Тел. +7 (495) 552-87-71

Старший научный сотрудник НИИ технологии материалов. Направление научной деятельности — физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. Автор 34 научных работ, в том числе 2 патента.

АЛЕХИН Валентин Павлович

E-mail: alehin_valentin@mail.ru
Тел. +7 (495) 620-37-63

Доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, академик Российской академии естественных наук и международной академии наук высшей школы, член Межгосударственного координационного совета по физике прочности и пластичности, член Российского комитета «Ультрадисперсные (нано) материалы», директор НИИ «Перспективные материалы и нанотехнологии» при МГИУ. Область научных интересов — физикохимия поверхности, физическое материаловедение, физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. Автор 680 научных работ, из них 10 монографий, 39 авторских свидетельств и патентов, научного открытия «Явление аномального ослабления рентгеновского излучения ультрадисперсными средами», № А-006, 1994 г.