

PACS numbers: 61.72.Hh, 62.20.fq, 62.40.+i, 81.20.Ny, 81.40.Ef, 81.40.Jj, 81.40.Lm

## **Кинетика релаксации напряжений в армко-железе после поверхностного упрочнения стальным роликом и различных режимов искусственного деформационного старения**

В. П. Алехин

*ФГБОУ ВПО «Московский государственный индустриальный университет»,  
ул. Автозаводская, 16,  
115280 Москва, Российская Федерация*

В работе проведён сравнительный анализ кривых релаксации механических напряжений в армко-железе, которые были использованы для анализа степени закрепления дислокаций примесными атомами. Эксперименты выполнялись после поверхностного упрочнения стальным роликом и различных режимов искусственного деформационного старения. Показано, что естественное деформационное старение (ДС) в них проявляется на временной базе, порядка 1 года, после чего оно практически прекращается. Обнаружена необычно большая величина упрочнения в тонких поверхностных слоях толщиной 1–3 мкм, характеризующаяся увеличением микротвёрдости на 200–300% по сравнению с исходным состоянием (без старения). В целях практического использования эффекта ДС в приповерхностных слоях для дополнительного повышения физико-механических свойств низкоуглеродистых сталей после поверхностной упрочняющей обработки (ПУО) 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 1 года. Рекомендован режим искусственного ДС после любого вида упрочняющей поверхностной обработки в качестве технологического приёма получения дополнительного упрочняющего эффекта исследуемых материалов, в том числе для низкоуглеродистых сталей, неупрочняемых обычными способами термической обработки из-за низкого содержания углерода и упрочняемых только методами химико-термической обработки. Рекомендован способ повышения технологической пластичности холодно- или горячекатаного тонколистового проката в случае его длительного хранения перед использованием в операциях глубокой штамповки или вытяжки за счёт проведения соответствующего гомогенизирующего отжига.

У роботі виконано порівняльний аналіз кривих релаксації механічних напружень в армко-залізі, яких було використано для аналізу ступеня закріплення дислокацій домішковими атомами. Експерименти виконувалися після

поверхневого зміцнення сталевим вальцем і різних режимів штучного деформаційного старіння. Показано, що природне деформаційне старіння (ДС) в них виявляється на часовій базі порядку 1 року, після чого воно практично припиняється. Виявлено незвично велике значення зміцнення в тонких поверхневих шарах товщиною 1–3 мкм, які характеризуються збільшенням мікротвердості на 200–300% у порівнянні з вихідним станом (без старіння). З метою практичного використання ефекту ДС у приповерхневих шарах для додаткового підвищення фізико-механічних властивостей маловуглецевих сталей після поверхневого зміцнювального оброблення (ПЗО) експериментально було підібрано оптимальний температурно-часовий режим штучного ДС ( $T = 100^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 20$  год.), що наближається за зміцнювальним ефектом до процесу природного ДС на базі 1 року. Рекомендовано режим штучного ДС після будь-якого виду зміцнювального поверхневого оброблення як технологічний засіб одержання додаткового зміцнювального ефекту досліджуваних матеріалів, в тому числі, для маловуглецевих сталей, які не зміцнювалися звичайними способами термічного оброблення через малий вміст вуглецю та зміцнювалися тільки методами хіміко-термічного оброблення. Рекомендовано спосіб підвищення технологічної пластичності холодно- або гарячекатаного тонколистового прокату у випадку його тривалого зберігання до використання в операціях глибокого штампування або витягання за рахунок виконання відповідного гомогенізувального відпалу.

A comparative analysis of the relaxation curves of mechanical stresses in armco-iron is performed. These curves are used to analyse the degree of pinning of dislocations by impurity atoms. The experiments are performed after the surface hardening by steel roller and various modes of artificial strain ageing. It is shown that the natural strain ageing (SA) in armco-iron takes place on a temporary basis of about one year, after which it practically ceases. The unusually high hardening in thin surface layers of a thickness of 1–3 microns characterized by an increase in microhardness by 200–300% as compared to initial state (without ageing) is revealed. For the purposes of the practical use of the SA in the surface layers to further improve the physical and mechanical properties of low-carbon steels after surface hardening treatment (SHT), optimum temperature–time regime of artificial SA ( $T = 100^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 20$  h), approaching to the strengthening effect of natural one year SA, has been experimentally selected. The SA mode is recommended after any artificial form of the surface hardening treatment as a process to obtain additional hardening effect of the materials under investigation, including carbon steels, which cannot be hardened by conventional methods of heat treatment due to low carbon content and which can be hardened only by means of the chemical and thermal treatments. Method of the technological plasticity increase caused by appropriate homogenizing annealing of cold- or hot-rolled steel sheets is recommended in case of their prolonged storage before using in operations of the deep stamping or stretches forming.

**Ключевые слова:** армко-железо, релаксация напряжений, деформационное старение.

*(Получено 11 июля 2012 г.)*

Известно, что свободная поверхность, являясь специфическим видом плоского дефекта в кристалле, оказывает существенное влияние на его физико-механические свойства [1]. Роль поверхности в процессах деформации и разрушения материалов еще более усиливается, если она с целью повышения усталостной прочности и износостойкости подвергается различным видам поверхностной упрочняющей обработки (ПУО) [2, 3]. Учитывая склонность объемно-центрированных кубических (ОЦК) материалов к деформационному старению (ДС), следует ожидать в случае проведения ПУО более жесткого закрепления дислокационной структуры поверхностного слоя и повышения эффекта его упрочнения за счет протекания процессов ДС.

Однако следует отметить, что до настоящего времени не проводился анализ совместного упрочняющего влияния на материалы 2-х параллельно действующих и дополняющих друг друга процессов: непосредственно поверхностной обработки и эффекта динамического (во время обработки) и последующего статического (после обработки) деформационного старения за счет осаждения быстро диффундирующих примесей внедрения (углерод, азот) на дислокациях и более жесткого их закрепления. Как правило, эти явления рассматривались без взаимосвязи, отдельно друг от друга. С другой стороны, и сам процесс деформационного старения изучался только в условиях обычной объемной деформации всего материала в целом и не рассматривался для конкретных технологических процессов поверхностного упрочнения, создающих градиент повышенной плотности дислокаций и соответствующий градиент внутренних остаточных напряжений, которые должны в существенной степени изменять кинетику и основные закономерности деформационного старения в отличие от обычно рассматриваемых условий его протекания при равномерной деформации всего образца по его поперечному сечению. При этом можно предполагать, что анализ совместного влияния указанных 2-х эффектов позволит рекомендовать для чистого железа и малоуглеродистых сталей, не подвергаемых термообработке из-за малого содержания углерода, а также для среднеуглеродистых и низколегированных сталей, своеобразный новый вид поверхностной упрочняющей обработки (типа химико-термической) в дополнение к обычно существующим и заключающимся в целенаправленном проведении естественного или для ускорения искусственного деформационного старения после соответствующего вида поверхностного упрочнения.

Наконец, знание этих закономерностей позволит прогнозировать и соответственно устранять за счет гомогенизирующего диффузионного отжига отрицательное действие указанного эффекта в том случае, когда после длительного хранения материала на складе или вылеживания перед различными операциями обработки металлов давлением, связанными с высокой степенью деформации (глубокая

штамповка или высадка и др.) может наблюдаться растрескивание и появление брака в деталях за счет снижения пластических свойств материала в результате старения.

Кроме того, процесс деформационного старения исследовался, как правило, на малой временной базе (в основном от нескольких часов и суток до месяца) и фактически отсутствуют исследования при больших временах естественного старения ( $T \cong 20^\circ\text{C}$ ) порядка года.

В работе проведен сравнительный анализ кривых релаксации механических напряжений и, в частности, глубины релаксации напряжений  $\tau_{\text{max}}^*$ , которые удобно использовать для анализа степени закрепления дислокаций примесными атомами. Эксперименты выполнялись на образцах армко-железа после поверхностного упрочнения стальным роликом (СР) и различных режимов искусственного деформационного старения.

Установлены количественные закономерности естественного и искусственного ДС в приповерхностных слоях исследованных образцов армко-железа после ПУО и показано, что естественное ДС в них проявляется на временной базе, порядка 1 года, после чего оно практически прекращается.

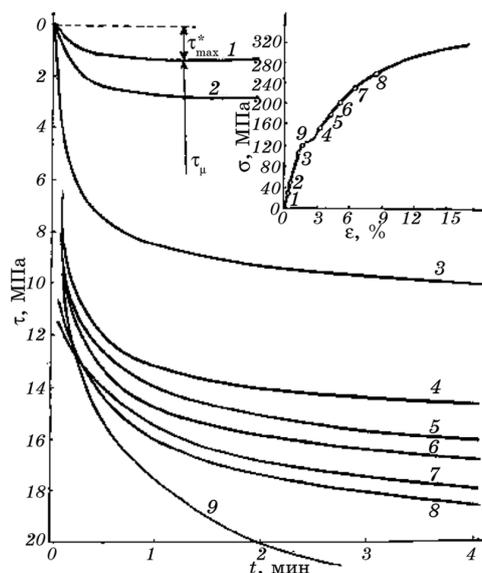
Обнаружена необычно большая величина упрочнения в тонких поверхностных слоях толщиной 1–3 мкм, характеризующаяся увеличением микротвердости на 200–300% по сравнению с исходным состоянием (без старения). Установлено, что упрочнение растет с повышением содержания углерода. Показана возможность получения нанокристаллической структуры с размером зерна 5–10 нм после ультразвукового упрочнения стали.

В целях практического использования эффекта ДС в приповерхностных слоях для дополнительного повышения физико-механических свойств низкоуглеродистых сталей после ПУО 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 1 года.

Рекомендован режим искусственного ДС после любого вида упрочняющей поверхностной обработки в качестве технологического приема получения дополнительного упрочняющего эффекта исследуемых материалов, в том числе для низкоуглеродистых сталей, неупрочняемых обычными способами термической обработки из-за низкого содержания углерода и упрочняемых только методами химико-термической обработки.

Рекомендован способ повышения технологической пластичности холодно- или горячекатаного тонколистового проката в случае его длительного хранения перед использованием в операциях глубокой штамповки или вытяжки за счет проведения соответствующего гомогенизирующего отжига.

Показано, что при ДС в условиях знакопеременного нагружения

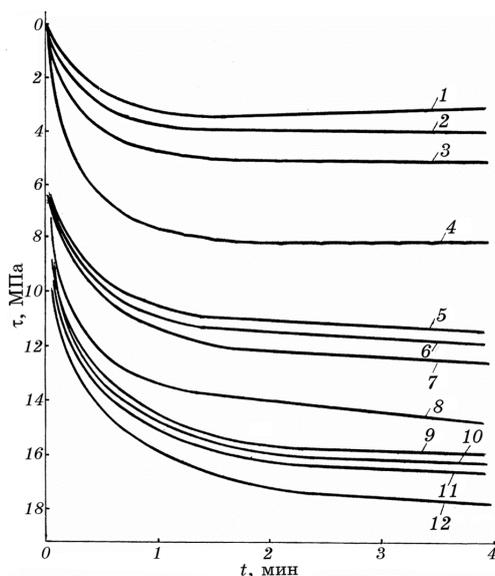


**Рис. 1.** Изменение глубины релаксации напряжений (термической компоненты  $\tau_{\max}^*$ ) в зависимости от величины напряжений  $\sigma$ , с которых начинается процесс релаксации: 1 —  $\sigma = 3,4$  кг/мм<sup>2</sup>; 2 —  $\sigma = 4,6$  кг/мм<sup>2</sup>; 3 —  $\sigma = 10,3$  кг/мм<sup>2</sup>; 4 —  $\sigma = 14,9$  кг/мм<sup>2</sup>; 5 —  $\sigma = 17,4$  кг/мм<sup>2</sup>; 6 —  $\sigma = 19,9$  кг/мм<sup>2</sup>; 7 —  $\sigma = 22,4$  кг/мм<sup>2</sup>; 8 —  $\sigma = 24,9$  кг/мм<sup>2</sup>; 9 —  $\sigma = 11,9$  кг/мм<sup>2</sup> ( $\tau_{\text{н}}$  атермическая компонента напряжений). Точки 1–8 начала процессов релаксации на кривой  $\sigma$ – $\epsilon$   $\alpha$ -Fe представлены на врезке.

кроме коттрелловского закрепления примесями внедрения необходимо учитывать также периодически возникающее пересыщение и недосыщение по собственным точечным дефектам (вакансиям и междоузлиям), которые приводят к дополнительному закреплению винтовых и смешанных дислокаций неконсервативно движущимися ступеньками.

На рисунке 1 представлено изменение глубины релаксации напряжений (термической компоненты  $\tau_{\max}^*$ ) для различных значений напряжения  $\sigma$ , с которых начинается процесс релаксации.

На рисунке 2 представлены 3 серии релаксационных кривых для разных величин исходных деформирующих напряжений  $\sigma = 9,9$ , 17,4 и 24,9 кг/мм<sup>2</sup>, с которых начинался процесс релаксации. Причем в каждой серии представлены кривые релаксации в исходном состоянии (4, 8, 12), в упрочненном (3, 7, 11), упрочненном и состаренном (1, 2, 5, 6, 9, 10), чтобы доказать наличие этого примесного эффекта закрепления дислокаций, представляло интерес провести по данным релаксации напряжений термоактивационный анализ и определить значения величин активационных объемов для всех 3-х указанных случаев: исходного, упрочненного, упрочненного и со-



**Рис. 2.** Влияние степени поверхностной деформации и деформационного старения на глубину релаксации напряжений (термической компоненты  $\tau_{\max}^*$ )  $\alpha$ -Fe: 4 — исх.  $\tau_0 = 9,9$  кг/мм<sup>2</sup>; 3 — упрочнение СР; 2 — старение при  $T = 100^\circ\text{C}$ ,  $t = 12$  ч; 1 — старение при  $T = 100^\circ\text{C}$ ,  $t = 20$  ч; 8 — исх.  $\tau_0 = 17,4$  кг/мм<sup>2</sup>; 7 — упрочнение СР; 6 — старение при  $T = 100^\circ\text{C}$ ,  $t = 12$  ч; 5 — старение при  $T = 100^\circ\text{C}$ ,  $t = 20$  ч; 12 — исх.  $\tau_0 = 24,9$  кг/мм<sup>2</sup>; 11 — упрочнение СР; 10 — старение при  $T = 100^\circ\text{C}$ ,  $t = 12$  ч; 9 — старение при  $T = 100^\circ\text{C}$ ,  $t = 20$  ч.

старенного состояний.

Значение активационного объема, определенное для исходного неупрочненного состояния при степенях деформации, больших  $5 \cdot 10^{-3}$  ( $\tau > 10$  кг/мм<sup>2</sup>), практически постоянно и равно  $q = 25b^3$  ( $b$  — модуль вектора Бюргерса дислокационной петли, освобождающейся в ходе акта термической активации). После поверхностного упрочнения активационный объем снижается до  $q = 20b^3$  и после последующего деформационного старения при  $T = 100^\circ\text{C}$  в течение 20 часов до значения  $q = 15b^3$ .

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Алехин, О. В. Алехин, *Физические закономерности деформации поверхностных слоев материалов* (Москва: МГИУ: 2011).
2. В. П. Алехин, *Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов* (Москва: Наука: 1983).
3. Л. М. Рыбакова, С. И. Булычев, В. С. Тумасян, Л. И. Куксенова, О. В. Алехин, *МиТОМ*, № 11: 32 (1990).