

О МАТЕМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ПАРАПРОЦЕССНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПАРАМАГНИТНОМ АУСТЕНИТЕ СТАЛЕЙ С НАКОПЛЕНИЕМ УПРУГОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ИХ ДЕФОРМАЦИИ СЖАТИЕМ

Как было показано в работах [1, 2], в хромоникелевых и марганцовистых сталях аустенитного класса при пластической деформации сжатием происходят парапроцессы, связанные с возникновением и накоплением ферромагнитных фаз. В настоящее время некоторые детали этой проблемы требуют более тщательного рассмотрения. Особенно это касается механизма и условий формирования первых порций ферромагнитного мартенсита (α' -фазы).

При определении малых количеств этой фазы в аустените указанных сталей использовали зависимости изменений магнитной восприимчивости от обратных значений напряженности магнитного поля для каждого акта пластической деформации сжатием. Как следует из приведенных на рис. 1 графиков, любые линейные по сути зависимости такого рода характеризуется угловыми коэффициентами (K), которые возрастают при увеличении деформации сжатием (для обоих типов аустенитных материалов).

Была поставлена задача установить особо точные значения угловых коэффициентов прямых $\chi(1/H)$ от степени пластической деформации сжатием с последующей попыткой свести полученные зависимости в обобщенные законы связи магнитной восприимчивостью аустенита сталей с накоплением упругой энергии при деформации сжатия в условиях развития парапроцессных явлений (т. е. формирования ферромагнитных фаз).

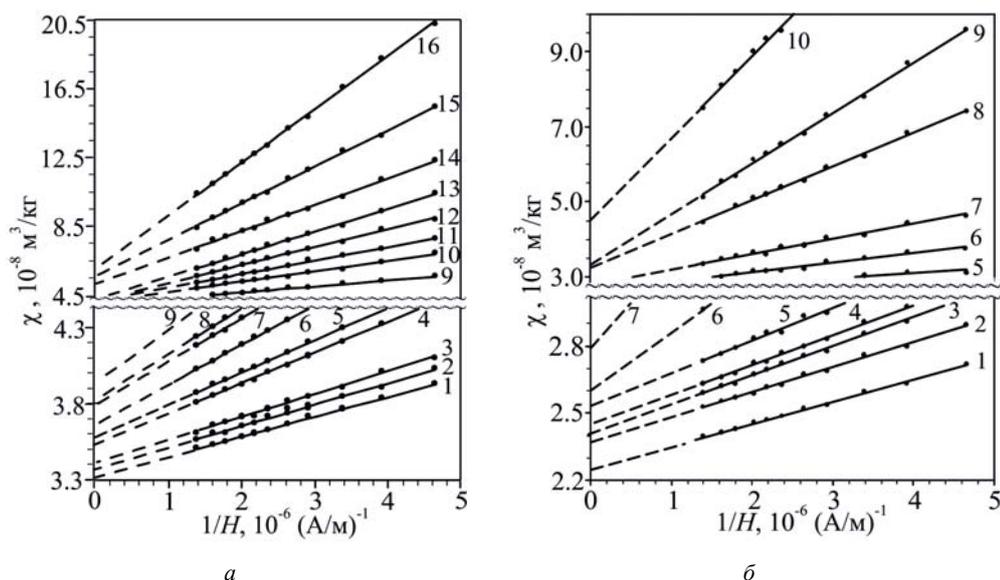


Рис. 1. Зависимость $\chi(1/H)$ при различных значениях пластической деформации сжатием хромоникелевой 10X16N13 (а) и марганцовистой Г13Л (б) сталей. Деформация: а) 1 – 23,98; 2 – 24,74; 3 – 25,49; 4 – 27,76; 5 – 29,27; 6 – 30,86; 7 – 31,92; 8 – 33,06; 9 – 35,70; 10 – 40,24; 11 – 44,23; 12 – 47,66; 13 – 50,45; 14 – 54,69; 15 – 59,38; 16 – 67,70 %; б) 1 – 6,03; 2 – 8,52; 3 – 10,00; 4 – 11,00; 5 – 12,01; 6 – 15,68; 7 – 19,18; 8 – 26,68; 9 – 29,78; 10 – 35,70 %

Для получения максимально точных результатов и исключения связи квадратичных ошибок при определении коэффициентов линейных уравнений использовали одномерный вариант метода центрального планирования, при котором исходные уравнения преобразовываются в уравнения [3], в которых текущая переменная представляет собой новую переменную, включающую в себя среднее интервальное значение выбранного ряда экспериментальных результатов.

Для вывода расчетных математических формул использовали первоначальное линейное уравнение вида: $y_i = b_0 + b_1 \cdot x_i$. Учет отклонения каждой новой варианты от среднего интервального $x_i^* = x_i - \bar{x}$, изменяет характер исходного уравнения $y_i = b_0 + b_1 \cdot x_i^* + b_1 \cdot \bar{x}$, откуда имеем уравнение с новыми вариантой и начальным членом $y_i = b_0^* + b_1 \cdot x_i^*$, где $b_0^* = b_0 + b_1 \cdot \bar{x}$ и, кроме того, $\langle (\Delta b_0^*) \cdot (\Delta b_1) \rangle = 0$ (Δb_0^* и Δb_1 – квадратичные ошибки коэффициентов этого уравнения).

В этом случае необходимая для расчетов группа формул преобразуется к упрощенным по форме зависимостям:

$$r_{x_i^*, y_i}^* = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^* \cdot y_i}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \cdot \bar{y}^2\right) \cdot \sum_{i=1}^n (x_i^*)^2}};$$

Далее, для квадратичных ошибок имеем более простые, по сравнению с [3], следующие зависимости:

$$(\Delta b^*) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2}{n \cdot (n-2)}}; \quad (\Delta b_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i^*)^2 \cdot n \cdot (n-2)}}$$

где $\Delta y_i = y_i^{экс} - y_i^{расч}$.

Полученные результаты показали, что точные значения угловых коэффициентов (K) связаны с деформацией квадратичным зависимостям (рис. 2).

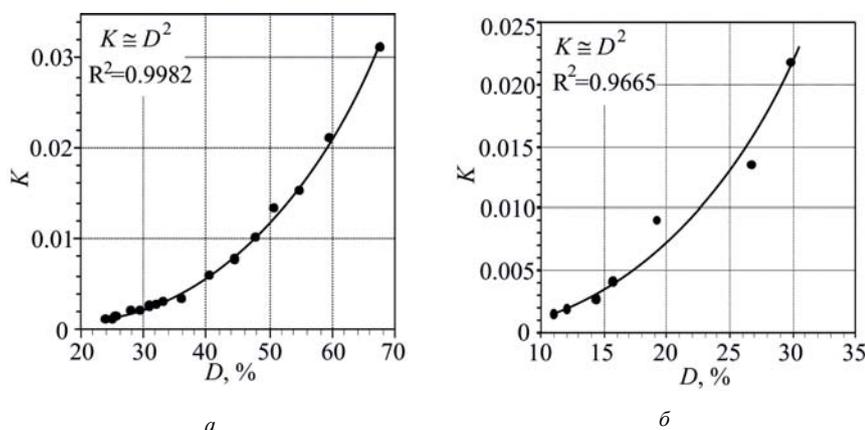


Рис. 2. Зависимость углового коэффициента K от величины пластической деформации сжатием хромоникелевой 10X16H13 (а) и марганцовистой Г13Л (б) сталей

Эти же зависимости были выбраны для обработки полученных парабол (типа $y = x^2$) путем их последующей линейризации (рис. 3). Нашли, что именно такие зависимости характеризуются хорошей критической корреляцией и позволяют утверждать, что существует определенное сходство с физическими законами, касающимися процессов накопления упругой энергии при деформации сжатием. Последнее, по-видимому, связано хотя бы с тем, что при увеличении числа дислокаций в процессе пластической деформации образуются группы заторможенных границами дислокаций, которые можно рассматривать как «сверхдислокации», близкие по своим энергетическим характеристикам к многократным дислокациям, у которых вектор Бюргера равен сумме векторов Бюргера заторможенных дислокаций.

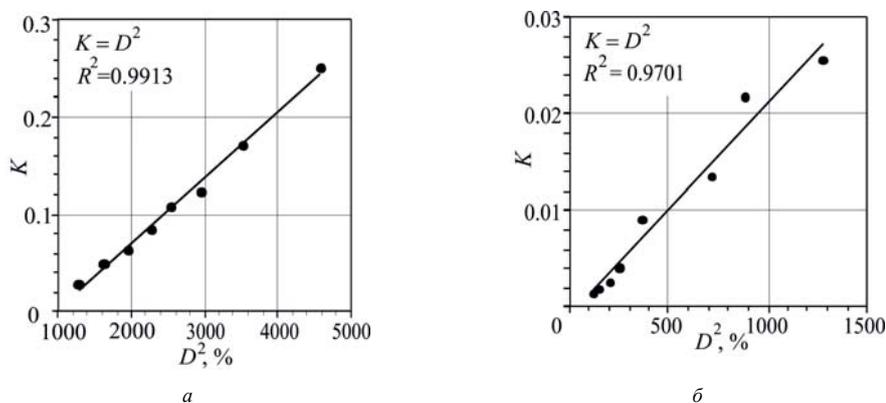


Рис. 3. Зависимость углового коэффициента K от квадрата величины пластической деформации сжатием хромоникелевой 10X16H13 (а) и марганцовистой Г13Л (б) сталей

Поскольку величины векторов Бюргера для такого рода сверхдислокаций коррелирует с величиной пластической деформации (параметр D), то становится вполне очевидным, что в рассмотренных металлических системах, закон изменения упругой энергии будет отвечать параболической зависимости вида $E_{уп} \sim D^2$. Это как раз и объясняет наличие вышеупомянутой корреляционной связи изменения углового коэффициента K с накоплением упругой энергии ($K \sim D^2$). Такая адекватная связь, вероятно, обусловлена тем, что при накоплении дислокаций в материале более легко устанавливаются необходимые спиновые соотношения электронов (парапроцессного типа), что и ускоряет с повышением деформации формирование ферромагнитных фаз мартенситного типа.

Список литературы

1. Ol'shanetskii V. E. Structural and magnetic stability of austenite in chromium-nickel and manganese steels with cold deformation / V. E. Ol'shanetskii, G. V. Snizhnoi, V. N. Sazhnev // Metal Science and Heat Treatment. – 2016. – Vol. 58. – № 5. – P. 311–317. DOI : 10.1007/s11041-016-0009-5.
2. Ольшанецкий В. Е. О формировании двух типов мартенситных фаз при пластической деформации аустенитной хромоникелевой стали / В. Е. Ольшанецкий, Г. В. Снежной // Физика и техника высоких давлений. – 2013. – Т. 23. – № 2. – С. 78–87.
3. Сквайрс Дж. Практическая физика / Сквайрс Дж. – М. : Мир. – 1971. – 241 с.

Одержано 09.12.2016

© Д-р техн. наук В. Е. Ольшанецкий¹, канд. физ.-мат наук Г. В. Снежной¹,
канд. физ.-мат. наук В. Л. Снежной²

¹ Запорожский национальный технический университет, ² Запорожский национальный университет,
г. Запорожье

Ol'shanetskii V., Snizhnoi G., Snizhnoi V. The mathematical correlation between paraprocess phenomena in paramagnetic austenite steels with the accumulation of elastic energy during deformation compression
