

# І СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ. ОПІР РУЙНУВАННЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

УДК 669.1:537.621.4:539.374.6

Д-р техн. наук В. Е. Ольшанецкий<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук Г. В. Снежной<sup>1</sup>,  
канд. физ.-мат. наук В. Л. Снежной<sup>2</sup><sup>1</sup>Запорожский национальный технический университет, <sup>2</sup>Запорожский национальный университет,  
г. Запорожье

## ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ДЕФОРМАЦИОННОЙ МАРТЕНСИТНОЙ ТОЧКИ ПРИ СИЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА АУСТЕНИТ Fe-Mn И Fe-Cr-Ni СТАЛЕЙ В ИЗМЕНЯЕМОМ И ПОСТОЯННОМ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Рассмотрены в термодинамическом плане вопросы влияния магнитного поля на превращение аустенита в мартенсит деформации ( $\varepsilon$  и  $\alpha'$ ). Предлагается метод количественной оценки возникшей ферромагнитной  $\alpha'$ -фазы на основании использования экспериментально установленных линейных зависимостей магнитной восприимчивости от обратной величины магнитного поля при различных деформациях.

**Ключевые слова:** аустенит, мартенсит, энергия Гиббса, магнитная восприимчивость.

Согласно теории и практики структурных изменений в металлических сплавах, аустенит марганцевых и хромоникелевых сталей при деформации сжатием предрасположен к образованию двух типов мартенситных фаз ( $\varepsilon$  и  $\alpha'$ ), которые сменяют друг друга при возрастании давления [1–5]. В этих случаях изменение термодинамического потенциала для обеих систем под влиянием температуры, давления и напряженности магнитного поля отвечает зависимости

$$dG = -SdT + VdP - MdH, \quad (1)$$

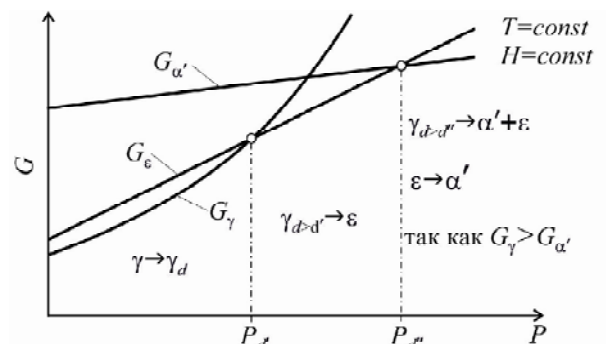
где  $T$  – температура,  $S$  – энтропия,  $P$  – давление,  $V$  – объем,  $M$  – намагниченность,  $H$  – напряженность магнитного поля. Это термодинамическое равенство представляет собой полный дифференциал (относительно интенсивных параметров  $T$ ,  $P$  и  $H$ ), который следует непосредственно из основного уравнения термодинамики [6]. Если  $T$  и  $H$  постоянны, то имеем соотношение

$$dG = VdP > 0 \quad (2)$$

и при  $dV \geq 0$  положительную (или по крайней мере неотрицательную) кривизну зависимости  $G = f(P)$ ,

т. к. из (2) следует  $\frac{d^2G}{dP^2} = \frac{dV}{dP} \geq 0$ .

Таким образом, фазовые изменения при деформации аустенитных сталей в зависимости от давления должны удовлетворять схеме, приведенной на рис. 1. При этом принимается, что кривизна зависимости  $G_{\alpha'} = f(P)$  мало отличается от нулевой.



**Рис. 1.** Графики изменения удельных свободных энергий аустенита ( $G_{\gamma}$ ) и мартенситных фаз ( $G_{\varepsilon}$  и  $G_{\alpha'}$ ) в зависимости от давления  $P$

Согласно этому рисунку, для стали со структурой стабилизированного аустенита при давлениях  $P < P_{d'}$ , обеспечивающим пластическую деформацию сжатием, аустенит насыщается ( $\gamma \rightarrow \gamma_d$ ) дефектами структуры (в основном дислокациями) без каких-либо признаков наличия локальных фазовых изменений. При давлениях  $P_{d'} < P < P_{d''}$  уже начинает образовываться из аустенита  $\varepsilon$ -мартенсит деформации ( $\gamma \rightarrow \varepsilon$ ). С повышением давления  $P$  до  $P_{d''}$  аустенит и  $\varepsilon$ -мартенсит переходят в состояние, предрасположенное к появлению зародышей  $\alpha'$ -мартенсита, а при  $P > P_{d''}$  возможна даже реакция эвтектидного типа ( $\gamma \rightarrow \varepsilon + \alpha'$ )

с последующим (или одновременным) переходом парамагнитной фазы  $\epsilon$  в ферромагнитную, т. е. в  $\alpha'$  - мартенсит.

Поскольку термодинамический потенциал (свободная энергия Гиббса) в нашем случае определяется выражением:

$$G = E - TS + PV - MH, \quad (3)$$

то с увеличением только напряженности магнитного поля этот потенциал уменьшается (при любых значениях деформации  $P$ ) (рис. 2).

Принимая, что магнитное поле оказывает несколько меньшее влияние на термодинамический потенциал мартенсита, можно ожидать, что с повышением внешнего поля точка пересечения кривой  $G_{\alpha'}$  с кривой изменения свободной энергии аустенита  $G_{\gamma}$  смещается в сторону больших давлений (рис. 2). В тоже время, если в относительном плане термодинамический потенциал  $\alpha'$  - мартенсита опережает смещение потенциала аустенита с увеличением магнитного поля, то точка равновесия должна смещаться в противоположную сторону, т. е. обуславливать при определенных давлениях возникновение больших количеств  $\alpha'$  - мартенсита. Однако такое предположение вступает в противоречие с характером графиков в виде наклонных прямых на рис. 3. Таким образом, первоначальное предположение касательно более интенсивного движения снижения потенциала аустенита, по-видимому, является справедливым. Поэтому следует ожидать, что образовавшийся в результате деформации  $\alpha'$  - мартенсит вследствие нарушения равновесия, установившегося при начальной деформации, будет склонен к уменьшению своего количественного содержания. При этом, в случае мягкого аустенита (низкое содержание углерода в системе Cr-Fe-Ni), вероятно, может происходить нечто подобное эффекту термоупругого равновесия, при котором образовавшийся мартенсит будет частично или полностью переходить в аустенит. Бездиффузионное сокращение длин мартенситных пластин при таком фазовом переходе может происходить за счет истечения (эмиссии) дислокаций

мартенсита в аустенит (путем преодоления незначительных энергетических барьеров, характерных для когерентных границ раздела аустенит- и мартенсит [7-8]).

Далее, поскольку выражение (1) является полным дифференциалом, его исходное выражение для  $\alpha$  - фазы и соответствующее тождество, вытекающие из равенства смешанных производных по определенным параметрам (при  $T = \text{const}$ ), будут отвечать следующей цепочке соотношений:

$$\begin{aligned} dG_{\alpha'} &= V_{\alpha'} dP - M_{\alpha'} dH \Rightarrow \frac{\partial^2 G_{\alpha'}}{\partial P \partial H} = \frac{\partial^2 G_{\alpha'}}{\partial H \partial P} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \left( \frac{\partial V_{\alpha'}}{\partial H} \right)_{P,(T)} = - \left( \frac{\partial M_{\alpha'}}{\partial P} \right)_{H,(T)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Последнее равенство определяет собой эффект магнитострикции (изменение объема при наложении магнитного поля  $H$ ) с одновременным наличием еще и эффекта пьезомагнетизма. Т. е., кроме изменения объема, должно наблюдаться еще и изменение намагниченности образцов с уменьшением поля  $H$ .

Однако в нашем случае, когда определяемые количества  $\alpha$  - фазы являются исключительно малыми, можно полагать, что указанные эффекты не приводят к заметному искажению количественных оценок образующихся мартенситных фаз.

Ранее нами были установлены экспериментальные зависимости, касающиеся хромоникелевой и марганцовистой сталей [1-5], не противоречащие рассмотренной аналитике. При этом аустенитные стали 10X16H13 и Г13 до одноосной пластической деформации на сжатие были полностью аустенизированы, а исходное значение парамагнитной восприимчивости  $\chi_{\gamma}$  аустенита в хромоникелевой стали составляло  $3,58 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  [4] (рис. 3, прямая 1). Дальнейшая деформация его (рис. 3, прямые 2, 3) привела к росту парамагнитной восприимчивости  $\chi_{\gamma'}$  до величины  $4,11 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ . При последующем увеличении деформации аустенита появился наклон прямых  $\chi(1/H)$  (рис. 3, прямые 4...7), что свидетельствует о возникновении ферромагнитного

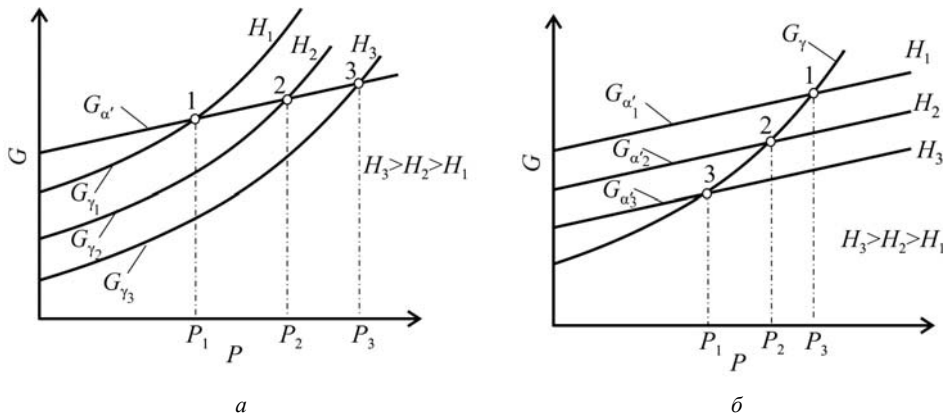
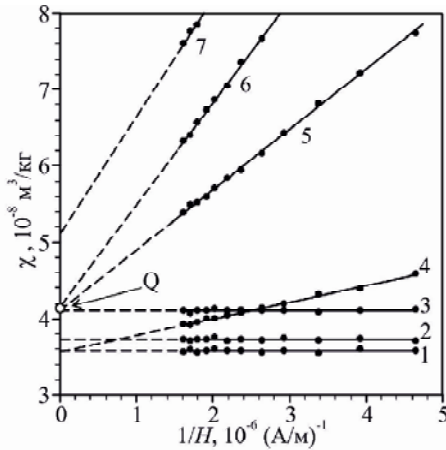


Рис. 2. Схема изменения удельных свободных энергий аустенита (а) и  $\alpha'$  - мартенсита (б) в зависимости от внешнего магнитного поля  $H$

$\alpha'$  - мартенсита, так как величина  $\chi$  в этом случае зависит от соотношения присутствующих в стали фаз (аустенита и мартенсита). Следует обратить особое внимание на то, что прямая 4 пересекла горизонтальную линию 3. Это свидетельствует о присутствии в системе, помимо ферромагнитной фазы ( $\alpha'$  - мартенсит), новой парамагнитной фазы ( $\varepsilon$  - мартенсита) [4].



**Рис. 3.** Зависимость  $\chi(1/H)$  при различных значениях деформации одноосным сжатием образцов стали 10X16N13. Деформация,  $D$ : 1 – 0; 2 – 8,85; 3 – 22,69; 4 – 29,27; 5 – 44,23; 6 – 50,45; 7 – 54,69 %

Поскольку прямая 5 (см. рис. 3), полученная при определенном давлении, совпадает (в пределах ошибки измерения) с начальной наивысшей горизонтальной прямой, то это позволяет, используя методы термодинамики, найти начальную точку отсчета для всё возрастающего количества  $\alpha'$  - фазы (с повышением давления) при условии наличия постоянного (максимального) магнитного поля. Для этого необходимо каждую последующую наклонную прямую экстраполировать на ординату  $\chi$ .

Так как система Fe-Cr-Ni представляет собой фазовую смесь аустенита и  $\alpha'$  - мартенсита, то из-за совпадения линейных графиков в точке  $Q$  (рис. 3) изначально справедливо следующее выражение:

$$\frac{\chi_{\alpha'+\gamma}}{\chi_{\gamma}} = \frac{\chi_{\alpha'} + \chi_{\gamma}}{\chi_{\gamma}} = 1, \quad (5)$$

откуда следует, что  $\chi_{\alpha'}$  и ферромагнитная фаза ( $\alpha'$  - мартенсит) соответственно отсутствует.

Такой же результат можно получить и из чисто термодинамических соображений, поскольку в точке  $Q$  существует фазовое равновесие между мартенситом и аустенитом, поскольку в этой точке парциальные химические потенциалы обеих фаз равны. Т. к. в этой точке справедливо равенство  $dG_{\alpha'} = dG_{\gamma}$ , то для установления исходного количества  $\alpha'$  - фазы можно составить следующие соотношения:

$$dG = dG_{\alpha'} + dG_{\gamma} = 0, \quad (6)$$

$$(-M_{\alpha'} + M_{\gamma})dH \Big|_{T,P=const} = -[\chi_{\gamma} + (\chi_{\alpha'} + \chi_{\gamma})]dH = 0$$

и, поскольку  $dH \neq 0$ , имеем  $\chi_{\alpha'}dH = 0$ . (7)

Т. е. в этом случае  $\chi_{\alpha'} = 0$ , что свидетельствует об отсутствии в системе  $\alpha'$  - мартенсита. Отметим и тот факт, что справедливость неравенства  $-\chi_{\alpha'}dH < 0$  характеризует уменьшение  $\chi$  с увеличением напряженности поля  $H$ .

Теперь рассмотрим вопрос об определении малых количеств  $\alpha'$  - мартенсита при изменяющейся деформации образцов сталей, учитывая влияние намагниченности аустенита на определение низких содержаний  $\alpha'$  - фазы [9]. Исходя из числовых значений соответствующих точке  $Q$  (см. рис. 3), можно составить соотношение, позволяющее находить образующие малые объемы  $\alpha'$  - мартенсита при изменении температурно-силовых факторов.

$$\chi' = \frac{\chi_{\Sigma}}{\chi_{\alpha}} = \frac{V_{\alpha'} \cdot J_{\alpha'} + V_{\gamma} \cdot J_{\gamma}}{V_{\alpha'} \cdot J_{\alpha'}} = 1 + \frac{V_{\gamma}}{V_{\alpha'}} \cdot \frac{J_{\gamma}}{J_{\alpha'}}. \quad (8)$$

Здесь  $J_{\alpha(\gamma)}$  и  $V_{\alpha(\gamma)}$  – удельные намагниченности фаз и объемы фаз сплава соответственно.

Примем, что  $\frac{J_{\gamma}}{J_{\alpha'}} = m$ , тогда

$$\frac{\chi' - 1}{m} = \frac{V_{\gamma}}{V_{\alpha'}}. \quad (9)$$

Можно принять для очень малых объемов  $\alpha'$  - фазы:  $V_{\alpha'} \ll V$ , тогда

$$\frac{V_{\alpha'}}{V - V_{\alpha'}} = \frac{m}{\chi' - 1} \cong \frac{V_{\gamma}}{V}. \quad (10)$$

Из (8) следует, что с увеличением  $\chi_{\alpha'}$  имеет место уменьшение и  $\chi'$ .

$$\frac{J_{\gamma}}{J_{\alpha'}} \cdot \frac{1}{\chi' - 1} = \frac{V_{\alpha'}}{V - V_{\alpha'}} \cong \frac{V_{\alpha'}}{V_{\gamma}}. \quad (11)$$

Тогда на основании (8) и (11) с учетом  $\chi' > 1$  и  $V_{\gamma} \gg V_{\alpha'}$  видим, что с уменьшением величины

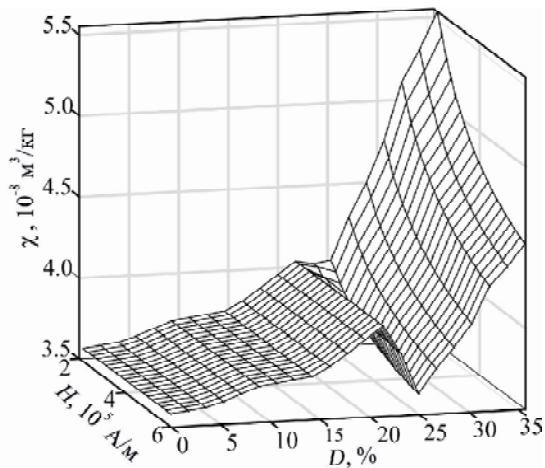
$(\chi' - 1) < 1$  увеличивается величина дроби  $\frac{V_{\alpha'}}{V - V_{\alpha'}}$ ,

при условии малых количеств  $\alpha'$  - фазы  $V_{\gamma}$  приближается к общему объему фаз  $V$ .

Теперь перейдем к возможной оценке количеств  $\alpha'$  - фазы в условиях, когда изменение давления происходит в постоянном магнитном поле. Рассмотрим двумерное разложение изменения термодинамического потенциала  $\Delta G_{\gamma}$  (по  $P$  и  $H$ ) в двумерный ряд Маклорена.

$$\Delta G_{\gamma}(\Delta P, \Delta H) = G(0,0) + \frac{\partial G(0,0)}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial G(0,0)}{\partial H} \Delta H + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial^2 G(0,0)}{\partial P^2} (\Delta P)^2 + 2 \cdot \frac{\partial^2 G(0,0)}{\partial P \partial H} \Delta P \cdot \Delta H + \frac{\partial^2 G(0,0)}{\partial H^2} (\Delta H)^2 \right\} + \dots (12)$$

С учетом изменения этого потенциала  $\gamma$  - фазы в малых окрестностях точек равновесия  $\alpha'$  - мартенсита с аустенитом на координатной плоскости  $P(\chi = 3,5 \cdot 10^{-8})H$  (проекции точек, принадлежащих складке на рис. 4).



**Рис. 4.** Зависимость  $\chi$  при различных значениях магнитного поля  $H$  деформации одноосным сжатием  $D$  образцов стали 10X16H13

В этом случае разложение (12) принимает линейный характер и при нулевых значениях  $\Delta P$  и  $\Delta H$  будет справедливо (с учетом того, что  $G(0,0) = 0$ ) соотношение

$$\Delta G_{\gamma}(\Delta P, \Delta H) = \frac{\partial G(0,0)}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial G(0,0)}{\partial H} \Delta H. \quad (13)$$

Определив в эксперименте какую-либо точку равновесия фаз (при определенном давлении, и некотором заданном значении  $H$ ), можно предвидеть, что эта точка при постоянном некотором значении магнитного поля будет перемещаться по определенной линейной траектории, параллельной или наклонной осям, указанной на рис. 4, координатной плоскости. Выбор таких направлений позволяет в каждом конкретном случае определиться (в чисто экспериментальном плане) в оценке начального малого количества возникающей ферромагнитной фазы ( $\alpha'$  - мартенсита деформации).

В то же время, принятый нами подход покамест не позволяет точно установить начало образования  $\varepsilon$  - мартенсита (для ряда рассмотренных случаев). Поскольку точки пересечения указанных на рис. 3 прямых связаны с образованием как  $\alpha'$  - , так и  $\varepsilon$  - мартенсита, то это естественно затрудняет точно устанавливать начальные ко-

личества возникающего парамагнитного  $\varepsilon$  - мартенсита.

### Список литературы

1. Ольшанецкий В. Е. О высокоточной оценке истинных мартенситных точек в специальных сталях аустенитного и аустенитно-мартенситного классов при изменении температурно-силовых факторов / В. Е. Ольшанецкий, Г. В. Снежной // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2012. – № 1. – С. 15–21.
2. Ольшанецкий В. Е. О термодинамических аспектах формирования промежуточных мартенситных фаз в высокомарганцевых сталях / В. Е. Ольшанецкий, Г. В. Снежной, В.Н.Сажнев // Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні проблеми прикладної фізики», Севастополь, 24–28 вересня 2012 р. – С. 307–308.
3. Ольшанецкий В. Е. О закономерностях формирования мартенситных фаз в марганцовистом аустените при деформации сжатием / В. Е. Ольшанецкий, Г. В. Снежной, В. Н. Сажнев // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2012. – № 2. – С. 8–14.
4. 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.
5. Ольшанецкий В. Е. Об особенностях развития мартенситных превращений в никель содержащих аустенитных сталях при деформации сжатием / В. Е. Ольшанецкий, Г. В. Снежной // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2013. – № 2. – С. 20–25.
6. Базаров И. П. Термодинамика / И. П. Базаров. – М. : Высшая школа, 1991. – 376 с.
7. Бобылев С. В. Теоретические модели испускания дислокаций границами зерен в деформируемых нанокристаллических материалах / С. В. Бобылев // Физика и механика материалов. – 2011. – № 12. – С. 126–160.
8. Структурно-фазовые превращения в закаленной конструкционной стали при деформации / Ю. Ф. Иванов, Е. В. Корнет, В. Е. Громов, С. В. Коновалов // Успехи физики металлов. – 2009. – Т.10. – № 4. – С. 389–414.
9. Влияние магнитного момента парамагнитной матрицы на определение низких содержаний  $\alpha'$  - фазы в аустенитных сталях / В. Л. Снежной, Ф. Д. Мирошниченко, В. Г. Каниболоцкий, Г. А. Охромий // ФММ. – 1970. – Т. 30. – № 2. – С. 363–366.

Одержано 06.04.2016

### Ольшанецкий В.Ю., Снежной Г.В., Снежной В.Л. Про визначення деформаційної мартенситної точки при силовому впливі на аустеніт Fe-Mn і Fe-Cr-Ni сталей у змінюваному і постійному магнітних полях

*Розглянуто в термодинамічному плані питання впливу магнітного поля на перетворення аустеніту в мартенсит деформації ( $\varepsilon$  і  $\alpha'$ ). Пропонується метод кількісної оцінки ферромагнітної  $\alpha'$  - фази, що виникла, на підставі використання експериментально встановлених лінійних залежностей магнітної сприйнятливості від зворотньої величини магнітного поля при різних деформаціях.*

**Ключові слова:** аустеніт, мартенсит, енергія Гіббса, магнітна сприйнятливість.

### Ol'shanetskii V., Snezhnoi G., Snezhnoi V. Determination of deformation martensite point on austenite Fe-Mn and Fe-Cr-Ni steels in variable and constant magnetic fields

*Thermodynamic questions of the magnetic field effect on the transformation of austenite into martensite of deformation ( $\varepsilon$  и  $\alpha'$ ) are discussed. The method of quantifying arisen ferromagnetic  $\alpha'$  - phase is proposed. The linear dependence of the magnetic susceptibility of the reciprocal of the magnetic field at various deformations experimentally found.*

**Key words:** austenite, martensite, Gibbs energy, magnetic susceptibility.