

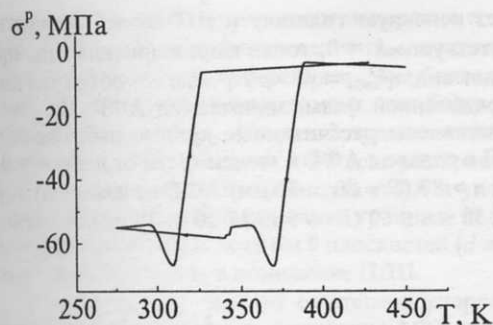


Рис. 4. Генерация реактивных напряжений образцом, в котором сформирован эффект ОПФ.

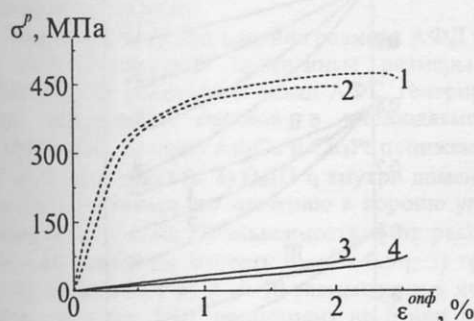


Рис. 5. Зависимость реактивных напряжений от $\epsilon^{\text{опф}}$, генерируемых при нагреве (пунктирные кривые) и охлаждении (сплошные кривые) модельного материала в защемленном состоянии при $F^y = 13$ (1, 3), $F^y = 8$ МПа (2, 4).

приведена на рис. 4. Отметим немонотонный характер изменения реактивного напряжения с изменением температуры. На рис. 5 приведена расчетная зависимость максимального значения реактивного напряжения от величины $\epsilon^{\text{опф}}$. Наблюдается примерно линейный рост σ^p от $\epsilon^{\text{опф}}$.

Таким образом, результаты моделирования ОПФ позволяют сделать выводы о правильности представлений об ОПФ как совокупности эффектов пластичности превращения за счет ориентированных внутренних напряжений и эффекта памяти формы в частично стесненных условиях, о работоспособности предложенной модели, правильно описывающей основные закономерности эффекта ОПФ мартенситного типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хачин В.Н., Пушин В.Г., Кондратьев В.В. Никелид титана: Структура и свойства. М.: Наука, 1992. 160 с.
2. Беляев С.П., Волков А.Е., Евард М.Е. Моделирование микропластических явлений в сплавах с памятью формы типа никелида титана // Вестн. ТГУ. Сер. Естеств. и технич. науки. Тамбов, 1998. Т. 3. Вып. 3. С. 306-309.
3. Knowles K.M., Smith D.A. // Acta metall. 1981. V. 29. P. 101-110.
4. Лихачев В.А., Кузьмин С., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. 216 с.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 97-01-00823.

УДК 539.22:548.771:669.017.1

ВКЛАД АФГ В ПОНИЖЕНИЕ ПАРАМЕТРА ДАЛЬНОГО ПОРЯДКА ДЕФОРМИРОВАННЫХ УПОРЯДОЧЕННЫХ СПЛАВОВ

© С.В. Старенченко, В.А. Старенченко

Россия, Томск, Томский государственный архитектурно-строительный университет

Starenchenko S.V., Starenchenko V.A. The contribution of apb to lowering of the long range order of the deformed alloys. In this work it was made an estimate of the APB contribution to lowering of the long range order. It is determined that the observed long range order depends on the antiphase domain sizes if APB extends to some planes. The large thickness of the APB gives a large lowering of the long range order parameter. It is calculated the possible decreasing of the long range order parameter with the regard to experimental values of APD sizes in Au_3Cu and Cu_3Pt . The experimental and calculated long range order parameters are compared.

Влияние пластической деформации на переход порядок-беспорядок недостаточно изучено, хотя упоминания о нарушении дальнего порядка (ДП) в упорядоченных сплавах при их деформации появлялись неоднократно [1]. В основном, выводы делались косвенно на основании измерения электросопротивления деформированных материалов [1] и изучения особенностей пластической деформации [2]. В последние годы появилась информация об исчезновении упорядоченного состояния при измельчении сплавов в шаровых мельницах [3, 4].

Методами рентгеновской дифрактометрии в наших работах получены сведения о структурных параметрах деформированных холодной прокаткой образцов сплавов, имеющих сверхструктуру

$\text{L}_{12} - \text{Au}_3\text{Cu}$ [5], Cu_3Pt [6], Ni_3Fe [7], Ni_3Al [8], сверхструктуру $\text{L}_{12}(\text{M}) - \text{Cu}_3\text{Pd}$ [9] и $\text{L}_{12}(\text{MM}) - \text{Au}_4\text{Zn}$ [10]. Механическое воздействие на сплав проявляется в накоплении дефектов кристаллической структуры. При этом происходит измельчение областей когерентного рассеяния, изменение доменной структуры материала, когда наряду с термическими антифазными границами (АФГ) появляются деформационные АФГ. Следствием этого оказывается неоднородное измельчение антифазных доменов (АФД) [5, 6]. Параллельно с уменьшением средних величин АФД - $\langle D \rangle$ происходит понижение экспериментально измеряемого параметра дальнего порядка (ПДП) вплоть до $\eta = 0$. Таким образом, пластическая деформация вызывает деформационный фазо-

вый переход порядок-беспорядок. Ряд предполагаемых механизмов, вызывающих это превращение, связан с генерацией, движением и диссоциацией сверхдислокаций, появлением одиночных дислокаций [11], что приводит к увеличению площади АФГ и измельчению доменов. Некоторые авторы считают, что появление дополнительных АФГ является основной причиной разупорядочения материала при деформации [1].

Оценим вклад АФГ в измеряемое рентгеновским методом значение ПДП - η . Известно, что АФГ не является идеальной, охватывающей одну плоскость, в которой осуществляется сдвиг. Теоретические расчеты [12] и экспериментальные результаты [13] показывают, что АФГ релаксирована на несколько плоскостей и при повышенных температурах перед T_k ее толщина может достигать нескольких параметров решетки. ПДП в области АФГ отличается от его значения внутри домена. Характер изменения может описываться разными функциями. Будем считать, что АФГ представляют одинаковые кубы с размером ребра $D = na$, где a - параметр решетки, n - число элементарных ячеек вдоль ребра, а толщина АФГ $d = 2\delta a$, где 2δ - число элементарных ячеек, охваченных АФГ в направлении, перпендикулярном плоскости ее залегания. Интенсивность рентгеновских рефлексов, по которым рассчитывают ПДП $\eta_{\text{набл}}$, пропорциональна объемной доле упорядоченной фазы c и η^2 . Полагая, что среднее значение ПДП на АФГ равно $k\eta$, рассчитаем связь между наблюдаемым значением $\eta_{\text{набл}}$ и η внутри домена в зависимости от размера домена и толщины АФГ. Простые рассуждения приводят к выражению

$$\eta_{\text{набл}} = \eta \left\{ \frac{n^3 + k^2(3n^2\delta + 3n\delta^2 + \delta^3)}{(n+\delta)^3} \right\}^{1/2},$$

откуда видно, что нерелаксированная АФГ - $\delta = 0$ не изменяет наблюдаемый ПДП, его значение соответствует ДП внутри домена $\eta_{\text{набл}} = \eta$. Если АФГ

имеет конечную толщину и ДП на ней полностью отсутствует - $k = 0$, тогда выражение для $\eta_{\text{набл}}$ принимает вид: $\eta_{\text{набл}}^2 = (1 - c')\eta^2$, где c' - объемная доля упорядоченной фазы, занимаемая АФГ. На рис. 1 представлены рассчитанные кривые наблюдаемого ПДП в сплаве с АФГ в зависимости от n для $k = 0,5$. При $n > 80$ ($D \approx 20 \dots 30$ нм) АФГ не изменяют $\eta_{\text{набл}}$. При $30 \leq n \leq 80$ ($D \approx 9 \dots 12-20 \dots 30$ нм) понижение

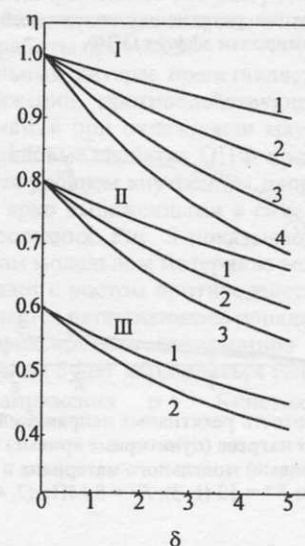


Рис. 2. Зависимости $\eta_{\text{набл}}$ от толщины АФГ. (I): $\eta = 1$, $n = 50 - 1$, $n = 25 - 2$, $n = 15 - 3$, $n = 10 - 4$. (II): $\eta = 0,8$, $n = 25 - 1$, $n = 15 - 2$, $n = 10 - 3$. (III): $\eta = 0,6$, $n = 10 - 1$, $n = 15 - 2$.

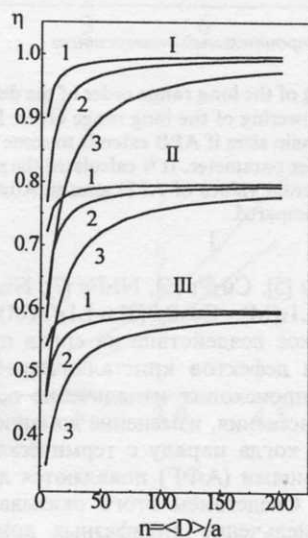


Рис. 1. Зависимости $\eta_{\text{набл}}$ от размеров АФД. (I): $\eta = 1$, $\delta = 0,5 - 1$, $\delta = 2 - 2$, $\delta = 5 - 3$. (II): $\eta = 0,8$, $\delta = 0,5 - 1$, $\delta = 2 - 2$, $\delta = 5 - 3$. (III): $\eta = 0,6$, $\delta = 0,5 - 1$, $\delta = 2 - 2$, $\delta = 5 - 3$.

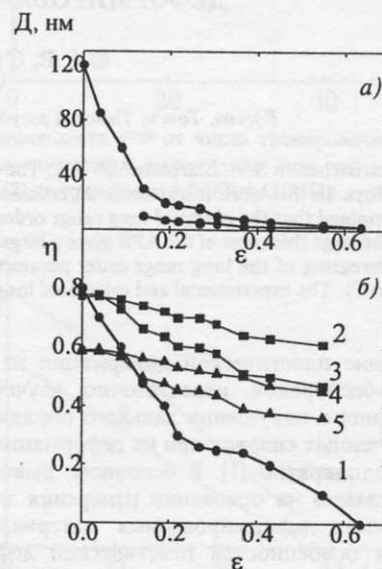


Рис. 3. Зависимости от степени деформации ϵ : а) размеров АФД, [6]; б) степени дальнего порядка $\eta_{\text{набл}}$ (эксперимент) - 1, $\eta_{\text{набл}}$ (расчет) с учетом размера АФД и толщины АФГ $\eta = 0,8$, $\delta = 2 - 2$, $\eta = 0,8$, $\delta = 5 - 3$, $\eta = 0,6$, $\delta = 2 - 4$, $\eta = 0,6$, $\delta = 5 - 5$ в сплаве Cu_3Pt .

$\eta_{\text{набл}}$ лежит в пределах точности измерения η , а при $n < 30$ ($D < 9 \dots 12$ нм) понижение $\eta_{\text{набл}}$ существенно превышает точность измерения η . Чем более совершенный ДП в антифазном домене, тем более выражено понижение $\eta_{\text{набл}}$. На рис. 2 представлена зависимость $\eta_{\text{набл}}$ от толщины АФГ для различных исходных состояний ДП и размеров АФД в упорядоченном сплаве. Релаксированная граница, толщина которой охватывает хотя бы 9 плоскостей ($d = 2\delta a$), дает заметный вклад в понижение ПДП.

Ясно, что $\eta_{\text{набл}}$ зависит от степени упорядоченности, размеров доменов, структуры АФГ сплава. В мелкодоменном сплаве с релаксированными АФГ даже при совершенном ДП $\eta_{\text{набл}}$ внутри домена существенно снижено.

Используя оценки влияния размера АФД на $\eta_{\text{набл}}$ и экспериментально измеренные размеры АФД (рис. 3а, 4а), рассчитаем вклад АФГ, генерируемых при деформации сплавов, в наблюдаемое при деформации сплавов Au_3Cu и Cu_3Pt понижение $\eta_{\text{набл}}$ [5, 6]. Будем считать: 1) ПДП η внутри домена неизменным и равным его значению в хорошо упорядоченном состоянии; 2) зависимость η от расстояния до АФГ линейная, то есть $\eta_{\text{АФГ}} = 0,5\eta$; 3) толщина АФГ охватывает от 2 до 10 элементарных ячеек, то есть размытие АФГ происходит на 5 или 21 атомную плоскость. На рис. 3, 4 представлены зависимости ПДП, обусловленные присутствием АФГ в сплавах Au_3Cu и Cu_3Pt . Видно, что размножение АФГ и соответствующее измельчение размеров

АФД не приводит к катастрофическому понижению $\eta_{\text{набл}}$ и переходу П-Б, происходит лишь уменьшение $\eta_{\text{набл}}$ внутри упорядоченной фазы (рис. 3, 4). Полагая, что в сплавах в процессе деформации одновременно понижается ПДП в объеме материала до минимально возможного значения $\eta = 0,6$ в упорядоченных фазах Au_3Cu [14] и Cu_3Pt [15], получили кривые (рис. 3, 4). Полученные оценки показывают, что генерация АФГ не может быть единственным фактором, обуславливающим деформационный фазовый переход порядок-беспорядок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кривоглаз М.А., Смирнов А.А. Теория упорядочивающихся сплавов. М.: Физматгиз, 1958. 388 с.
2. Старенченко В.А., Абзаев Ю.А., Старенченко С.В. Влияние температуры на разрушение монокристаллов Ni_3Ge // Пластическая деформация сплавов. Томск: ТГУ, 1986. С. 210-218.
3. Ермаков А.Е., Сорокина Т.А., Цури В.А. и др. Влияние пластической деформации на структурные особенности и магнитные свойства сплава FePt // ФММ. 1979. Т. 48. Вып. 6. С. 1180-1188.
4. Елсуков Е.П., Баринов В.А., Галахов В.Р. и др. Переход порядок-беспорядок в сплаве Fe_3Si при механическом измельчении // ФММ. 1983. Т. 55. Вып. 2. С. 337-340.
5. Старенченко С.В., Сизоненко Н.Р., Замятина И.П., Старенченко В.А., Козлов Э.В. Влияние деформации на структуру упорядоченного и разупорядоченного сплава, близкого к Au_3Cu // Порошковая металлургия. 1997. № 3/4. С. 33-37.
6. Старенченко С.В., Замятина И.П., Старенченко В.А., Козлов Э.В. Исследование деформационного нарушения дальнего порядка в сплаве $\text{Cu} - 22 \text{ ат.}\% \text{ Pt}$ // ФММ. 1998. Т. 85. Вып. 2. С. 122-127.
7. Старенченко С.В., Замятина И.П., Старенченко В.А. Исследование структурного состояния упорядоченного монокристалла Ni_3Fe , деформированного прокаткой // Актуальные проблемы прочности. Новгород, 1994. С. 44.
8. Старенченко С.В., Замятина И.П., Старенченко В.А. Влияние пластической деформации на состояние дальнего порядка в сплавах со сверхструктурой L_{12} // Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений. Тамбов, 1996. С. 202-203.
9. Старенченко С.В., Замятина И.П., Старенченко В.А., Козлов Э.В. Влияние деформации на состояние дальнего порядка сплавов Cu_3Pt , Cu_3Pd // Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий. Обнинск, 1997. С. 58.
10. Старенченко С.В., Сизоненко Н.Р., Старенченко В.А., Козлов Э.В. Деформационное разупорядочение сплава Au_4Zn // ФММ. 1996. Т. 81. Вып. 1. С. 84-90.
11. Старенченко С.В., Старенченко В.А. Механизмы разрушения атомного дальнего порядка в упорядоченных сплавах с ГЦК решеткой // Науч. тр. I Междунар. семинара «Актуальные проблемы прочности» им. В.А. Лихачева и XXXIII семинара «Актуальные проблемы прочности», 15-18 окт. 1997. Новгород, 1997. С. 373-377.
12. Попов Л.Е., Козлов Э.В., Голосов Н.С. Теория равновесных антифазных границ в упорядоченных твердых растворах типа Cu_3Au // Изв. вузов. Физика. 1966. № 2. С. 55-63.
13. Leroux C., Loiseau A., Cadeville M.C. et al. Order-disorder transformation in $\text{Co}_{30}\text{Pt}_{70}$ alloy: evidence of wetting from the antiphase boundaries // J. Phys.: Condens. Matter. 1990. № 2. P. 3479-3495.
14. Козлов Э.В., Старенченко С.В. Превращение порядок-беспорядок в сплаве вблизи состава Au_3Cu // Изв. вузов. Физика. 1980. № 3. С. 70-74.
15. Тайлашев А.С. Природа и механизм превращения порядок-беспорядок сплава Cu_3Pt // Молодые ученые и специалисты Томской области в девятой пятилетке: Материалы научно-практической конференции ТГУ. Томск, 1975. С. 91-94.

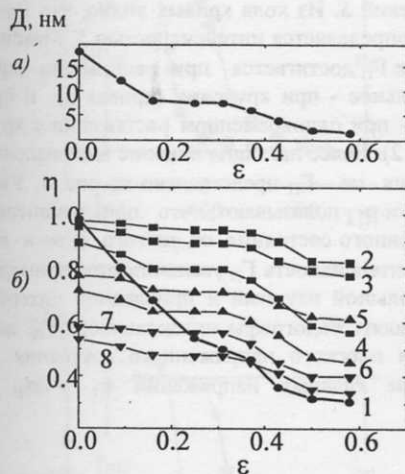


Рис. 4. Зависимости от степени деформации ε : а) размеров АФД (эксперимент) [5]; б) степени дальнего порядка $\eta_{\text{набл}}$ (эксперимент) - 1, $\eta_{\text{набл}}$ (расчет) с учетом размера АФГ и толщины АФД $\eta = 1$, $\delta = 2 - 2$, $\eta = 1$, $\delta = 5 - 3$, $\eta = 1$, $\delta = 5 - 4$, $\eta = 0,8$, $\delta = 2 - 5$, $\eta = 0,8$, $\delta = 5 - 6$, $\eta = 0,6$, $\delta = 2 - 7$, $\eta = 0,6$, $\delta = 5 - 8$ в сплаве Au_3Cu .