

УДК 669.1:537.621.4:539.374.6

Г. В. СНЕЖНОЙ¹, В. Л. СНЕЖНОЙ²¹ Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина² Запорожский национальный университет, Запорожье, Украина

ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ ЗАРОЖДЕНИЯ, РАЗВИТИЯ И ИСЧЕЗНОВЕНИЯ ε-МАРТЕНСИТА ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ АУСТЕНИТНЫХ Fe-Cr-NI СТАЛЕЙ

Предлагается новый подход к пониманию зарождения, развития и исчезновения ε-мартенсита в умеренно нестабильных аустенитных Fe-Cr-Ni сталей при холодной одноосной пластической деформации сжатием. Из деформированного до постоянного максимального парамагнитного состояния аустенита γ'_{\max} вначале одновременно скачком образуется максимальное количество ε-мартенсита, минимальное количество деформированного γ' -аустенита и минимальное количество α' -мартенсита. При этом с повышением пластической деформации сжатием суммарная удельная магнитная восприимчивость матрицы образца стали, содержащей уменьшающееся количество ε-фазы (вплоть до ее исчезновения) и возрастающее количество γ' -фазы (к ее первоначальному состоянию γ'_{\max}), остается постоянной величиной. С самого начала возникновения α' -мартенсита происходит его накопление с увеличением деформации. Анализируются варианты образования сопутствующего и промежуточного ε-мартенсита.

Ключевые слова: хромоникелевая сталь, деформация, аустенит, ε-мартенсит, α' -мартенсит, удельная магнитная восприимчивость.

Введение

Установление основных теоретических положений мартенситного превращения и его возможности практического применения в авиационной промышленности стимулировали проведение экспериментальных исследований, результатом которых в последнее время явилось повышенное внимание к мартенситным превращениям с участием ε-фазы, как при механическом так и термическом воздействиях, которая является сопутствующей или промежуточной фазой при образовании α' -мартенсита деформации. Пластическая деформация аустенитных хромоникелевых сталей приводит к появлению двух типов мартенситных фаз: ферромагнитный α' - и парамагнитный ε- мартенситы. Формирование ε-мартенсита в аустенитной матрице происходит при малых деформациях и ε-мартенсит почти полностью превращается в α' -мартенсит при увеличении деформации [1]. В [2] предлагается следующая последовательность превращений в метастабильных сталях $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha'$. Авторы [3-5] считают, что наиболее вероятный способ фазового превращения в аустенитных нержавеющих сталях: $\gamma \rightarrow \varepsilon$, $\gamma \rightarrow \alpha'$ или $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha'$. При помощи аналитического электронного микроскопа удалось зафиксировать мартенсит де-

формации через несколько последовательных превращений: $\gamma(\text{fcc}) \rightarrow \varepsilon(\text{hcp})$, $\gamma(\text{fcc}) \rightarrow \varepsilon(\text{hcp}) \rightarrow \alpha'(\text{bcc})$, $\gamma(\text{fcc}) \rightarrow \alpha'(\text{bcc})$ [6].

Анализ литературы [1-17] по данному вопросу показал, что закономерности начальной стадии $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha'$ переходов и дальнейшего развития мартенситного превращения изучены недостаточно глубоко возможно потому, что в аустенитных хромоникелевых сталях экспериментально не удается отдельно зафиксировать количество ε- и α' - фаз вследствие малого образования мартенситов и парамагнитных состояний ε- и γ- фаз [16].

В связи с вышесказанным, возникла необходимость (с использованием особо чувствительного магнитометрического метода) проследить начальную стадию образования ε- и α' - мартенситов и их развитие, оценить роль парамагнитной матрицы, содержащей ε- и γ- фазы в формировании и накоплении α' -мартенсита при пластической деформации сжатием умеренно нестабильных сталей 10X16H13 и 12X15H16.

1. Материалы и методика эксперимента

Аустенизацию сталей 10X16H13 и 12X15H16 с химическим составом (табл. 1) проводили при тем-

пературе 1050°C (30 мин. с последующей закалкой в воду). Образцы вырезали холодным механическим способом в виде прямоугольных параллелепипедов размером $\sim 3 \times 3 \times 1$ мм³, поверхности которых шлифовались и затем электрополировались.

Таблица 1
Химический состав исследуемых сталей, масс.%

Элемент	Марка стали	
	10X16H13	12X15H16
C	0,13	0,12
Cr	15,83	14,874
Ni	13,70	15,541
Mn	1,37	1,57
Si	1,07	0,95
S	0,01	0,01
P	0,03	0,030
W	0,04	-
Mo	0,14	0,17
Cu	0,24	0,22

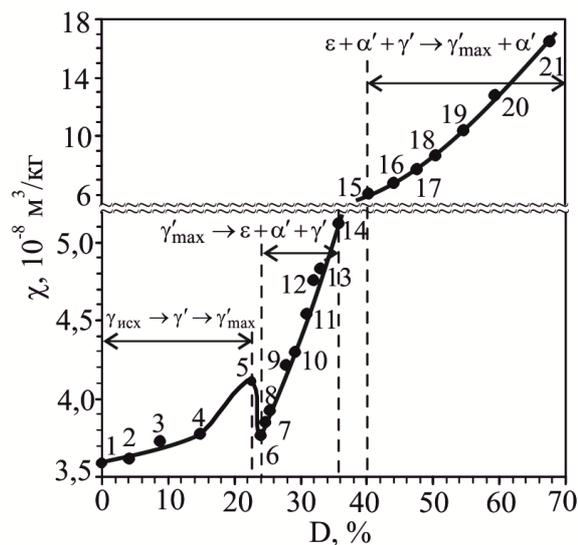
Количество низкого содержания α -фазы в объемных процентах, суммарную удельную магнитную восприимчивость χ_∞ образцов, равную $\chi_\infty = \chi_p + \chi_0$ (χ_p – парапроцессная составляющая феррофазы, χ_0 – парамагнитная восприимчивость аустенита) определяли по методике [18-20].

Холодную пластическую одноосную деформацию сжатием (усадка) осуществляли на специальной лабораторной установке, степень остаточной деформации D рассчитывали с учетом толщин образцов до (d_0) и после (d) деформации ($D=(d-d_0)/d_0 \cdot 100\%$). При этом деформация сжатием была выбрана специально, чтобы исключить возможное усложняющее влияние на анализ результатов исследований фактора кристаллографической текстуры. Обе стали до пластической деформации были полностью аустенизированы, что подтверждается горизонтальной линией $\chi(1/H)$ [12, 13].

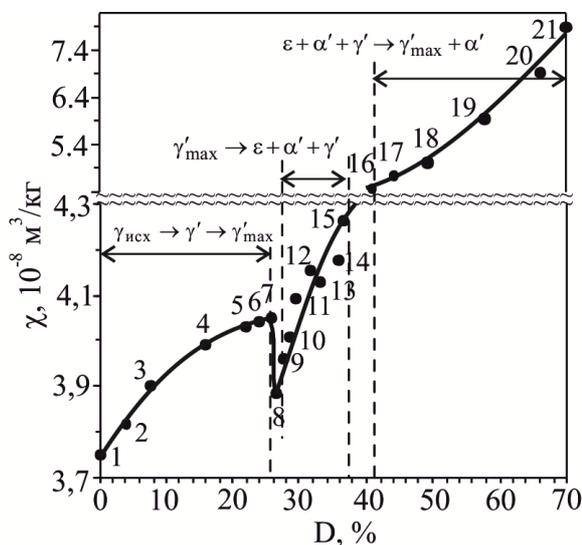
2. Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 представлена экспериментальная зависимость удельной магнитной восприимчивости χ стали 10X16H13 в поле $H=2,95 \cdot 10^5$ А/м [12, 14] и стали 12X15H16 в поле $H=5,21 \cdot 10^5$ А/м [13] от степени одноосной пластической деформации D сжатием.

Более подробно проанализируем зависимость $\chi(D)$ на примере стали 10X16H13 (рис. 1 а). Ее можно представить в виде трех деформированных областей:



а



б

Рис. 1. Зависимость удельной магнитной восприимчивости χ от степени деформации D :

а – стали 10X16H13 в магнитном поле $H=2,95 \cdot 10^5$ А/м [12,14]; б – стали 12X15H16 в поле $H=5,21 \cdot 10^5$ А/м. Точками показано номер степени деформации образца [13]

1-я область ($D=0 \dots 22,69\%$, точки 1...5), в которой выполняется эффект “роста” парамагнитного состояния, т.е. увеличения удельной магнитной восприимчивости от исходной $\chi_{\gamma'_{исх}} = 3,58 \cdot 10^{-8}$ м³/кг до постоянного максимального значения $\chi_{\gamma'_{макс}} = 4,11 \cdot 10^{-8}$ м³/кг. Подобный эффект, но для сталей типа 12X18H10Т, наблюдался в [20].

2-я область ($D=23,98 \dots 35,70\%$, точки 6...14), в начале которой скачком зарождаются сопутствующий или промежуточный ε -мартенсит и α' -мартенсит деформации (точка б), затем с увеличением деформации количество ε -фазы уменьшает-

ся и полностью трансформируется в аустенит и α' -мартенсит (точка 15).

3-я область ($D=40,24\dots 67,70\%$, точки 15...21), в которой продолжает накапливаться количество α' -мартенсита без ε -мартенсита за счет уменьшения количества γ'_{\max} аустенита.

Аналогичные результаты наблюдаются и для стали 12X15H16 (рис. 1, б).

Схема превращений исходного аустенита $\gamma_{\text{исх}}$, деформированного аустенита γ' , ε -мартенсита, α' -мартенсита и, соответственно, предельных значений удельной магнитной восприимчивости χ для указанных выше трех деформационных областей имеет вид:

$$1\text{-я область: } \gamma_{\text{исх}} \rightarrow \gamma' \rightarrow \gamma'_{\max}, \quad (1)$$

$$\chi_{\gamma_{\text{исх}}} \rightarrow \chi_{\gamma'} \rightarrow \chi_{\gamma'_{\max}}, \quad (2)$$

$$2\text{-я область: } \gamma'_{\max} \rightarrow [(\varepsilon_{\max} + \gamma'_{\min}) + \alpha'_{\min}] \rightarrow$$

$$\rightarrow [(\varepsilon_{\text{уменьш.}}^{\max} + \gamma'_{\text{возр.}}^{\min}) + \alpha'_{\text{возр.}}^{\min}], \quad (3)$$

$$\chi_{\gamma'_{\max}} \rightarrow (\underbrace{\chi_{\varepsilon_{\max}} + \chi_{\gamma'_{\min}}}_{\text{const}}) + \chi_{\alpha'_{\min}} \rightarrow$$

$$\rightarrow (\underbrace{\chi_{\varepsilon_{\text{уменьш.}}^{\max}} + \chi_{\gamma'_{\text{возр.}}^{\min}}}_{\text{const}}) + \chi_{\alpha'_{\text{возр.}}^{\min}}, \quad (4)$$

$$3\text{-я область: } [(\varepsilon_{\text{уменьш.}}^{\max} + \gamma'_{\text{возр.}}^{\min}) + \alpha'_{\text{возр.}}^{\min}] \rightarrow,$$

$$\rightarrow (\gamma'_{\text{уменьш.}}^{\max} + \alpha'_{\text{возр.}}^{\min}), \quad (5)$$

$$(\underbrace{\chi_{\varepsilon_{\text{умен.}}} + \chi_{\gamma'_{\text{возр.}}}}_{\text{const}}) + \chi_{\alpha'_{\text{возр.}}} \rightarrow (\chi_{\gamma'_{\max}} + \chi_{\alpha'_{\text{возр.}}}), \quad (6)$$

где индексы: "min" и "max" – соответственно минимальное и максимальное значения указанных величин (количества фаз или удельных магнитных восприимчивостей фаз);

"уменьш." и "возр." – соответственно для указанных величин, которые уменьшаются от max и возрастают от min с увеличением деформации.

В предложенной схеме необходимо обратить особое внимание на сумму слагаемых $(\chi_{\varepsilon_{\max}} + \chi_{\gamma'_{\min}})$ во 2-й области и $(\chi_{\varepsilon_{\text{умен.}}} + \chi_{\gamma'_{\text{возр.}}})$ в 3-й области, которая при деформации благодаря термодинамическому равновесию сохраняет постоянное значение. Это следует из полученной экспериментальной зависимости результирующей удельной магнитной восприимчивости χ_{∞} от количества возникающего мартенсита деформации $P_{\alpha'}$ при разных степенях деформации сжатием (рис. 2, а, б) [12, 14].

Поскольку точки 6-14 (10X16H13, рис. 1, а) и точки 8...17 (12X15H16, рис. 1, б) лежат соответственно на одной наклонной прямой, то полученные

экстраполяцией $P_{\alpha'} \rightarrow 0$ (отсутствует α' -мартенсит) на ось χ_{∞} значения $\chi_{\text{матр.}} = \chi_{\varepsilon} + \chi_{\gamma'} = \text{const} = 2,98 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ для стали 10X16H13 и $\chi_{\text{матр.}} = \chi_{\varepsilon} + \chi_{\gamma'} = \text{const} = 3,32 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ для стали 12X15H16 "принадлежат" соответственно указанным всем точкам (6...14) для стали 10X16H13 и (8...17) для стали 12X15H16. Точки 1...5 (10X16H13) и точки 1...7 (12X15H16) не указаны на рис. 2, а, б, поскольку они принадлежат 1-й области деформации и соответствуют деформированному аустениту при отсутствии ε - и α' - фаз).

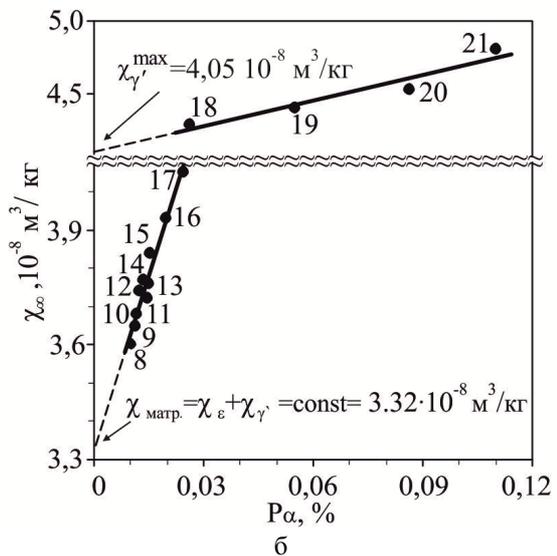
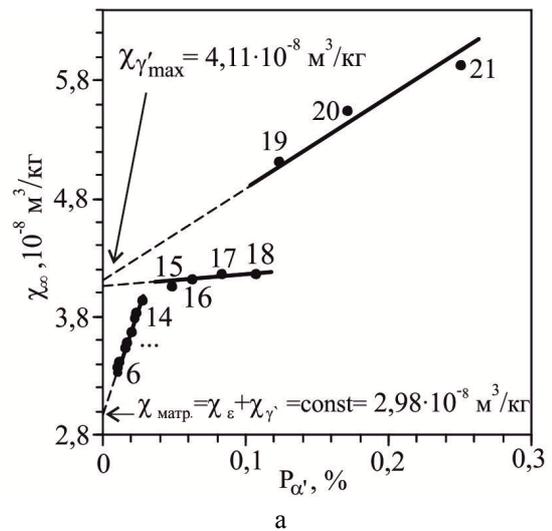


Рис. 2. Зависимость результирующей удельной магнитной восприимчивости χ_{∞} (аустенита и парапроцесса) от количества возникающего $P_{\alpha'}$ мартенсита: а – стали 10X16H13, для точек 6...14 присутствует, а для точек 15...21 отсутствует ε -фаза [12, 14]; б – стали 12X15H16, для точек 8...17 присутствует, а для точек 18...21 отсутствует ε -фаза [13]

Это означает, что слагаемые χ_ε и $\chi_{\gamma'}$ в зависимости от степени деформации могут принимать различные значения от max до min, но в сумме остаются постоянной величиной. Например, для стали 10X16H13 при фазовом переходе из точки 5 в точку 6 (рис. 2, а) образуется минимальное количество α' -мартенсита $P_{\alpha'}=0,0105\%$, которое удалось зафиксировать при деформации $D=23,98\%$ и максимальное количество ε -мартенсита, а при дальнейшем увеличении деформации возрастает количество α' -мартенсита и уменьшается количество ε -мартенсита. Так как сумма указанных слагаемых ($\chi_\varepsilon + \chi_{\gamma'}$) остается постоянной, то количество ε -фазы с максимального значения в точке 6 уменьшается до исчезновения в точке 15, а $\chi_{\gamma'}$ возрастает до $\chi_{\gamma'_{\max}}$ при последующих деформациях.

Для стали 10X16H13 $\chi_{\gamma_{\text{исх}}} = 3,58 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ (исходный аустенит), $\chi_{\gamma'_{\max}} = 4,11 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ (максимальное значение деформированного аустенита) и $\chi_{\text{матр.}} = \chi_\varepsilon + \chi_{\gamma'} = 2,98 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг} = \text{const}$ (без α' -фазы), т.е. $\chi_{\text{матр.}} < \chi_{\text{исх}} < \chi_{\gamma'_{\max}}$. Отсюда следует, что $\chi_{\gamma'}$ равно минимальному значению $\chi_{\gamma'_{\min}}$ деформированного аустенита. Поэтому значение χ должно быть максимальным: $\chi_\varepsilon = \chi_{\varepsilon_{\max}}$, т.к. сумма этих слагаемых равна const. Аналогично такой подход прослеживается и для стали 12X15H16 ($\chi_{\gamma_{\text{исх}}} = 3,75 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, $\chi_{\gamma'_{\max}} = 4,05 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, $\chi_{\text{матр.}} = \chi_\varepsilon + \chi_{\gamma'} = 3,32 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг} = \text{const}$).

Удельная магнитная восприимчивость отдельной парамагнитной фазы (в нашем случае аустенита или ε -мартенсита) не зависит от количества этой фазы. Если определяется суммарное значение восприимчивостей ($\chi_\varepsilon + \chi_{\gamma'}$), то для нахождения χ_ε необходимо χ_ε пересчитывать для 100% ε -фазы [17].

При фазовом переходе

$$\gamma'_{\max} \rightarrow [(\varepsilon_{\max} + \gamma'_{\min}) + \alpha'_{\min}]$$

возможны два пути образования ε -мартенсита. Первый, на примере стали 10X16H13, в точках близких к точке 6 возникают одновременно ε -фаза и α' -мартенсит, т.е. ε -фаза является сопутствующей фазой, что мы и фиксируем нашим чувствительным методом. Второй – в диапазоне между точками 5 и 6 ($22,69\% < D < 23,98\%$) возникает вначале только ε -мартенсит, а затем возникает α' -мартенсит, т.е. ε -мартенсит является промежуточной фазой.

Для других сталей, в которых время жизни ε -фазы позволяет зафиксировать отдельно ε -фазу, а затем α' -мартенсит, ε -фаза является также промежуточной, что согласуется с другими авторами [2].

Таким образом, возможен вариант образования в точке 6 (10X16H13) такого максимального количества ε -фазы, что $\gamma'_{\min} = 0$. Тогда формулы (3), (4) в обобщенном виде перейдут в частную известную формулу $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha'$ (например [2]), в которой ε -фаза является промежуточной.

В работах [15, 16] показано, что промежуточную ε -фазу трудно также зафиксировать и при обратном $\alpha \rightarrow \varepsilon \rightarrow \gamma$ превращении, так как время этого превращения, например в чистом железе, менее 0,12-0,15 с при скорости нагрева 100 град/с.

Заключение

На примере умеренно нестабильных сталей 10X16H13 и 12X15H16 предлагается, экспериментально подтвержденная новая схема образования, развития и исчезновения ε -мартенсита при холодной одноосной пластической деформации сжатием:

1. В 1-й области деформаций $D=0... \sim 26\%$ наблюдается эффект "роста" парамагнитного состояния деформированного аустенита до постоянного максимального значения, т.е. увеличивается удельная магнитная восприимчивость до постоянного максимального значения.

2. В начале 2-й области ($D=24...45\%$) одновременно скачком (фазовый переход) образуется максимальное количество ε -мартенсита, минимальное количество деформированного аустенита и минимальное количество α' -мартенсита. При дальнейшей деформации соответственно количество ε -мартенсита уменьшается (вплоть до исчезновения), а аустенита γ' увеличивается и растет количество α' -фазы.

3. В 3-й области ($D=46...70\%$) продолжает накапливаться количество α' -мартенсита без ε -мартенсита за счет максимального количества аустенита.

Литература

1. Kurc, A. The effect of ($\gamma \rightarrow \alpha'$) phase transformation on microstructure and properties of austenitic Cr-Ni steels [Text] / A. Kurc, Z. Stoklosa // Archives of materials science and engineering. – 2010. – Vol. 41, № 2. – P. 85-94.
2. Seetharaman, V. Influence of the martensitic transformation on the deformation-behavior of an AISI-316 stainless-steel at low-temperatures [Text] /

V. Seetharaman, R. Krishnan // *Journal of materials science*. – 1981. – Vol. 16, № 2. – P. 523-530.

3. Deformation mechanisms induced under high cycle fatigue tests in a metastable austenitic stainless steel [Text] / J. J. Roa, G. Fargas, E. Jiménez-Piqué at al // *Materials Science & Engineering A*. – 2014. – Vol. 597. – P. 232-236.

4. Das, A. Estimation of deformation induced martensite in austenitic stainless steels [Text] / A. Das, S. Tarafder, P. Chakraborti // *Materials Science & Engineering A*. – 2011. – Vol. 529. – P. 9-20.

5. Deformation induced martensitic transformation in a 201 modified austenitic stainless steel [Text] / S. S. Tavares, J. M. Pardal, M. J. Gomes da Silvab at al // *Materials characterization*. – 2009. – Vol. 60. – P. 907-911.

6. Das, A. Magnetic properties of cyclically deformed austenite [Text] / A. Das // *Journal of magnetism and magnetic materials*. – 2014. – Vol. 361. – P. 232-242.

7. Strain-induced ϵ/α' martensitic transformation behavior and solid particle erosion resistance of austenitic Fe-Cr-C-Mn/Ni alloys [Text] / M. C. Park, J. Y. Yun, G. S. Shin at al // *Tribology Letters*. – 2014. – Vol. 54, № 1. – P. 51-58.

8. Interplay of microstructure defects in austenitic steel with medium stacking fault energy [Text] / C. Ullrich, R. Eckner, L. Krüger at al // *Materials Science & Engineering A*. – 2016. – Vol. 649. – P. 390-399.

9. Deformation microstructure and deformation-Induced martensite in austenitic Fe-Cr-Ni alloys depending on stacking fault energy [Text] / Y. Tian, O. Gorbato, A. Borgenstam at al // *Metallurgical and materials transactions A – Physical metallurgy and materials science*. – 2017. – Vol. 48A, № 1. – P. 1-7.

10. Ol'shanetskii, V. E. Structural and magnetic stability of austenite in chromium-nickel and manganese steels with cold deformation [Text] / V. E. Ol'shanetskii, G. V. Snezhnoi, V. N. Sazhnev // *Metal science and heat treatment*. – 2016. – Vol. 58, № 5. – P. 311-317. DOI: 10.1007/s11041-016-0009-5.

11. Ольшанецкий, В. Е. Об особенностях развития мартенситных превращений в никель содержащих аустенитных сталях при деформации сжатием [Текст] / В. Е. Ольшанецкий, Г. В. Снежной // *Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении*. – 2013. – № 2. – С. 20-25.

12. Ольшанецкий, В. Е. О формировании двух типов мартенситных фаз при пластической деформации аустенитной хромоникелевой стали [Текст] / В. Е. Ольшанецкий, Г. В. Снежной // *Физика и техника высоких давлений*. – 2013. – Т. 23, № 2. – С. 78-87.

13. Снежной, Г. В. Зарождение первых порций ϵ - и α' -мартенситов деформации в аустенитных хромоникелевых сталях [Текст] / Г. В. Снежной, В. Г. Мищенко, В. Л. Снежной // *Стародубовские чтения 2015 : сб. науч. тр. Сер.: Строительство,*

материаловедение, машиностроение. – 2015. – С. 307-313.

14. Снежной, Г. В. Трансформация зарождающегося ϵ -мартенсита в аустенитных Fe-Cr-Ni сталях при температурно-силовых воздействиях [Текст] / Г. В. Снежной // *Стародубовские чтения 2017 : сб. науч. тр. Сер.: Строительство, материаловедение, машиностроение*. – 2017. – Вып. 95. – С. 124-128.

15. Кабанова, И. Г. О превращении $\alpha \rightarrow \epsilon \rightarrow \gamma$ и упорядочении аустенита в сплаве Fe-32%Ni [Текст] / И. Г. Кабанова, В. В. Сагарадзе, Н. В. Катаева // *Письма о материалах*. – 2011. – Т. 1. – С. 110-116.

16. Headley, T. J. A new bcc-fcc orientation relationship observed between ferrite and austenite in solidification structures of steels [Text] / T. J. Headley, J. A. Brooks // *Metallurgical and materials transactions A*. – 2002. – Vol. 33, № 1. – P. 5-15.

17. Лысак, Л. И. Физические основы термической обработки стали [Текст] / Л. И. Лысак, Б. И. Николин. – К. : Техника, 1975. – 304 с.

18. Снежной, Г. В. Интегральный физический метод идентификации α -фазы в аустенитных хромоникелевых сталях [Текст] / Г. В. Снежной, В. Г. Мищенко, В. Л. Снежной // *Литье и металлургия*. – 2009. – № 3 (52). – С. 241-244.

19. Сніжної, Г. В. Автоматизована установка для визначення магнетної сприйнятливості криць та стонів [Текст] / Г. В. Сніжної, Є. Л. Жавжаров // *Вісник НТУ "КПІ" : зб. наук. праць. Сер.: Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. – 2012. – Вип. 49. – С. 136-141.

20. Snezhnoi, G. V. Magnetic state of austenite near the true deformation martensitic point of a chromium-nickel austenitic steel [Text] / G. V. Snezhnoi // *The physics of metals and metallography*. – 2011. – Vol. 111, № 6. – P. 573-578. DOI: 10.1134/S0031918X110 50152.

References

1. Kurc, A., Stoklosa, Z. The effect of ($\gamma \rightarrow \alpha'$) phase transformation on microstructure and properties of austenitic Cr-Ni steels. *Archives of materials science and engineering*, 2010, vol. 41, no. 2, pp. 85-94.

2. Seetharaman, V., Krishnan, R. Influence of the martensitic-transformation on the deformation-behavior of an AISI-316 stainless-steel at low-temperatures. *Journal of materials science*, 1981, vol. 16, no. 2, pp. 523-530.

3. Roa, J., Fargas, G., Jiménez-Piqué, E., Mateo, A. Deformation mechanisms induced under high cycle fatigue tests in a metastable austenitic stainless steel. *Materials Science & Engineering A*, 2014, vol. 597, pp. 232-236.

4. Das, A., Tarafdera, S., Chakraborti P. Estimation of deformation induced martensite in austenitic stainless steels. *Materials Science & Engineering A*, 2011, vol. 529, pp. 9-20.

5. Tavares, S., Pardal, J., Gomes da Silvab, M., Abreub H., Silvac M. Deformation induced martensitic transformation in a 201modified austenitic stainless steel. *Materials characterization*, 2009, vol. 60, pp. 907-911.
6. Das, A., Magnetic properties of cyclically deformed austenite. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2014. vol. 361, pp. 232-242.
7. Park, M., Yun, J., Shin, G., Kim, S. Strain-induced ϵ/α' martensitic transformation behavior and solid particle erosion resistance of austenitic Fe-Cr-C-Mn/Ni alloys. *Tribology Letters*, 2014, vol. 54, no. 1, pp. 51-58.
8. Ullrich, C., Eckner, R., Krüger, L., Martin, S., Klemm, V., Rafaja, D. Interplay of microstructure defects in austenitic steel with medium stacking fault energy. *Materials Science & Engineering A*, 2016, vol. 649, pp. 390-399.
9. Tian, Y., Gorbatov, O., Borgenstam, A., Hedstro, P. Deformation microstructure and deformation-Induced martensite in austenitic Fe-Cr-Ni alloys depending on stacking fault energy. *Metallurgical and materials transactions A – Physical metallurgy and materials science*, 2017, vol. 48 A, no. 1, pp. 1-7.
10. Ol'shanetskii, V. E., Snezhnoi, G. V., Sazhnev, V. N. Structural and magnetic stability of austenite in chromium-nickel and manganese steels with cold deformation. *Metal science and heat treatment*, 2016, vol. 58, no. 5, pp. 311-317. doi: 10.1007/s11041-016-0009-5
11. Ol'shaneckij, V. E., Snizhnoi, G. V. Ob osobennostyah razvitiya martensitnyh prevrashhenij v nikel' sodержashhih austenitnyh staljah pri deformacii szhatiem [Especially the development of martensitic transformations at the compressive deformation in the nickel-containing austenitic steels]. *Novye materialy i tehnologii v metallurgii i mashinostroenii*, 2013, no. 2, pp. 20-25.
12. Ol'shaneckij, V. E., Snizhnoi, G. V. O formirovanii dvuh tipov martensitnyh faz pri plasticheskoj deformacii austenitnoj hromonikelevoj stali [About the formation of two types of martensite phases during plastic deformation of austenitic chromium-nickel steel]. *Fizika i tehnika vysokih davlenij*, 2013, vol. 23, no. 2, pp. 78-87.
13. Snizhnoi, G. V., Mishhenko, V. G., Snizhnoi, V. L. Zarozhdenie pervykh porcij ϵ - i α' -martensitov deformacii v austenitnyh hromonikelevykh staljah [Formation of the first portions of ϵ - and α' -deformation-induced martensite in chromium-nickel steels of the austenitic class]. *Starodubovskie chtenija 2015 : sb. nauch. tr. Ser. : Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie*. 2015, no. 80, pp. 307-313.
14. Snizhnoi, G. V. Transformacija zarozhdajushhegosja ϵ -martensita v austenitnyh Fe-Cr-Ni staljah pri temperaturno-silovyh vozdeystvijah [Transformation of ϵ -martensite in austenite Fe-Cr-Ni steel under the influence of temperature and deformation]. *Starodubovskie chtenija 2017 : sb. nauch. tr. Ser.: Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie*, 2017, no. 95, pp. 124-128.
15. Kabanova, I. G., Sagaradze, V. V., Kataeva, N. V. O prevrashhenii $\alpha \rightarrow \epsilon \rightarrow \gamma$ i uporjadochenii austenita v splave Fe-32%Ni [On $\alpha \rightarrow \epsilon \rightarrow \gamma$ transformation and ordering of austenite in Fe-32%Ni alloy]. *Pis'ma o materialah*, 2011, vol. 1, pp. 110-116.
16. Headley, T. J., Brooks, J. A. A new bcc-fcc orientation relationship observed between ferrite and austenite in solidification structures of steels. *Metallurgical and materials transactions A*. 2002, vol. 33, no. 1, pp. 5-15.
- 17 Lysak, L. I., Nikolin, B. I. *Fizicheskie osnovy termicheskoy obrabotki stali* [Physical basis of heat treatment of steel]. Kiev, Tehnika Publ., 1975. 304 p.
18. Snizhnoi, G. V., Mishhenko, V. G., Snizhnoi, V. L. *Integral'nyj fizicheskij metod identifikacii α -fazy v austenitnyh hromonikelevykh staljah* [The klasternyj mechanism of origin martensite with isothermal and athermal microkinetics is offered]. *Lit'e i metallurgija*, 2009, no. 3 (52), pp. 241-244.
19. Snizhnoi, G. V., Zhavzharov Ye. L. *Avtomatyzovana ustanovka dlya vyznachennya mahnetnoyi spryynyatlyvosti kryts' ta stopiv* [Automated equipment for determining the magnetic susceptibility of steels and alloys]. *Visnyk NTU "KPI" : zb. nauk. prats'. Ser.: Radiotekhnika. Radioaparatabuduvannya*, 2012, vol. 49, pp. 136-141.
20. Snezhnoi, G. V. Magnetic state of austenite near the true deformation martensitic point of a chromium-nickel austenitic steel. *The physics of metals and metallography*, 2011, vol. 111, no. 6, pp. 573-578. DOI: 10.1134/S0031918X11050152

Поступила в редакцию 12.05.2017, рассмотрена на редколлегии 9.06.2017

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. В. В. Погосов, Запорожский национальный технический университет, Запорожье.

ПРО ОДНУ МОДЕЛЬ ЗАРОЖДЕНИЯ, РОЗВИТКУ І ЗНИКНЕННЯ ϵ -МАРТЕНСИТУ ПРИ ПЛАСТИЧНІЙ ДЕФОРМАЦІЇ FE-CR-NI СТАЛЕЙ

Г. В. Сніжної, В. Л. Сніжної

Пропонується новий підхід до розуміння зародження, розвитку і зникнення ϵ -мартенситу в помірно нестабільних аустенітних Fe-Cr-Ni сталей при холодній одновісній пластичній деформації стисненням. З дефо-

рмованого до постійного максимального парамагнітного стану аустеніту γ'_{\max} спочатку одночасно стрибком утворюється максимальна кількість ε -мартенситу, мінімальна кількість деформованого γ' -аустеніту і мінімальна кількість α' -мартенситу. При цьому з підвищенням пластичної деформації стисненням сумарна питома магнітна сприйнятливості матриці зразка сталі, яка містить ε -фазу (кількість якої зменшується аж до її зникнення) і зростаючу кількість γ' -фази (до її первісного стану γ'_{\max}), залишається постійною величиною. З самого початку виникнення α' -мартенситу відбувається його накопичення зі збільшенням деформації. Аналізуються варіанти утворення супутнього і проміжного ε -мартенситу.

Ключові слова: хромонікелева сталь, деформація, аустеніт, ε -мартенсит, α' -мартенсит, питома магнітна сприйнятливості.

MODEL NUCLEATION, DEVELOPMENT AND DISAPPEARANCE OF ε -MARTENSITE DURING PLASTIC DEFORMATION OF AUSTENITIC FE-CR-NI STEEL

G. V. Snizhnoi, V. L. Snizhnoi

A new approach to understanding the processes of nucleation, development and disappearance of martensite in moderately unstable austenitic Fe-Cr-Ni steels under cold uniaxial plastic compression deformation is proposed. The paramagnetic state of austenite increases to a maximum value γ'_{\max} under deformation. Then, simultaneously, the maximum amount of ε -martensite, the minimum amount of deformed γ' -austenite and the minimum amount of α' -martensite is formed. The paramagnetic matrix of the steel sample contains the ε - and γ' -phases. With the increase in plastic deformation by compression, the total specific magnetic susceptibility of these phases remains constant. In this case, the amount of ε -phase decreases (before disappearance), and the amount of γ' -phase increases. As the deformation of steel increases, α' -martensite accumulates. The variants of formation of concomitant and intermediate ε -martensite are analyzed.

Keywords: chromium-nickel steel, deformation, austenite, ε -martensite, α' -martensite, specific magnetic susceptibility.

Снежной Геннадий Валентинович – канд. физ.-мат. наук, доцент, докторант, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина, e-mail: snow@zntu.edu.ua.

Снежной Валентин Лукьянович – канд. физ.-мат. наук, доцент, Запорожский национальный университет, Запорожье, Украина, e-mail: snow@email.zp.ua.

Snizhnoi Gennadii Valentinovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate professor, Dr. student, National Technical University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: snow@zntu.edu.ua.

Snizhnoi Valentin Luk'janovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate professor, National University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: snow@email.zp.ua.