

# І СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ. ОПІР РУЙНУВАННЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

УДК 669.1:537.621.4:539.374.6

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

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ОБРАЗОВАНИЯ И ТРАНСФОРМАЦИИ $\varepsilon$ - МАРТЕНСИТА ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ АУСТЕНИТНЫХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ

*Исследованы фазовые превращения в хромоникелевых сталях со стабильным, умеренно нестабильным и нестабильным аустенитом при деформации сжатием. Показано, что при определенных давлениях в аустените может образовываться как  $\alpha'$  - мартенсит, так и предшествующий его появлению промежуточный  $\varepsilon$  - мартенсит.*

**Ключевые слова:** сталь, деформация, аустенит,  $\varepsilon$  - мартенсит,  $\alpha'$  - мартенсит, магнитная восприимчивость.

### Введение

За последнее время достигнуты значительные успехи в понимании природы  $\varepsilon$  - мартенсита в аустенитных сталях и сплавах [1...4]. В аустенитных хромоникелевых сталях концентрационные области  $\varepsilon$  - фазы сравнительно меньше (до 15 %), чем в марганцевых (до 80 %, а при деформации – до 100 %) [5, 6], что затрудняет обнаружение и исследование этой фазы, т. к. не удается получить  $\varepsilon$  - мартенсит без  $\alpha'$  - мартенсита деформации [5]. Поскольку  $\varepsilon$  - мартенсит и аустенит являются парамагнитными фазами, то это обстоятельство не позволяет обычными магнитными методами с достаточной точностью отличить  $\varepsilon$  - мартенсит от аустенита в Fe-Cr-Ni сталях [5].

### Цель

В связи с вышесказанным возникла необходимость проведения исследований с использованием более чувствительного магнитометрического метода, учитывающего при определении весьма низких содержаний ферромагнитного  $\alpha'$  - мартенсита (порядка 0,005 % и более) намагниченности парамагнитного аустенита [7], обнаружить при комнатной температуре начальную стадию возникновения  $\varepsilon$  - мартенсита с одновременным образованием низкого количества  $\alpha'$  - мартенсита деформации, а также проследить их поведение в зависимости от дальнейшей пластической деформации сжатием и попытаться определить экспериментальным

путем численное значение удельной магнитной восприимчивости  $\varepsilon$  - мартенсита. Данная работа является продолжением исследований, проведенных ранее [8, 9, 10, 11, 12].

### Материалы и методика исследований

Для исследований, согласно магнитометрической диаграмме видов и степени стабильных и нестабильных сталей [13], были выбраны аустенитные хромоникелевые стали трех типов: 1 тип – стали 10X23N18, 14X17N18 со стабильным аустенитом [8, 9]; 2 тип – стали 10X16N13, 12X15N16 с умеренно нестабильным аустенитом [8, 9]; 3 тип – стали 12X18N10T (10,46 % масс. Ni) [10], 12X18N10T (9,42 % масс. Ni) [11], 10X18N9-Y (9,20 % масс. Ni) [12] с нестабильным аустенитом. Химический состав названных сталей указан в таблице 1.

Такая подборка марок сталей обусловлена различным содержанием хрома и никеля, необходимым для установления условий возникновения и трансформации  $\varepsilon$  - мартенсита при деформации. Стандартную аустенизацию всех сталей проводили при температуре 1050 °С (выдержка 30 мин. с последующей закалкой в воду). В результате все стали оказались полностью (100 %) аустенизированными и парамагнитными, кроме стали 12X18N10T (9,42 % масс. Ni), в которой после указанной закалки остался  $\delta$  - феррит в количестве  $P_{\delta} = 0,078$  % об. Затем холодным механическим способом вырезали образцы размером  $\sim 3 \times 3 \times 1$  мм<sup>3</sup>.

**Таблица 1** – Химический состав исследуемых аустенитных сталей

элемент	Марки стали						
	Стабильный аустенит		Умеренно нестабильный аустенит		Нестабильный аустенит (крайне нестабильный)		
	10X23H18	14X17H18	10X16H13	12X15H16	12X18H10T	10X18H9-У	12X18H10T
C	0,10	0,14	0,13	0,12	0,12	0,07	0,12
Cr	22,6	16,808	15,83	14,874	18,089	17,26	17,854
Ni	18,70	17,770	13,70	15,541	10,463	9,20	9,42
Mn	0,94	1,48	1,37	1,57	1,582	1,60	1,316
Si	0,44	1,18	1,07	0,95	0,304	0,30	0,25
S	0,01	0,02	0,01	0,01		0,22	
P	0,02	0,035	0,03	0,030		0,03	
W			0,04			0,06	
Mo		0,04	0,14	0,17	0,112	0,32	0,121
Cu		0,23	0,24	0,22		0,29	
Ti					0,460	0,005	0,252

Для снятия поверхностных повреждений образцы шлифовали с использованием абразивных порошков, а затем полировали до зеркального блеска с использованием алмазных паст и электрохимического метода. Степень пластической одноосной деформации на сжатие при комнатной температуре рассчитывали по отношению толщин до и после деформации ( $D = (d - d_0) / d_0$ ). На всех этапах подготовки образцов обращали особое внимание на то, чтобы их поверхности не загрязнялись какими-либо ферромагнитными примесями.

Весьма низкое содержание мартенсита деформации  $P_{\alpha'}$  определяли чувствительным магнитометрическим методом, описанным в работах [7, 14]. Зависимости удельной магнитной восприимчивости  $\chi$  от обратной величины магнитного поля  $H$  были получены с использованием разработанной автоматизированной установки [15].

#### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Далее будет показано, что стали 10X23H18, 14X17H18, 10X16H13, 12X15H16, 12X18H10T (10,463 % масс. Ni), 10X18H9-У до пластической деформации сжатием были действительно полностью аустенизированы и, следовательно, стали парамагнитными, а сталь 12X18H10T (9,42 % масс. Ni) содержала  $\delta$  - феррит в количестве 0,078 %.

Оценим возможность возникновения и дальнейшего поведения  $\varepsilon$  - мартенсита в указанных типах сталей.

1. Деформация стабильных сталей 10X23H18 до 55,90 % (рис. 1 а) и 14X17H18 до 67,70 % (рис. 1 б) привела к росту удельных магнитных восприимчивостей сталей 10X23H18 от исходной  $\chi_{\gamma}^{ucx.} = 3,30 \cdot 10^{-8}$  до максимальной  $\chi_{\gamma'}^{\max} = 3,72 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг [8] ( $\gamma'$  – деформированный аустенит), а в стали 14X17H18 – от исходной  $\chi_{\gamma}^{ucx.} = 4,45 \cdot 10^{-8}$  до  $\chi_{\gamma'}^{\max} = 4,63 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг [9]. В указанных

выше интервалах деформаций не было зафиксировано появление  $\varepsilon$  - и  $\alpha'$  - мартенситов (отсутствует наклон прямых  $\chi(1/H)$ ).

Отсюда следует, что в стабильных сталях при комнатной температуре, вплоть до сравнительно больших деформаций (60...70 %) сжатием, не возникают  $\varepsilon$  - и  $\alpha'$  - мартенситы, что подтверждается в работах [8, 9]. Изменение магнитного состояния аустенита этих сталей при повышении пластической деформации осуществлялось по схеме  $\gamma^{ucx.} \rightarrow \gamma' \rightarrow \gamma'_{\max}$ , т. е. исходное магнитное состояние ( $\chi_{\gamma}^{ucx.}$ ) переходит в деформационное магнитное состояние ( $\chi_{\gamma'}$ ), и достигает при дальнейшем увеличении деформации предельного магнитного состояния ( $\chi_{\gamma'}^{\max}$ ) [10].

2. Проанализируем группу сталей с умеренно нестабильным аустенитом (10X16H13 и 12X15H16), которые до пластической деформации на сжатие также были полностью аустенизированы (отсутствовал наклон прямых  $\chi(1/H)$  для исходных образцов на рис. 2).

Рассмотрим сначала сталь 10X16H13. Полученные в эксперименте значения измерений и результатов приведены на рис. 2 а.

Исходное значение удельной магнитной восприимчивости аустенита стали 10X16H13 до деформации составило  $\chi_{\gamma}^{ucx.} = 3,58 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг [8]. Деформация 22,69 % (рис. 2 а) привела к росту удельной магнитной восприимчивости до значения  $\chi_{\gamma'}^{\max} = 4,11 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг. При дальнейшем увеличении деформации появляется наклон прямых  $\chi(1/H)$  в отличие от стабильных сталей 10X23H18 и 14X17H18, что свидетельствует о возникновении ферромагнитного  $\alpha'$  - мартенсита, поскольку рост  $\chi$  обусловлен только появлением мартенситной

фазы. Так в стали 10X16H13 при деформациях 23,98, 24,74 и 25.49 % и т. д. уже были зафиксированы первые порции возникшего  $\alpha'$  - мартенсита в количестве 0,0105, 0,0113 и 0,0122 % и т. д. На этом рисунке, и последующих, присутствуют складки, свидетельствующие о смене характера структурных изменений, связанных с появлением и эволюцией мартенситных фаз.

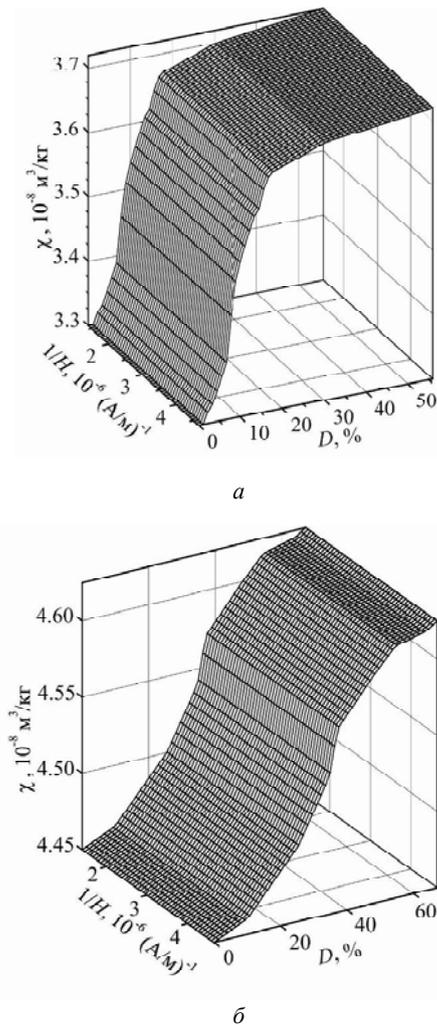


Рис. 1. Зависимость  $\chi(1/H, D)$  образцов сталей 10X23H18 (а) и 14X17H18 (б)

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что в стали 10X16H13 наклонные прямые поверхности  $\chi(1/H, D)$  при постоянных значениях  $D$  (интервал деформаций 23,98...40,24 %) пересекли начальные горизонтальные прямые (интервал деформаций 0...22,69 %) (см. рис. 2 а). Экстраполяцией вышеуказанных наклонных прямых на ось  $\chi$  ( $H \rightarrow \infty$ ) [7], получены значения результирующей удельной магнитной восприимчивости  $\chi_\infty$  [8] ( $\chi_\infty = \chi_{\text{матр.}} + \chi_p = (\chi_\varepsilon + \chi_\gamma) + \chi_p$ , где  $\chi_{\text{матр.}}$  – магнитная восприимчивость парамагнитной матрицы,  $\chi_p$  – парапроцессная магнитная восприим-

чивость  $\alpha'$  - мартенсита,  $\chi_\gamma$  – магнитная восприимчивость аустенита;  $\chi_{\text{матр.}} = \chi_\varepsilon + \chi_\gamma$ , где  $\chi_\varepsilon$  удельная магнитная восприимчивость  $\varepsilon$  - мартенсита). Эти значения  $\chi_\infty$  лежат ниже максимального значения парамагнитной восприимчивости аустенита  $\chi_\gamma^{\text{max}} = 4,11 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ , которое соответствует началу превращения аустенита в мартенсит деформации типа  $\alpha'$ .

Методом экстраполяции из графической зависимости  $\chi_\infty$  от  $P_{\alpha'}$  при  $P_{\alpha'} \rightarrow 0$  [16, 17] для интервала деформаций от 23,98 % до 35,70 % определили  $\chi_{\text{матр.}}$  на уровне  $2,98 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  (рис. 3) [8], что было ниже минимального значения исходной парамагнитной восприимчивости  $\chi_\gamma^{\text{исх.}} = 3,58 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  аустенита для данного химического состава исследуемой стали 10X16H13. На основании этого важного факта можно сделать вывод, что возникшая новая парамагнитная фаза является ничем иным, как  $\varepsilon$  - мартенситом деформации.

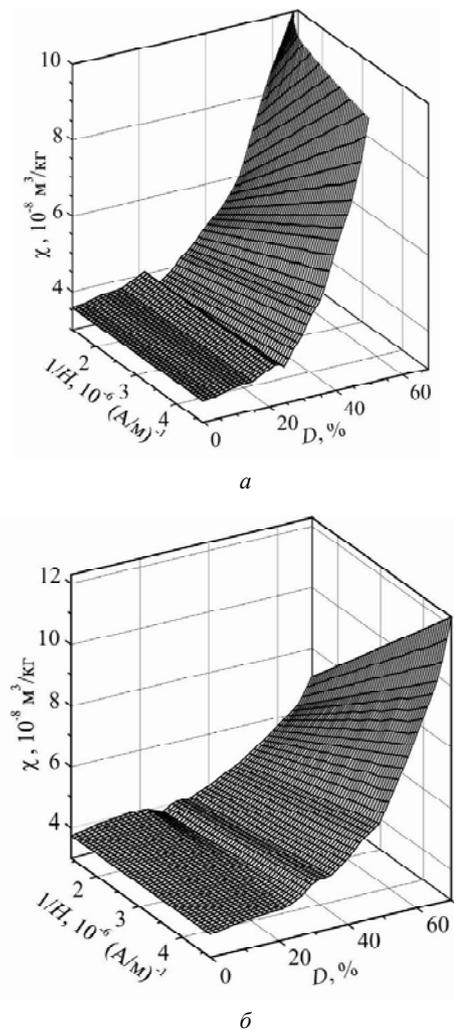
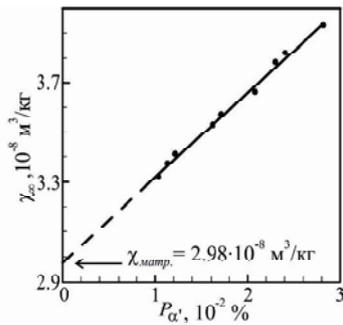


Рис. 2. Зависимость  $\chi(1/H, D)$  образцов сталей 10X16H13 (а) и 12X15H16 (б)



**Рис. 3.** Зависимость результирующей удельной магнитной восприимчивости  $\chi_{\infty}$  (парамагнитной матрицы и парапроцессной составляющей ферромагнитной  $\alpha'$ - фазы) стали 10X16H13 от количества мартенсита деформации  $P_{\alpha'}$ .

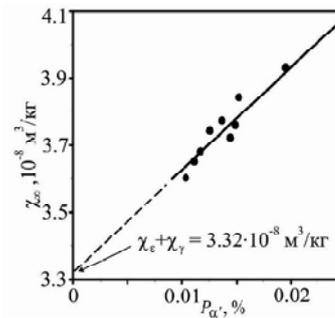
Следовательно, для стали 10X16H13 деформация  $D_H = 23,98\%$  является начальной, при которой возникают  $\varepsilon$ - мартенсит и первая порция  $\alpha'$ - мартенсита в количестве  $P_{\alpha'}^n = 0,011\%$  [8]. После деформации  $D_K = 40,24\%$  (назовем ее конечной) удельная магнитная восприимчивость становится равной  $\chi_{\gamma'}^{\max} = 4,05 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ . При этой деформации  $\varepsilon$ - фаза полностью исчезает (трансформируется в  $\alpha'$ - мартенсит). Количество возникающего при этом  $\alpha'$ - мартенсита составляет  $P_{\alpha'}^{\text{кон.}} = 0,049\%$ . Дальнейшая деформация до 67,70 % сопровождается только превращением  $\gamma'_{\max} \rightarrow \alpha'$  (наклонные линии  $\chi(1/H)$  не пересекают горизонтальные прямые).

Аналогичные результаты получены и для стали 12X15H16 (рис. 2 б), принадлежащей также ко второму типу сталей с умеренно нестабильным аустенитом, что также подтверждает предполагаемую модель образования и дальнейшего поведения  $\varepsilon$ - мартенсита в процессе пластического деформирования.

Так на основании приведенных данных на рис. 2 б следует, что в стали 12X15H16 исходная удельная магнитная восприимчивость аустенита (после стандартной аустенизации) равна  $\chi_{\gamma}^{\text{исх.}} = 3,75 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  [9]. Её деформация до 25,87 % привела к значению  $\chi_{\gamma'}^{\max} = 4,05 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ . При дальнейшей деформации стали от 26,53 до 44,27 % уже фиксируются обе мартенситные фазы  $\varepsilon$  и  $\alpha'$ .

На основании экспериментальных данных (рис. 4) для рассматриваемой стали 12X15H16 найдено значение  $\chi_{\varepsilon} + \chi_{\gamma} = 3,32 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  [9], которое меньше  $\chi_{\gamma'}^{\max}$  и  $\chi_{\gamma}^{\text{исх.}}$ . При деформации  $D = 44,27\%$  получено значение  $\chi_{\infty} = 4,05 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ . Предполагается, что при такой деформации и выше ( $D > 44,27\%$ )  $\varepsilon$ - фаза уже полностью трансформируется. Дальнейшая деформация до 70,03 % сопровождается только превращением  $\gamma'_{\max} \rightarrow \alpha'$ , что и приведено на схеме возникновения и трансформации  $\varepsilon$  и  $\alpha'$ - мартенситов, указанной в табл. 2.

Таким образом, можно предположить следующую модель образования и исчезновения  $\varepsilon$ - мартенсита при пластической деформации сжатием при комнатной



**Рис. 4.** Зависимость результирующей удельной магнитной восприимчивости  $\chi_{\infty}$  (парамагнитной матрицы и парапроцессной составляющей ферромагнитной  $\alpha'$ - фазы) стали 12X15H16 от количества мартенсита деформации  $P_{\alpha'}$ .

температуре в сталях 10X16H13 и 12X15H16 с умеренно нестабильным аустенитом сталей:

$$\gamma_{\text{исх.}} \rightarrow \gamma' \rightarrow \gamma'_{\max} \rightarrow [\gamma' + (\varepsilon + \alpha')] \rightarrow (\gamma' + \alpha').$$

3. Рассмотрим теперь полученные результаты для третьего типа крайне нестабильных сталей, включающего две марки стали 12X18H10T (10,46 % масс. Ni) и 10X18H9-У (9,20 % масс. Ni), которые после указанной выше стандартной аустенизации были полностью аустенизированы (количество  $\delta$ - феррита  $P_{\delta} = 0$ ) и одну марку 12X18H10T (9,42 % масс. Ni), которая после соответствующей аустенизации содержала  $\delta$ - феррит в количестве  $P_{\delta} = 0,078\%$  (наклон прямой при  $D = 0$  на рис. 5а подтверждает присутствие  $\delta$ - феррита при нулевой деформации).

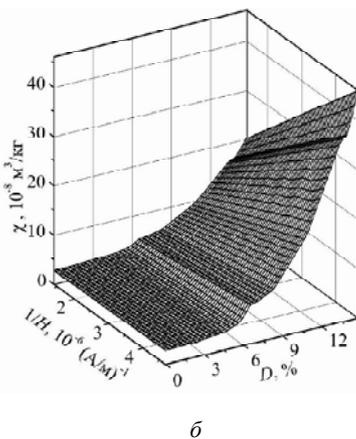
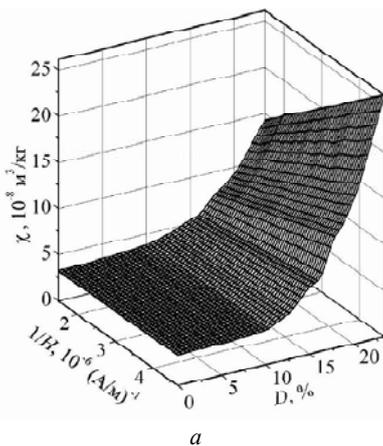
На рис. 5 приведены соответственно полученные результаты для первых двух сталей: 12X18H10T (10,46 % масс. Ni) [10] и 10X18H9-У (9,20 % масс. Ni) [12].

Видно, что в определенном интервале деформаций  $D = 0 \dots 10,33\%$  удельная магнитная восприимчивость аустенита стали 12X18H10T (10,46 % масс. Ni) увеличивается от исходной  $\chi_{\gamma}^{\text{исх.}} = 3,27 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  до максимального значения  $\chi_{\gamma'}^{\max} = 3,94 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  [10], а в интервале  $D = 0 \dots 2,36\%$  для стали 10X18H9-У восприимчивость растет от  $\chi_{\gamma}^{\text{исх.}} = 2,82 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  до  $\chi_{\gamma'}^{\max} = 3,06 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  [12].

В этих деформационных интервалах сталей 12X18H10T (10,46 % масс. Ni) и 10X18H9-У (9,20 % масс. Ni)  $\alpha'$ - мартенсит деформации не зарождается (отсутствует наклон  $\chi(1/H)$ ). Дальнейшее увеличение деформации  $D = 11,70 \dots 23,51\%$  стали 12X18H10T (10,46 % масс. Ni) и  $D = 3,19 \dots 14,72\%$  стали 10X18H9-У приводит к зарождению и накоплению только  $\alpha'$ - мартенсита в отсутствии  $\varepsilon$ - мартенсита (нет пересечения наклонными линиями горизонтальных прямых). Как видим, в этих полностью аустенизированных сталях 12X18H10T (10,46 % масс. Ni) и 10X18H9-У (9,20 % масс. Ni) не возникает  $\varepsilon$ - мартенсит в отличие от второго типа умеренно нестабильных сталей (10X16H13 и 12X15H16).

**Таблиця 2** – Схема зародження  $\varepsilon$ - і  $\alpha'$ - мартенситов деформации в аустенитних хромонікелевих сталях (на прикладі сталі 12X15H16) з умерено нестабільним аустенитом

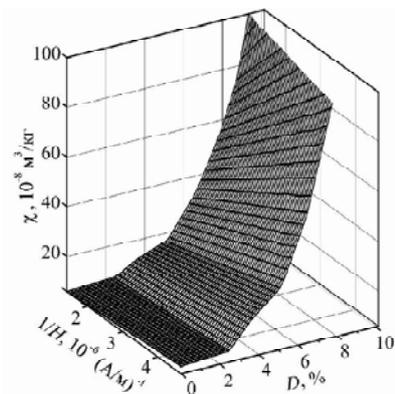
Номер області, інтервал деформации	Фазові превращення і предельні значення магнітної восприимчивості	Коментарій
I обл. $D = 0 \dots 26\%$	$\gamma \rightarrow \gamma' \rightarrow \gamma'_{\max}$ $\chi_{\gamma} \rightarrow \chi_{\gamma'} \rightarrow \chi_{\gamma'}^{\max}$ $\chi_{\gamma} = 3,75 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ $\chi_{\gamma'} = ]3,75, 4,05[ \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ $\chi_{\gamma'}^{\max} = 4,05 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$	Магнітна восприимчивість, яка характеризує магнітно-атомне стання парамагнітного аустенита, з деформацией збільшується і досягає постійного максимального значення.
II обл. $D = 26,5 \dots 44\%$	$\gamma'_{\max} \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha'$ $\gamma'_{\max} \rightarrow \alpha'$ $\chi_{\gamma'}^{\max} \rightarrow \chi_{\varepsilon} + \chi_{\alpha'}$ $\chi_{\varepsilon} + \gamma'_{\max} = 3,32 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ $P_{\alpha'} = 0,01 \dots 0,025\%$	При збільшенні деформации в одержаній аустенитній матриці зароджуються перші порції парамагнітного $\varepsilon$ - і ферромагнітного $\alpha'$ - мартенситов деформации. Дальніше накоплення $\alpha'$ - мартенсита здійснюється за рахунок аустенита і $\varepsilon$ - мартенсита
III обл. $D = 49 \dots 70\%$	$\gamma'_{\max} \rightarrow \alpha'$ $\chi_{\gamma'}^{\max} \rightarrow \chi_{\alpha'}$ $P_{\alpha'} = 0,03 \dots 0,11\%$	Дальніше накоплення кількості $\alpha'$ - мартенсита здійснюється за рахунок аустенита



**Рис. 5.** Зависимость  $\chi(1/H, D)$  для образцов сталей 12X18H10T (10,46 % масс. Ni) (а) и 10X18H9- (9,20 % масс. Ni) (б)

Отсюда следует, что в аустенитных хромонікелевых сталях 12X18H10T (10,46 % масс. Ni) и 10X18H9-У (9,20 % масс. Ni), не содержащих в исходном состоянии  $\delta$ - феррит, мартенситная реакция происходит по схеме (без участия  $\varepsilon$ - мартенсита):

И наконец, проследим начальную стадию мартенситной реакции в крайне нестабильной стали 12X18H10T (9,42 % масс. Ni), содержащей в исходном состоянии низкое количество  $\delta$ - феррита  $P_{\delta} = 0,078\%$  даже после стандартной закалки в воду [11]. Необходимо обратить внимание на то, что в этой стали в отличие от всех приведенных выше сталей, отсутствует деформационный аустенит  $\gamma'$ , т. е. до возникновения  $\alpha'$ - мартенсита удельная магнітная восприимчивость аустенита не возрастает (отсутствуют горизонтальные прямые), а сразу же при первых деформациях образуется  $\alpha'$ - мартенсит деформации (рис. 6).



**Рис. 6.** Зависимость  $\chi(1/H, D)$  стали 12X18H10T (9,42 % масс. Ni)

Изначальное количество  $\delta$  - феррита не меняется под действием пластической деформации [18, 19]. Поэтому из полученного экспериментально результирующего значения количеств  $P_\delta$  феррита и  $P_{\alpha'}$  мартенсита деформации  $P_\alpha = P_\delta + P_{\alpha'}$  вычитанием  $P_\delta$  из  $P_\alpha$  определяем  $P_{\alpha'}$ . Из зависимости  $\chi_\infty(P_\alpha)$  методом экстраполяции [16, 17] определяется удельная магнитная восприимчивость  $\chi_0 = 2,39 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  аустенита (рис. 7).

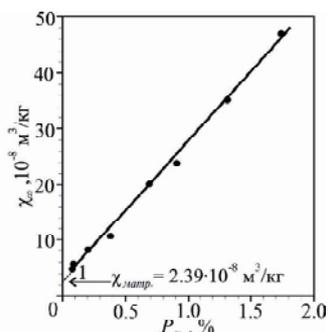
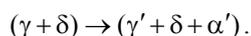


Рис. 7. Зависимость результирующей удельной магнитной восприимчивости  $\chi_\infty$  (аустенита и парапроцесса) стали 12X18Н10Т (9,42 % масс. Ni) от суммарного количества феррофазы  $P_\alpha$  [11]

Следовательно, на основании экспериментальных данных в крайне нестабильной стали 12X18Н10Т (9,42 % масс. Ni), содержащей низкое количество  $\delta$  - феррита  $P_\delta = 0,078 \%$  даже после предварительной стандартной аустенизации (выдержка 30 мин. при температуре 1050 °С с последующей закалкой в воду) в интервале пластических деформаций сжатием от 0 до 10,2 % возникает и накапливается только  $\alpha'$  - мартенсит без присутствия  $\varepsilon$  - мартенсита. Предполагается, что для стали 12X18Н10Т (9,42 % масс. Ni), содержащей в исходном состоянии  $\delta$  - феррит, мартенситная реакция происходит по следующей схеме, но без участия  $\varepsilon$  - мартенсита:



### Выводы

Экспериментально установлено:

1. В аустенитных хромоникелевых сталях со стабильным аустенитом 10X23Н18 и 14X17Н18 при пластической деформации сжатием соответственно в интервалах (0...55,90 %) и (0...67,19 %) изменяется атомно-магнитное состояние аустенита и в результате чего возрастает удельная магнитная восприимчивость стали 10X23Н18 от  $\chi_\gamma^{ucx} = 3,30 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  до приближающегося к «насыщению» максимальному значению  $\chi_\gamma^{\max} = 3,72 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ , а в стали 14X17Н18 от  $\chi_\gamma^{ucx} = 4,45 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  до  $\chi_\gamma^{\max} = 4,63 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  по схеме  $\chi_\gamma^{ucx} \rightarrow \chi_\gamma^{\max}$ , и при этом не возникают  $\varepsilon$  - и  $\alpha'$  - мартенситы.

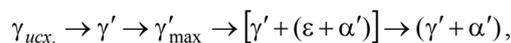
В указанных выше деформационных интервалах не происходит структурно-фазовых превращений.

2. В сталях с умеренно нестабильным аустенитом 10X16Н13 и 12X15Н16 при пластической деформации обнаружено  $\varepsilon$  - и  $\alpha'$  - мартенситы. Выявлены границы начальных деформационных интервалов существования  $\varepsilon$  - и  $\alpha'$  - мартенситов. В начальном интервале деформации (0...23,98 %) для стали 10X16Н13 и (0...26,53 %) для стали 12X15Н16 магнитная восприимчивость аустенита возрастает от  $\chi_\gamma^{ucx} = 3,58 \cdot 10^{-8}$  до максимального значения  $\chi_\gamma^{\max} = 4,11 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  в стали 10X16Н13 и от  $\chi_\gamma^{ucx} = 3,75 \cdot 10^{-8}$  до  $\chi_\gamma^{\max} = 4,05 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  в стали 12X15Н16 соответственно. В этом интервале деформаций  $\varepsilon$  - и  $\alpha'$  - мартенситы не зарождаются.

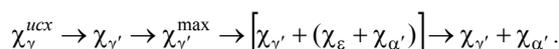
При последующих деформациях обнаружены начальные границы деформации 23,98 % (10X16Н13) и 26,53 % (12X15Н16), при которых возникают  $\varepsilon$  - мартенсит и первые порции  $\alpha'$  - мартенсита в количестве  $P_{\alpha'} = 0,011\%$  (10X16Н13) и  $P_{\alpha'} = 0,010\%$  (12X15Н16).

При деформациях свыше 40,24 % (10X16Н13) и 49,27 % (12X15Н16) исчезает  $\varepsilon$  - мартенсит, но продолжает накапливаться  $\alpha'$  - мартенсит, содержание которого при дальнейшем росте деформации вплоть до конечных значений 67,70 % (10X16Н13) и 70,03 % (12X15Н16), количество образовавшейся фазы составляет  $P_{\alpha'} = 0,251 \%$  и  $P_{\alpha'} = 0,110 \%$  соответственно.

В аустенитных хромоникелевых сталях при пластической деформации происходят не только структурно-фазовые превращения, принимающие участие в предполагаемой схеме

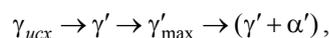


но и изменения атомно-магнитного состояния аустенита, т. е. удельной магнитной восприимчивости

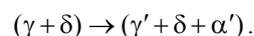


3. В аустенитных хромоникелевых сталях с крайне нестабильным аустенитом (после стандартной аустенизации), как не содержащих в исходном состоянии  $\delta$  - феррит (12X18Н10Т, 10,46 % масс. Ni), так и содержащих в исходном состоянии низкое содержание  $\delta$  - феррита (10X18Н9-У, 9,20 % масс. Ni), не обнаружено присутствие  $\varepsilon$  - мартенсита после деформационной обработки.

Структурно-фазовые превращения в сталях с крайне нестабильным аустенитом, не содержащих  $\delta$  - феррит, предположительно происходят по схеме:



а в содержащих феррит – по схеме:



Изменение магнитного состояния (магнитной восприимчивости) для сталей, не содержащих и содержащих  $\delta$  - феррит, осуществляется, соответственно, по сле-

дуючим схемам:

$$\chi_{\gamma_{\text{max}}} \rightarrow \chi_{\gamma'} \rightarrow \chi_{\gamma'_{\text{max}}} \rightarrow (\chi_{\gamma'} + \chi_{\alpha'}),$$

$$\chi_{\gamma} + \chi_{\delta} \rightarrow (\chi_{\gamma'} + \chi_{\delta} + \chi_{\alpha'}).$$

### Список литературы

1. Interplay of microstructure defects in austenitic steel with medium stacking fault energy / [C. Ullrich, R. Eckner, L. Kruger and etc.] // Materials Science & Engineering A. – 2016. – Vol. 649. – P. 390–399.
2. A. Das Magnetic properties of cyclically deformed austenite / A. Das // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2014. – Vol. 361. – P. 232–242.
3. Strain-induced  $\varepsilon/\alpha'$  martensitic transformation behavior and solid particle erosion resistance of austenitic Fe-Cr-C-Mn/Ni alloys / [M. C. Park, J. Y. Yun, G. S. Shin, S. J. Kim] // Tribology Letters. – 2014 – Vol. 54. – № 1. – P. 51–58.
4. E. Cakmak / E. Cakmak, S. Vogel, H. Choo // Effect of martensitic phase transformation on the hardening behavior and texture evolution in a 304L stainless steel under compression at liquid nitrogen temperature // Materials Science & Engineering A 589 (2014). – P. 235–241.
5. Лысак Л. И. Физические основы термической обработки стали / Л. И. Лысак, Б. И. Николин. – К. : Техника, – 1975. – 304 с.
6. Hans-Jocnen V. Mechanische Eigenschaften austenitischer, kohlenstoffarmer Cr-Ni-Stahl / V. Hans-Jocnen // Neue Hutte. – 1970. – Vol. 15. – № 4. – P. 234–237.
7. 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.
8. 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.
9. Снежной Г. В. Зарождение первых порций  $\varepsilon$  - и  $\alpha'$  - мартенситов деформации в аустенитных хромоникелевых сталях / Г. В. Снежной, В. Г. Мищенко, В. Л. Снежной // Сб. научных трудов «Стародубовские чтения 2015». Серия «Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2015. – С. 307–313.
10. Снежной Г. В. Магнитное состояние аустенита вблизи истинной деформационной мартенситной точки хромоникелевых сталей аустенитного класса / Г. В. Снежной // ФММ. – 2011. – Т. 111. – № 6. – С. 599–604.
11. Снежной Г. В. О возможности контроля малых деформаций аустенитных хромоникелевых сталей магнитометрическим методом / Г. В. Снежной // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 9(76). – С. 131–135.
12. Сніжної Г. В. Магнетна поведінка аустеніту на початку утворення мартенситу деформації в криці 10X18H9-Y / Г. В. Сніжної // Фізика і хімія твердого тіла. – 2011. – Т. 12. – № 3. – С. 748–752.
13. Снежной Г. В. О видах и границах состояний стабильного и нестабильного аустенита Fe-Cr-Ni сталей / Г. В. Снежной, В. Е. Ольшанецкий, В. Л. Снежной // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2015. – № 1. – С. 7–13.
14. Снежной Г. В. Интегральный физический метод идентификации  $\alpha$  - фазы в аустенитных хромоникелевых сталях / Г. В. Снежной, В. Г. Мищенко, В. Л. Снежной // Литье и металлургия. – 2009. – № 3(52). – С. 241–244.
15. Сніжної Г. В. Автоматизована установка для визначення магнетної сприйнятливості криць та стопів / Г. В. Сніжної, Є. Л. Жавжаров // зб. наук. праць «Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Радіотехніка. Радіоапаратобудування». – 2012. – № 49. – С. 136–141.
16. О физической природе мартенситной точки / [В. Л. Снежной, Ф. Д. Мирошниченко, В. Г. Каниболоцкий, П. А. Малинен] // ФММ. – 1971. - Т. 31. - № 1. – С. 158–161.
17. Ольшанецкий В. Е. О физической трактовке мартенситной точки / В. Е. Ольшанецкий, В. Л. Снежной // ФММ. – 1973. – Т. 36. – № 4. – С. 894–896.
18. Гудремон Э. Специальные стали / Гудремон Э. – М. : Металлургия. – Т. 1, 2. – 1959. – 1638 с.
19. Магнитный контроль фазового состава трехфазных хромоникелевых сталей / [М. Б. Ригмант, А. П. Ничипурок, М. К. Корх, М. Миховски] // Дни на безразрушительный контрол 2012, Сборник доклады. Юни 2012, България. Научни известия на НТСМ, год. XX, бр.1(133), 2012 (ISSN 1310-3946). – С. 31–37. – рус.

Одержано 14.11.2016

### Сніжної Г.В., Сніжної В.Л., Ольшанецький В.Ю. Про особливості утворення і трансформації $\varepsilon$ - мартенситу при пластичній деформації аустенітних хромонікелевих сталей

*Досліджено фазові перетворення в хромонікелевих сталях зі стабільним, помірно нестабільним і нестабільним аустенітом при деформації стисненням. Показано, що при певних тисках в аустеніті може утворюватися як  $\alpha'$  - мартенсит, так і проміжний  $\varepsilon$  - мартенсит, що передує його появи.*

**Ключові слова:** сталь, деформація, аустеніт,  $\alpha'$  - мартенсит,  $\varepsilon$  - мартенсит, магнітна сприйнятливість.

### Snezhnoi G., Snezhnoi V., Ol'shanetskiy V. On peculiarities of the formation and transformation of $\varepsilon$ - martensite during plastic deformation of austenitic chromium-nickel steels

*Phase transformations in chromium-nickel steel with a stable, moderately unstable and unstable austenite during deformation compression were investigated. During plastic deformation in the austenite can form both  $\alpha'$  - martensite and prior to its appearance intermediate  $\varepsilon$  - martensite.*

**Key words:** steel, deformation, austenite,  $\alpha'$  - martensite,  $\varepsilon$  - martensite, magnetic susceptibility.