

УДК 669.15:537.621.4:620.193.4

## ЗАРОЖДЕНИЕ ПЕРВЫХ ПОРЦИЙ $\varepsilon$ - И $\alpha'$ -МАРТЕНСИТОВ ДЕФОРМАЦИИ В АУСТЕНИТНЫХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЯХ

СНЕЖНОЙ Г.В. <sup>1\*</sup>, к.ф-м.н., доц.,  
МИЩЕНКО В.Г. <sup>2</sup>, д.т.н., проф.,  
СНЕЖНОЙ В.Л. <sup>3</sup>, к.ф-м.н., доц.

<sup>1\*</sup> Кафедра микро- и нанoeлектроники, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (061) 764-67-33, e-mail: [snow@zntu.edu.ua](mailto:snow@zntu.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-1452-0544

<sup>2</sup> Кафедра прикладной физики, Запорожский национальный университет, ул. Жуковского 66, 69600, Запорожье, Украина, 69600, ORCID ID: 0000-0003-0992-478X

<sup>3</sup> Кафедра прикладной физики, Запорожский национальный университет, ул. Жуковского 66, 69600, Запорожье, Украина, ORCID ID: 0000-0001-6901-9920

**Аннотация.** *Цель.* Экспериментально зафиксировать первые порции зарождающихся парамагнитного  $\varepsilon$ - и ферромагнитного  $\alpha'$ -мартенситов при одноосной пластической деформации сжатием умеренно нестабильного аустенита хромоникелевой стали 12X15H16. *Методика.* Для нахождения зависимости магнитной восприимчивости аустенизированной исследуемой стали от степени деформации  $K$  и определения весьма низких содержаний зарождающегося  $\alpha'$ -мартенсита деформации использовался чувствительный магнитометрический метод, учитывающий влияние намагниченности парамагнитного аустенита. Неучет намагниченности парамагнитного аустенита приводит к значительным погрешностям определения весьма низкого количества  $\alpha'$ -фазы, например, ошибка составляет более 1000 % при содержании  $\alpha'$ -фазы 0.005 %, 80 % – при 0.1 % и лишь при наличии 2.5 ... 3.0 % ошибка достигает ~3 %. *Результаты.* Установлено, что в стали 14X17H18 со стабильным аустенитом при пластической деформации сжатием ( $K=0..67$  %) парамагнитная восприимчивость увеличилась на 4 % и при этом не обнаружено  $\gamma \rightarrow \alpha'$  превращение. В стали 12X15H16 с умеренно нестабильным аустенитом выявлено в зависимости от степени относительной деформации  $K$  три области: 1 – в процессе увеличения пластической деформации ( $K=0..26$  %) возрастает магнитное состояние аустенита  $\gamma \rightarrow \gamma'$ , которое описывается увеличением парамагнитной восприимчивости аустенита на 8 % до постоянного максимального значения  $\chi_{\gamma'}^{\max}$ ; 2 – при последующем увеличении деформации ( $K=26.5 \dots 44$  %) в полученной парамагнитной аустенитной матрице зарождаются первые порции парамагнитного  $\varepsilon$ - и ферромагнитного  $\alpha'$ -мартенситов деформации ( $\gamma'^{\max} \rightarrow \varepsilon + \gamma' + \alpha'$ ), в этой области количество возникающего  $\alpha'$ -мартенсита зафиксировано  $P_{\alpha'} = 0.01 \dots 0.025$  %; 3 – при дальнейшей деформации ( $K=49 \dots 70$  %) происходит превращение парамагнитных фаз  $\varepsilon$  и  $\gamma'$  в исходное максимальное парамагнитное состояние  $\gamma'^{\max}$  аустенита ( $\varepsilon + \gamma' \rightarrow \gamma'^{\max}$ ,  $\gamma'^{\max} \rightarrow \alpha'$ ) и дальнейшее накопление количества  $\alpha'$ -мартенсита ( $P_{\alpha'} = 0.03 \dots 0.11$  %). *Научная новизна.* Предложена физическая модель зарождения первых порций  $\varepsilon$ - и  $\alpha'$ -мартенситов деформации. *Практическая значимость.* Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании технологий деформационной обработки с целью улучшения физико-механических и служебных характеристик аустенитных хромоникелевых сталей.

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

## ЗАРОДЖЕННЯ ПЕРШІХ ПОРЦІЙ $\varepsilon$ - І $\alpha'$ -МАРТЕНСИТІВ ДЕФОРМАЦІЇ В АУСТЕНИТНИХ ХРОМОНИКЕЛЕВИХ СТАЛЯХ

СНЕЖНОЙ Г.В. <sup>1\*</sup>, к.ф-м.н., доц.,  
МИЩЕНКО В.Г. <sup>2</sup>, д.т.н., проф.,  
СНЕЖНОЙ В.Л. <sup>3</sup>, к.ф-м.н., доц.

<sup>1\*</sup> Кафедра мікро- і нанoeлектроніки, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061) 764-67-33, e-mail: [snow@zntu.edu.ua](mailto:snow@zntu.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-1452-0544

<sup>2</sup> Кафедра прикладної фізики, Запорізький національний університет, вул. Жуковського 66, 69600, Запоріжжя, Україна, 69600, ORCID ID: 0000-0003-0992-478X

<sup>3</sup> Кафедра прикладної фізики, Запорізький національний університет, вул. Жуковського 66, 69600, Запоріжжя, Україна, ORCID ID: 0000-0001-6901-9920

**Анотація.** *Мета.* Експериментально зафіксувати перші порції парамагнітного  $\varepsilon$ - і ферромагнітного  $\alpha'$ -мартенситів, які зароджуються при одноосній пластичній деформації стисненням помірно нестабільного аустеніту хромонікелевої сталі 12X15H16. *Методика.* Для знаходження залежності магнітної сприйнятливості аустенизованої досліджуваної сталі від ступеня деформації  $K$  і визначення дуже низьких вмістів  $\alpha'$ -мартенситу деформації, який зароджується, використовувався чутливий магнітометричний метод, що враховує вплив намагніченості парамагнітного аустеніту. Неврахування

намагніченості парамагнітного аустеніту призводить до значних похибок визначення низької кількості  $\alpha$ -фази, наприклад, похибка складає більше 1000 % при вмісті  $\alpha$ -фази 0.005 %, 80 % – при 0.1 % і лише за наявності 2.5 ... 3.0 % похибка досягає  $\sim 3$  %. **Результати.** Встановлено, що в сталі 14X17H18 зі стабільним аустенітом при пластичній деформації стисненням ( $K=0..67$  %) парамагнітна сприйнятливість збільшилась на 4 % і при цьому не виявлено  $\gamma \rightarrow \alpha'$  перетворення. У сталі 12X15H16 з помірно нестабільним аустенітом виявлено залежно від ступеня відносної деформації  $K$  три області: 1 – в процесі збільшення пластичної деформації ( $K=0 \dots 26\%$ ) зростає магнітний стан аустеніту  $\gamma \rightarrow \gamma'$ , який описується збільшенням парамагнітної сприйнятливості аустеніту на 8 % до постійного максимального значення  $\chi_{\gamma'}^{\max}$ ; 2 – при подальшому збільшенні деформації ( $K=26.5 \dots 44$  %) в отриманій парамагнітній аустенітній матриці зароджуються перші порції парамагнітного  $\varepsilon$ - і феромагнітного  $\alpha'$ - мартенситів деформації ( $\gamma'^{\max} \rightarrow \varepsilon + \gamma' + \alpha'$ ), у цій області зафіксовано кількість  $\alpha'$ -мартенситу  $P_{\alpha'} = 0.01 \dots 0.025\%$  що виникає; 3 – при подальшій деформації ( $K=49..70$  %) відбувається перетворення парамагнітних фаз  $\varepsilon$  і  $\gamma'$  у вихідний максимальний парамагнітний стан  $\gamma'^{\max}$  аустеніту ( $\varepsilon + \gamma' \rightarrow \gamma'^{\max}$ ,  $\gamma'^{\max} \rightarrow \alpha'$ ) і подальше накопичення кількості  $\alpha'$ - мартенситу ( $P_{\alpha'} = 0.03 \dots 0.11\%$ ). **Наукова новизна.** Запропоновано фізичну модель зародження перших порцій  $\varepsilon$ - і  $\alpha'$ - мартенситів деформації. **Практична значимість.** Отримані результати можуть бути використані при вдосконаленні технологій деформаційної обробки з метою поліпшення фізико-механічних і службових характеристик аустенітних хромонікелевих сталей.

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

## FORMATION OF THE FIRST PORTIONS OF $\varepsilon$ - AND $\alpha'$ - DEFORMATION-INDUCED MARTENSITE IN CHROMIUM-NICKEL STEELS OF THE AUSTENITIC CLASS

SNIZHNOI G.V. <sup>1\*</sup>, *Cand. Sc. (Phys. and Math.)*

MISHCHENKO V.G. <sup>2</sup>, *Dr. Sc. (Tech.)*

SNIZHNOI V.L. <sup>3</sup>, *Cand. Sc. (Phys. and Math.)*

<sup>1\*</sup> Department of micro- and nanoelectronics, State Higher Education Establishment “Zaporizhzhya National Technical University”, 64, Zhukovskogo str., Zaporizhzhya, 69063, Ukraine, phone: +38 (061) 764-67-33, e-mail: [snow@zntu.edu.ua](mailto:snow@zntu.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-1452-0544

<sup>2</sup> Department of Applied Physics, State Higher Education Establishment “Zaporizhzhya National University”, 66, Zhukovskogo str., Zaporizhzhya, 69600, ORCID ID: 0000-0003-0992-478X

<sup>3</sup> Department of Applied Physics, State Higher Education Establishment “Zaporizhzhya National University”, 66, Zhukovskogo str., Zaporizhzhya, 69600, ORCID ID: 0000-0001-6901-9920

**Abstract. Purpose.** The first portions of the emerging  $\varepsilon$ - paramagnetic and  $\alpha'$ - ferromagnetic martensite under uniaxial compression plastic deformation moderately unstable austenite chromium-nickel X12CrNi15-16 steel experimentally fix. **Methodology.** Dependence of the magnetic susceptibility of the steel from the degree of deformation  $K$  and amount of  $\alpha'$ - martensite deformation sensitive magnetometric method is found. This method influence of the magnetization of paramagnetic austenite into account. Neglecting the magnetization of paramagnetic austenite leads to significant errors in determining the very low number of  $\alpha$ - phase, for example, the error is more than 1000 % when the content of  $\alpha$ -phase 0.005 %, 80 % – at 0.1 %, and only in the presence of 2.5 ... 3.0 % error reaches about 3 %. **Findings.** In X14CrNi17-18 steel (stable austenite) during plastic deformation by compression ( $K=0..67$  %) the paramagnetic susceptibility increased by 4 % revealed. In this steel transformation  $\gamma \rightarrow \alpha'$  is not found. In X12CrNi15-16 steel with unstable austenite moderately depending on the degree of deformation three regions of phase transformations found. The first region of deformation: while increasing the plastic deformation ( $K=0 \dots 26$  %) increase in the magnetic state of the austenite  $\gamma \rightarrow \gamma'$  and increase the paramagnetic susceptibility of austenite by 8 % to maximum value  $\chi_{\gamma'}^{\max}$  takes place. The second region: with increasing deformation ( $K=26.5 \dots 44$  %) in the paramagnetic austenite matrix formed the first portions of the paramagnetic  $\varepsilon$ - and ferromagnetic  $\alpha'$ - martensite deformation ( $\gamma'^{\max} \rightarrow \varepsilon + \gamma' + \alpha'$ ). In this region, the amount of deformation occurring  $\alpha'$ -martensite  $P_{\alpha'} = 0.01 \dots 0.025$  % is found. The third region: with increasing deformation ( $K=49 \dots 70$  %) is transformed paramagnetic phase  $\varepsilon$  and  $\gamma'$  to maximum paramagnetic state  $\gamma'^{\max}$  austenite ( $\varepsilon + \gamma' \rightarrow \gamma'^{\max}$ ,  $\gamma'^{\max} \rightarrow \alpha'$ ). Further accumulation of the amount of  $\alpha'$ -martensite ( $P_{\alpha'} = 0.03 \dots 0.11$  %) takes place. **Originality.** Physical model of the nucleation of the first portions  $\varepsilon$ - and  $\alpha'$ - martensite deformation is offered. **Practical value.** The results of research in improving the technology of deformation processing to improve the mechanical and service characteristics of austenitic chromium-nickel steels can be used.

**Keywords:** steel; austenite; magnetic susceptibility; deformation;  $\varepsilon$ -martensite;  $\alpha'$ -martensite

### Введение

Пластическая деформация аустенитных хромоникелевых сталей приводит к появлению двух типов мартенситных фаз: ферромагнитный  $\alpha'$ - и парамагнитный  $\varepsilon$ - мартенситы. Формирование  $\varepsilon$ -мартенсита в аустенитной матрице происходит при малых деформациях и  $\varepsilon$ -мартенсит почти полностью превращается в  $\alpha'$ -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 нержавеющей сталях:  $\gamma \rightarrow \varepsilon$ ,  $\gamma \rightarrow \alpha'$  или  $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha'$ . При помощи аналитического электронного микроскопа удалось зафиксировать мартенсит деформации 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]. Низкое количество парамагнитного  $\varepsilon$ -мартенсита и ферромагнитного  $\alpha'$ -мартенсита в аустенитных хромоникелевых сталях усложняет их обнаружение и количественное определение в объемных процентах [7]. Рентгеновская дифракция может быть использована для выявления и количественной оценки  $\varepsilon$ - и  $\alpha'$ -мартенситов, но ограничена объемным содержанием больше 5 % [8].

Магнитные измерения могут быть использованы для определения ферромагнитной  $\alpha$ -фазы без ограничения в количестве больше 3 %. При меньших содержаниях  $\alpha$ -фазы необходимо учитывать намагниченность парамагнитной матрицы. Иначе измерения приводят к сомнительным результатам. Например, ошибка составляет 1000% при содержании  $\alpha$ -фазы 0.005 %, 80 % - при 0.1 % и лишь при наличии 2.5 ... 3.0 % ошибка достигает ~3 % [9].

Аустенитные нержавеющей стали имеют разную устойчивость мартенситной реакции (образование  $\varepsilon$ - и  $\alpha'$ -мартенситов деформации), которая значительно зависит от содержания никеля. В работах [7, 10] представлены концентрационные области тех составов сталей, в которых образуется  $\varepsilon$ -мартенсит, что послужило основанием выплавить лабораторные плавки в литейном цехе Запорожского национального технического университета сталей 14X17H18 и 12X15H16 соответственно со стабильным и умеренно нестабильным аустенитом.

### Цель

Целью данной работы является экспериментально зафиксировать первые порции зарождающихся парамагнитного  $\varepsilon$ - и ферромагнитного  $\alpha'$ - мартенситов при одноосной пластической деформации сжатием умеренно нестабильного аустенита хромоникелевой стали 12X15H16.

### Материалы и методика исследований

Аустенизацию сталей 14X17H18 и 12X15H16 с химическим составом (табл.1) проводили при

температуре 1050°C (30 мин.) с последующей закалкой в воду. Образцы вырезали холодным механическим способом в виде прямоугольных параллелепипедов размером  $\sim 3 \times 3 \times 3 \text{ мм}^3$ , поверхности которых подвергали электрополировке.

Весьма низкие содержания мартенсита деформации  $P_\alpha$  (в объемных процентах) определяли чувствительным магнитометрическим методом, учитывающим намагниченность парамагнитной аустенитной матрицы [11].

Медленную холодную пластическую одноосную деформацию сжатием (усадка) осуществляли на специальной лабораторной установке. Степень остаточной деформации  $K$  рассчитывали с учетом толщин образцов до ( $d_0$ ) и после ( $d$ ) деформации ( $K=(d_0-d)/d_0 \cdot 100\%$ ).

Таблица 1

Химический состав исследуемых аустенитных материалов, масс.% /  
Chemical compositions of the investigated austenitic materials, wt. %

Элемент	Марка стали	
	14X17H18	12X15H16
C	0.14	0.12
Mn	1.48	1.57
Si	1.18	0.95
S	0.02	0.01
P	0.035	0.030
Cr	16.808	14.874
Ni	17.770	15.541
Mo	0.04	0.17
Cu	0.23	0.22

Сталь 14X17H18 до пластической одноосной деформации сжатием была полностью аустенизирована, что подтверждается горизонтальной линией  $\chi(1/H)$  (рис.1, прямая 1).

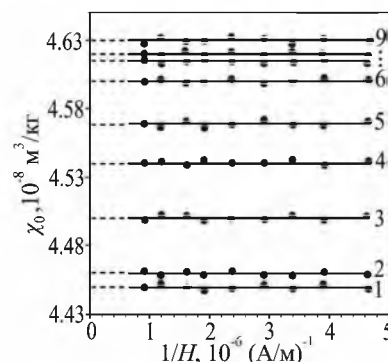


Рис. 1. Зависимость  $\chi(1/H)$  при различных значениях деформации стали 14X17H18. Деформация: 1 – 0, 2 – 10.0, 3 – 25.48, 4 – 34.73, 5 – 37.10, 6 – 48.20, 7 – 54.44, 8 – 63.79, 9 – 67.19 % /

Dependence  $\chi(1/H)$  on deformation in X14CrNi17-18 steel. Deformation: 1 – 0, 2 – 10.0, 3 – 25.48, 4 – 34.73, 5 – 37.10, 6 – 48.20, 7 – 54.44, 8 – 63.79, 9 – 67.19 %

При этом исходное значение парамагнитной восприимчивости  $\chi_\gamma = 4.45 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ . Деформации до 67.19 % (см. рис.1, прямая 9) приводили к росту парамагнитной восприимчивости  $\chi$  аустенита вплоть до максимального значения  $\chi_\gamma^{\text{max}} = 4.63 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг} = \text{const}$ . В этом интервале деформаций не было зафиксировано появление мартенсита деформации  $P_\alpha = 0$  (отсутствует наклон  $\chi(1/H)$ , рис.1).

Тенденция роста парамагнитной восприимчивости аустенита с увеличением степени деформации представлена на рис.2. Интервал деформаций до 50 % характеризуется приблизительно линейным ростом  $\chi(K)$  вплоть до появления площадки “насыщения” (эффект стабилизации) на соответствующей кривой. На основании этих данных можно сделать вывод о высокой стабильности стали 14X17H18 в отношении мартенситного превращения при деформации сжатием.

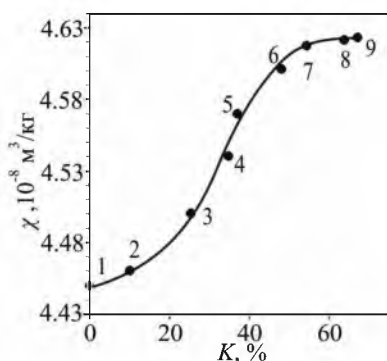


Рис. 2. Зависимость удельной парамагнитной восприимчивости  $\chi_\gamma$  аустенита от относительной пластической одноосной деформации сжатием  $K$  стали 14X17H18 /

*Dependence of the specific magnetic susceptibility  $\chi_\gamma$  of austenite on the relative plastic uniaxial compressive deformation  $K$  in X14CrNi17-18 steel*

Другая сталь 12X15H16 до пластической одноосной деформации на сжатие также была полностью аустенизирована, что опять-таки подтверждается горизонтальной линией  $\chi(1/H)$  (рис.3, прямая 1). При этом исходное значение парамагнитной восприимчивости аустенита составило  $\chi_\gamma = 3.75 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Деформация этой стали до 25.87 % (рис.3, прямая 7) привела к росту исходной парамагнитной восприимчивости от  $\chi_\gamma = 3.75 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  до максимального постоянного значения  $\chi_\gamma^{\text{max}} = 4.05 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  (табл.2).

Наблюдаемый эффект роста парамагнитной восприимчивости аустенита с увеличением степени деформации до появления первых порций мартенсита аналогичен измерениям  $\chi$  в стали 12X18H10T [12]. При дальнейшем увеличении деформации наблюдается наклон прямых  $\chi(1/H)$ , что свидетельствует о возникновении ферромагнитного

$\alpha'$ -мартенсита деформации, поскольку наклон прямых  $\chi(1/H)$  зависит от соотношения количеств аустенита и мартенсита.

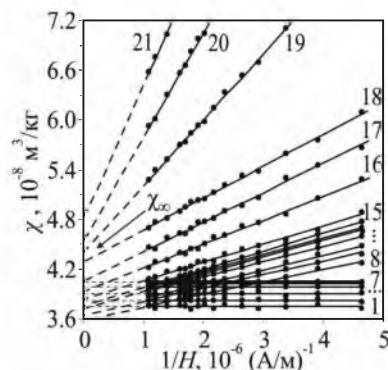


Рис. 3. Зависимость  $\chi(1/H)$  при различных значениях деформации стали 12X15H16. Деформация: 1–0, 2–3.89, 3–7.47, 4–15.88, 5–21.92, 6–23.92, 7–25.87, 8–26.53, 9–27.44, 10–28.34, 11–29.44, 12–31.55, 13–32.97, 14–35.75, 15–36.49, 16–40.85, 17–44.27, 18–49.21, 19–57.78, 20–66.19, 21–70.03 % /

*Dependence  $\chi(1/H)$  on deformation in X12CrNi15-16 steel. 1–0, 2–3.89, 3–7.47, 4–15.88, 5–21.92, 6–23.92, 7–25.87, 8–26.53, 9–27.44, 10–28.34, 11–29.44, 12–31.55, 13–32.97, 14–35.75, 15–36.49, 16–40.85, 17–44.27, 18–49.21, 19–57.78, 20–66.19, 21–70.03 %*

Так, при деформациях 26.53, 27.44 и 28.34 % были зафиксированы первые порции возникающего  $\alpha'$ -мартенсита деформации в количествах: 0.010, 0.011 и 0.012 % – прямые 8...10 (рис.3). Следует обратить внимание на то, что эти прямые, а также прямые с номерами 11...17 пересекли начальные горизонтальные прямые 1...7. Методом экстраполяции вышеуказанных прямых на ось  $\chi (H \rightarrow \infty)$  [11] получено для них значения результирующей удельной магнитной восприимчивости  $\chi_\infty$  парамагнитной матрицы и парапроцессной составляющей феррофазы  $\alpha'$ , т.е.  $\chi_\infty = \chi_{\text{matrix}} + \chi_\alpha = \chi_\epsilon + \chi_\gamma + \chi_\alpha$ , где  $\chi_{\text{matrix}} = \chi_\epsilon + \chi_\gamma$  – удельная магнитная восприимчивость парамагнитной матрицы (таблица 2).  $\epsilon$ -фаза парамагнитна [7, 13]. Эти значения  $\chi_\infty$  лежат ниже максимального значения парамагнитной восприимчивости аустенита  $\chi_\gamma^{\text{max}} = 4.05 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг} = \text{const}$ . Таким образом, можно

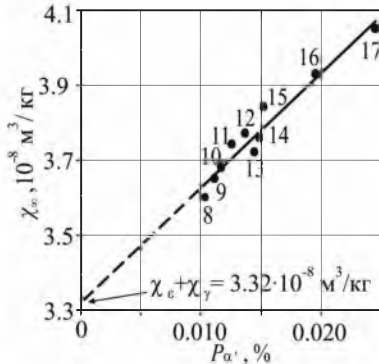
предположить, что в интервале деформаций от 26.53 до 44.27 % помимо ферромагнитной фазы ( $\alpha'$ -мартенсит) присутствует новая парамагнитная фаза с меньшим, по сравнению с предыдущим значением парамагнитной восприимчивости аустенита.

Методом экстраполяции из графической зависимости  $\chi_\infty$  от  $P_\alpha$  при  $P_\alpha \rightarrow 0$  [11] (для интервала деформаций от 26.53 до 44.27 %, рис.4) определили результирующее значение удельных парамагнитных восприимчивостей  $\epsilon$ - и  $\gamma$ -фаз:  $\chi_{\text{matrix}} = \chi_\epsilon + \chi_\gamma = 3.32 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ . Это значение оказалась меньше найденного нами значения парамагнитной восприимчивости исходного недеформированного аустенита

( $\chi_\gamma=3.75 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ ), что может свидетельствовать о возникновении новой  $\varepsilon$ -фазы, отличной от аустенита и  $\alpha'$ -мартенсита деформации [14].

Таблица 2

**Значения магнитных восприимчивостей и количества феррофазы в зависимости от степени пластической деформации  $K$  сжатием стали 12X15H16 /**  
**Dependence of magnetic susceptibilities and amount of ferrophase on deformation  $K$  in X12CrNi15-16 steel**



*Рис. 4. Зависимость результирующей удельной магнитной восприимчивости  $\chi_\infty$  (парамагнитной матрицы и парапроцессной составляющей ферромагнитной  $\alpha'$ -фазы) стали 12X15H16 от количества мартенсита деформации  $P_{\alpha'}$  для точек 8... 17 /*

*Dependence of resulting specific magnetic susceptibility  $\chi_\infty$  (for paramagnetic matrix and paraprocess ferromagnetic  $\alpha'$ -phase) in X12CrNi15-16 steel on amount of deformation-induced martensite  $P_{\alpha'}$  for points 8... 17*

То что, согласно нашим данным  $\varepsilon$ -мартенсит является парамагнитной фазой с парамагнитной восприимчивостью меньшей, чем у аустенита (т.е.  $\chi_\varepsilon < \chi_\gamma$ ), согласуется с данными для марганцевых сталей [13]. Количество Ni и Cr в рассматриваемой стали также должно способствовать согласно [7, 10] появлению  $\varepsilon$ -мартенсита. Таким образом, обнаруженная в эксперименте новая парамагнитная фаза в стали 12X15H16 является ни чем иным, как  $\varepsilon$ -мартенситом деформации. Так как числовое значение  $\chi_{\text{matrix}}=3.32 \cdot 10^{-8}$  меньше исходного значения  $\chi_\gamma = 3.75 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ , то можно предположить существование возможных двух вариантов превращений: 1 – деформированная парамагнитная матрица вначале превращается в  $\varepsilon$ - и  $\alpha'$ -фазы ( $\gamma^{\text{max}} \rightarrow \varepsilon + \alpha'$ ), для которой  $\chi_{\gamma'}^{\text{max}} \rightarrow \chi_\varepsilon + \chi_{\alpha'}$ ,  $\chi_\varepsilon < \chi_\gamma$ ; 2 – деформированная парамагнитная матрица превращается в  $\varepsilon$ -,  $\gamma'$ - и  $\alpha'$ - фазы ( $\gamma^{\text{max}} \rightarrow \varepsilon + \gamma' + \alpha'$ ), для которой  $\chi_{\gamma'}^{\text{max}} \rightarrow \chi_\varepsilon + \chi_{\gamma'} + \chi_{\alpha'}$ .

При деформации 44.27 % результирующая удельная магнитная восприимчивость  $\chi_\infty$  достигла уровня  $4.05 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ , что совпадает с максимальным значением парамагнитной восприимчивости деформированного аустенита (см.рис.3, прямая 7). Это позволяет высказать предположение, что при последующем силовом воздействии  $\varepsilon$ -фаза уже полностью трансформируется в  $\alpha'$ -мартенсит. Дальнейшая деформация до 70.03 % сопровождается только превращением  $\gamma^{\text{max}} \rightarrow \alpha'$  (линии  $\chi(I/H)$  не пересекают горизонтальные прямые).

№	$K$ , %	$\chi$ , $10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг} *$	$\chi_\infty$ , $10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$	$P_{\alpha'}$ , %	Фаза
1	0.00	3.75	3.75	0.000	$\gamma$
2	3.89	3.82	3.82	0.000	
3	7.47	3.90	3.90	0.000	
4	15.88	3.99	3.99	0.000	
5	21.92	4.03	4.03	0.000	
6	23.92	4.04	4.04	0.000	
7	25.87	4.05	4.05	0.000	
8	26.53	4.11	3.60	0.0104	$\gamma + \varepsilon + \alpha'$
9	27.44	4.20	3.65	0.0112	
10	28.34	4.26	3.68	0.0117	
11	29.44	4.36	3.74	0.0126	
12	31.55	4.45	3.77	0.0137	
13	32.97	4.44	3.72	0.0145	
14	35.75	4.50	3.76	0.0150	
15	36.49	4.59	3.84	0.0152	
16	40.85	4.90	3.93	0.0196	
17	44.27	5.26	4.05	0.0246	
18	49.21	5.59	4.29	0.0262	$\gamma + \alpha'$
19	57.78	7.11	4.40	0.0549	
20	66.19	8.79	4.53	0.0863	
21	70.03	10.25	4.81	0.1103	

(\* $H=2.55 \cdot 10^5 \text{ А/м}$  для образцов содержащих  $\alpha'$ -фазу)

Из графической зависимости  $\chi_\infty$  от  $P_{\alpha'}$  при  $P_{\alpha'} \rightarrow 0$  методом экстраполяции [11] (для интервала деформаций от 49.21 до 70.03 %, рис.5) определили значение удельной парамагнитной восприимчивости аустенита:  $\chi_\gamma = 4.10 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ . Это значение оказалось близким к найденному нами значению парамагнитной восприимчивости деформированного аустенита ( $\chi_{\gamma'}^{\text{max}} = 4.05 \cdot 10^{-8} = \text{const} \text{ м}^3/\text{кг}$ , см. рис.3, прямая 7). Можно предположить, что в процессе пластической деформации изменяется магнитное состояние аустенита, при этом его парамагнитная восприимчивость увеличивается до тех пор, пока не достигнет максимального значения. Для исследуемой стали 12X15H16 найденное максимальное значение составляет  $\chi_{\gamma'}^{\text{max}} = 4.10 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Таблица 3

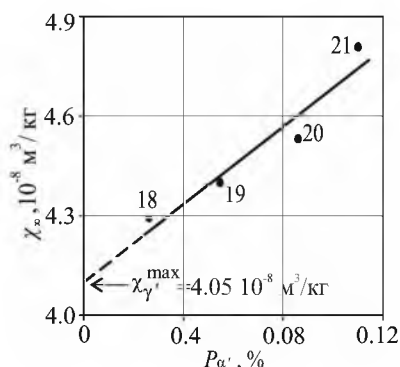


Рис. 5. Зависимость результирующей удельной магнитной восприимчивости  $\chi_{\alpha}$  (аустенита и парапроцессной составляющей  $\alpha'$ -фазы) стали 12X15H16 от количества мартенсита деформации  $P_{\alpha'}$  для точек 18... 21 /

Dependence of resulting specific magnetic susceptibility  $\chi_{\alpha}$  (for austenite and paraprocess ferromagnetic component  $\alpha'$ -phase) in X12CrNi15-16 steel on amount of deformation-induced martensite  $P_{\alpha'}$  for points 18... 21

Зависимость возникновения количества  $\alpha'$ -мартенсита от степени деформации стали 12X15H16 представлена на рис.6.

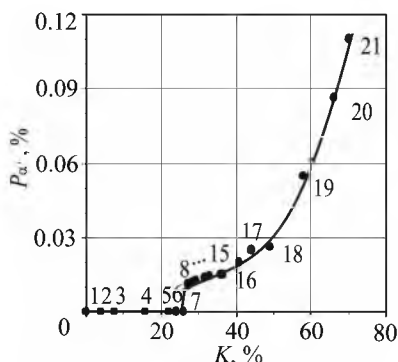


Рис. 6. Зависимость количества возникающего мартенсита деформации  $P_{\alpha'}$  от относительной пластической одноосной деформации сжатием  $K$  стали 12X15H16 для точек 1... 21 /

Dependence of amount of nucleated deformation-induced martensite  $P_{\alpha'}$  on deformation  $K$  in X12CrNi15-16 steel for points 1...21

**Научная новизна и практическая значимость**

На основании приведенных данных для стали 12X15H16 можно представить модель начальной стадии образования  $\epsilon$ - и  $\alpha'$ -мартенситов деформации, представленных в табл.3. Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании технологий деформационной обработки с целью улучшения физико-механических и служебных характеристик аустенитных хромоникелевых сталей.

**Схема зарождения первых порций  $\epsilon$ - и  $\alpha'$ -мартенситов деформации в аустенитных хромоникелевых сталях с умеренно нестабильным аустенитом /  
Scheme formation of the first portions of  $\epsilon$ - and  $\alpha'$ -martensite of deformation in chromium-nickel steel with a moderately unstable austenite**

Номер области, интервал деформации	Фазовые превращения и предельные значения магнитной восприимчивости	Комментарий
I обл. $K=0 \dots 26\%$	$\gamma \rightarrow \gamma^{\max}$ $\chi_{\gamma} \rightarrow \chi_{\gamma}^{\max}$ $\chi_{\gamma} = 3.75 \cdot 10^{-8} \text{ М}^3/\text{кг}$ $\chi_{\gamma}^{\max} = 4.05 \cdot 10^{-8} \text{ М}^3/\text{кг}$	Магнитно-атомное состояние парамагнитного аустенита, которое характеризуется магнитной восприимчивостью, возрастает и достигает постоянного максимального значения.
II обл. $K=26.5 \dots 44\%$	$\gamma^{\max} \rightarrow \epsilon + \gamma' + \alpha'$ $\chi_{\gamma}^{\max} \rightarrow \chi_{\epsilon} + \chi_{\gamma'} + \chi_{\alpha'}$ $\chi_{\epsilon + \gamma'} = 3.32 \cdot 10^{-8} \text{ М}^3/\text{кг}$ $P_{\alpha'} = 0.01 \dots 0.025\%$	При увеличении деформации в полученной аустенитной матрице зарождаются первые порции парамагнитного $\epsilon$ - и ферромагнитного $\alpha'$ -мартенситов деформаций.
III обл. $K=49 \dots 70\%$	$\epsilon + \gamma' \rightarrow \gamma^{\max}$ $\gamma^{\max} \rightarrow \alpha'$ $\chi_{\gamma}^{\max} \rightarrow \chi_{\alpha'}$ $P_{\alpha'} = 0.03 \dots 0.11\%$	При дальнейшей деформации происходит превращение парамагнитных фаз $\epsilon + \gamma'$ в исходное максимальное постоянное парамагнитное состояние $\gamma^{\max}$ аустенита и дальнейшее накопление количества $\alpha'$ -мартенсита.

**Выводы**

1. Экспериментально установлено, что в стали 14X17H18 со стабильным аустенитом при медленной пластической одноосной деформации сжатием от 0 до 67 % удельная парамагнитная восприимчивость увеличивается на 4 % и при этом  $\gamma \rightarrow \alpha'$  превращение не обнаружено, т.е. данная сталь является стабильной по отношению к пластической деформации до 67 %.

2. В стали с умеренно нестабильным аустенитом 12X17H16 в зависимости от степени деформации сжатием обнаружено три области: 1 – при переходе от исходного парамагнитного состояния аустенита  $\gamma$  ( $K=0$ ) к деформированному парамагнитному состоянию ( $\gamma \rightarrow \gamma^{\max}$ ) выявлено возрастание на 8 % исходной  $\chi_{\gamma}$  парамагнитной восприимчивости ( $K=26\%$ ) до постоянного максимального значения ( $\chi_{\gamma} \rightarrow \chi_{\gamma}^{\max}$ ); 2 – зарождение первых порций  $\epsilon$ - и  $\alpha'$ -мартенситов ( $K=26.5 \dots 44\%$ ) от 0.01 до 0.025 % ( $\gamma^{\max} \rightarrow \epsilon + \gamma' + \alpha'$ ); 3 – при дальнейшей деформации  $K=45 \dots 70\%$  происходит ( $\epsilon + \gamma' \rightarrow \gamma^{\max}$ ,  $\gamma^{\max} \rightarrow \alpha'$ ) накопление  $\alpha'$ -мартенсита деформации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ  
/ REFERENCES

1. Kurc A. The effect of ( $\gamma \rightarrow \alpha'$ ) phase transformation on microstructure and properties of austenitic Cr-Ni steels / A.Kurc, Z.Stoklosa // Archives of Materials science and Engineering. – 2010. – Vol.41. – №2. – P.85-94.  
[http://www.archivesmse.org/vol41\\_2/4123.pdf](http://www.archivesmse.org/vol41_2/4123.pdf)
2. Seetharaman V. Influence of the martensitic transformation on the deformation-behavior of an AISI-316 stainless-steel at low-temperatures / V.Seetharaman, R. Krishnan // Journal of materials science. – 1981. – Vol.16. – №2. – P.523-530.  
[http://journals1.scholarsportal.info.ezproxy.lakeheadu.ca/details/00222461/v16i0002/523\\_totmto3ssalt.xml](http://journals1.scholarsportal.info.ezproxy.lakeheadu.ca/details/00222461/v16i0002/523_totmto3ssalt.xml)
3. Roa J.J. Deformation mechanisms induced under high cycle fatigue tests in a metastable austenitic stainless steel / J.J. Roa, G.Fargas, E. Jiménez-Piqué, A. Mateo // Materials Science & Engineering A. – 2014. – Vol.597. – P.232-236.  
[http://journals2.scholarsportal.info.ezproxy.lakeheadu.ca/pdf/09215093/v597icomplete/232\\_dmiuhciamass.xml](http://journals2.scholarsportal.info.ezproxy.lakeheadu.ca/pdf/09215093/v597icomplete/232_dmiuhciamass.xml)
4. Das A. Estimation of deformation induced martensite in austenitic stainless steels / A. Das, S. Tarafder a, P. Chakraborti // Materials Science & Engineering A. – 2011. – Vol.529. – P.9-20.  
[http://journals1.scholarsportal.info.ezproxy.lakeheadu.ca/pdf/09215093/v529inone\\_c/9\\_eodimiass.xml](http://journals1.scholarsportal.info.ezproxy.lakeheadu.ca/pdf/09215093/v529inone_c/9_eodimiass.xml)
5. Tavares S.S.M. Deformation induced martensitic transformation in a 201modified austenitic stainless steel / S.S.M. Tavares, J.M. Pardal, M.J. Gomes da Silvab, H.F.G. Abreub, M.R. da Silvac // Materials characterization. – 2009. – Vol.60. – P.907-911.  
[http://journals1.scholarsportal.info.ezproxy.lakeheadu.ca/pdf/10445803/unassigned/nfp\\_dintia2mass.xml](http://journals1.scholarsportal.info.ezproxy.lakeheadu.ca/pdf/10445803/unassigned/nfp_dintia2mass.xml)
6. Arpan Das. Magnetic properties of cyclically deformed austenite. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2014. – Vol.361. – P.232-242.  
[http://journals2.scholarsportal.info.ezproxy.lakeheadu.ca/pdf/03048853/v361i0002\\_c/232\\_mpodca.xml](http://journals2.scholarsportal.info.ezproxy.lakeheadu.ca/pdf/03048853/v361i0002_c/232_mpodca.xml)
7. Лысак Л.И. Физические основы термической обработки стали / Л.И.Лысак, Б.И.Николин. – К.: Техника, – 1975. – 304 с.  
Lyisak L.I., Nikolin B.I. Fizicheskie osnovyi termicheskoy obrabotki stali [Physical basis of heat treatment of steel] – Kiev: Tehnika. 1975. 304 с.  
<http://www.twirpx.com/file/1053529/>
8. Tavares S.S.M. A magnetic study of the reversion of martensite  $\alpha'$  in a 304 stainless steel / S.S.M. Tavares, D. Fruchart, S. Miraglia // Journal of Alloys and Compounds. – 2000. – Vol.307. – P.311-317.  
[http://journals1.scholarsportal.info.ezproxy.lakeheadu.ca/pdf/09258388/v307i1-2/311\\_amsotmia3ss.xml](http://journals1.scholarsportal.info.ezproxy.lakeheadu.ca/pdf/09258388/v307i1-2/311_amsotmia3ss.xml)
9. Снежной В.Л., Мирошниченко Ф.Д., Каниболоцкий В.Г., Охромий Г.А. Влияние магнитного момента парамагнитной матрицы на определение низких

содержаний  $\alpha'$ -фазы в аустенитных сталях // ФММ. – 1970. – Т.30. – № 2. – С.363-366.

Snezhnoi V.L., Miroshnichenko F.D., Kanibolotsky V.G., Okhromy G.A. Vliyanie magnitnogo momenta paramagnitnoy matritsy na opredelenie nizkikh sodержaniy  $\alpha'$ -fazyi v auztenitnyih stalyah [Effect of magnetic moment of a paramagnetic matrix on the determination of low concentrations of  $\alpha'$ -phase in austenitic steels], Yekaterinbourg, Phys. Met. and Metallogr., 1970. 2/30. P.363-366.

[http://impo.imp.uran.ru/fmm/Electron/vol30\\_2](http://impo.imp.uran.ru/fmm/Electron/vol30_2)

10. Hans-Jocnen V. Mechanische Eigenschaften austenitischer, kohlenstoffarmer Cr-Ni-Stahl / V.Hans-Jocnen // Neue Hutte. – 1970. – Vol.15. – №4. – P.234-237.

11. Снежной Г.В. Интегральный физический метод идентификации  $\alpha'$ -фазы в аустенитных хромоникелевых сталях / Г.В.Снежной, В.Г.Миценко, В.Л.Снежной // Литье и металлургия. – 2009. – №3(52). – С.241-244.

Snizhnoi G.V., Mishchenko V.G., Snezhnoi V.L. Integralniy fizicheskiy metod identifikatsii  $\alpha'$ -fazyi v auztenitnyih hromonikelevyih stalyah [Integral physical method of  $\alpha'$ -phase identification in austenitic chrome-nickel steels], Minsk, Foundry Prod. and metall, 2009. 3/52. P.241-244.

<http://limrb.by/publications>

12. Snizhnoi G.V. Magnetic state of the deformed austenite before and after martensite nucleation in austenitic stainless steels // G.V.Snizhnoi, M.S.Rasshchupkyna / Journal of Iron and Steel Research, International. – 2012. – Vol.19. – № 6. – P.42-46.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1006706X12601253>

13. Дехтяр И.Я. Исследование магнитной восприимчивости мартенситных  $\epsilon$ - и  $\epsilon'$ -фаз в марганцевых сталях / И.Я. Дехтяр, Л.И. Лысак, Б.И. Николин, Р.Г. Федченко // ФММ. – 1967. – Т.24. – №1. – С. 79-83.

Dehtyar I.Ya, Lyisak L.I., Nikolin B.I., Fedchenko R.G. Issledovanie magnitnoy vospriimchivosti martensitnyih  $\epsilon$ - i  $\epsilon'$ -faz v margantsevyih stalyah [The study of the magnetic susceptibility of the martensitic  $\epsilon$ - and  $\epsilon'$ - phase in manganese steels], Yekaterinbourg, Phys. Met. and Metallogr., 1967. 1/24. P.79-83.

[http://impo.imp.uran.ru/fmm/Electron/vol24\\_1/main.html](http://impo.imp.uran.ru/fmm/Electron/vol24_1/main.html)

14. 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.

Ol'shanetskiy V.E., Snezhnoi G.V. O formirovaniy dvuh tipov martensitnyih faz pri plasticheskoy deformatsii auztenitnoy hromonikelevooy stali [About the formation of two types of martensite phases in the course of plastic deformation of austenitic chromium-nickel steel], Donetsk, High pressure physics and technics. 2013. 2/23. P.78-87.

[http://www.fti.dn.ua/site/wp-content/uploads/2014/02/2013\\_2\\_8.pdf](http://www.fti.dn.ua/site/wp-content/uploads/2014/02/2013_2_8.pdf)

Статья рекомендована к публикации д-ром физ.-мат. наук, проф. В. В. Погосовым (Украина); д-ром физ.-мат. наук, проф. В. М. Матюшиным (Украина)

Поступила в редколлегию 22.03.2015

Принята к печати 23.03.2015