

УДК 669.1:537.621.4:539.374.6

## ТРАНСФОРМАЦИЯ ЗАРОЖДАЮЩЕГОСЯ $\varepsilon$ -МАРТЕНСИТА В АУСТЕНИТНЫХ FE-CR-NI СТАЛЯХ ПРИ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

СНЕЖНОЙ Г.В., к.ф-м.н., доц.

Кафедра микро - и наноэлектроники, 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

**Аннотация. Цель.** Исследовать поведение зарождающихся  $\varepsilon$ - и  $\alpha'$ -мартенситов в аустенитных Fe-Cr-Ni сталях при температурно-силовых воздействиях. **Методика.** Для нахождения удельной магнитной восприимчивости использовали магнитометрические весы, автоматизированные микропроцессорной системой. Для определения весьма низких содержаний зарождающегося  $\alpha'$ -мартенсита деформации (от 0,005%) использовался чувствительный магнитометрический метод, учитывающий влияние намагниченности парамагнитной матрицы. **Результаты.** Обнаружен фазовый переход первого рода деформированного аустенита в, одновременно возникающие,  $\varepsilon$ - и  $\alpha'$ - мартенситы при определенной одноосной пластической деформации сжатием по схеме:  $\gamma_0 \rightarrow \gamma' \rightarrow \gamma'_{\max} \rightarrow (\varepsilon + \alpha')$ , где  $\gamma_0$  – исходное состояние полностью аустенизированной стали,  $\gamma'$  – промежуточные значения деформированного аустенита,  $\gamma'_{\max}$  – максимальное значение деформированного аустенита. Указанное фазовое превращение первого рода характеризуется скачком удельной магнитной восприимчивости от  $\chi'_{\max}$  до суммарного значения  $\chi = (\chi_{\gamma'} + \chi_{\varepsilon} + \chi_{\alpha'})$ , где  $\chi_{\gamma'}$ ,  $\chi_{\varepsilon}$  и  $\chi_{\alpha'}$  соответственно удельные магнитные восприимчивости деформированного аустенита  $\gamma'$ ,  $\varepsilon$ - и  $\alpha'$ - мартенсита. **Научная новизна.** Для стали 10X16N13 выявлено температурная и деформационная области существования  $\varepsilon$ -мартенсита. В этой стали при пластической деформации происходят не только структурно-фазовые превращения, но и изменения атомно-магнитного состояния аустенита в результате искажения ГЦК решетки. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы для изучения влияния  $\varepsilon$ -фазы на механические и служебные свойства аустенитных Fe-Cr-Ni сталей.

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

## ТРАНСФОРМАЦІЯ $\varepsilon$ -МАРТЕНСИТУ, ЯКИЙ ЗАРОДЖУЄТЬСЯ В АУСТЕНИТНІЙ FE-CR-NI СТАЛЯХ ПРИ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВИХ ВПЛИВАХ

СНЕЖНОЙ Г.В., к.ф-м.н., доц.

Кафедра мікро- і наноелектроніки, 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

**Анотація. Мета.** Дослідити поведінку  $\varepsilon$ - і  $\alpha'$ - мартенситів, які зароджуються в аустенітних Fe-Cr-Ni сталях, при температурно-силових впливах. **Методика.** Для знаходження питомої магнітної сприйнятливості використовували магнітометричні терези з автоматизованою мікропроцесорною системою. Для визначення низького вмісту  $\alpha'$ -мартенситу деформації (від 0,005%) використовувався чутливий магнітометричний метод, що враховує вплив намагніченості парамагнітної матриці. **Результати.** Встановлено фазове перетворення першого роду деформованого аустеніту, в якому виникають  $\varepsilon$ - і  $\alpha'$ - мартенсити при певній одноосній пластичній деформації стисненням, за схемою:  $\gamma_0 \rightarrow \gamma' \rightarrow \gamma'_{\max} \rightarrow (\varepsilon + \alpha')$ , де  $\gamma_0$  – вихідний стан повністю аустенизованої сталі,  $\gamma'$  – проміжне значення деформованого аустеніту,  $\gamma'_{\max}$  – максимальне значення деформованого аустеніту. Зазначене фазове перетворення першого роду характеризується стрибком питомої магнітної сприйнятливості від  $\chi'_{\max}$  до сумарного значення  $\chi = (\chi_{\gamma'} + \chi_{\varepsilon} + \chi_{\alpha'})$ , де  $\chi_{\gamma'}$ ,  $\chi_{\varepsilon}$  і  $\chi_{\alpha'}$ , відповідно питомі магнітні сприйнятливості  $\gamma'$  деформованого аустеніту,  $\varepsilon$ - і  $\alpha'$ - мартенситів. **Наукова новизна.** Для сталі 10X16N13 виявлено температурна і деформаційна області існування  $\varepsilon$ -мартенситів. У цій сталі при пластичній деформації відбуваються не тільки структурно-фазові перетворення, а також зміни атомно-магнітного стану аустеніту за рахунок спотворення ГЦК решітки. **Практична значимість.** Отримані результати можуть бути використані для вивчення впливу  $\varepsilon$ -фазы на механічні та службові властивості аустенітних Fe-Cr-Ni сталей.

*Ключові слова:* аустеніт,  $\varepsilon$ -мартенсит;  $\alpha'$ -мартенсит; магнітна сприйнятливості; хромонікелева сталь

# TRANSFORMATION OF $\varepsilon$ -MARTENSITE IN AUSTENITE Fe-Cr-Ni STEEL UNDER THE INFLUENCE OF TEMPERATURE AND DEFORMATION

SNIZHNOI G.V., Ph. D. (Phys. and Math.)

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

**Abstract. Purpose.** The behavior of the formed  $\varepsilon$ - and  $\alpha'$ - martensites in austenitic Fe-Cr-Ni steels under the influence of temperature and deformation is investigated. **Methodology.** To find the specific magnetic susceptibility, a magnetometric weighing-machine with a microprocessor system was used. A low amount of  $\alpha'$ - martensite (from 0.005%) was determined by a sensitive magnetometric method. This method the effect of the magnetization of the paramagnetic matrix takes into account. **Findings.** A phase transition of the first kind of deformed austenite in simultaneously appearing  $\varepsilon$ - and  $\alpha'$ -martensites at a certain uniaxial plastic deformation by compression was detected. The phase transformation according to scheme  $\gamma_0 \rightarrow \gamma' \rightarrow \gamma'_{\max} \rightarrow (\varepsilon + \alpha')$  is realized (where:  $\gamma_0$  – initial state of fully austenitic steel,  $\gamma'$  – intermediate values of deformed austenite,  $\gamma'_{\max}$  – maximum value of deformed austenite). This phase transformation by a jump in the specific magnetic susceptibility from  $\chi_{\gamma'_{\max}}$  to the total value of  $\chi = (\chi_{\gamma'} + \chi_{\varepsilon} + \chi_{\alpha'})$  is determined (where:  $\chi_{\gamma'}$ ,  $\chi_{\varepsilon}$  and  $\chi_{\alpha'}$  – specific magnetic susceptibilities of deformed austenite  $\gamma'$ ,  $\varepsilon$ - and  $\alpha'$ - martensite, respectively). **Originality.** For steel 10X16H13, the temperature and deformation regions of the existence of  $\varepsilon$ - martensite were detected. In this steel, during plastic deformation, structural-phase transformations and changes in the atomic-magnetic state of austenite due to distortion of the *fcc* lattice occur. **Practical value.** The above results for studying the effect of the  $\varepsilon$ -phase on the mechanical and service properties of austenitic Fe-Cr-Ni steels can be used.

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

## Введение

В настоящее время достигнуты значительные успехи при изучении  $\varepsilon$ -фазы в аустенитных сталях. Так, предполагаются такие, наиболее вероятные, схемы превращения  $\varepsilon$ -мартенсита в аустенитных нержавеющей сталях  $\gamma \rightarrow \varepsilon$ ,  $\gamma \rightarrow \alpha'$  или  $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha'$  [1-4]. Подобных примеров в научной литературе довольно много, однако нет единого мнения на природу зарождения и трансформации  $\varepsilon$ -мартенсита при температурно-силовых воздействиях.

Данная работа является продолжением исследований, проведенных авторами ранее [5-11], в которых при помощи термодинамического анализа рассмотрена физическая природа формирования  $\varepsilon$ - и  $\alpha'$ - мартенситов при деформации сжатием. Зарождение и дальнейшая трансформация  $\varepsilon$ -фазы в хромоникелевых сталях под влиянием температуры исследовано недостаточно [12]. При этом экспериментально не удается получить  $\varepsilon$ -мартенсит без одновременного с ним образования  $\alpha'$ -мартенсита деформации [12]. Так как  $\varepsilon$ -мартенсит и  $\gamma$ -аустенит являются парамагнитными фазами, то этот факт не позволяет стандартными магнитными методами отличить  $\varepsilon$ -мартенсит от аустенита в Fe-Cr-Ni сталях.

## Цель

В связи с вышесказанным возникла необходимость проведения дополнительных исследований с использованием особо чувствительного магнитометрического метода, позволяющего при весьма низких содержаниях ферромагнитного  $\alpha'$ -мартенсита деформации (от 0,005 %) [13], проследить поведение зарождающихся  $\varepsilon$ - и  $\alpha'$ - мартенситов в аустенитных Fe-Cr-Ni сталях при температурно-силовых воздействиях.

## Материал

Согласно магнитометрической диаграмме видов стабильных и нестабильных сталей [10] была выбрана с умеренно нестабильным аустенитом сталь 10X16H13 с химическим составом (масс%): C-0,13; Cr-15,83; Ni-13,70; Mn-1,37; Si-1,07; S-0,01; P-0,03; W-0,04; Mo-0,14; Cu-0,24; Fe-ост. [14].

## Методика и результаты

Аустенизацию стали проводили при температуре 1050°C (30 мин.) с последующей закалкой в воду. Образцы вырезали холодным механическим способом в виде прямоугольных параллелепипедов размером  $\sim 3 \times 3 \times 3$  мм<sup>3</sup>. Для устранения возможных ферромагнитных включений, которые могли бы повлиять на чистоту эксперимента, поверхности образцов подвергали шлифовке и электрополировке.

Удельную магнитную восприимчивость  $\chi$  и весьма низкое содержание  $\alpha'$ -мартенсита деформации  $P_{\alpha'}$  (в объемных процентах) определяли чувствительным магнитометрическим методом [13, 15]. Степень остаточной одноосной пластической деформации сжатием  $D$  рассчитывали с учетом толщин образцов до ( $d_0$ ) и после ( $d$ ) деформации ( $D=(d_0-d)/d_0 \cdot 100\%$ ). Нагрев образцов проводился в аргоне со скоростью  $\sim 5^\circ\text{C}/\text{мин}$ .

Сталь до пластической одноосной деформации сжатием была полностью аустенизирована, что подтверждается горизонтальной линией  $\chi(1/H)$  [5] и имела при комнатной температуре исходную удельную парамагнитную восприимчивость  $\chi_0 = 3,58 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ . Затем образец деформировали одноосным сжатием от 0 до 68 %.

Анализ полученных результатов зависимости удельной восприимчивости  $\chi$  образца исследуемой стали от степени пластической деформации  $D$  показывает (рис.1), что деформация в пределах 0...22,6 % (точки 1...5 на кривой рис.1) приводит к изменению магнитного состояния, т.е. исходное недеформированное парамагнитное состояние аустенита ( $\gamma$ ) с  $\chi_0 = 3,58 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  непрерывно переходит в деформированные парамагнитные состояния  $\gamma'$ , достигая максимального значения  $\chi_{\gamma'_{\max}} = 4,11 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ , вследствие искажения ГЦК решетки, по схеме:

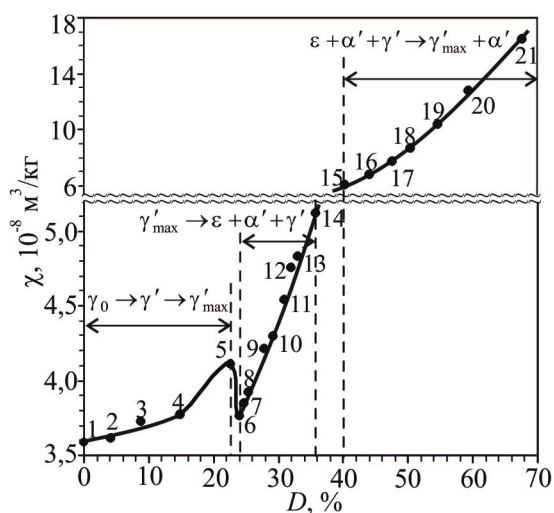
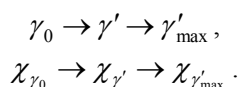
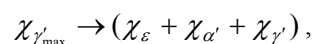
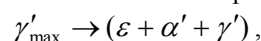


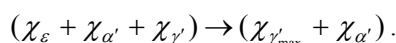
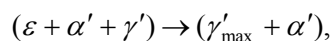
Рис. 1. Зависимость удельной магнитной восприимчивости  $\chi$  от степени деформации  $D$  стали 10X16H13 в магнитном поле  $H=2,95 \cdot 10^5 \text{ А/м}$ . Точками показано номер степени деформации образца / Dependence of the specific magnetic susceptibility  $\chi$  from degree of deformation  $D$  of the steel 10X16H13 in magnetic field  $H=2,95 \cdot 10^5 \text{ А/м}$ . The dots represent number the degree of deformation

При  $D=22,69...23,98 \%$ , наблюдается резкий спад кривой  $\chi(D)$  от  $\chi_{\gamma'_{\max}} = 4,11 \cdot 10^{-8}$  до  $3,76 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  (точки 5, 6 на рис.1), т.е. происходит фазовый переход 1-го рода. В точке 6 зафиксировано первые порции одновременно возникающих  $\varepsilon$ - и  $\alpha'$ -мартенситов ( $P_{\alpha'}=0,0105 \%$ ), что подтверждается появлением наклона прямых  $\chi(1/H)$  при  $D=23,98...35,70 \%$  и их пересечением горизонтальных прямых  $\chi(1/H)$  при  $D=0...22,69 \%$  для деформируемого парамагнитного аустенита [5]. После точки 14 ( $D>35,70 \%$ ) исчезает  $\varepsilon$ -мартенсит (отсутствует указанное пересечение), при этом  $\alpha'$ -мартенсит в последующих точках 15...21 продолжает накапливаться до  $P_{\alpha'}=0,25 \%$  ( $D=67,70 \%$ ).

Отсюда следует, что в интервале  $D=23,98...35,70 \%$  (точки 6...14) зарождается, трансформируется и исчезает  $\varepsilon$ -мартенсит по схеме:



а при больших деформациях  $D=40,24...67,70 \%$  (точки 15...21) без присутствия  $\varepsilon$ -мартенсита по схеме:



Еще одним внешним фактором, который эффективно влияет на прямое и обратное мартенситное превращение является температура. С этой целью был подготовлен деформированный образец соответствующий интервалу деформаций 23,98...29,27 % (точки 6...10, см. рис.1). Такой образец, полученный при деформации  $D=26,58 \%$ , содержал  $\varepsilon$ - и  $\alpha'$ -мартенситы ( $P_{\alpha'}=0,0147 \%$ ), при комнатной температуре  $20^\circ\text{C}$  удельная магнитная восприимчивость которого равнялась  $4,17 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  в магнитном поле  $H=2,95 \cdot 10^5 \text{ А/м}$ .

На рис. 2 представлены температурные зависимости удельной магнитной восприимчивости образцов в магнитном поле  $H=2,95 \cdot 10^5 \text{ А/м}$ : кривая 1 – для исходного недеформированного образца ( $D=0$ ); кривая 2 – для деформированного образца ( $D=26,58 \%$ ).

Кривая 1 соответствует недеформированной однофазной стали 10X16H13, содержащей аустенит, для которой  $\chi_0 = 3,58 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ . При нагреве от комнатной температуры до  $450^\circ\text{C}$  наблюдается только магнитное превращение как для парамагнетика по закону Кюри. Эта кривая приведена для сравнения с кривой 2. Совсем другой характер имеет кривая 2 для этой же стали, но содержащей в исходном состоянии парамагнитные  $\varepsilon$ -фазу (мартенсит деформации) и деформированную  $\gamma'$ -фазу (аустенит), ферромагнитную  $\alpha'$ -фазу (мартенсит деформации). Поэтому, результирующая удельная магнитная восприимчивость  $\chi = (\chi_{\varepsilon} + \chi_{\gamma'} + \chi_{\alpha'})$  будет

зависеть от количества названных фаз и их поведения от температуры. Так как исходное количество фаз в образце после деформации  $P_{\varepsilon} < 15$  [12] и  $P_{\alpha'} = 0,014$  %, то  $P_{\gamma'} \geq 85$  %, т.е. преобладающей фазой является аустенит. При этом необходимо учесть, что при содержании критического значения  $\alpha$ -фазы  $P_{\alpha} \approx 0,06$  % магнитные моменты мартенсита и аустенита приблизительно равны [13].

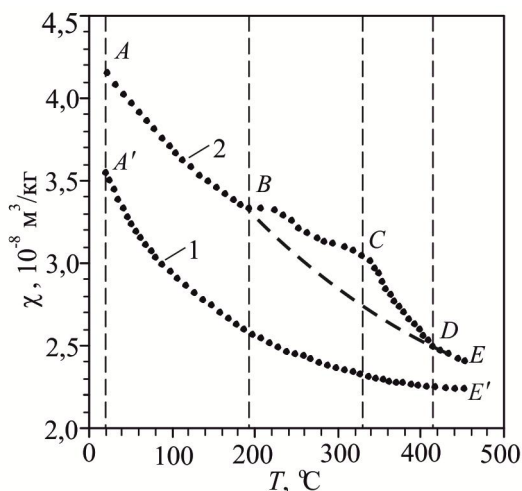


Рис. 2. Зависимости удельной магнитной восприимчивости  $\chi$  от температуры образцов стали 10X16H13 в магнитном поле  $H = 2,95 \cdot 10^5$  А/м: 1 – исходный образец ( $D=0$ ); 2 – деформированный образец ( $D=26,58$  %), содержащий  $\varepsilon$ - и  $\alpha'$ -мартенситы деформации / Dependence of the specific magnetic susceptibility  $\chi$  from temperature  $T$  of the steel 10X16H13 in magnetic field  $H = 2,95 \cdot 10^5$  А/м: 1 – sample before deformation ( $D=0$ ); 2 – deformed sample ( $D=26,58$  %), containing  $\varepsilon$ - and  $\alpha'$ -martensites of deformation

На участке  $AB$  кривой 2 (температурный интервал 20...200°C) зависимость  $\chi(T)$  близка по форме к кривой 1, т.е. преобладающую роль на этом участке играет деформированный парамагнитный аустенит  $\gamma'$ . Начиная с температуры 195°C (точка  $B$ ) и дальнейшего повышения температуры до 417°C (точка  $D$ ) происходит  $\varepsilon \rightarrow \gamma$  превращение. Поскольку количество  $\varepsilon$ -фазы уменьшается, а количество  $\gamma$ -фазы увеличивается и  $\chi_{\varepsilon} < \chi_{\gamma}$ , то в начале наблюдается рост результирующей  $\chi$  до температуры 330°C (точка  $C$ ), а затем – спад  $\chi$  до температуры 417°C (точка  $D$ ).

С повышением температуры от 330°C происходит количественное уменьшение  $\varepsilon$ -мартенсита, усиливающее влияние изменения температуры на  $\chi_{\varepsilon}$  и  $\chi_{\alpha'}$ , что приводит к уменьшению  $\chi$  от точки  $C$  до точки  $D$ .

При температуре 417°C (точка  $D$ ) заканчивается  $\varepsilon \rightarrow \gamma$  превращение, что находится в согласии с работой [16], в которой показано, что в нержавеющей стали содержащей 16 % Cr и 12 % Ni указанный переход заканчивается при 400°C.

Температурная область этого перехода зависит от концентрации легирующих элементов (Cr, Ni и др.), предварительной термообработки и находится в области 180...400°C [12]. При этих температурах диффузия атомов химических элементов идет медленно, поэтому можно предположить, что  $\varepsilon \rightarrow \gamma$  превращение идет бездиффузионно по мартенситному механизму [12].

### Результаты

Для стали 10X16H13 обнаружена деформационная область перехода аустенита в  $\varepsilon$ - и  $\alpha'$ -мартенситы. Установлен температурный интервал существования  $\varepsilon$ -мартенсита.

### Научная новизна и практическая ценность

Для стали 10X16H13 выявлено температурная и деформационная области существования  $\varepsilon$ -мартенсита, которые могут быть использованы для изучения влияния  $\varepsilon$ -фазы на механические и служебные свойства.

### Выводы

На основании экспериментальных исследований влияния температурно-силовых факторов на трансформацию зарождающихся  $\varepsilon$ - и  $\alpha'$ -мартенситов в стали 10X16H13 получены следующие результаты:

1. Обнаружен фазовый переход 1-го рода аустенита в  $\varepsilon$ - и  $\alpha'$ -мартенситы, что подтверждается резким скачком удельной магнитной восприимчивости при пластической деформации сжатием ~23 %.

2. Установлена температурная область превращения  $\varepsilon$ -мартенсита в аустенит: начало 195°C, конец 420°C.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Tian Y. Deformation microstructure and deformation-Induced martensite in austenitic Fe-Cr-Ni alloys depending on stacking fault energy / Y. Tian, O. Gorbatov, A. Borgenstam, P. Hedstro // Metallurgical and materials transactions A – Physical metallurgy and materials science. – 2017. – Vol. 48A. – № 1. – P. 1-7.
2. 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.

3. Das A. Estimation of deformation induced martensite in austenitic stainless steels / A. Das, S. Tarafder, P. Chakraborti // *Materials Science & Engineering A*. – 2011. – Vol. 529. – P. 9-20.
4. Tavares S. S. M. Deformation induced martensitic transformation in a 201 modified 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.
5. 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. – Режим доступа: [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)
6. Снежной Г. В. Зарождение первых порций  $\epsilon$ - и  $\alpha'$ - мартенситов деформации в аустенитных хромоникелевых сталях / Г. В. Снежной, В. Г. Мищенко, В. Л. Снежной // *Строительство. материаловедение. машиностроение. Серия: Стародубовские чтения: сб. научн. тр. Приднепров. гос. акад. стр-ва и архитектуры*. – 2015. – № 80. – С. 307-313. – Режим доступа: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua>
7. Snezhnoi G. V. Magnetic state of austenite near the true deformation martensitic point of a chromium–nickel austenitic steel / G. V. Snezhnoi // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2011. – Vol. 111. – № 6. – P. 573-578. – Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0031918X11050152>
8. 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. – Режим доступа: <http://www.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/AKTT/2010/AKTT910/Snegnoy.pdf>
9. Сніжної Г. В. Магнетна поведінка аустеніту на початку утворення мартенситу деформації в криці 10X18H9-У / Г. В. Сніжної // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2011. – Т. 12. – № 3. – С. 748-752. – Режим доступу: [http://www.pu.if.ua/inst/phys\\_che/start/pccs/vol12/1203-32.pdf](http://www.pu.if.ua/inst/phys_che/start/pccs/vol12/1203-32.pdf)
10. 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 // *Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении*. – 2015. – № 1. – С. 7-13. – Режим доступа: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua>
11. Снежной Г. В. Об особенностях образования и трансформации  $\epsilon$ -мартенсита при пластической деформации аустенитных хромоникелевых сталей / Г. В. Снежной, В. Е. Ольшанецкий, В. Л. Снежной // *Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении*. – 2016. – № 2. – С. 8-15. – Режим доступа: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua>
12. Лысак Л. И. Физические основы термической обработки стали / Л. И. Лысак, Б. И. Николин. – К.: Техника, – 1975. – 304 с.
13. Снежной В. Л. 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 // *Физика металлов и материаловедение*. – 1970. – Т. 30. – № 2. – С. 363-366. – Режим доступа: [http://impo.imp.uran.ru/fmm/Electron/vol30\\_2](http://impo.imp.uran.ru/fmm/Electron/vol30_2)
14. Ol'shanetskii V. E. Structural and magnetic stability of austenite in chromium-nickel and manganese steels with cold deformation / V. E. Ol'shanetskii, G. V. Snezhnoi, V. N. Sazhnev // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2016. – Vol. 58. – № 5. – P. 311-317. – Режим доступа: <http://www.scilit.net/article/10.1007/s11041-016-0009-5>
15. Сніжної Г. В. Автоматизована установка для визначення магнетної сприйнятливості криць та стопів / Г. В. Сніжної, С. Л. Жавжаров // *Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія - Радіотехніка. Радіоапаробудування*. – 2012. – № 49. – С. 136-141. – Режим доступу: <http://radap.kpi.ua/radiotechnique/article/view/86>
16. Breedis J. The martensitic transformation in single crystals of iron-chromium-nickel alloys / J. Breedis, W. Robertson // *Acta Metallurgica*. – 1962. – Vol. 10. – №. 11. – P. 1077-1088.

## REFERENCES

1. 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. 48A, no. 1, pp. 1-7.
2. Kurc A. and 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.
3. Das A., Tarafder S., Chakraborti P. *Estimation of deformation induced martensite in austenitic stainless steels. Materials Science & Engineering A*. 2011, vol. 529, pp. 9-20.
4. Tavares S. S. M., Pardal J. M., Silvab M. J., Abreub H. F. G., Silvac M. R. *Deformation induced martensitic transformation in a 201 modified austenitic stainless steel. Materials characterization*. 2009, vol. 60, pp. 907-911.
5. Ol'shanetskii V.E. and Snizhnoi G.V. *O formirovanii dvuh tipov martensitnykh faz pri plasticheskoy deformatsii austenitnoy hromonikelevoy stali* [About the formation of two types of martensite phases in the course of plastic deformation of austenitic chromium-nickel steel]. *Fizika i tehnika vyisokikh davleniy* [High pressure physics and technics]. 2013, vol. 23, no.2, pp. 78-87. (in Ukrainian). Available at: [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)
6. Snizhnoi G. V., Mishchenko V. G., Snizhnoi V. L. *Zarozhdenie pervykh portsiy  $\epsilon$ - i  $\alpha'$ - martensitov deformatsii v austenitnykh hromonikelevykh stalyah* [Formation of the first portions of  $\epsilon$ - and  $\alpha'$ - deformation-induced martensite in chromium-nickel steels of the austenitic class]. *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie* – [Construction, materials science, mechanical engineering]. PDABA. Dnipropetrovsk, 2015, no. 80, pp. 307-313. (in Ukrainian). Available at: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua>
7. Snizhnoi 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. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0031918X11050152>
8. Snizhnoi G. V. *O vozmozhnosti kontrolya malyykh deformatsiy austenitnykh hromonikelevykh staley magnitometricheskim metodom* [On control of small deformations of austenite chromiumnickel steels magnetometrical method]. *Aviatsionno-*

- kosmicheskaya tehnika i tehnologiya* [Aviation-space engineering and technology]. 2010. no. 9(76), pp. 131-135. (in Ukrainian). Available at: <http://www.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/AKTT/2010/AKTT910/Snegnoy.pdf>
9. Snizhnoi G. V. *Mahnetna povedinka austenitu na pochatku utvorenniya martensytu deformatsiyi v krytsi 10Kh18N9-U* [Magnetic state of austenite in the early formation of deformation martensite in steel X10CrNiS189]. *Fizyka i khimiya tverdogo tila* [Physics and chemistry of solid state]. 2011, vol. 12, no. 3, pp. 748-752. (in Ukrainian). Available at: [http://www.pu.if.ua/inst/phys\\_che/start/pcss/vol12/1203-32.pdf](http://www.pu.if.ua/inst/phys_che/start/pcss/vol12/1203-32.pdf)
  10. Snizhnoi G. V., Olshanetskii V. E., Snizhnoi V. L. *O vidah i granitsah sostoyaniy stabilnogo i nestabilnogo austenita Fe-Cr-Ni staley* [Types and boundary of condition stable and unstable austenite Fe-Cr-Ni steels]. *Novyye materialy i tehnologii v metallurgii i mashinostroenii* [Innovative materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering]. 2015, no. 1, pp. 7-13. (in Ukrainian). Available at: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua>
  11. Snizhnoi G. V., Olshanetskii V. E., Snizhnoi V. L. *Ob osobennostyah obrazovaniya i transformatsii  $\epsilon$ -martensita pri plasticheskoy deformatsii austenitnykh hromonikelevykh staley* [On peculiarities of the formation and transformation of  $\epsilon$ -martensite during plastic deformation of austenitic chromium-nickel steels] *Novyye materialy i tehnologii v metallurgii i mashinostroenii* [Innovative materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering]. 2016, no. 2, pp. 8-15. (in Ukrainian). Available at: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua>
  12. Lyisak L.I., Nikolin B.I. *Fizicheskie osnovy termicheskoy obrabotki stali* [Physical basis of heat treatment of steel] – Kiev: Tehnika. 1975. 304 p. (in Ukrainian). Available at: <http://www.twirpx.com/file/1053529/>
  13. Snezhnoi V.L., Miroshnichenko F.D., Kanibolotsky V.G., Okhromy G.A. *Vliyanie magnitnogo momenta paramagnitnoy matritsy na opredelenie nizkikh soderzhanii  $\alpha$ -fazyi v austenitnykh stalyah* [Effect of magnetic moment of a paramagnetic matrix on the determination of low concentrations of  $\alpha$ -phase in austenitic steels]. *Fizika metallov i metallovedenie* [Phys. Met. and Metallogr.]. 1970, vol. 2, no. 30, pp. 363-366. (in Russian). Available at: [http://impo.imp.uran.ru/fmm/Electron/vol30\\_2](http://impo.imp.uran.ru/fmm/Electron/vol30_2)
  14. Ol'shanetskii V. E., Snizhnoi 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. Available at: <http://www.scilit.net/article/10.1007/s11041-016-0009-5>
  15. Snizhnoy G. V. and Zhavzharov E. L. *Avtomatyzovana ustanovka dlya vyznachennya mahnetnoyi spryynatlyvosti kryts' ta stopiv* [Automated equipment for determining the magnetic susceptibility of steels and alloys] *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyy instytut". Seriya - Radiotekhnika. Radioaparaturbuduvannya* [Bulletin of National technical university of Ukraine. Series Radiotechnique. Radioapparatus building]. 2012, no. 49, pp. 136-141. (in Ukrainian). Available at: <http://radap.kpi.ua/radiotechnique/article/view/86>
  16. Breedis J. and Robertson W. *The martensitic transformation in single crystals of iron-chromium-nickel alloys. Acta Metallurgica*. 1962, vol. 10, no. 11, pp. 1077-1088.

Стаття рекомендована до публікації д-ром. фіз.-мат. наук, проф. В.В. Погосовим (Україна), д-ром. фіз.-мат. наук, проф. В.М. Матюшиним (Україна)