

УДК 669.1:537.621.4:539.374.6

ТРАНСФОРМАЦИЯ ЗАРОЖДАЮЩЕГОСЯ ε -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, ORCID ID: 0000-0003-1452-0544

Аннотация. Цель. Исследовать поведение зарождающихся ε - и α' -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 α' -мартенсита деформации (от 0,005%) использовался чувствительный магнитометрический метод, учитывающий влияние намагничённости парамагнитной матрицы. **Результаты.** Обнаружен фазовый переход первого рода деформированного аустенита в, одновременно возникающие, ε - и α' - мартенситы при определенной одноосной пластической деформации сжатием по схеме: $\gamma_0 \rightarrow \gamma' \rightarrow \gamma'_{\max} \rightarrow (\varepsilon + \alpha')$, где γ_0 – исходное состояние полностью аустенизированной стали, γ' – промежуточные значения деформированного аустенита, γ'_{\max} – максимальное значение деформированного аустенита. Указанное фазовое превращение первого рода характеризуется скачком удельной магнитной восприимчивости от $\chi'_{\gamma'_{\max}}$ до суммарного значения $\chi = (\chi_{\gamma'} + \chi_{\varepsilon} + \chi_{\alpha'})$, где $\chi_{\gamma'}$, χ_{ε} и $\chi_{\alpha'}$ соответственно удельные магнитные восприимчивости деформированного аустенита γ' , ε - и α' - мартенсита. **Научная новизна.** Для стали 10X16N13 выявлено температурная и деформационная области существования ε -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 ε -фазы на механические и служебные свойства аустенитных Fe-Cr-Ni сталей.

Ключевые слова: аустенит, ε -мартенсит; α' -мартенсит; магнитная восприимчивость; хромоникелевая сталь

ТРАНСФОРМАЦІЯ ε -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, ORCID ID: 0000-0003-1452-0544

Анотація. Мета. Дослідити поведінку ε - і α' - 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 α' -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 ε - і α' - мартенсити при певній одноосній пластичній деформації стисненням, за схемою: $\gamma_0 \rightarrow \gamma' \rightarrow \gamma'_{\max} \rightarrow (\varepsilon + \alpha')$, де γ_0 – вихідний стан повністю аустенизованої сталі, γ' – проміжне значення деформованого аустеніту, γ'_{\max} – максимальне значення деформованого аустеніту. Зазначене фазове перетворення першого роду характеризується стрибком питомої магнітної сприйнятливості від $\chi'_{\gamma'_{\max}}$ до сумарного значення $\chi = (\chi_{\gamma'} + \chi_{\varepsilon} + \chi_{\alpha'})$, де $\chi_{\gamma'}$, χ_{ε} і $\chi_{\alpha'}$, відповідно питомі магнітні сприйнятливості γ' деформованого аустеніту, ε - і α' - мартенситів. **Наукова новизна.** Для сталі 10X16N13 виявлено температурна і деформаційна області існування ε -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 ε -фазы на механічні та службові властивості аустенітних Fe-Cr-Ni сталей.

Ключові слова: аустеніт, ε -мартенсит; α' -мартенсит; магнітна сприйнятливості; хромонікелева сталь

TRANSFORMATION OF ε -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, ORCID ID: 0000-0003-1452-0544

Abstract. Purpose. The behavior of the formed ε - and α' - 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 α' - 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 ε - and α' -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: γ_0 – initial state of fully austenitic steel, γ' – intermediate values of deformed austenite, γ'_{\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: $\chi_{\gamma'}$, χ_{ε} and $\chi_{\alpha'}$ – specific magnetic susceptibilities of deformed austenite γ' , ε - and α' - martensite, respectively). **Originality.** For steel 10X16H13, the temperature and deformation regions of the existence of ε - 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 ε -phase on the mechanical and service properties of austenitic Fe-Cr-Ni steels can be used.

Keywords: austenite; ε -martensite; α' -martensite; magnetic susceptibility; chromium-nickel steel

Введение

В настоящее время достигнуты значительные успехи при изучении ε -фазы в аустенитных сталях. Так, предполагаются такие, наиболее вероятные, схемы превращения ε -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 ε -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 ε - и α' - мартенситов при деформации сжатием. Зарождение и дальнейшая трансформация ε -фазы в хромоникелевых сталях под влиянием температуры исследовано недостаточно [12]. При этом экспериментально не удается получить ε -мартенсит без одновременного с ним образования α' -мартенсита деформации [12]. Так как ε -мартенсит и γ -аустенит являются парамагнитными фазами, то этот факт не позволяет стандартными магнитными методами отличить ε -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 α' -мартенсита деформации (от 0,005 %) [13], проследить поведение зарождающихся ε - и α' - 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 $\sim 3 \times 3 \times 3$ мм³. Для устранения возможных ферромагнитных включений, которые могли бы повлиять на чистоту эксперимента, поверхности образцов подвергали шлифовке и электрополировке.

Удельную магнитную восприимчивость χ и весьма низкое содержание α' -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 χ 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 (γ) с $\chi_0 = 3,58 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ непрерывно переходит в деформированные парамагнитные состояния γ' , достигая максимального значения $\chi_{\gamma'_{\max}} = 4,11 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, вследствие искажения ГЦК решетки, по схеме:

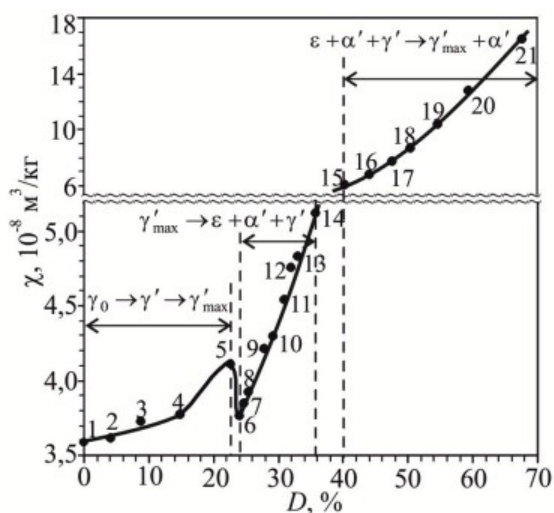
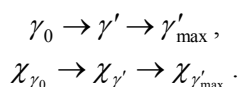
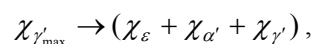
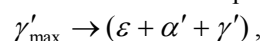


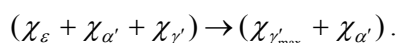
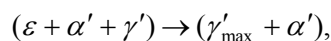
Рис. 1. Зависимость удельной магнитной восприимчивости χ от степени деформации D стали 10X16H13 в магнитном поле $H=2,95 \cdot 10^5 \text{ А/м}$. Точками показано номер степени деформации образца / Dependence of the specific magnetic susceptibility χ from degree of deformation D of the steel 10X16H13 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 ε - и α' -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 ε -мартенсит (отсутствует указанное пересечение), при этом α' -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 ε -мартенсит по схеме:



а при больших деформациях $D=40,24...67,70 \%$ (точки 15...21) без присутствия ε -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 ε - и α' -мартенситы ($P_{\alpha'}=0,0147 \%$), при комнатной температуре 20°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°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 ε -фазу (мартенсит деформации) и деформированную γ' -фазу (аустенит), ферромагнитную α' -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 α -фазы $P_\alpha \approx 0,06\%$ магнитные моменты мартенсита и аустенита приблизительно равны [13].

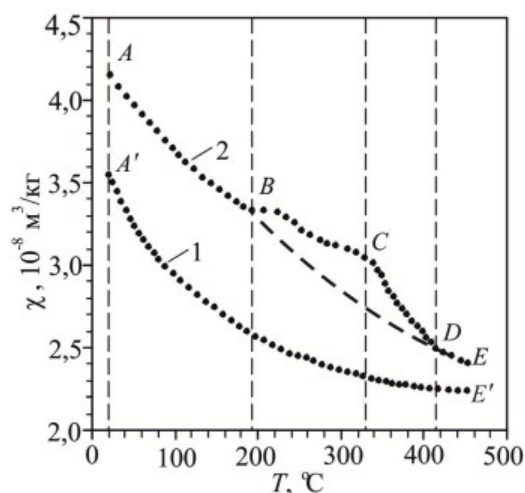


Рис. 2. Зависимости удельной магнитной восприимчивости χ от температуры образцов стали 10X16H13 в магнитном поле $H = 2,95 \cdot 10^5$ А/м: 1 – исходный образец ($D=0$); 2 – деформированный образец ($D=26,58\%$), содержащий ε - и α' -мартенситы деформации / Dependence of the specific magnetic susceptibility χ 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 ε - and α' -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 γ' . Начиная с температуры 195°C (точка B) и дальнейшего повышения температуры до 417°C (точка D) происходит $\varepsilon \rightarrow \gamma$ превращение. Поскольку количество ε -фазы уменьшается, а количество γ -фазы увеличивается и $\chi_\varepsilon < \chi_\gamma$, то в начале наблюдается рост результирующей χ до температуры 330°C (точка C), а затем – спад χ до температуры 417°C (точка D).

С повышением температуры от 330°C происходит количественное уменьшение ε -мартенсита, усиливающее влияние изменения температуры на χ_ε и $\chi_{\alpha'}$, что приводит к уменьшению χ 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 ε - и α' -мартенситы. Установлен температурный интервал существования ε -мартенсита.

Научная новизна и практическая ценность

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

Выводы

На основании экспериментальных исследований влияния температурно-силовых факторов на трансформацию зарождающихся ε - и α' -мартенситов в стали 10X16H13 получены следующие результаты:

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

2. Установлена температурная область превращения ε -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. Gorbатов, 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
6. Снежной Г. В. Зарождение первых порций ϵ - и α' - 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
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 ϵ -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 α -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
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
6. Snizhnoi G. V., Mishchenko V. G., Snizhnoi V. L. *Zarozhdenie pervykh portsiy ϵ - i α' - martensitov deformatsii v austenitnykh hromonikelevykh stalyah* [Formation of the first portions of ϵ - and α' - 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-*