

УДК 621.74

ЗАРОДЖЕННЯ МАРТЕНСИТУ ДЕФОРМАЦІЇ В ХРОМОНІКЕЛЕВИХ СТАЛЯХ АУСТЕНИТНОГО КЛАСУ

Г. В. СНИЖНОЙ

Запорізький національний технічний університет

Досліджено виникнення перших порцій мартенситу деформації за пластичного одновісного стиску сталей 12X18H10T і 12X18H9T, в яких у вихідному стані, відповідно, відсутній і присутній δ -ферит. Експериментально знайдені істинні деформаційні мартенситні точки ϵ_s . Виявлено, що в сталі 12X18H10T при $\epsilon < \epsilon_s$ існує однофазний стан (А), а при $\epsilon > \epsilon_s$ – двофазний (А+М); в сталі 12X18H9T при $\epsilon < \epsilon_s$ – двофазний стан (А+Ф), при $\epsilon > \epsilon_s$ – трифазний (А+Ф+М). Виявлено ефект збільшення намагнетченості парамагнетного аустеніту до виникнення мартенситу деформації.

Ключові слова: *магнетна сприйнятливність, аустеніт, деформація, мартенсит деформації, істинна деформаційна мартенситна точка.*

Аустенітні хромонікелеві сталі широко застосовують як конструкційний матеріал завдяки задовільному співвідношенню пластичності й міцності, високій корозійній та термічній стійкості. Деякі з них метастабільні і за пластичної деформації в них протікає мартенситне $\gamma \rightarrow \alpha'$ перетворення (α' – мартенсит деформації).

На $\gamma \rightarrow \alpha'$ перетворення впливає хімічний склад сталі, температура деформації, мікроструктура, магнетне поле, опромінення частинками і водень [1–6]. Магнетні методи не завжди дають змогу з достатньою точністю визначати вміст α' -фази в діапазоні 0...0,5%, тому отримані результати в цьому інтервалі слід сприймати з обережністю [5].

Численні експериментальні дослідження аустенітних хромонікелевих сталей показують, що утворення і накопичення мартенситу деформації починається тоді, коли досягається деяке критичне значення деформацій (напруження) і продовжується аж до моменту руйнування [5]. При цьому критичне значення (область) деформацій у літературних джерелах “плаває”, тобто не є однозначним. Виходячи з цього, мета роботи – експериментально визначити однозначне критичне значення відносної деформації стиску, за якого зароджується мартенсит деформації, коли у вихідному стані сталей повністю відсутній або присутній δ -ферит. Аналіз утворення мартенситу деформації за допомогою магнетних методів у слабomagнетних сталях ускладнюється через недостатню точність визначення дуже низького вмісту мартенситу деформації. Тому для вивчення початкової стадії $\gamma \rightarrow \alpha'$ перетворення в аустенітних хромонікелевих сталях використовували точніший метод, який враховує намагнетченість парамагнетної аустенітної матриці [7]. Неврахування намагнетченості парамагнетного аустеніту спричинює значні відносні похибки, наприклад, понад 1000% за вмісту α -фази $\sim 0,005\%$, 80% – за 0,1% і лише за вмісту α -фази близько 2,5...3,0% похибка досягає $\sim 3\%$.

Експериментальне дослідження. Для пластичної одновісної деформації на стиск вирізали холодним механічним способом зразки у вигляді прямокутних паралелепіпедів розміром $\sim 3 \times 3 \times 2$ mm³ і полірували електрохімічним способом. При

цьому намагались досягти максимальної паралельності граней зразків, які піддавали одновісному стиску. Ступінь пластичної деформації ε розраховували за відношенням товщин до і після деформації ($\varepsilon = (d_0 - d)/d_0$). Під час підготовки і випробування зразків ретельно стежили, щоб їх поверхня не забруднювалася феромагнетними домішками.

Кількість феромагнетної фази (α -фази) $P_{\alpha'}$ визначали за виразом [7]

$$P_{\alpha'} = \frac{\sigma_m}{\sigma_{\alpha}} \cdot 100\% = \frac{[\chi - \chi_{\infty}] \cdot H}{\sigma_{\alpha}} \cdot 100\% = \frac{[\chi - (\chi_0 + \chi_p)] \cdot H}{\sigma_{\alpha}} \cdot 100\%,$$

де σ_m – феромагнетна складова питомої намагненості насичення зразка; σ_{α} – питома намагненість насичення α -фази; χ – загальна питома магнетна сприйнятливості зразка; χ_{∞} – результуюча питома магнетна сприйнятливості χ_0 парамагнетного аустеніту зразка і парапроцесу χ_p α -фази зразка: $\chi_{\infty} = \chi_0 + \chi_p$; H – напруженість магнетного поля.

За експериментальними залежностями $\chi(1/H)$ визначали χ_{∞} методом екстраполяції [7] і за вказаною вище формулою – кількість феромагнетної фази в об'ємних процентах.

Досліджували промислові аустенітні сталі 12X18H10T (mass. %: 0,12 C; 1,505 Mn; 17,797 Cr; 10,867 Ni; 0,137 Mo; 0,304 Si; 0,486 Ti) і 12X18H9T (mass. %: 0,12 C; 1,316 Mn; 17,854 Cr; 9,420 Ni; 0,121 Mo; 0,250 Si; 0,252 Ti). Сталі відпалювали за температури 1323 K (30 min) і гартували у воді, після чого сталь 12X18H10T стала повністю однофазною з аустенітною структурою (A) (про що свідчить відсутність нахилу прямих залежностей питомої магнетної сприйнятливості χ від оберненої величини магнетного поля H) з $\chi_0 = 3,32 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, а сталь 12X18H9T – двофазною (A+Ф) з кількістю δ -фериту $P_{\delta} = 0,078\%$.

Аналіз результатів. Спочатку розглянемо однофазну (A) сталь 12X18H10T. Після експериментального знаходження питомої магнетної сприйнятливості χ будували графіки залежності χ від $1/H$ за різної відносної деформації ε (рис. 1). Як бачимо, для деформації до $\sim 8\%$ криві 1–7 не мають нахилу, що підтверджує відсутність мартенситу деформації, і лише, коли $\varepsilon > 11\%$, виникає α' -мартенсит (криві 8–14). Екстраполюючи криві на вісь ординат χ при $H \rightarrow \infty$, визначаємо χ_{∞} і обчислюємо кількість мартенситу $P_{\alpha'}$ в об'ємних процентах (див. таблицю). Із графіка залежності χ_{∞} від $P_{\alpha'}$ (рис. 2) для кривих 8–14 методом екстраполяції $P_{\alpha'} \rightarrow 0$ (мартенсит деформації відсутній) визначаємо питому магнетну сприйнятливості парамагнетного аустеніту $\chi_0 = 4,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$.

Аналіз таблиці показує, що зі збільшенням деформації ε від 0 до $\sim 8\%$ параметр χ_{∞} зростає від 3,32 до $4,35 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, значення яких збігаються з χ_0 у зв'язку з відсутністю $P_{\alpha'}$, тобто $\chi_{\infty} = \chi_0$. Відзначимо, що знайдене раніше значення $\chi_0 = 4,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, вочевидь, є максимальним значенням парамагнетного аустеніту для досліджуваної сталі до початку зародження мартенситу деформації.

Під час вивчення початкової стадії $\gamma \rightarrow \alpha'$ перетворення для випадку, коли у вихідному стані сталі 12X18H10T повністю відсутній δ -ферит, природно постає питання, в якій однозначній критичній точці ε_c починає виникати мартенсит деформації. Для цього побудуємо графік залежності відносної деформації стиску ε

Магнетна сприйнятливість і кількість ферофази залежно від ступеня деформації стиску зразка сталі 12X18H10T

№	$\varepsilon, \%$	$\chi, 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ($H = 3,42 \cdot 10^5 \text{ A/m}$)	$\chi_{\infty} = \chi_0 + \chi_p,$ $10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$		$P_{\alpha'}, \%$
			χ_0	χ_p	
1	0,00	3,33	3,32	0,0	0,0
2	1,01	3,40	3,39	0,0	0,0
3	2,03	3,50	3,50	0,0	0,0
4	3,80	3,68	3,67	0,0	0,0
5	5,06	3,90	3,91	0,0	0,0
6	6,58	4,10	4,11	0,0	0,0
7	8,10	4,35	4,35	0,0	0,0
8	11,80	7,93	5,70		0,066
9	12,86	10,00	6,30		0,109
10	13,67	11,90	6,93		0,147
11	15,54	16,38	8,21		0,241
12	16,41	18,66	8,62		0,296
13	17,22	20,90	9,86		0,326
14	18,48	25,60	11,40		0,419

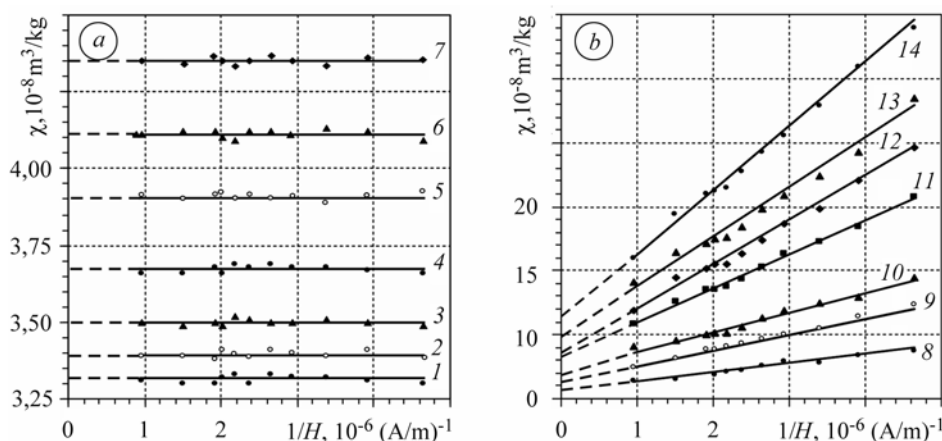


Рис. 1. Залежність $\chi(1/H)$ для різних значень деформації ε сталі 12X18H10T.
a: 1 – 0,00%; 2 – 1,01%; 3 – 2,03%; 4 – 3,80%; 5 – 5,06%; 6 – 6,58%; 7 – 8,10%;
b: 8 – 11,80%; 9 – 12,86%; 10 – 13,67%; 11 – 15,54%; 12 – 16,41%; 13 – 17,22%; 14 – 18,48%.

Fig. 1. Dependence of $\chi(1/H)$ for different values of deformation, ε , of 12X18H10T steel.
a: 1 – 0.00%; 2 – 1.01%; 3 – 2.03%; 4 – 3.80%; 5 – 5.06%; 6 – 6.58%; 7 – 8.10%;
b: 8 – 11.80%; 9 – 12.86%; 10 – 13.67%; 11 – 15.54%; 12 – 16.41%; 13 – 17.22%; 14 – 18.48%.

від питомої магнетної сприйнятливості χ досліджуваного зразка, наприклад, у магнетному полі $H = 3,42 \cdot 10^5 \text{ A/m}$ (рис. 3), використовуючи дані з таблиці. Загальна точка перетину кривих 1 і 2 (рис. 3) дає значення $\chi_s = 4,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ і $\varepsilon_s = 10,9\%$. Для фізичного трактування точок χ_s і ε_s побудуємо графічну залежність χ від $P_{\alpha'}$ (рис. 4) за даними таблиці. Якщо продовжити криву до перетину з віссю χ ($P_{\alpha'} \rightarrow 0$), отримаємо значення $\chi_s = 4,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, яке збігається із зна-

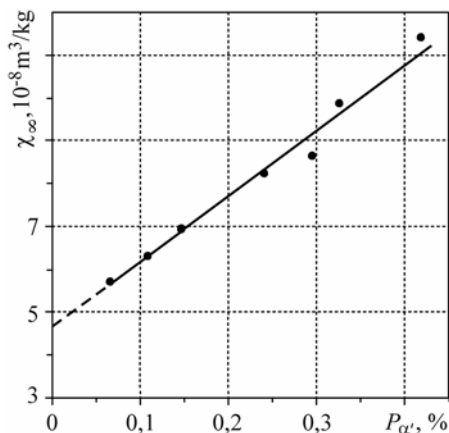
ченням χ_s , знайденим з графіка на рис. 3. Варто відзначити, що знайдене числове значення χ_s збігається із чисельним максимальним значенням χ_0 . Звідси випливає, що χ_s і ε_s – однозначна межа між аустенітом і сумішшю аустеніту та мартенситу деформації.

Рис. 2. Залежність результуючої питомої магнетної сприйнятливості χ_∞ (аустеніту і парапроцесу) сталі 12X18H10T від кількості утвореного мартенситу

$$P_{\alpha'} : \chi_0 = 4,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Fig. 2. Dependence of the resultant specific magnetic susceptibility, χ_∞ , (austenite and paraprocess) of 12X18H10T steel on the quantity of forming martensite

$$P_{\alpha'} : \chi_0 = 4.6 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}.$$



Називатимемо точку ε_s істинною деформаційною мартенситною точкою за аналогією з істинною температурною мартенситною точкою [8, 9] і яка, на відміну від критичної області деформації (напруження), однозначна. Багато дослідників критичну область (не точку) деформацій, як правило, визначають наближено зі залежності $P_{\alpha'}$ від ε , подібно кривій на рис. 5.

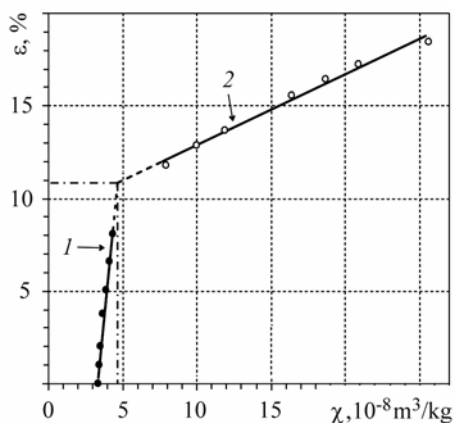


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Залежність відносної деформації стиску ε від питомої магнетної сприйнятливості χ ($H = 3,42 \cdot 10^5$ A/m) сталі 12X18H10T: 1 – для однофазного (A) стану; 2 – для двофазного (A+M). У точці перетину кривих $\varepsilon_s = 10,9\%$; $\chi_s = 4,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$.

Fig. 3. Dependence of relative compression deformation, ε , on the specific magnetic susceptibility χ ($H = 3.42 \cdot 10^5$ A/m) of 12X18H10T steel. 1 – for single-phase (A) state; 2 – for two-phase (A+M). At an intersection point of curves $\varepsilon_s = 10.9\%$; $\chi_s = 4.6 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$.

Рис. 4. Залежність питомої магнетної сприйнятливості χ ($H = 3,42 \cdot 10^5$ A/m) від кількості утвореного мартенситу деформації $P_{\alpha'}$ сталі 12X18H10T.

У точці перетину кривої з віссю $\chi_s = 4,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$.

Fig. 4. Dependence of the specific magnetic susceptibility, χ , ($H = 3.42 \cdot 10^5$ A/m) on the amount of forming martensite deformation, $P_{\alpha'}$, of 12X18H10T steel.

At a point of curve intersection with an axis $\chi_s = 4.6 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$.

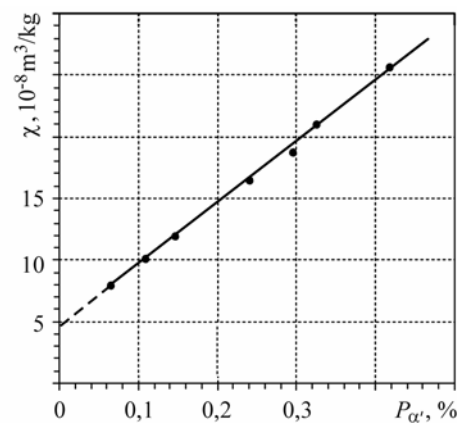


Рис. 4. Fig. 4.

Виявлено, що в області деформації стиску $\varepsilon = 0...11\%$ парамагнетизм аустеніту зростає приблизно на 30% (χ_0 збільшується від 3,33 до максимального значення $4,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$) (див. таблицю). Підвищення значення питомої магнетної сприйнятливості аустеніту для деформованих зразків за одновісного стиску, як і за одновісного розтягу [6], можливо, пов'язане з виникненням (в областях з високою внутрішньою напругою) поблизу точки ε_s феромагнетних кластерів, на базі яких виникають кристали феромагнетної α -фази.

Дослідження вихідної двофазної (A+Ф) аустенітної сталі 12X18H9T показали, що залежність $\varepsilon(\chi)$ має аналогічний характер (рис. 6) зі значеннями $\varepsilon_s = 2,4\%$ і $\chi_s = 8,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. Зменшення ε_s в сталі 12X18H9T порівняно зі сталлю 12X18H10T пояснюють присутністю домішок δ -фериту. В сталі 12X18H9T істинна деформаційна мартенситна точка ε_s вказує на те, що при $\varepsilon < \varepsilon_s$ існує двофазний стан (A+Ф), а при $\varepsilon > \varepsilon_s$ – трифазний (A+Ф+M). При цьому зі збільшенням ε зростає кількість мартенситу деформації.

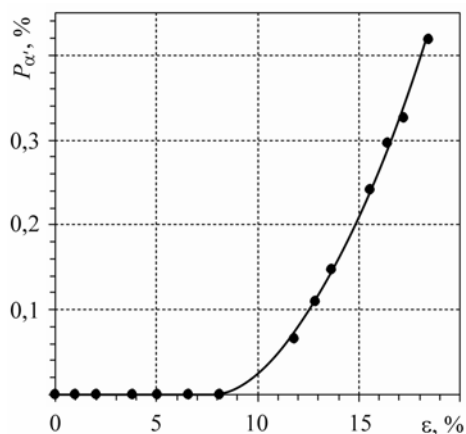


Рис. 5. Fig. 5.

Рис. 5. Залежність утвореного мартенситу деформації $P_{\alpha'}$ від відносного ступеня стиску ε сталі 12X18H10T.

Fig. 5. Dependence of the forming martensite deformation, $P_{\alpha'}$, on the relative degree of compression, ε , of 12X18H10T steel.

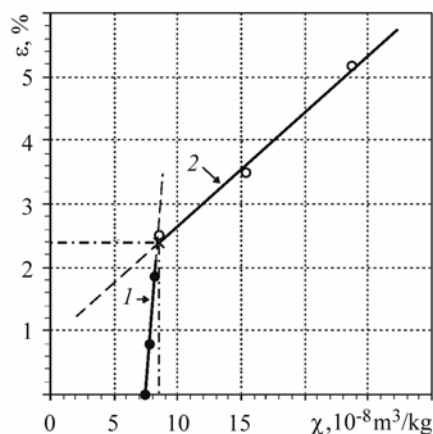


Рис. 6. Fig. 6.

Рис. 6. Залежність відносної деформації стиску ε від питомої магнетної сприйнятливості χ ($H = 3,42 \cdot 10^5 \text{ A/m}$) двофазної (A+Ф) сталі 12X18H9T: 1 – для двофазного (A+Ф) стану; 2 – для трифазного (A+Ф+M). У точці перетину кривих $\varepsilon_s = 2,4\%$; $\chi_s = 8,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$.

Fig. 6. Dependence of relative compression deformation, ε , on the specific magnetic susceptibility, χ , ($H = 3,42 \cdot 10^5 \text{ A/m}$) of two-phase (A+Ф) of 12X18H9T steel:

1 – for two-phase (A+Ф) state; 2 – for three-phase (A+Ф+M).

У точці перетину кривих $\varepsilon_s = 2,4\%$; $\chi_s = 8,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що під час одновісного стиску однофазної (A) аустенітної хромонікелевої сталі 12X18H10T мартенсит деформації виникає за досягнення істинної деформаційної мартенситної точки $\varepsilon_s = 10,9\%$, нижче за яку існує однофазний стан (A), вище – двофазний (A+M). Виявлено ефект збільшення намагнетченості (30%) парамагнетного аустеніту внаслідок появи феромагнетних кластерів, на базі яких виникають кристали мартенситу деформації.

Для двофазної сталі (А+Ф) 12Х18Н9Т мартенсит деформації виникає за досягнення порівняно меншого значення $\varepsilon_s = 2,4\%$ зі сталлю 12Х18Н10Т, при $\varepsilon < \varepsilon_s$ існує двофазний стан (А+Ф), при $\varepsilon > \varepsilon_s$ – трифазний (А+Ф+М), що пояснюється присутністю домішок δ -фериту.

РЕЗЮМЕ. Исследовано зародження первых порций мартенсита деформации при пластическом одноосном сжатии сталей 12Х18Н10Т и 12Х18Н9Т, в исходном состоянии которых отсутствовал и присутствовал δ -феррит, соответственно. Выявлено, что в стали 12Х18Н10Т при $\varepsilon < \varepsilon_s$ существует однофазное состояние (А), а при $\varepsilon > \varepsilon_s$ – двухфазное (А+М); в стали 12Х18Н9Т при $\varepsilon < \varepsilon_s$ – двухфазное состояние (А+Ф), при $\varepsilon > \varepsilon_s$ – трехфазное (А+Ф+М). Обнаружен эффект увеличения намагнитченности парамагнитного аустенита до возникновения мартенсита деформации.

SUMMARY. The formation of the first portions of deformation martensite as a result of plastic deformation of 12Х18Н10Т and 12Х18Н9Т steels under the initial uniaxial compression when δ -ferrite was absent and present, respectively, are investigated. For 12Х18Н10Т steel at $\varepsilon < \varepsilon_s$ there is a single-phase state (А) and at $\varepsilon > \varepsilon_s$ – two-phase state (А+М). For 12Х18Н9Т steel at $\varepsilon < \varepsilon_s$ there is a two-phase state (А+Ф) and at $\varepsilon > \varepsilon_s$ – three-phase (А+Ф+М). The effect of increased magnetization of the paramagnetic austenite before the appearance of martensite deformation is found.

1. Банних О. А. Развитие исследований нержавеющей сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1977. – № 10. – С. 41.
2. Толмасов В. А. Изменение фазового свойства нержавеющей стали 1Х18Н9Т под влиянием пластической деформации // *Физика металлов и металловедение.* – 1958. – VI, № 5. – С. 838–842.
3. Малинов Л. С., Харланова Е. Я. Развитие мартенситных превращений при деформации в Fe–Mn-сталях различного состава // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1988. – № 1. – С. 11–14.
4. Balitskii A. I., Ivaskevich L. M. and Mochulskyi V. M. The influence of hydrogen on martensitic transformation of austenitic steels // 8th European Symposium on Martensitic Transformations. – Prague, 2009. – P. 03001–03004.
5. Максимкин О. П., Гусев Н. Н., Осипов И. С. Параметры образования мартенситной α' -фазы при деформации нержавеющей сталей, облученных в реакторах АХ ВВРр-К и БН-350 // *Вестник НЯЦ РК.* – 2007. – Вып. 3. – С. 12–17.
6. *Применение магнитных методов для исследования эволюции структуры в аустенитных нержавеющей сталях после длительной эксплуатации энергоблоков на АЭС* / В. М. Ажажа, В. А. Десненко, Л. С. Ожигов и др. // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение.* – 2009. – № 4–2. – С. 241–246.
7. Снежной Г. В., Мищенко В. Г., Снежной В. Л. Интегральный физический метод идентификации α -фазы в аустенитных хромоникелевых сталях // *Литье и металлургия.* – 2009. – № 3(52). – С. 241–244.
8. Ольшанецкий В. Е., Снежной В. Л. О физической трактовке мартенситной точки // *Физика металлов и металловедение.* – 1973. – 36, № 4. – С. 894–896.
9. Снежной Г. В., Снежной В. Л. Зміна механізму стартової мікрокінетики мартенситного перетворення в залізнікелевих стопах // *Металлофізика и новейшие технологии.* – 2009. – 31, № 4. – С. 565–576.

Одержано 15.07.2010