

УДК 621.86.065

doi: 10.18698/0536-1044-2018-11-14-19

Механизм перехода аустенита в мартенсит при холодной пластической деформации аустенитных сталей

В.А. Бубнов

Курганский государственный университет

A Mechanism of Transition of Austenite to Martensite During Cold Plastic Deformation of Austenitic Steels

V.A. Bubnov

Kurgan State University

При изготовлении оборудования из аустенитных сталей широко используют технологические операции с применением пластического деформирования (гибку, вальцовку, холодную штамповку, калибровку, правку и накатку резьб). Пластическая деформация в холодном состоянии приводит к активному изменению физических и механических свойств материала, оказывая влияние на несущую способность конструкций. Проведено качественное и количественное исследование перехода аустенита в мартенсит при холодной пластической деформации аустенитной стали. Изменение фазового состава такой стали при пластической деформации ведет к изменению ее магнитных свойств, так как у α -Fe (мартенсита) они есть, а у γ -Fe (аустенита) их нет. После деформации немагнитные аустенитные стали становятся магнитными, и чем выше степень деформации, тем сильнее проявляются магнитные свойства. Следовательно, при холодном пластическом деформировании аустенитных сталей наблюдается деформационное упрочнение при одновременном протекании дислокационного и фазового переходов γ -Fe в α -Fe с образованием мартенсита деформации. Исследования механизма перехода аустенита в мартенсит при холодной пластической деформации выполнены магнитометрическим методом на примере аустенитной стали 12X18H10T в зависимости от степени деформации в диапазоне 0...45%. Установлено, что при степени деформации, равной 44,6%, количество мартенсита в деформированной стали составило 45,5%. Это свидетельствует о том, что полного перехода аустенита в мартенсит не произошло и в деформированном металле структура была аустенитно-мартенситной.

Ключевые слова: аустенитные стали, аустенит, мартенсит, пластическая деформация, степень деформации, деформационное упрочнение

Technological processes that involve plastic deformation (bending, rolling, cold stamping, calibration, straightening, rolling of threads) are widely used when manufacturing technological equipment from austenitic steels. Plastic deformation in the cold state leads to an active change in the physical and mechanical properties of the material and affects the load-carrying capacity of structures. The purpose of this study is to qualitatively and quantitatively evaluate the transition of austenite to martensite upon exposure of austenitic steel to cold plastic deformation. The change in the phase composition of austenitic steels by plastic deformation leads to a change in the magnetic properties of the steels, as α -Fe (martensite) has magnetic properties, while γ -Fe (austenite) does not. Non-magnetic austenitic steels become magnetic after the deformation, and the higher the degree of

deformation, the stronger the magnetic properties. Thus, in the case of cold plastic deformation of austenitic steels, deformation hardening is observed when two processes occur simultaneously: a dislocation and phase transition from γ -Fe to α -Fe with the formation of deformation martensite. Studies of the mechanism of transition from austenite to martensite during cold plastic deformation were performed using the example of austenitic steel 12X18H10T, depending on the degree of deformation in the range of 0–45 %. A magnetometric method was used in the study of this transition. It was established that at the deformation rate of 44.6 %, the amount of martensite in the deformed steel was 45.5 %. This indicates that a complete transition of austenite to martensite was not observed, and the structure in the deformed metal was austenitic-martensitic.

Keywords: austenitic steels, austenite, martensite, plastic deformation, degree of deformation, strain hardening

Аустенитные стали (АС) получили широкое распространение в химическом, нефтяном и пищевом машиностроении, а также в медицинской технике. Этот класс сталей характеризуется достаточно высоким содержанием легирующих элементов (Cr, Ni), расширяющих область γ -Fe, поэтому при их охлаждении до комнатной температуры в АС присутствует аустенит [1]. К АС относятся хромоникелевые стали, содержащие 10...27 % хрома и более 7 % никеля по ГОСТ 5632–72. Стандарт предусматривает около 50 марок сталей данного класса.

При изготовлении оборудования из АС широко используют технологические операции с применением пластического деформирования (гибку, вальцовку, штамповку, калибровку, правку, поверхностное обкатывание и накатку резьб). Пластическая деформация в холодном состоянии, приводящая к активному изменению физических и механических свойств материала, оказывает влияние на несущую способность конструкций [2–14].

В Курганском машиностроительном институте, Курганском государственном университете и на Курганском заводе химического машиностроения при участии АО «НИИхиммаш» (Москва) уже более 30 лет ведутся работы по исследованию изменения физических и механических свойств АС на примере 12X18H9T и 12X18H10T при холодной пластической деформации (ХПД) в зависимости от степени деформации ϵ_0 . При растяжении степень деформации определяется выражением $\epsilon_0 = [(l_k - l_0)/l_0] \cdot 100\%$ (l_0 — исходный размер; l_k — размер после деформации), при сжатии — $\epsilon_0 = [(l_0 - l_k)/l_0] \cdot 100\%$. Интервал исследования степени деформации $\epsilon_0 = 0...45\%$.

Цель работы — качественная и количественная оценка перехода аустенита в мартенсит при ХПД (растяжении или сжатии) АС.

Изменение фазового состава АС с содержанием никеля от 8 до 12 % путем пластической деформации ведет к изменению магнитных свойств АС, так как у α -Fe (мартенсита) они есть, а у γ -Fe (аустенита) их нет. После деформации немагнитные АС становятся магнитными, и чем выше степень деформации, тем сильнее проявляются магнитные свойства [10, 11, 15].

Итак, при ХПД АС наблюдается деформационное упрочнение с одновременным протеканием дислокационного и фазового переходов γ -Fe в α -Fe с образованием мартенсита деформации.

Значительный интерес представляют механизм и глубина перехода аустенита в мартенсит в АС при ХПД. Проведены исследования такого перехода на примере АС 12X18H10T в зависимости от степени деформации ϵ_0 . Сделаны попытки определения количественного перехода γ -Fe в α -Fe при ХПД АС в интервале степени деформации $\epsilon_0 = 0...45\%$ и установления возможной глубины этого перехода. Испытания проведены на цилиндрических образцах диаметром $d_0 = 10$ мм, длиной $l_0 = 10$ и 15 мм, деформированных сжимающим усилием на разрывных испытательных машинах с усилием сжатия (или растяжения) $P = 100$ и 250 кН (рис. 1).

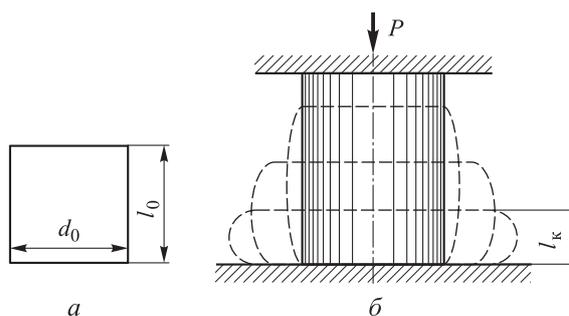


Рис. 1. Схемы исходного образца (а) и его деформирования (б)

После изготовления шлифов на металлографическом микроскопе выполнена качественная оценка перехода аустенита в мартенсит. Результаты этих исследований приведены на рис. 2 и в таблице, где напряжение сжатия (условное напряжение) $\sigma = P/F_0$ (F_0 — площадь поперечного сечения образца до деформации), эффективное (истинное) напряжение $\sigma_{\text{эф}} = P/S_{\text{эф}}$ ($S_{\text{эф}} = V/l_k$; V — объем образца).

Как видно из рис. 2, структура АС при 100%-ном содержании аустенита у исходного недеформированного материала переходит в иное

состояние. В деформированной АС появляется мартенсит, и его количество растет по мере увеличения степени деформации ε_0 . Структура АС становится аустенитно-мартенситной.

Одновременно проявляется активное изменение магнитных свойств АС. Деформированные образцы приобретают чувствительность к воздействию на них магнитом.

Для более качественного исследования фазового перехода на представленных образцах в лаборатории материаловедения Института физики металлов Уральского отделения РАН

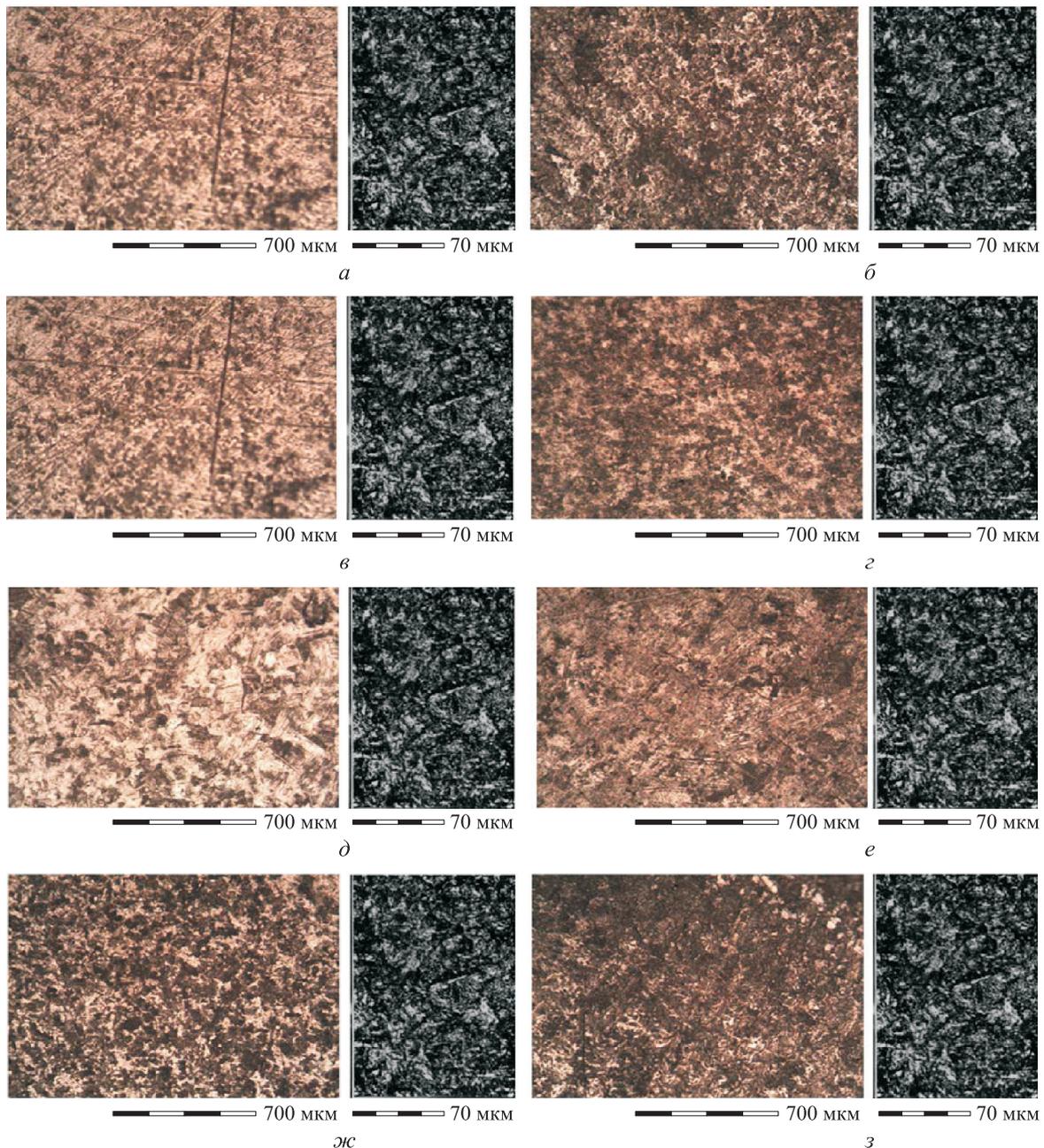


Рис. 2. Структуры недеформированной и деформированной АС при различной степени деформации: а — $\varepsilon_0 = 0$; б — $\varepsilon_0 = 6,6\%$; в — $\varepsilon_0 = 7,16\%$; г — $\varepsilon_0 = 12\%$; д — $\varepsilon_0 = 16,5\%$; е — $\varepsilon_0 = 23\%$; ж — $\varepsilon_0 = 33,3\%$; з — $\varepsilon_0 = 40,4\%$

Результаты исследований аустенитно-мартенситного перехода АС 12Х18Н10Т при ХПД

Усилие сжатия P , кН	Напряжение сжатия σ , МПа	Эффективное напряжение $\sigma_{эф}$, МПа	Степень деформации ϵ_0 , %	Количество мартенсита, %
0	0	0	0	0
30	386	360	6,2	1,7
50	643	562	12,0	12,2
70	900	738	16,5	33,4
90	1158	902	21,6	36,0
120	1544	978	36,0	41,0
150	1930	1057	44,6	45,5

магнитометрическим методом проведена количественная оценка перехода аустенита в мартенсит в зависимости от степени деформации. Механизм изменения структуры АС 12Х18Н10Т при ХПД на основании изменения магнитных свойств материала показал довольно точную количественную оценку рассматриваемого перехода в зависимости от степени деформации ϵ_0 (см. таблицу, рис. 3). На рис. 3 приведены зависимости удельной намагниченности насыщения M_s и количества мартенсита от степени деформации ϵ_0 .

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что чем выше степень деформации, тем больше аустенита переходит в мартенсит. В исследуемом интервале степени деформации при $\epsilon_0 = 44,6\%$ количество мартенсита в деформированном материале составило 45,5%. Это означает, что полного перехода аустенита в мартенсит добиться не удалось и структура деформированного металла была аустенитно-

мартенситной. Из рис. 3, а видно, что наиболее активный переход аустенита в мартенсит происходит в интервале степени деформации $\epsilon_0 = 10...20\%$.

Следует отметить, что изменение физических (магнитных) свойств АС и механических характеристик (пределов текучести σ_t , прочности σ_b и выносливости σ^{-1} , относительных удлинения δ и сужения ψ , ударных вязкостей КСЧ и КСЧV) при ХПД носит характер постоянного явления. Эти измененные свойства сталей остаются постоянными во времени [3–5, 8, 9, 11, 12].

При изготовлении технологического оборудования используют технологические операции с применением ХПД, причем степень деформации, как правило, не превышает 8...10%. Проведенные металлографические и магнитометрические исследования перехода аустенита в мартенсит в АС показали, что при таких значениях степени деформации структура АС становится аустенитно-мартенситной с содержанием 95...96% аустенита и 4...5% мартенсита.

Выводы

1. Применение упрочняющих деформационных технологий при изготовлении конструкций из АС приводит к активному изменению физических (магнитных) и механических свойств материалов.
2. Приобретенные повышенные механические характеристики АС в процессе деформационного упрочнения стабильны во времени.
3. Наиболее активно переход аустенита в мартенсит наблюдается при степени деформации $\epsilon_0 = 10...25\%$.

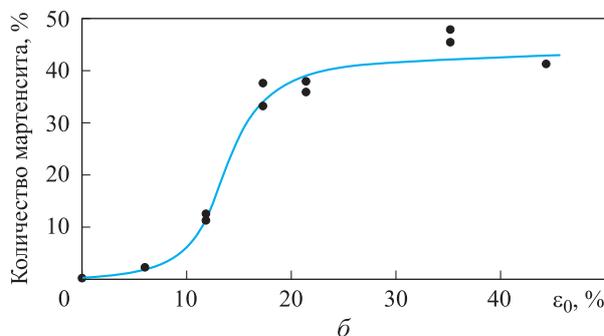
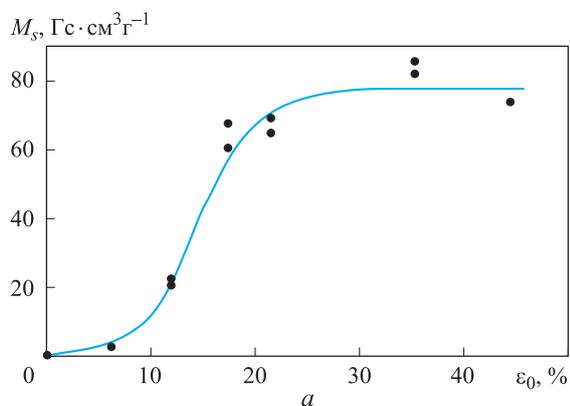


Рис. 3. Зависимости удельной намагниченности насыщения (а) и количества мартенсита (б) в АС 12Х18Н10Т от степени деформации: точки — экспериментальные данные; кривые — их аппроксимация

4. Следует учитывать, что повышение несущей способности элементов конструкций за счет деформационного упрочнения позволяет использовать этот эффект при их эксплуатации до температуры не более 400 °С.

Литература

- [1] Гуляев А.П. *Металловедение*. Москва, Металлургия, 1986. 544 с.
- [2] Михеев М.Н., Беликова М.М., Виткалова Р.Н., Катаева Н.В. Электромагнитный метод определения мартенсита деформации в нержавеющей сталях. *Дефектоскопия*, 1985, № 10, с. 48–51.
- [3] Бубнов В.А. Совершенствование конструкции и технологии изготовления роторов маятниковых центрифуг. *Химическое и нефтяное машиностроение*, 1986, № 4, с. 28–29.
- [4] Бубнов В.А. Металлосберегающая технология изготовления фланцев химического оборудования. *Химическое и нефтяное машиностроение*, 1987, № 5, с. 32–34.
- [5] Бубнов В.А., Отрадный В.В. Работоспособность стальных деталей, подвергаемых объемному упрочнению пластическим деформированием. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2002, № 4, с. 18–25.
- [6] Бубнов В.А., Костенко С.Г., Отрадный В.В. Способ определения предела выносливости стали аустенитного класса. Пат. 2265213 РФ, бюл. № 33, 2005.
- [7] Бубнов В.А. Повышение точности эллиптических днищ и цилиндрических колец пластическим обжатием. *Химическое и нефтяное машиностроение*, 1996, № 4, с. 61–63.
- [8] Бубнов В.А., Костенко С.Г., Отрадный В.В. Определение предела выносливости аустенитных сталей, подвергнутых пластическому деформированию. *Вестник Курганского государственного университета. Сер. Технические науки*, 2005, вып. 1, с. 23–25.
- [9] Бубнов В.А. Деформационное упрочнение аустенитных сталей и снижение металлоемкости оборудования. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2008, № 7, с. 45–47.
- [10] Завалишин В.А., Сагарадзе В.В., Катаева Н.В., Калинин Г.Ю., Мушников С.Ю. Изменение магнитных свойств азотосодержащей аустенитной стали 04X20H61ПАМ25Ф в результате низкотемпературной деформации. *Вопросы материаловедения*, 2011, т. 3(67), с. 13–18.
- [11] Сагарадзе В.В., Уваров А.И. *Упрочнение и свойства аустенитных сталей*. Екатеринбург, РИО УрО РАН, 2013. 720 с.
- [12] Бубнов В.А., Марфицын С.В. Аустенитные стали и пластическая деформация. *Вестник Курганского государственного университета. Сер. Технические науки*, 2014, № 2(33), вып. 9, с. 41–43.
- [13] Gleiter H. Nanostructured materials: state of the art and perspectives. *Nanostructured Materials*, 1995, vol. 6, no. 1–4, pp. 3–14, doi: 10.1016/0965-9773(95)00025-9
- [14] Gavriljuk V.G., Shanina B.D., Berns H. Ab initio development of a high-strength corrosion-resistant austenitic steel. *Acta Materialia*, 2008, vol. 56, pp. 5071–5082, doi: 10.1016/j.actamat.2008.06.021
- [15] Завалишин В.А. *Перераспределение легирующих элементов и изменение магнитных свойств при интенсивной холодной деформации Fe-Cr-Ni аустенитных сплавов*. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург, Институт физики металлов УрО РАН, 2002. 168 с.

References

- [1] Gulyayev A.P. *Metallovedeniye* [Physical metallurgy]. Moscow, Metallurgiya publ., 1986. 544 p.
- [2] Mikheyev M.N., Belikova M.M., Vitkalova R.N., Katayeva N.V. Electromagnetic method for the determination of strain martensite in stainless steels. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 1985, no. 10, pp. 48–51.
- [3] Bubnov V.A. Improving the design and manufacturing technology of pendulum centrifuge rotors. *Chemical and Petroleum Engineering*, 1986, no. 4, pp. 28–29 (in Russ.).
- [4] Bubnov V.A. Metal-saving manufacturing technology of chemical equipment flanges. *Chemical and Petroleum Engineering*, 1987, no. 5, pp. 32–34 (in Russ.).

- [5] Bubnov V.A., Otradnyy V.V. Efficiency of steel parts subjected to volumetric hardening by plastic deformation. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2002, no. 4, pp. 18–25 (in Russ.).
- [6] Bubnov V.A., Kostenko S.G., Otradnyy V.V. *Sposob opredeleniya predela vyносливости stali austenitnogo klassa* [Method for determining the endurance limit of austenitic steel]. Patent RF no. 2265213, 2005.
- [7] Bubnov V.A. Increasing the accuracy of elliptical bottoms and cylindrical rings by plastic compression. *Chemical and Petroleum Engineering*, 1996, no. 4, pp. 61–63 (in Russ.).
- [8] Bubnov V.A., Kostenko S.G., Otradnyy V.V. Determination of the fatigue limit of austenitic steels subjected to plastic deformation. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Tekhnicheskiye nauki*, 2005, no. 1, pp. 23–25 (in Russ.).
- [9] Bubnov V.A. Strain hardening of austenitic steels and decrease of equipment steel intensity. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2008, vol. 44, is. 7–8, pp. 409–413.
- [10] Zavalishin V.A., Sagaradze V.V., Katayeva N.V., Kalinin G.Yu., Mushnikova S.Yu. The change of magnetic properties of nitrogen austenite steel 0.04C–20Cr–6Ni–11Mn–0.4N–2Mo–Nb–V after the low temperature deformation. *Voprosy materialovedeniya*, 2011, vol. 3(67), pp. 13–18 (in Russ.).
- [11] Sagaradze V.V., Uvarov A.I. *Uprochneniye i svoystva austenitnykh staley* [Hardening and properties of austenitic steels]. Ekaterinburg, RIO UrO RAN publ., 2013. 720 p.
- [12] Bubnov V.A., Marfitsyn S.V. Austenitic steel and plastic deformation. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Tekhnicheskiye nauki*, 2014, no. 2(33), is. 9, pp. 41–43 (in Russ.).
- [13] Gleiter H. Nanostructured materials: state of the art and perspectives. *Nanostructured Materials*, 1995, vol. 6, no. 1–4, pp. 3–14, doi: 10.1016/0965-9773(95)00025-9
- [14] Gavriljuk V.G., Shanina B.D., Berns H. Ab initio development of a high-strength corrosion-resistant austenitic steel. *Acta Materialia*, 2008, vol. 56, pp. 5071–5082, doi: 10.1016/j.actamat.2008.06.021
- [15] Zavalishin V.A. *Pereraspredelenie legiruyushchih elementov i izmenenie magnitnykh svoystv pri intensivnoy holodnoy deformatsii Fe-Cr-Ni austenitnykh splavov*. Kand. Diss. [Redistribution of alloying elements and change of magnetic properties under intensive cold deformation of Fe-Cr-Ni austenitic alloys. Cand. Diss.]. Ekaterinburg, 2002. 168 p.

Статья поступила в редакцию 04.09.2018

Информация об авторе

БУБНОВ Валерий Андрианович — доктор технических наук, профессор кафедры «Механика машин и основы конструирования». Курганский государственный университет (640020, Курган, Российская Федерация, ул. Советская, д. 63, стр. 4, e-mail: kgu_sm@kgsu.ru).

Information about the author

BUBNOV Valeriy Andrianovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Mechanics of Machines and Fundamentals of Design Department. Kurgan State University (640020, Kurgan, Russian Federation, Sovetskaya St., Bldg. 63, Block 4, e-mail: kgu_sm@kgsu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Бубнов В.А. Механизм перехода аустенита в мартенсит при холодной пластической деформации аустенитных сталей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 11, с. 14–19, doi: 10.18698/0536-1044-2018-11-14-19

Please cite this article in English as:

Bubnov V.A. A Mechanism of Transition of Austenite to Martensite During Cold Plastic Deformation of Austenitic Steels. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 11, pp. 14–19 (in Russ.), doi: 10.18698/0536-1044-2018-11-14-19