

## О СТРУКТУРНОЙ И МАГНИТНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ АУСТЕНИТА

*Экспериментально установлена количественная зависимость удельной магнитной восприимчивости  $\chi_0$  парамагнитного аустенита от содержания никеля в хромоникелевых и марганца в марганцовистых сталях. Показано, что с увеличением содержания никеля, кроме стабилизации аустенита, наблюдается увеличение  $\chi_0$ . Влияние марганца на  $\chi_0$  в марганцовистых сталях противоположное. Выявлено локализованное распределение элементов Cr и Ni на границе аустенитных зерен в хромоникелевой стали и присутствие на этих границах участков ферромагнитной фазы.*

**Ключевые слова:** сталь, деформация, аустенит, мартенсит, магнитная восприимчивость, микротвердость.

### Введение

Согласно диаграмме Fe-Ni, при температуре выше 910 °С  $\gamma$ - область (решетка ГЦК) существует во всем интервале концентраций никеля от 0 до 100 %. В соответствии с принятым подходом, эта фазовая область в пределах концентраций железа от 0 до 50 % называется аустенитом (при наличии в системе углерода), а вторая часть концентрационного интервала характеризует такую же структуру, но уже на основе никеля. Иногда эту фазу на основе ГЦК решетки никеля называют в жаропрочных сплавах никелевым аустенитом. Поскольку никель (в отличие от марганца) является чистым ферромагнетиком, то его присутствие в аустенитных никелевых сталях с повышением концентрации должно ослаблять склонность аустенита к сохранению парамагнитного состояния. По-видимому, увеличение содержания в стали никеля изменяет в электронной структуре аустенита соотношение числа локализованных и коллективизированных электронов, что, скорее всего, и приводит к увеличению числа спаренных электронов в размытых  $d$ -оболочках атомов железа (т. е. проявление определенной склонности к ферромагнетизму). Эти обстоятельства должны влиять на изменение магнитной характеристики  $\chi_0$  (парамагнитная восприимчивость) в сторону ее увеличения при повышении в стали содержания никеля или, наоборот, к значительному ее уменьшению в марганцовистых сталях (при увеличении содержания марганца), что, естественно, должно усиливать парамагнетизм аустенита.

С целью подтверждения приведенных соображений и были проведены экспериментальные исследования на аустенитных хромоникелевых и марганцовистых сталях.

### 1 Материал и методика эксперимента

Образцы опытных хромоникелевых сталей были получены открытой плавкой в литейной лаборатории

Запорожского национального технического университета в 10 кг индукционной тигельной печи с кислой футеровкой. Шихта состояла из лома стали 08кп по ГОСТ 10501-88, ферросплавов (ферросилиций ФС65 по ГОСТ 1415-93, феррохром ФХ001А по ГОСТ 4757-91), марганца электролитического чешуйчатого Мп 99.7 и порошка никелевого электролитического ПНЭ-2 по ГОСТ 9722-97. Плавки проводили с использованием метода порционной разливки (заливали стержни Ж16 мм). Первая плавка (пл.1) содержала: С–0,08 %, Si–1,2 %, P–0,015 %, S–0,015 %, Cr–16,5 %, Ni–7,52 %, Mn–0,9 %, Cu–0,035 %, Mo–0,03 %, Nb–0,0 %, Ti–0,45, Co–0,02, Al–0,005. При этом, вследствие использования одной исходной плавки, исключалось воздействие нежелательных вариаций технологических параметров (в случае наличия разных плавки), что позволило определить влияние возрастающего содержания никеля в стали на изучаемые факторы в чистом виде. После отбора каждой порции металла вводили порошок никеля, причем, содержание никеля в полученных плавках составило: пл. 1–7,52 %, пл. 2–8,57 %, пл. 3–10,63 %, пл. 4–11,99 %, пл. 5–13,15 %, пл. 6–14,47 %, пл. 7–15,76 %.

Высокомарганцевые стали с переменным содержанием марганца от 8,43 до 17,5 % ранее были получены в индукционных тигельных электропечах в виде слитков 100×100×200 мм и подвергнуты закалке в воду от 1050 °С (время выдержки при температуре закалки 3 часа). Содержание других элементов в марганцовистых сталях удерживалось в пределах химического состава для стали 110Г13Л (ГОСТ 977-88).

Металлографические исследования проводили на растровом электронном микроскопе РЕМ-1061, который был оснащен системой энергодисперсионного микроанализа. Микротвердость структурных составляющих полученных сталей определяли с помощью твердомера ПМТ-3 (при нагрузке 50 г, согласно ГОСТ 9450-76).

Прибор был снабжен цифровой видеокамерой для визуального наблюдения, съемки и передачи изображения на компьютер, а также был оснащен светодиодным осветителем. Фиксацию результатов исследований проводили в цифровом режиме, что позволило повысить точность измерений, а также получать общее увеличение микроструктуры до  $\times 900$ .

Для непосредственных магнитометрических исследований из середины закаленных слитков вырезали механическим способом образцы в виде прямоугольных параллелепипедов размером  $\sim 3 \times 3 \times 3$  мм<sup>3</sup>, а затем их электрополировали. Медленную пластическую одноосную деформацию на сжатие проводили при комнатной температуре на специальной лабораторной установке. Степень остаточной деформации  $K$  рассчитывали по отношению толщин до ( $d_0$ ) и после ( $d$ ) деформации:  $K = (d_0 - d) / d_0$ . Удельную магнитную восприимчивость  $\chi$  определяли с помощью специальной автоматизированной установки [1].

Весьма низкое содержание ферромагнитных фаз  $P_\alpha$  (карбиды, мартенсит деформации, феррит) в объемных процентах устанавливали, используя чувствительный магнитометрический метод, учитывающий намагниченность парамагнитной аустенитной матрицы [2].

## 2 Результаты и их обсуждение

Образцы хромоникелевой стали были подвергнуты закалке с температуры 1050 °С (выдержка 30 мин.) в воде. Размер аустенитного зерна двух плавков приведен на рис. 1.

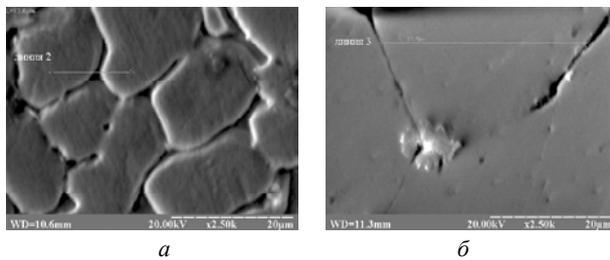


Рис. 1. Металлография хромоникелевой стали:  
а - пл.1, б - пл.7

Метод энергодисперсионной спектроскопии выявил равномерное распределение элементов всех элементов по объему зерна и локализованное распределение элементов Cr и Ni на границах зерен. Было установлено (см. линия 2 на рис. 1, рис. 2), что граница зерна перенасыщена хромом на  $20 \div 23$  % при уменьшении содержания никеля на  $20 \div 26$  % (по сравнению с объемом зерна).

Толщины приграничных зон зерен с каждой последующей плавкой уменьшаются. Обнаруженные значительные расхождения концентраций элементов на границе зерен вместе с утолщением приграничных зон свидетельствует о наличии каких-то других, отличных от аустенита, фаз. Данное утверждение было подтверждено результатом магнитометрических исследований.

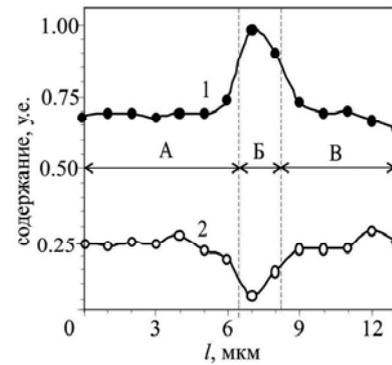


Рис. 2. Локализованное распределение элементов Cr (кривая 1) и Ni (кривая 2) на границе зерен (интервал Б) и по объему зерна (интервал А и В) в хромоникелевой стали, пл. 1

Магнитометрический метод выявил, что после термообработки образцы плавков 1...3 хромоникелевой стали содержали ферромагнитную фазу  $P_\alpha$  в количестве 2,99, 0,34 и 0,03 % соответственно (рис. 3). При этом металл плавков 4...7 был полностью аустенитный и его удельная магнитная восприимчивость аустенита  $\chi_0$  составила  $3,05, 3,25, 3,61$  и  $4,00 \cdot 10^{-8}$  (м<sup>3</sup>/кг). Таким образом, с увеличением содержания никеля от 11,99 % до 15,76 % удельная магнитная восприимчивость аустенита  $\chi_0$  данных плавков увеличивается от  $3,05 \cdot 10^{-8}$  до  $4,00 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг (рис. 4).

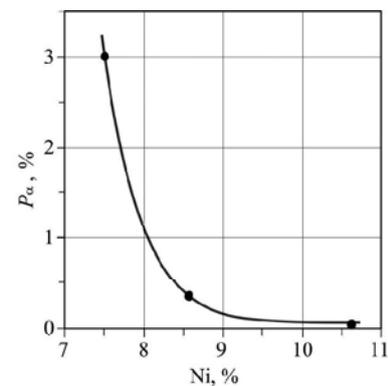


Рис. 3. Зависимость  $P_\alpha$  от содержания Ni в хромоникелевой стали (пл. 1...3)

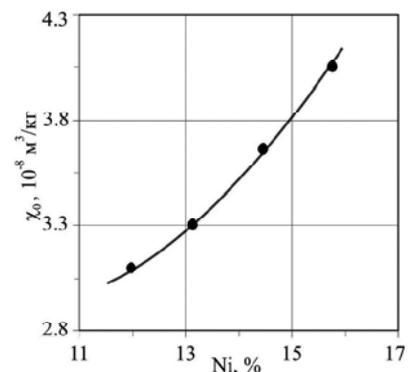


Рис. 4. Зависимость  $\chi_0$  от содержания Ni в хромоникелевой стали (пл. 4...7)

После термообработки (аустенизации) марганцевые стали Г8Л и Г10Л еще содержали некоторое количество ферромагнитных фаз (ферриты, карбиды): 0,071 % и 0,028 % соответственно. Для этих сталей значения удельной парамагнитной восприимчивости аустенита  $\chi_0$  составило  $3,90 \cdot 10^{-8}$  и  $2,81 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  [3]. Поскольку стали Г13Л и Г18Л были предварительно полностью аустенизированны, то  $P_\alpha = 0$  и значения удельной парамагнитной восприимчивости аустенита  $\chi_0$  составило  $2,36 \cdot 10^{-8}$  и  $1,90 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ . Таким образом, в марганцовистых сталях с увеличением содержания марганца от 8,6 % до 17,5 % удельная магнитная восприимчивость аустенита  $\chi_0$  уменьшается от  $3,90 \cdot 10^{-8}$  до  $1,90 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  (рис. 5).

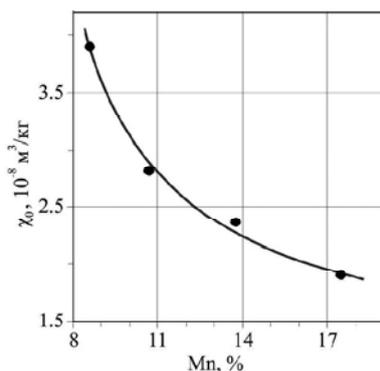


Рис. 5. Зависимость  $\chi_0$  от содержания Mn в марганцевой стали

Экспериментальные результаты, приведенные на рис. 4 и 5, свидетельствуют о принципиально различном (противоположном) влиянии никеля и марганца на парамагнетизм аустенита: первый из них эту характеристику увеличивает, а второй уменьшает. В то же время, как следует из литературных данных, оба элемента должны расширять  $\gamma$ -область и повышать стабильность аустенита относительно образования мартенсита деформации. Проверка этого положения была проведена нами с целью установления новых дополнительных нюансов в характере изменения этой качественной характеристики (т. е. стабильности аустенита, касательно ряда сплавов конкретного состава). Для этого все полученные образцы после аустенизации были деформированы на сжатие и установлен характер выбранных физических изменения показателя стабильности. Далее были проведены эксперименты, которые касались плавок с содержанием никеля на нижнем и верхнем уровнях.

Образцы плавки № 2 хромоникелевой стали до пластической одноосной деформации на сжатие не были полностью аустенитными, что подтверждается наличием некоторого наклона линии 1 зависимости  $\chi(1/H)$  (рис. 6, прямая 1). С увеличением степени деформации наклон кривых 2...7 увеличивается, что свидетельствует о росте содержания ферромагнитной фазы ( $\alpha'$ -мартенсита деформации). Зависимость количества  $\alpha$ -фазы и  $\alpha'$ -мартенсита от степени деформации представлена на рис. 7.

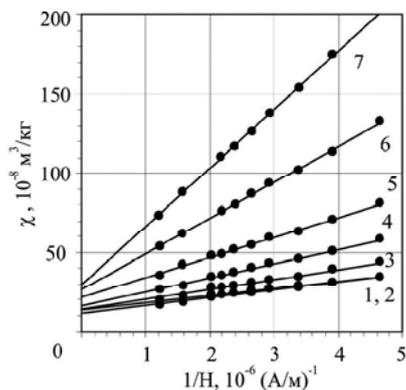


Рис. 6. Зависимость  $\chi(1/H)$  при различных значениях деформации хромоникелевой стали (пл. 2). Деформация: 1 – 0; 2 – 1,11; 3 – 3,70; 4 – 4,96; 5 – 6,52; 6 – 7,78; 7 – 9,48 %

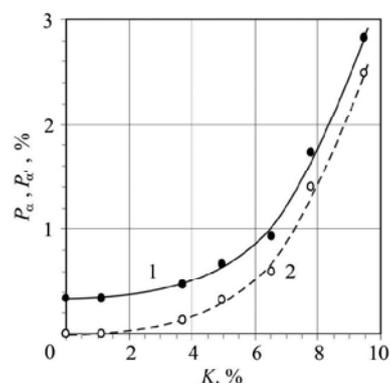


Рис. 7. Зависимость  $\alpha$ -фазы  $P_\alpha$  и количества возникающего мартенсита деформации  $P_{\alpha'}$  от относительной деформации сжатия  $K$  хромоникелевой стали (пл. 2): 1 –  $P_\alpha$ , 2 –  $P_{\alpha'}$

Плавка № 7 хромоникелевой стали до пластической одноосной деформации на сжатие была полностью аустенизирована, что подтверждается горизонтальной линией  $\chi(1/H)$  (рис. 8, прямая 1).

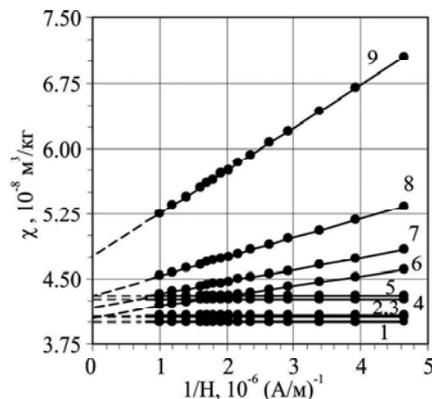


Рис. 8. Зависимость  $\chi(1/H)$  при различных значениях деформации  $K$  хромоникелевой стали, пл. 7.  $K$ : 1 – 0; 2 – 6,46; 3 – 16,56; 4 – 21,81; 5 – 26,89; 6 – 31,16; 7 – 40,57; 8 – 47,78; 9 – 62,49

При этом исходное значение парамагнитной восприимчивости  $\chi_0$  аустенита составило  $4,00 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ . Деформация до 26,89 % (см. рис. 8, прямая 5) для этой стали привела к росту парамагнитной восприимчивости  $\chi_0$  до значения  $4,31 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ . Наблюдаемый эффект роста парамагнитной восприимчивости аустенита с увеличением степени деформации до появления первых порций мартенсита аналогичен измерениям  $\chi_0$  в стали 12Х18Н10Т [4]. При дальнейшем увеличении степени деформации появляется наклон прямых  $\chi(l/H)$ , что свидетельствует о возникновении ферромагнитного  $\alpha'$ -мартенсита деформации, так как величина  $\chi$  уже зависит от соотношения фаз, т.е. аустенита и мартенсита. Так, при деформациях 31,16 % и 40,57 % были зафиксированы порции возникающего  $\alpha'$ -мартенсита деформации в количестве 0,009 % и 0,011 % (см. рис. 8, прямые 6 и 7). Следует обратить внимание и на то, что прямые 6 и 7 (см. рис. 7) пересекли начальные горизонтальные прямые 4 и 5. При экстраполяции вышеуказанных прямых на ось с ( $H \rightarrow \infty$ ) получили для них значения результирующей удельной магнитной восприимчивости  $\chi_\infty$   $4,08 \cdot 10^{-8}$  и  $4,19 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ , которые лежат ниже максимального значения парамагнитной восприимчивости аустенита  $\chi_0^{\text{max}} = 4,30 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ . Таким образом, в интервале деформаций от 31,16 % до 40,57 %, помимо ферромагнитной фазы  $\alpha'$ -мартенсита, присутствует новая парамагнитная фаза с меньшим, по сравнению с аустенитом, значением парамагнитной восприимчивости. Эта новая парамагнитная фаза, по аналогии с [4] может быть идентифицирована, как  $\epsilon$ -мартенсит деформации. Зависимость количества возникающего  $\alpha'$ -мартенсита от степени деформации представлена на рис. 9.

Зависимость микротвердости приграничной области аустенитного зерна и самого зерна (рис. 10) от концентрации никеля приведена на рис. 11.

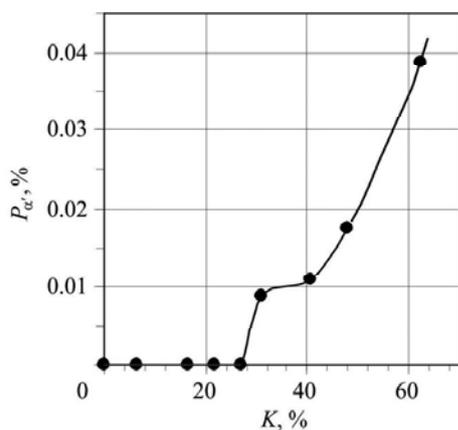


Рис. 9. Зависимость количества возникающего мартенсита деформации  $P_{\alpha'}$  от относительной деформации сжатия  $K$  хромоникелевой стали, пл. 7

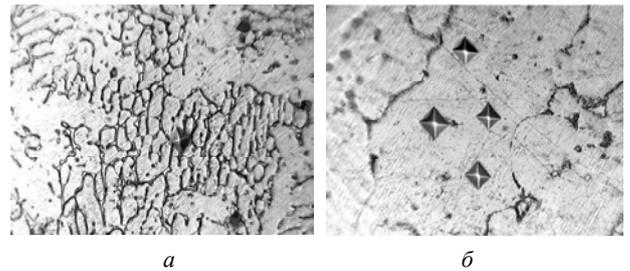


Рис. 10. Металлография при определении микротвердости с помощью твердомера ПМТ-3 (при нагрузке 50 г) структурных составляющих хромоникелевой стали: а – пл. 1, б – пл. 7

Микротвердость аустенитного зерна и приграничной области определяется влиянием двух элементов, а именно никеля и хрома. Поскольку в приграничной области меняется соотношение этих элементов, т.е. имеет место локализованное увеличение содержания хрома и уменьшение никеля (по-сравнению с их содержаниями в объеме зерна). В связи с тем, что оба элемента влияют на твердость аустенита (хром как правило в сторону увеличения, а никель – уменьшения), а в случае феррита – наоборот, то в приграничных ферромагнитных прослойках твердость превышает твердость самих зерен, что позволяет утверждать, что в них присутствует ферритная фаза.

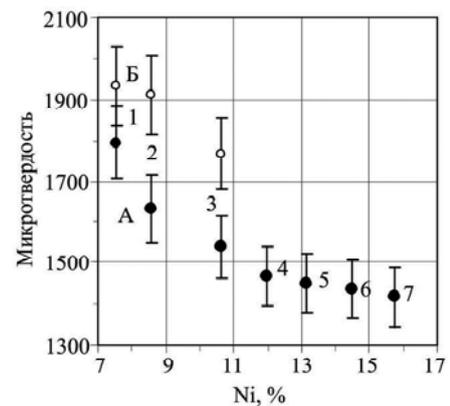


Рис. 11. Зависимость микротвердости аустенитного зерна (маркер А) и приграничной области (маркер Б) от содержания Ni в хромоникелевой стали (1...7 – номера соответствующих плавок)

Зависимость микротвердости марганцовистой стали от содержания Mn приведена на рис. 12.

Уменьшение микротвердости в марганцевых сталях с повышением содержания Mn можно попытаться объяснить тем, что при локальной деформации (от индентора твердомера) дислокации, с одной стороны, встречают меньшее сопротивление решетки из-за возможного снижения модуля упругости (благодаря присутствию марганца), а с другой стороны, эта же деформация приводит к расщеплению в сталях такого типа полных дислокаций на частичные, которые обладают повышенной подвижностью. Зависимость микротвердости марганцовистой стали от  $\chi_0$  приведена на рис. 13.

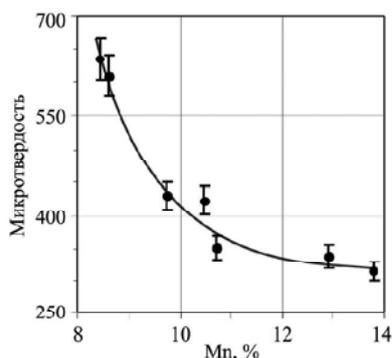


Рис. 12. Зависимость микротвердости марганцевой стали от содержания Mn

Имеет место увеличение микротвердости с повышением  $\chi_0$ . Таким образом, при пониженных содержаниях марганца стабильность марганцевого аустенита уменьшается и появляется склонность к возникновению различных промежуточных иных фаз.

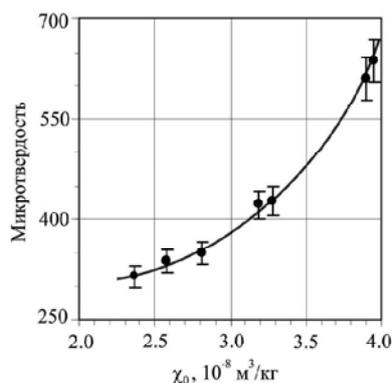


Рис. 13. Зависимость микротвердости марганцевой стали от  $\chi_0$

### Выводы

1. На основании анализа полученных результатов, касающихся влияния никеля в хромоникелевых сталях при постоянном содержании хрома, было установлено,

но, что с увеличением содержания никеля, кроме стабилизации аустенита, наблюдается ослабление его парамагнетизма, поскольку никель относится к элементам ферромагнитной группы.

2. На основании исследований установлено, что марганец как аустенитообразующий элемент в отношении парамагнетизма аустенита ведет себя противоположным образом: с увеличением содержания марганца в системе Fe-C-Mn наблюдается усиление парамагнетизма аустенита, благодаря резкому снижению  $\chi_0$  парамагнитной восприимчивости.

3. На основании магнитных измерений и измерений микротвердости приграничных зон и непосредственно в объемах зерен аустенита подтверждено, что в хромоникелевых сталях наблюдается сильное ослабление парамагнитных свойств аустенита из-за присутствия на границах зерен участков ферромагнитной фазы (феррита или мартенсита деформации).

### Список литературы

1. Сніжної Г. В. Автоматизована установка для визначення магнетної сприйнятливості криць та ступів / Г. В. Сніжної, Є. Л. Жавжаров // збірник наукових праць «Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування». – 2012. – № 49. – С. 136–141.
2. Снежной Г. В. Магнитное состояние аустенита вблизи истинной деформационной мартенситной точки хромоникелевых сталей аустенитного класса / Г. В. Снежной // ФММ. – 2011. – Т. 111. – № 6. – С. 599–604.
3. Снежной Г. В. О связи механических свойств высокомарганцевых сталей с парамагнитной удельной восприимчивостью аустенита / Г. В. Снежной, В. Е. Ольшанецкий // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2012. – № 2 – С. 25–29.
4. 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.

Одержано 29.09.2014

### Сніжної Г.В., Ольшанецкий В.Ю., Сажнев В.М. Про структурну і магнітну стабільність аустеніту в сплавах, що містять нікель і марганець

Експериментально встановлено кількісну залежність питомої магнітної сприйнятливості  $\chi_0$  парамагнітного аустеніту від вмісту нікелю в хромонікелевих і марганцю в марганцевих сталях. Показано, що зі збільшенням вмісту нікелю, крім стабілізації аустеніту, спостерігається збільшення  $\chi_0$ . Вплив марганцю на  $\chi_0$  в марганцевих сталях протилежне. Виявлено локалізований розподіл елементів Cr і Ni на межах аустенітних зерен у хромонікелевій сталі і наявність на цих межах ділянок ферромагнітної фази.

**Ключові слова:** сталь, деформація, аустеніт, мартенсит, магнітна сприйнятливість, микротвердість.

### Snezhnoi G., Olshanetskiy V., Sazhnev V. Structural and magnetic stability of the austenite in the nickel and manganese alloys

The quantitative dependence of the specific magnetic susceptibility  $\chi_0$  of paramagnetic austenite on content of nickel in nickel-chromium and manganese in the manganese steels was established experimentally. Increasing the nickel content causes an increase in the stabilization of austenite and  $\chi_0$  revealed. With the increase in the content of manganese in the manganese steels decrease  $\chi_0$  observed. Localized distribution of the elements Cr and Ni in the austenite grain boundaries in the stainless steel and the presence of these borders areas ferromagnetic phases identified.

**Key words:** steel, deformation, austenite, martensite, magnetic susceptibility, microhardness.