

УДК 669.1: 539.538: 539.4.019.3: 537.621.4

Г.В. СНЕЖНОЙ, В.Н. САЖНЕВ

Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

## МАГНИТНОЕ СОСТОЯНИЕ АУСТЕНИТНОЙ МАТРИЦЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОМАРГАНЦЕВЫХ СТАЛЕЙ

Экспериментально установлено, что механические свойства высокомарганцевых сталей зависят преимущественно от магнитной природы парамагнитной аустенитной матрицы, которая определяется суммой магнитных моментов атомов, приходящих на единицу массы (удельная намагниченность). Показано, что для слабомагнитных исследуемых сталей магнитным параметром, с помощью которого можно определить поведение механических свойств, может быть парамагнитная удельная магнитная восприимчивость  $\chi_0$ . С понижением  $\chi_0$  повышаются предел прочности, ударная вязкость, относительное удлинение и сужение, а ударно-абразивная износостойкость понижается.

**Ключевые слова:** ударная вязкость, удлинение, сужение, износостойкость, стабильность аустенита, деформация, удельная магнитная восприимчивость аустенита.

### Введение

Постоянно повышающиеся требования потребителей к качеству выпускаемой металлопродукции вызывают необходимость поиска причин влияющих на механические свойства высокомарганцевых сталей, широко применяемых для изготовления деталей, работающих в условиях интенсивных динамических нагрузок.

На механические свойства высокомарганцевых сталей влияют температура разливки, химический состав, содержание углерода, марганца, карбидов, вредных примесей и пр. [1, 2]. Все эти различные факторы приводят к искажениям и изменениям в кристаллической и магнитной структурах парамагнитной аустенитной матрицы. Поэтому, при рассмотрении вопроса о механических свойствах должны учитываться данные о магнитном состоянии аустенита, которое характеризуется суммой магнитных моментов атомов, приходящих на единицу массы, т.е. удельной намагниченностью  $\sigma = \chi_0 \cdot H$ , где  $\chi_0$  – удельная магнитная восприимчивость,  $H$  – напряженность магнитного поля. Отсюда возникает необходимость разработки нового метода контроля механических свойств аустенитных сталей. В качестве параметра, позволяющего определять магнитное состояние аустенита, выбирается удельная магнитная восприимчивость  $\chi_0$ .

При этом остается не изученным влияние атомно-магнитного состояния аустенитной матрицы на прочностные ( $\sigma_B$ ), пластические ( $\delta$ ,  $\Psi$ ), вязкостные свойства (КСУ) и характеристики износостойкости (К) высокомарганцевых сталей.

В связи с этим, цель работы – исследовать корреляцию между намагниченностью парамагнитного аустенита и механическими свойствами высокомарганцевых сталей.

### 1. Материал и методика эксперимента

Высокомарганцевые стали с переменным содержанием марганца от 8.6 до 13.8% (стали №1-3) были получены в индукционных тигельных электропечах методом сплавления в виде слитков 100x100x200 мм и подвергнуты закалке в воду от 1050°C (время выдержки 3 часа). Содержание других элементов выдерживался в пределах химического состава для стали 110Г13Л по стандарту ГОСТ 977-88 (табл.1). Образцы для механических испытаний и магнитометрических исследований вырезались из средней части слитка.

Таблица 1  
Химический состав исследованных сталей

Элемент, масс.%	Сталь №1	Сталь №2	Сталь №3
	110Г8Л	110Г10Л	110Г13Л
C	1.14	1.30	1.16
Mn	8.60	10.7	13.80
Si	0.66	0.87	0.76
S	0.040	0.014	0.016
P	0.088	0.084	0.092
Cr	0.10	0.10	0.10
Al	0.019	0.021	0.018

Для определения ударной вязкости (КСУ) образцы испытывали на копре МК-30А согласно

ГОСТ 9454-78. Испытания на разрыв проводили на машине УРМ-50. Предел прочности при растяжении на разрыв, относительные удлинение и сужение определяли в соответствии с ГОСТ 1497-84. Относительную износостойкость после ударно-абразивного изнашивания определяли в лабораторной шаровой мельнице по потере веса соответственно эталонного ( $\Delta P_{\text{эт}}$ ) и опытного ( $\Delta P_{\text{оп}}$ ) образцов  $K = \Delta P_{\text{эт}} / \Delta P_{\text{оп}}$ . В качестве эталона использовалась сталь 20 (деформированный пруток сечением  $10 \times 10 \text{ мм}^2$ ) с химическим составом (масс.%): С 0.19, Мн 0.56, Si 0.26, Cr 0.25 и твердостью НВ=126.

Весьма низкое содержание ферромагнитных мартенсита деформации и карбидов в объемных процентах определяли чувствительным магнитометрическим методом, учитывающий намагниченность парамагнитной аустенитной матрицы [3, 4]. Для магнитометрических исследований из середины закаленных слитков вырезались холодным механическим способом образцы в виде прямоугольных параллелепипедов размером  $\sim 3 \times 3 \times 3 \text{ мм}^3$  с последующей электрополировкой. Медленная пластическая одноосная деформация на сжатие при комнатной температуре осуществлялась на специальной лабораторной установке. Степень остаточной деформации  $\varepsilon$  рассчитывалась по отношению толщин до и после деформации ( $\varepsilon = (d_0 - d) / d_0$ ).

## 2. Результаты и их обсуждение

В литом состоянии структура исследуемых сталей представляла собой аустенитную основу с включением крупных карбидов (рис.1,а,б,в). С целью аустенизации была выполнена термическая обработка - закалка в воду от температуры  $1050^\circ\text{C}$ . При этом в образцах стали 110Г8Л и 110Г10Л после закалки наблюдается аустенитная структура с небольшим количеством остаточных карбидов (рис.1,г,д), а в стали 110Г13Л - только аустенитная фаза (рис.1,е). Механические и ударные свойства исследованных сталей представлены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Свойства высокомарганцевых сталей при испытаниях на растяжение при  $20^\circ\text{C}$

№	Марка стали	Предел прочности $\sigma_B$ , %	Удлинение $\delta$ , %	Сужение $\Psi$ , %
1	110Г8Л	43.7	8.8	13.1
2	110Г10Л	72.3	26.2	24.1
3	110Г13Л	82.8	42.0	29.4

Присутствие ферромагнитных карбидов в исходных сталях 110Г8Л и 110Г10Л (рис.1,г,д) до де-

формации также подтверждается наклоном прямых экспериментальных зависимостей удельной магнитной восприимчивости  $\chi$  от обратной величины магнитного поля  $H$  (рис. 2, прямые 1 и 2).

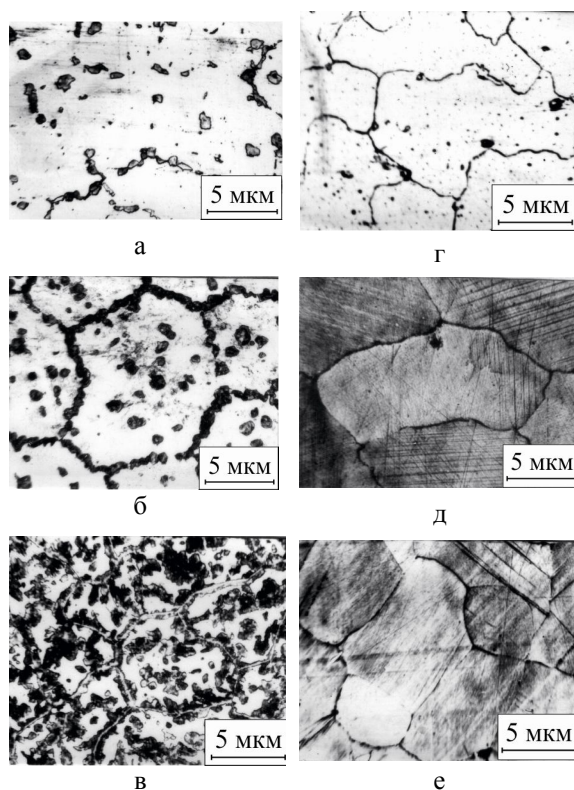


Рис. 1. Структура высокомарганцевых сталей в литом состоянии (а, б, в) и после закалки от  $1050^\circ\text{C}$  в воду (г, д, е). а, г – 110Г8Л; б, д – 110Г10Л; в, е – 110Г13Л

Таблица 3

Ударная вязкость и износостойкость высокомарганцевых сталей

№	Марка стали	Ударная вязкость КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	Ударно-абразивная износостойкость К, отн. ед.
1	110Г8Л	84	2.81
2	110Г10Л	190	2.27
3	110Г13Л	223	2.14

Экстраполируя ( $H \rightarrow \infty$ ) эти прямые на ось  $\chi$ , находили значение  $\chi_\infty$  и определяли количество ферромагнитных карбидов [3,4]. Сталь 110Г13Л была полностью аустенизирована, что подтверждается горизонтальной линией  $\chi(1/H)$  (рис. 2, прямая 3). Для этой стали удельная магнитная восприимчивость парамагнитного аустенита:  $\chi_0 = 2.36 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  (рис. 2).

Аналогично для разных степеней относительной деформации  $\varepsilon$  исследуемых сталей эксперимен-

тально находили значений  $\chi$  и строили график зависимости  $\chi$  от  $1/H$ . Экстраполируя прямые на ось ординат  $\chi$  при  $H \rightarrow \infty$ , определяли  $\chi_\infty$  и вычисляли суммарное количество ферромагнитных фаз  $P_\alpha$  [3, 4], при этом  $P_\alpha = P_c + P_{\alpha'}$ , где  $P_c$  и  $P_{\alpha'}$  - количество ферромагнитных карбидов и мартенсита деформации в объемных процентах, соответственно.

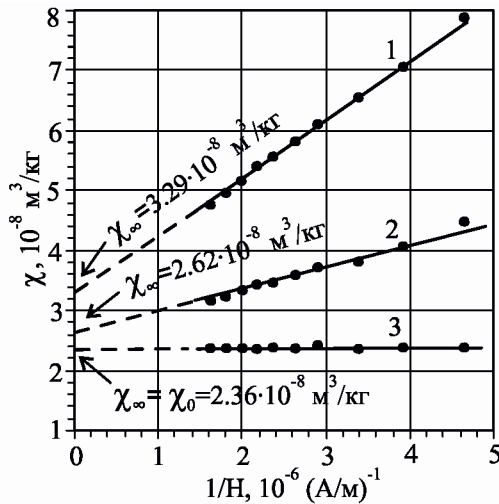


Рис. 2. Зависимость удельной магнитной восприимчивости  $\chi$  исследуемых сталей от обратной величины магнитного поля  $H$  до деформации: 1 – 110Г8Л, 2 – 110Г10Л, 3 – 110Г13Л

Количество ферромагнитных карбидов  $P_c$  определяли по аналогичной методике, как и  $P_\alpha$  [3,4]. Стали 110Г8Л и 110Г10Л содержали количество карбидов 0.071% и 0.028%, соответственно. В стали 110Г13Л ферромагнитные карбиды отсутствуют ( $P_c=0$ ). Предполагается, что при содержании углерода менее 2 масс.% и не слишком больших деформациях карбиды не возникают.

Отметим, что для сталей 110Г8Л и 110Г10Л сразу при первых малых актах сжатиях ( $\epsilon = 0...5\%$ ) зарождается мартенсит деформации, а в 110Г13Л, аналогично аустенитным хромоникелевым сталям [5], обнаружен эффект роста парамагнитной восприимчивости аустенита  $\chi_0$  от  $2.36 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  до  $2.55 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  с увеличением степени деформации до появления первых порций мартенсита.

На рис. 3 показана зависимость количества возникающего мартенсита деформации  $P_{\alpha'}$  от относительной степени сжатия  $\epsilon$  исследуемых сталей. Из рис.3 видно, что количество образовавшегося мартенсита деформации в стали 110Г13Л от степени деформации меньше, чем в сталях 110Г8Л и 110Г10Л. Например, для  $\epsilon=24\%$  в стали 110Г8Л образуется 1.46 %, а в сталях 110Г10Л и 110Г13Л - 0.15 и 0.06%

мартенсита деформации соответственно (рис.3). По-видимому низкое содержание образовавшегося в результате деформации мартенсита (0.000...0.5%), само по себе не может влиять на механические свойства, а является лишь мерой (индикатором), которое характеризует изменение механических свойств.

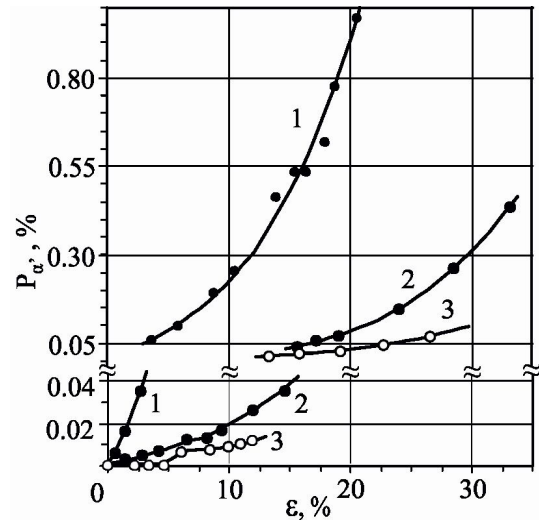


Рис. 3. Зависимость количества возникающего мартенсита  $P_{\alpha'}$  от относительной деформации сжатия  $\epsilon$  в исследованных сталях: 1 – 110Г8Л, 2 – 110Г10Л, 3 – 110Г13Л

Из графика зависимости  $\chi_\infty$  от  $P_{\alpha'}$  (рис. 4) для прямых №1-3 методом экстраполяции  $P_{\alpha'} \rightarrow 0$  (отсутствует мартенсит деформации) определяли соответственно для сталей 110Г8Л, 110Г10Л, 110Г13Л значения удельной парамагнитной восприимчивости аустенита  $\chi_0=3.90, 2.81, 2.37 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Для стали 110Г13Л значение  $\chi_0=2.37 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  хорошо совпадает с ранее найденным значением  $\chi_0=2.36 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Различие в количестве возникающего мартенсита деформации в сталях можно объяснить различным магнитным состоянием аустенита (удельной парамагнитной восприимчивости  $\chi_0$  аустенита). Как видим, сталь 110Г13Л является более стабильной (чем меньше  $\chi_0$ , тем сталь стабильней).

Чтобы наглядно представить картину влияния магнитного состояния (структурно-чувствительной величины  $\chi_0$ ) аустенита на механические свойства, построим зависимости КСЧ,  $K$ ,  $\sigma_B$ ,  $\delta$ ,  $\Psi$  от  $\chi_0$ , которые соответственно представлены на рис. 5 – 9.

Магнитное состояние аустенита существенно определяет свойства стали: с увеличением  $\chi_0$  снижается ударная вязкость и увеличивается ударно-абразивная износостойкость (рис. 5).

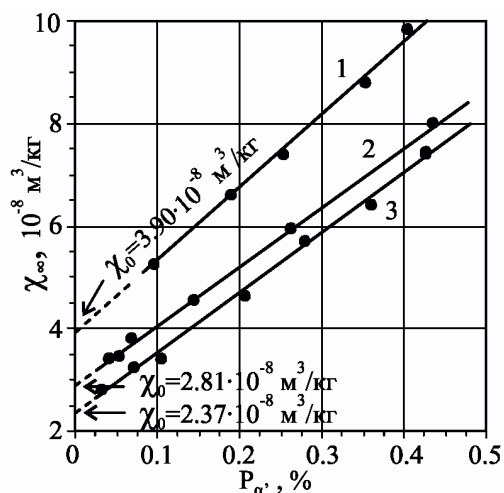


Рис. 4. Зависимость результирующей удельной магнитной восприимчивости  $\chi_{\infty}$  (аустенита и парапроцесса) от количества возникающего мартенсита деформации  $P_{\alpha'}$ . Из графика:  $\chi_0 = 3.90, 2.81, 2.37 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  соответственно для сталей: 1 – 110Г8Л, 2 – 110Г10Л, 3 – 110Г13Л

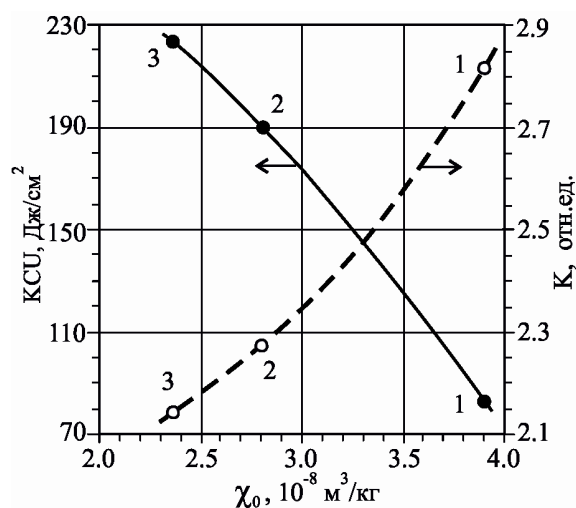


Рис. 5. Зависимость ударной вязкости KCU и ударно-абразивной износостойкости K от парамагнитной удельной магнитной восприимчивости  $\chi_0$  аустенита. Точки №1-3 соответственно для сталей: 1 – 110Г8Л, 2 – 110Г10Л, 3 – 110Г13Л

Сталь 110Г13Л при пластической деформации вплоть до 30% в основном сохраняет аустенитную структуру, хотя не полностью:  $P_{\alpha'} < 0.1\%$  (рис. 3). Следовательно, высокая износостойкость не связана с возникновением в ее структуре весьма малого количества мартенсита деформации, а физическая природа скорее всего в магнитном состоянии аустенитной матрицы (рис. 5). При этом возникающее низкообъемное содержание мартенсита может быть только индикатором, мерой износостойкости. Таким образом, можно предположить, что первопричиной повышения механических свойств аустенитных сталей является атомно-магнитная структура аустенит-

ной матрицы, а все другие факторы только формируют такое состояние.

Следовательно, для достижения высокой ударной вязкости марганцовых сталей, необходимо получать для них минимальное значение удельной парамагнитной восприимчивости аустенита  $\chi_0$ .

Зависимости относительного удлинения  $\delta$  и сужения  $\Psi$  от  $\chi_0$  имеют вид, представленный на рис. 6. Как видим, и в этом случае подтверждается тенденция: с понижением  $\chi_0$  возрастают показатели пластичности.

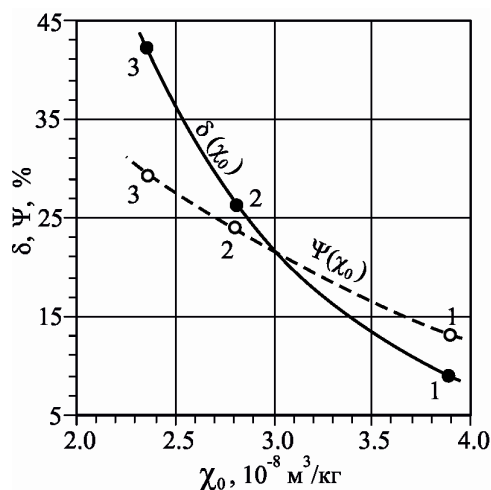


Рис. 6. Зависимость относительных удлинения  $\delta$  и сужения  $\Psi$  от парамагнитной удельной магнитной восприимчивости  $\chi_0$  аустенита. Точки №1-3 соответственно для сталей: 1 – 110Г8Л, 2 – 110Г10Л, 3 – 110Г13Л

Аналогичная ситуация и с пределом прочности  $\sigma_B$ , чем меньше  $\chi_0$ , тем больше  $\sigma_B$  (рис. 7).

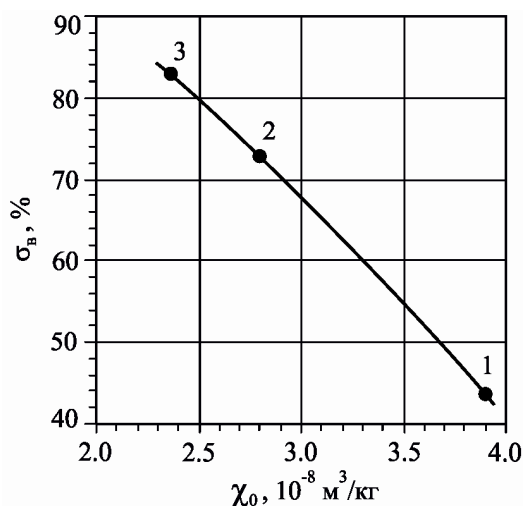


Рис. 7. Зависимость предела прочности  $\sigma_B$  от парамагнитной удельной магнитной восприимчивости  $\chi_0$  аустенита; точки №1-3 соответственно для сталей: 1 – 110Г8Л, 2 – 110Г10Л, 3 – 110Г13Л

Представляет интерес выяснить влияние марганца на  $\chi_0$ , т.е. какая стабильность структуры исследуемых сталей в этом случае. Из данных, приведенных на рис. 8, видно, что с увеличением содержания марганца уменьшается  $\chi_0$ , т.е. увеличивается стабильность аустенита и значит улучшаются механические свойства.

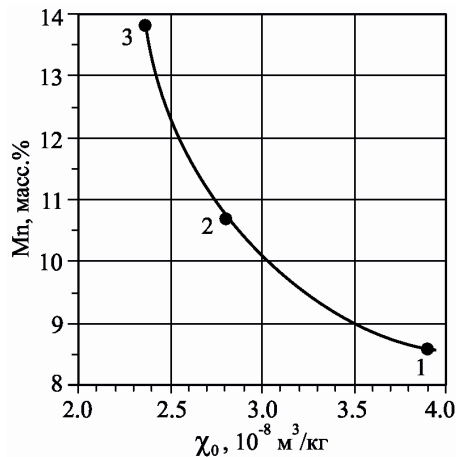


Рис. 8. Влияние содержания марганца Мп (при одинаковом содержании других легирующих элементов) на магнитное состояние аустенита (параметр  $\chi_0$ ). Точки №1-3 соответственно для сталей: 1 – 110Г8Л, 2 – 110Г10Л, 3 – 110Г13Л

Из рис. 9 следует, что ударная вязкость повышается при меньших значениях возникающего мартенсита деформации и карбидов.

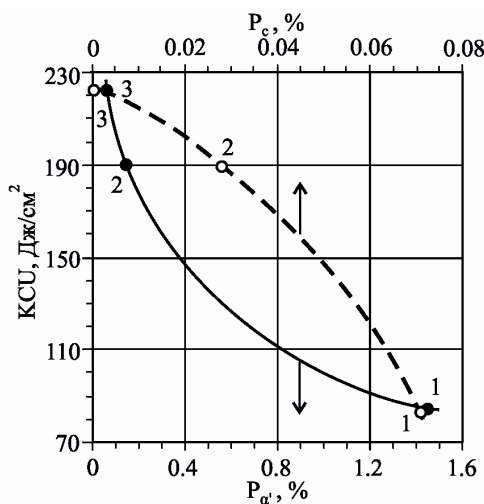


Рис. 9. Зависимость ударной вязкости КСУ от количества возникающего мартенсита деформации  $P_\alpha$ , (деформация  $\varepsilon=24\%$ ) и карбидов  $P_c$  в исследованных сталях. Точки №1-3 соответственно для сталей: 1 – 110Г8Л, 2 – 110Г10Л, 3 – 110Г13Л

## Выводы

1. Показано, что основную роль в повышении или понижении механических свойств играет атомно-магнитное состояние аустенита в сталях аустенитного класса, которое определяется структурно чувствительным параметром парамагнитной удельной магнитной восприимчивостью, учитывающей результирующее влияние различных факторов на формирование аустенита. Величина  $\chi_0$  характеризует степень стабильности аустенита: чем меньше  $\chi_0$ , тем более стабильный аустенит и наоборот.

2. Экспериментально установлено, что низкое содержание, образовавшегося в результате деформации мартенсита (0.000...0.5%), само по себе не может влиять на механические свойства, а является лишь мерой (индикатором), которое характеризует изменение механических свойств.

3. Значительное количественное влияние на магнитное состояние аустенита оказывает марганец и, следовательно, на механические свойства высокомарганцевых сталей.

## Литература

1. Богачев, И.Н. Структура и свойства железо-марганцевых сплавов [Текст] / И.Н. Богачев, В.Ф. Еголаев. – М.: Металлургия, 1973. – 296 с.
2. Мирзаев, Д.А. Влияние металлургических факторов на механические свойства и износостойкость литых марганцовистых сталей [Текст] / Д.А. Мирзаев, Ю.Д. Корягин, К.Ю. Окишев // Известия Челябинского научного центра. – 1999. – Вып. 3. – С. 18 – 22.
3. Снежной, Г.В. Интегральный физический метод идентификации  $\alpha$ -фазы в аустенитных хромоникелевых сталях [Текст] / Г.В. Снежной, В.Г. Мищенко, В.Л. Снежной // Литье и металлургия. – 2009. – № 3(52). – С. 241 – 244.
4. Сніжної, Г.В. Автоматизована установка для визначення магнетної сприйнятливості криць та стовів [Текст] / Г.В. Сніжної, Є.Л. Жавжаров // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія - Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2012. – №49. – С. 136-141.
5. Снежной, Г.В. Магнитное состояние аустенита вблизи истинной деформационной мартенситной точки хромоникелевых сталей аустенитного класса [Текст] / Г.В. Снежной // ФММ. – 2011. – Т. 111, № 6. – С. 599 – 604.

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. В.В. Погосов, Национальный технический университет, Запорожье.

### МАГНІТНИЙ СТАН АУСТЕНИТНОЇ МАТРИЦІ І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОМАНГАНОВИХ КРИЦЬ

*Г.В. Сніжної, В.М. Сажнев*

Експериментально встановлено, що механічні властивості високоманганових криць залежать переважно від магнітної природи парамагнітної аустенітної матриці, яка визначається сумою магнітних моментів атомів, що приходяться на одиницю маси (питома намагніченість). Показано, що для слабомагнітних досліджуваних криць магнітним параметром, за допомогою якого можна визначити зміну механічних властивостей, може бути парамагнітна питома магнітна сприйнятливість  $\chi_0$ . Із пониженням  $\chi_0$  підвищуються межа міцності, ударна в'язкість, відносно подовження і звуження, а ударно-абразивна зносостійкість знижується.

**Ключові слова:** ударна в'язкість, подовження, звуження, зносостійкість, стабільність аустеніту, деформація, питома магнітна сприйнятливість аустеніту.

### THE MAGNETIC STATE OF AUSTENITIC MATRIX AND MECHANICAL PROPERTIES HIGH-MANGANESE STEEL

*G.V. Snizhnoi, V.N. Sazhnev*

Mechanical properties of high-manganese steel depends mainly on the magnetic nature of paramagnetic austenite matrix has been established experimentally. The magnetic nature of the austenitic matrix of the sum of the magnetic moments of atoms per unit mass (specific magnetization) is determined. Mechanical properties of weakly magnetic steel can determine the magnetic parameter shown. Magnetic parameter can be paramagnetic specific magnetic susceptibility  $\chi_0$  is proposed. With decreasing  $\chi_0$  the tensile strength, impact strength, elongation and narrowing of the increase. With decreasing  $\chi_0$  shock-abrasive wear resistance is reduced.

**Key words:** impact strength, elongation, contraction, endurance, stability of austenite, strain, magnetic susceptibility of austenite.

**Сніжної Геннадий Валентинович** – канд. физ.-мат. наук, доцент, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина, e-mail: snow@zntu.edu.ua.

**Сажнев Владимир Николаевич** – канд. тех. наук, доцент, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина, e-mail: sazhnev@zntu.edu.ua.