

УДК 669.1: 539.538: 539.4.019.3: 537.621.4

Д-р техн. наук Сніжної Г. В., д-р техн. наук Ольшанецький В. Ю.,

канд. техн. наук Сажнев В. М.

Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя

## ПРОГНОЗУВАННЯ І КОНТРОЛЬ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОМАРГАНЦЕВИХ СТАЛЕЙ ЗА АТОМНО-МАГНІТНИМ СТАНОМ АУСТЕНІТУ

**Мета роботи.** Встановити кореляційний зв'язок між механічними властивостями високомарганцевих сталей і атомно-магнітним станом аустенітної матриці, який характеризується питомою парамагнітною сприйнятливістю  $\chi_0$  аустеніту.

**Методи дослідження.** Випробування на розрив проводили на машині УРМ-50, межу міцності при розтягуванні на розрив, відносні подовження і звуження визначали відповідно до ГОСТ 1497-84. Мікротвердість вимірювали з використанням приладу ПМТЗ при навантаженні 50 г за стандартною методикою. Відносну зносостійкість  $K$  після ударно-абразивного зношування визначали в лабораторному кульовому млині. Визначення питомої парамагнітної сприйнятливості аустеніту (до механічних випробувань) здійснювали на магнітометричних терезах.

**Отримані результати.** Виходячи з результатів експериментальних досліджень, встановлено наявність кореляції між механічними властивостями і питомою парамагнітною сприйнятливістю  $\chi_0$  аустеніту, що дає можливість використовувати цю характеристику в якості ефективного критерію прогнозування і контролю механічних властивостей аустенітних сталей.

**Наукова новизна.** Запропоновано й експериментально підтверджено ідею про зв'язок між механічними властивостями аустенітних сталей і попередньо сформованим атомно-магнітним станом аустенітної матриці.

**Постановка завдання.** Переважну об'ємну частину сталей 100Г8Л, 110Г10Л становить парамагнітний аустеніт ( $\approx 99,93\%$ ), а в сталі 110Г10Л його кількість досягає 100%. Тому властивості цих сталей визначаються саме станом аустеніту та його перетвореннями. Аустеніт є парамагнетиком, який характеризується своєрідною електронною будовою, для якого надчутливим параметром є питома парамагнітна сприйнятливість  $\chi_0$  (сумарний магнітний момент одиниці маси аустеніту при одиничному значенні магнітного поля). Пропонується дослідити вказані сталі з позицій атомно-магнітного стану аустенітної матриці.

**Практична цінність.** Запропонована номограма «питома парамагнітна сприйнятливість аустеніту - механічні властивості», яка може бути використана у виробничих умовах для прогнозування і контролю механічних властивостей, а саме показників міцності і пластичності.

**Ключові слова:** високомарганцева сталь, аустеніт, подовження, звуження, зносостійкість, дислокація, мартенсит деформації, парамагнітна сприйнятливість.

### Постановка проблеми

Вимоги споживачів до якості металопродукції постійно підвищуються і викликають необхідність пошуку нових методів для прогнозування і контролю механічних властивостей сталей і сплавів. Високомарганцевим сталям притаманний комплекс цінних властивостей, які обумовлюють їх застосування в металургії та машинобудуванні для виробництва траків гусеничних машин, коронок землерийних машин, зносостійких тіл, що мелють і т. д.

На механічні властивості високомарганцевих сталей впливають температура розливання, хімічний склад, вміст вуглецю, марганцю, карбідів, шкідливих домішок [1]. Усі ці чинники спричиняють спотворення у крис-

талічній і зміни в атомно-магнітній структурах аустенітної матриці. Тому цілком природно, що має місце кореляція механічних властивостей і атомно-магнітного стану аустеніту [2]. Атомно-магнітний стан аустеніту характеризується питомою парамагнітною сприйнятливістю  $\chi_0$ , яка як високочутлива характеристика здатна відбивати особливості впливу температури, тиску та хімічного складу [3]. З фізичної точки зору  $\chi_0$  є сума орбітальних і спінових моментів атомів в одиниці маси за умови одиничного значення магнітного поля. Таким чином, проблема прогнозування механічних властивостей аустенітних сталей, які пов'язані зі атомно-магнітним станом (параметр  $\chi_0$ ) аустеніту потребує експериментального підтвердження.

## Матеріали та методика досліджень

Високомарганцеві сталі з різним вмістом марганцю були отримані в індукційних тигельних електропечах у вигляді зливків  $100 \times 100 \times 200$  мм, а потім для аустенізації піддані загартуванню в воду від  $1050^\circ\text{C}$  (витримка 3 години). Зміст інших елементів витримувався в межах хімічного складу для сталі 110Г13Л по стандарту ГОСТ 977-88. Хімічний склад досліджуваних сталей наведено в таблиці 1. Зразки для механічних випробувань і магнітометричних досліджень вирізали з середньої частини зливків, які представляли однорідну вихідну мікроструктуру.

Випробування на розрив проводили на машині УРМ-50, межу міцності при розтягуванні на розрив, відносні подовження і звуження визначали відповідно до ГОСТ 1497-84. Мікротвердість вимірювали з використанням приладу ПМТЗ при навантаженні 50 г за стандартною методикою. Відносну зносостійкість  $K$  після ударно-абразивного зношування визначали в лабораторному кульовому млині по відносній втраті ваги еталонного і дослідного зразків. В якості еталону використовували сталь 20 (деформований пруток перетином  $10 \times 10$  мм<sup>2</sup>) з хімічним складом (мас. %): С – 0,19; Мп – 0,56; Si – 0,26; Cr – 0,25 і твердістю НВ = 126 од.

Для побудови номограми, на підставі якої можливо прогнозувати механічні властивості, виходячи з величини питомої парамагнітної сприйнятливості  $\chi_0$  аустеніту, використані значення показників межі міцності ( $\sigma_B$ ), відносного подовження ( $\delta$ ) і звуження ( $\Psi$ ), ударно-абразивної зносостійкості ( $K$ ) і мікротвердості. Визначення питомої парамагнітної сприйнятливості аустеніту (до механічних випробувань) здійснювали на високоточному обладнанні [4, 5] з використанням екстраполяційних методів [6, 7].

Слід зазначити, що вибір  $\chi_0$  як критерію (індикатора механічних властивостей) дозволяє врахувати при прогнозуванні механічних властивостей не тільки вплив вмісту марганцю (який є основним аустенізатором в досліджуваних сталях), а й вміст деяких інших елементів, що входять до складу сталі (перш за все вуглецю).

## Результати та їх обговорення

Після обробки результатів експериментальних досліджень була побудована номограма (рис. 1), на підставі якої можна прогнозувати механічні властивості високомарганцевих сталей.

Таблиця 1 – Хімічний склад досліджуваних аустенітних сталей

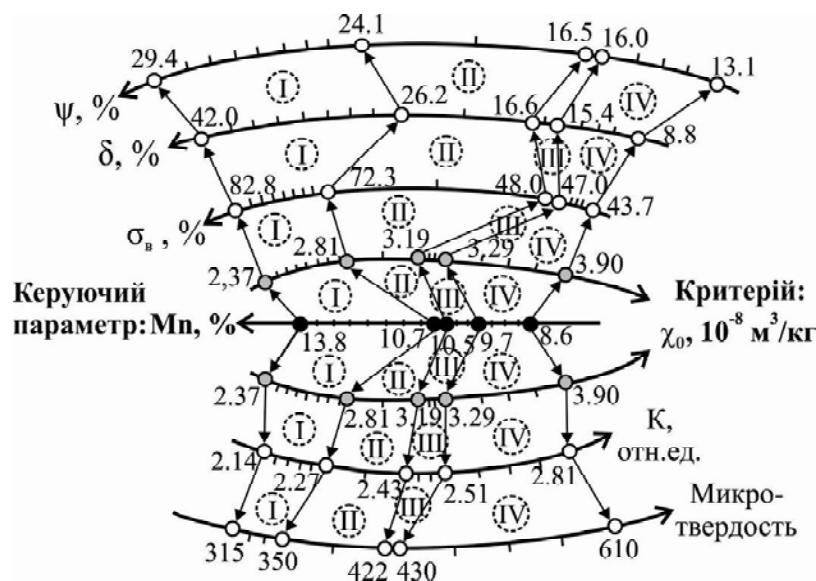
№ сталі	Марка сталі	Елемент, мас. %						
		C	Mn	Si	S	P	Cr	Al
1	110Г8Л	1,14	8,6	0,66	0,04	0,088	0,1	0,019
2	110Г10Л	1,20	9,7	0,47	0,016	0,09	0,1	0,018
3	110Г10Л	1,19	10,5	0,45	0,015	0,10	0,01	0,022
4	110Г10Л	1,30	10,7	0,87	0,014	0,084	0,1	0,021
5	110Г13Л	1,16	13,8	0,76	0,016	0,092	0,1	0,018

У центральній частині номограми представлені значення керуючого параметра (вміст Mn) і критерію  $\chi_0$ . У верхній частині номограми вказані такі механічні властивості, як межа міцності  $\sigma_B$ , відносне подовження  $\delta$  і звуження  $\Psi$ . Номограма містить чотири сектори (маркування від I до IV), кожен з яких обмежений експериментально знайденими значеннями парамагнітних і механічних властивостей. Наприклад, якщо питома парамагнітна сприйнятливості аустеніту досліджуваної високомарганцевої сталі лежить в межах інтервалу I, тобто від  $2,37 \cdot 10^{-8}$  до  $2,81 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг, то прогнозована величина межі міцності буде знаходитися в інтервалі від 72,3 до 82,8 %. Аналогічні міркування справедливі і для відносних подовження та звуження.

З номограми видно, що зі збільшенням вмісту марганцю параметр  $\chi_0$  зменшується, а показники пластичності зростають. Цю особливість в поведінці зазначених механічних характеристик можна пояснити наступним чином. За літературними даними [8], марганець ефективно знижує енергію дефектів упаковки і тим самим полегшує утворення і ковзання розтягнутих дислокацій з одночасним збільшенням міцності (завдяки явищу твердорозчинного зміцнення аустеніту легуючою добавкою марганцю). Розщеплення елементарних граткових дислокацій дозволяє забезпечити можливість легкого ковзання при переході розтягнутих дислокацій в аналогічній площині, що перетинають початкові.

Слід зазначити, що ударно-абразивна зносостійкість  $K$  змінюється в протилежну сторону щодо характеру зміни вмісту марганцю (верхня частина номограми). Тобто при вмісті Mn 8,6 % цей показник  $K$  виявляється вищим, ніж при вмісті 13,8 % того ж елемента.

Такий несподіваний факт в поведінці розглянутої механічної характеристики можна пояснити наступним чином. Оскільки, як уже зазначалося вище, марганець зменшує енергію дефектів упаковки і тим самим сприяє розщепленню великої кількості повних (елементарних) дислокацій, то це стимулює процес перекидання ковзання з однієї площини в іншу. Крім того, у зазначеній сталі (13,8 % Mn), при ударно-абразивному зношуванні практично не утворюється мартенсит деформації, що також зменшує ступінь наклепу поверхневого шару. При вмісті ж марганцю порядку 8,6 %, ефект розщеплення повних дислокацій вірогідно виявляється слаб-



**Рис. 1.** Номограма для контролю та прогнозування пластичних (верхня частина) і мікротвердості, ударно-абразивних властивостей (нижня частина) високомарганцевих сталей за допомогою критерію  $\chi_0$  аустеніту (центральна частина)

ше, що сприяє накопиченню нерозщеплених елементарних дислокацій біля перешкод з утворенням дислокаційних клубків і сплетінь. Це повинно різко збільшити твердість поверхнього шару аустеніту, і, до того ж, в цьому випадку слід очікувати активне утворення помітних кількостей дуже твердих зносостійких ділянок мартенситу деформації. Структура одержуваного поверхнього шару, напевно стає (при подальшому подрібненні зерна в процесі деформації) аморфно-кристалічною.

Интерес представляє залежність мікротвердості від магнітного стану аустеніту, яка також представлена на цій номограмі. Як бачимо, зменшення мікротвердості відповідає зниженню параметра  $\chi_0$ .

#### Список література

1. Богачев И. Н. Структура и свойства железомарганцевых сплавов / И. Н. Богачев, В. Ф. Еголаев – М.: Металлургия, 1973. – 296 с.
2. Снежной Г. В. Магнитное состояние аустенитной матрицы и механические свойства высокомарганцевых сталей / Г. В. Снежной, В. Н. Сажнев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 9(96). – С. 115–120.
3. Снежной Г. В. Влияние химических компонентов на механические и магнитные свойства высокомарганцевых

сталей / Г. В. Снежной, В. Н. Сажнев, В. Е. Ольшанецкий // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 8(125). – С. 22–26.

4. Мирошниченко Ф. Д. Магнитометрические весы с униполярно-астигматической системой и механико-магнитным зацеплением призмы / Ф. Д. Мирошниченко, В. Л. Снежной // *Приборостроение*. – 1966. – № 2. – С. 48–52.
5. Сніжною Г. В. Автоматизована установка для визначення магнетної сприйнятливості криць та стопів / Г. В. Сніжною, Є. Л. Жавжаров // *збірник наукових праць «Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування». – 2012. – № 49. – С. 136–141.
6. Снежной В. Л. О физической природе мартенситной точки / В. Л. Снежной, Ф. Д. Мирошниченко, В. Г. Каниболоцкий, П. А. Малинен // *ФММ*. – 1971. – Т. 31. – № 1. – С. 158–161.
7. Ольшанецкий В. Е. О физической трактовке мартенситной точки / В. Е. Ольшанецкий, В. Л. Снежной // *ФММ*. – 1973. – Т. 36. – № 4. – С. 894–896.
8. Allain S. Correlation between the calculated stacking fault energy and the plasticity mechanisms in Fe-Mn-C alloys / S. Allain, J.-P. Chateau, O. Bouaziz, S. Migot, N. Guelton // *Materials Science and Engineering A*. – 2004. – Vol. 387–389. – P. 158–162.

Одержано 14.12.2020

#### Снежной Г. В., Ольшанецкий В. Е., Сажнев В. Н. Прогнозирование и контроль механических свойств высокомарганцевых сталей по атомно-магнитному состоянию аустенита

**Цель работы.** Установить корреляционную связь между механическими свойствами высокомарганцевых сталей и атомно-магнитным состоянием аустенитной матрицы, которая характеризуется удельным парамагнитным восприимчивостью  $\chi_0$  аустенита.

**Методы исследования.** Испытания на разрыв проводили на машине УРМ-50, предел прочности при растяжении на разрыв, относительное удлинение и сужение определяли в соответствии с ГОСТ 1497-84. Микротвердость измеряли с использованием прибора ПМТЗ при нагрузке 50 г по стандартной методике.

Относительную износостойкость  $K$  после ударно-абразивного износа определяли в лабораторной шаровой мельнице. Определение удельной парамагнитной восприимчивости  $\chi_0$  аустенита (до механических испытаний) осуществляли на магнитометрических весах.

**Полученные результаты.** Исходя из результатов экспериментальных исследований, установлено наличие корреляции между механическими свойствами и удельной парамагнитной восприимчивостью  $\chi_0$  аустенита, что позволяет использовать эту характеристику в качестве эффективного критерия прогнозирования и контроля механических свойств аустенитных сталей.

**Научная новизна.** Предложена и экспериментально подтверждена идея о связи между механическими свойствами аустенитных сталей и предварительно сформированным атомно-магнитным состоянием аустенитной матрицы (параметр  $\chi_0$ ).

**Постановка задачи.** Подавляющую объемную часть сталей 100Г8Л, 110Г10Л составляет парамагнитный аустенит (99,93 %), а в стали 110Г10Л его объем достигает 100%. Поэтому свойства этих сталей определяются именно состоянием аустенита и его преобразованиями. Аустенит является парамагнетиком, который характеризуется своеобразным электронным строением, для которого чувствительным параметром является удельная парамагнитная восприимчивость  $\chi_0$  (суммарный магнитный момент единицы массы аустенита при единичном значении магнитного поля). Предлагается исследовать указанные стали с позиций атомно-магнитного состояния аустенитной матрицы.

**Практическая ценность.** Предложена номограмма «удельная парамагнитная восприимчивость  $\chi_0$  аустенита – механические свойства», которая может быть использована в производственных условиях для прогнозирования и контроля механических свойств аустенитных сталей, а именно показателей прочности и пластичности.

**Ключевые слова:** высокомарганцевая сталь, аустенит, удлинение, сужение, износостойкость, дислокация, мартенсит деформации, парамагнитная восприимчивость.

#### Snizhnoi G., Ol'shanetskii V., Sajhnev V. Prediction and control of the mechanical properties of high-manganese steels by the atomic-magnetic state of austenite

**Purpose of the work.** To establish a correlation between the mechanical properties of high-manganese steels and the atomic-magnetic state of the austenite matrix, which is characterized by the specific paramagnetic susceptibility  $\chi_0$  of austenite.

**Research methods.** Tensile tests were carried out on a URM-50 machine, tensile strength at break, elongation and contraction were determined in accordance with GOST 1497-84. Microhardness was measured using a PMT3 device at a load of 50 g according to the standard method. The relative wear resistance  $K$  after shock-abrasive wear was determined in a laboratory ball mill. The determination of the specific paramagnetic susceptibility  $\chi_0$  of austenite (before mechanical tests) was carried out on a magnetometric balance.

**Results obtained.** Based on the results of experimental studies, a correlation has been established between the mechanical properties and the specific paramagnetic susceptibility  $\chi_0$  of austenite, which makes it possible to use this characteristic as an effective criterion for predicting and controlling the mechanical properties of austenitic steels.

**Scientific novelty.** The idea of the relationship between the mechanical properties of austenitic steels and the preformed atomic-magnetic state of the austenitic matrix (parameter  $\chi_0$ ) is proposed and experimentally confirmed.

**Formulation of the problem.** The overwhelming bulk of steels 100Г8Л, 110Г10Л is paramagnetic austenite (99.93 %), and in steel 110Г10Л its amount reaches 100 %. Therefore, the properties of these steels are determined precisely by the state of austenite and its transformations. Austenite is a paramagnet, which is characterized by a peculiar electronic structure, for which the sensitive parameter is the specific paramagnetic susceptibility  $\chi_0$  (the total magnetic moment per unit mass of austenite at a unit value of the magnetic field). It is proposed to investigate these steels from the standpoint of the atomic-magnetic state of the austenitic matrix.

**Practical value.** A nomogram «specific paramagnetic susceptibility  $\chi_0$  of austenite – mechanical properties» is proposed, which can be used in production conditions to predict and control the mechanical properties of austenitic steels, namely, strength and ductility.

**Key words:** high-manganese steel, austenite, elongation, constriction, durability, stretched dislocation, deformation martensite, paramagnetic susceptibility.