

УДК 669.1: 539.538: 539.4.019.3: 537.621.4

Канд. физ.-мат. наук Г. В. Снежной, д-р техн. наук В. Е. Ольшанецкий

Национальный технический университет, г. Запорожье

О СВЯЗИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОМАРГАНЦЕВЫХ СТАЛЕЙ С ПАРАМАГНИТНОЙ УДЕЛЬНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТЬЮ АУСТЕНИТА

Показана связь механических свойств высокомарганцевых сталей с магнитным состоянием аустенитной матрицы, а именно с парамагнитной восприимчивостью χ_0 . С понижением этого параметра связано повышение предела прочности, ударной вязкости, относительного удлинения (сужения) и снижение ударно-абразивной износостойкости, а также уменьшение микротвердости. Предлагается рассматривать χ_0 как прогнозирующий индикатор для механических свойств.

Ключевые слова: аустенит, ударная вязкость, удлинение, сужение, износостойкость, растянутая дислокация, мартенсит деформации, парамагнитная восприимчивость.

В работах [1, 2, 3] было показано, что марганец как легирующий элемент оказывает сильное влияние на характер фазовых превращений (включая мартенситные) в сталях аустенитного класса при воздействии на материалы температурно-силовых факторов. При этом в качестве высокоточного индикатора структурных изменений и механических свойств может служить парамагнитная восприимчивость аустенита, которая в качестве высокочувствительной характеристики способна отражать особенности влияния температуры и давления, а также еще и химического состава (т. е. содержания Mn, C, Si и др. элементов) на общее состояние и свойства аустенитной фазы.

Поскольку марганец и углерод являются сильными аустенизаторами, то при варьировании содержания марганца и оценки его влияния на парамагнитную восприимчивость было признано целесообразным подбирать аустенитные материалы с примерно одинаковым содержанием углерода.

Для получения зависимостей типа «механические свойства – удельная парамагнитная восприимчивость аустенита» были выбраны такие показатели свойств, как ударно-абразивная износостойкость, ударная вязкость, относительное удлинение и сужение, а также микротвердость. При этом материалы были предварительно подготовлены с целью получения однородной исходной микроструктуры. Определение парамагнитной восприимчивости аустенита производили на специальной высокоточной аппаратуре [4].

При построении графиков полученных зависимостей (рис. 1–7) были использованы некоторые данные, приведенные в таблице 1, а также результаты, полученные при проведении прямых экспериментов. При этом мы пренебрегали влиянием на свойства аустенита таких примесей, как Cr, Al, P и S, поскольку их содержание в выбранных материалах (стали 110Г8Л, 110Г10Л, 110Г13Л) было таким, что не могло сколь-нибудь заметным образом повлиять на оценку свойств указанных материалов с помощью выбранного параметра-индикатора.

Указанные выше высокомарганцевые стали с различным содержанием марганца были получены в индукционных тигельных электропечах в виде слитков 100×100×200 мм, а затем подвергнуты закалке в воду от 1050 °С (время выдержки при этом составляло 3 часа). Образцы для механических испытаний и магнитометрических исследований вырезали из средней части слитка.

Для определения ударной вязкости (КCU) образцы испытывали на копре МК-30А согласно ГОСТ 9454-78. Испытания на разрыв проводили на машине УРМ-50, а предел прочности при растяжении на разрыв, относительные 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 изнашивания определяли в лабораторной шаровой мельнице

Таблица 1 – Химический состав исследуемых аустенитных материалов

| Марка стали | Элемент, масс.%, | | | | | | |
|-------------|------------------|-------|------|------|-------|-------|-------|
| | C | Mn | Si | Cr | Al | P | S |
| 110Г13Л | 1,16 | 13,80 | 0,76 | 0,10 | 0,018 | 0,092 | 0,016 |
| 110Г10Л | 1,19 | 10,47 | 0,45 | 0,01 | 0,022 | 0,100 | 0,015 |
| 110Г8Л | 1,14 | 8,60 | 0,66 | 0,10 | 0,019 | 0,088 | 0,04 |

по относительной потере веса эталонного и опытного образцов, а в качестве эталона использовали 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 $\text{HB} = 126 \text{ ед.}$

Для начала представлялось важным установить зависимость величины парамагнитной восприимчивости χ_0 аустенита от содержания марганца Мн (рис. 1). На графике видно, что с увеличением содержания марганца параметр χ_0 уменьшается.

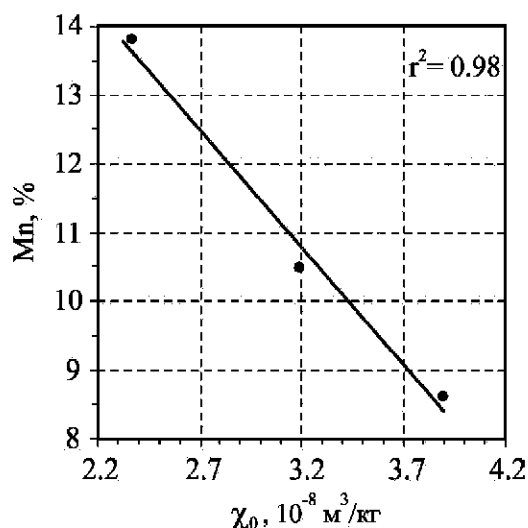


Рис. 1. Влияние содержания марганца Мн (при примерных одинаковом содержании других микролегирующих элементов) на магнитное состояние аустенита (параметр χ_0), r^2 – критический коэффициент линейной корреляции

Далее был проведен ряд экспериментов по установлению связей механических свойств от показателя χ_0 . Зависимости относительного удлинения δ и сужения Ψ от χ_0 имели вид, представленный на рис. 2 и 3. Как видим, с понижением χ_0 показатели пластичности (δ и Ψ) возрастают. Попытаемся объяснить эту особенность в поведении указанных механических характеристик. По литературным данным [5], марганец эффективно понижает энергию дефектов упаковки (в указанном интервале содержания Мн, см. табл. 1). В результате элементарные решеточные дислокации активно расщепляются на частичные, соединенные дефектами упаковки с отличной от аустенита кристаллографической структурой (ГПУ), что облегчает процесс пластической деформации из-за увеличения возможности легкого скольжения (и ослабления эффекта задержки движения дислокаций в плоскостях типа $\{0001\}$ дефектами Ломер-Коттрелла и Хирта с вершинными частичными дислокациями краевой ориентации) поскольку в случае расщепления отдельных элементарных дислокаций существует возможность перехода растянутых дислокаций в пересекающие плоскости скольжения того же типа.

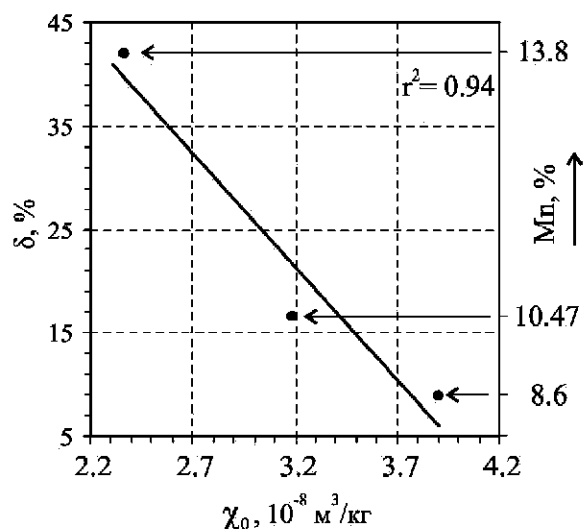


Рис. 2. Зависимость относительного удлинения δ от парамагнитной удельной восприимчивости χ_0 аустенита, r^2 – критический коэффициент линейной корреляции

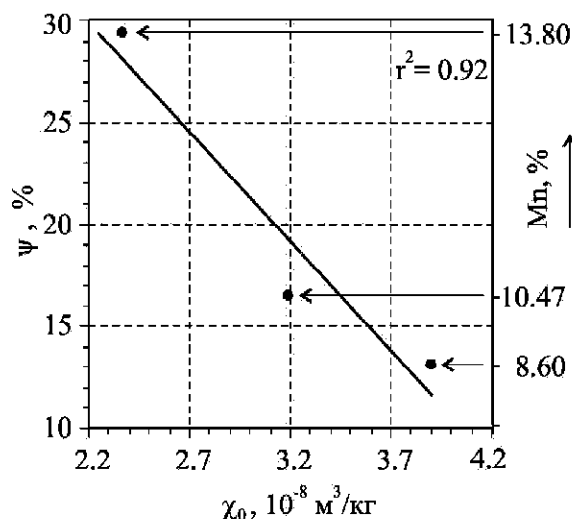


Рис. 3. Зависимость относительного сужения Ψ от парамагнитной удельной магнитной восприимчивости χ_0 аустенита, r^2 – критический коэффициент линейной корреляции

Для объяснения связи между ударной вязкостью и парамагнитной восприимчивостью аустенита (рис. 4) нами были использованы данные (рис. 5), касающиеся связи ударной вязкости с относительным удлинением и заимствованные из работы Гуляева А.П. (Металловедение, Издательство: Оборонгиз, Москва 1963). И поскольку ударная вязкость хорошо коррелирует с относительным удлинением (коэффициент корреляции составляет величину $r^2 = 0,97$, рис. 5), то все сказанное выше позволяет связать ударную вязкость с параметром χ_0 посредством оценки последним пластических характеристик материалов.

Интересно отметить, что предел прочности (рис. 6) и относительное удлинение (рис. 2) имеют одинаковую тенденцию изменения от парамагнитной воспри-

имчивости. Это, по нашему мнению, связано с «эффектом α -латуни», поскольку, как и в случае с цинком, входящим в состав латуней (ЛС90, Л80, Л70), при увеличении содержания марганца существенно уменьшается энергия дефектов упаковки и тем самым облегчается скольжение растянутых дислокаций с одновременным увеличением прочности (благодаря явлению твердорастворного упрочнения аустенита легирующей добавкой марганца).

Следует отметить, что ударноабразивная износостойкость аустенитной фазы изменяется в противоположную сторону относительно характера изменения содержания марганца. Т. е. при содержании Мп 8,6 % этот показатель K оказывается более высоким, чем при содержании 13,8 % того же элемента. Такой

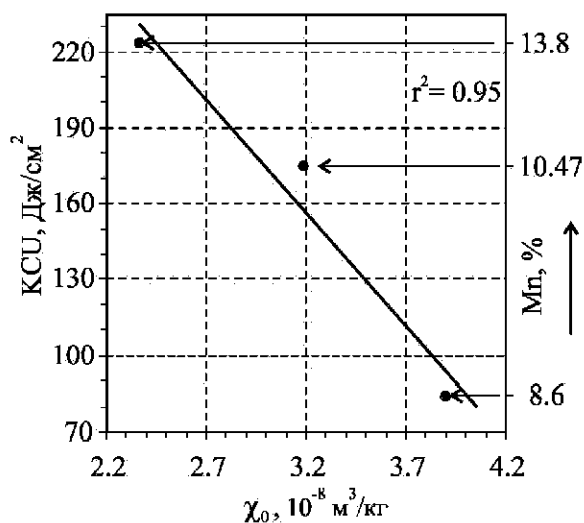


Рис. 4. Зависимость ударной вязкости KCU от парамагнитной удельной восприимчивости χ_0 аустенита, r^2 – критический коэффициент линейной корреляции

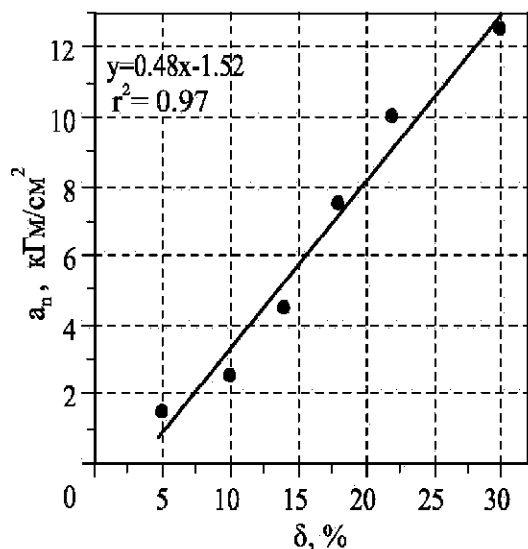


Рис. 5. Связь между ударной вязкостью a_n и относительным удлинением δ , заимствованные из работы А.П.Гуляева, r^2 – критический коэффициент линейной корреляции

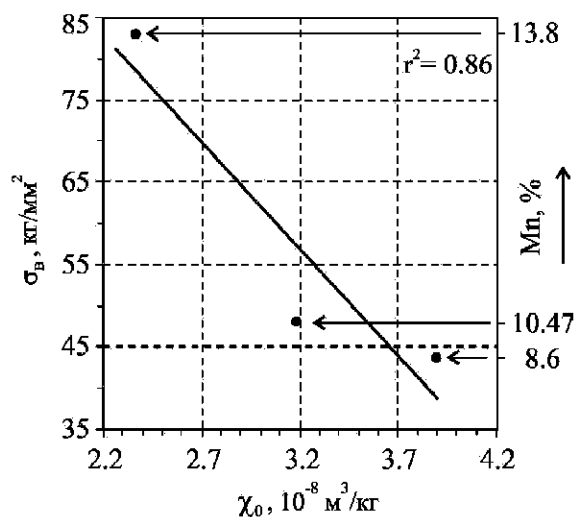


Рис. 6. Зависимость предела прочности σ_v от парамагнитной удельной магнитной восприимчивости χ_0 аустенита, r^2 – критический коэффициент линейной корреляции

неожиданный факт в поведении рассматриваемой механической характеристики можно попытаться объяснить следующим образом. Поскольку, как уже отмечалось выше, марганец уменьшает энергию дефектов упаковки и тем самым способствует расщеплению большого числа полных (элементарных) дислокаций, то это стимулирует процесс переброса скольжения из одной плоскости в другую. Кроме того, в указанной высокомарганцевой стали при ударноабразивном изнашивании практически не образуется мартенсит деформации, что также уменьшает степень наклепа поверхностного слоя. При содержаниях же марганца порядка 8,6 %, по-видимому, эффект расщепления полных дислокаций выражен слабее, что благоприятствует накоплению элементарных дислокаций у препятствий с образованием дислокационных клубков и сплетений.

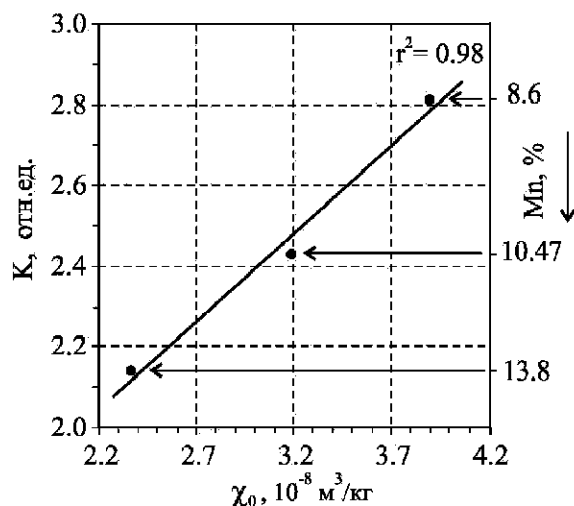


Рис. 7. Зависимость ударно-абразивной износостойкости K от парамагнитной удельной восприимчивости χ_0 аустенита, r^2 – критический коэффициент линейной корреляции

Это резко увеличивает твердость поверхностного слоя аустенита, и к тому же в данном случае еще образуются заметные количества очень твердых износостойких участков мартенсита деформации. Структура этого поверхностного (белого) слоя, по всей видимости, становится (при дальнейшем измельчении зерна в процессе деформации) аморфно-кристаллической или, возможно, даже аморфной.

Является исключительно интересной зависимость микротвердости от магнитного состояния аустенита, которая представлена на рис. 8. Как видим, увеличение микротвердости в этом случае обусловлено повышением параметра χ_0 .

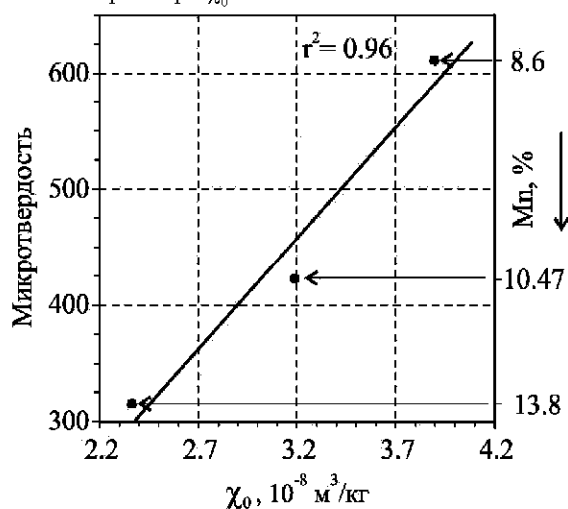


Рис. 8. Зависимость микротвердости исследуемых сталей от парамагнитной удельной восприимчивости χ_0 аустенита, r^2 – критический коэффициент линейной корреляции

Попытаемся объяснить указанную выше связь следующим образом. Поскольку при измерении микротвердости используются нагрузки, приводящие к исключительно малой локальной деформации (при вдавлении индентора), то из-за очень низкой энергии дефектов упаковки должно происходить активное расщепление полных дислокаций, что облегчает их легкое скольжение и повышает тем самым большую глубину проникновения индентора даже при малых нагрузках. При этом, несмотря на заметные длины свободного пробега дислокаций при таких малых локальных деформациях, растянутые дислокации не успевают создать отдельные скопления, которые способны заметно повлиять на микротвердость в направлении ее существенного увеличения.

Исходя из приведенных графиков, можно отметить наличие хорошей корреляционной связи между механическими свойствами и парамагнитной восприимчивостью аустенита, что дает возможность ее использовать в качестве эффективного фактора прогнозирования механических свойств аустенитного материала в зависимости от содержания в нем марганца (при ус-

ловии постоянного содержания углерода и др. элементов-аустенизаторов).

Выбор в качестве критерия оценки свойств именно парамагнитной восприимчивости аустенита (при варьировании в стали содержания марганца) обусловлен еще и тем, что непосредственное экспериментальное определение механических свойств аустенитных материалов часто является исключительно трудоемким, а сопоставляемый им критерий может быть легко установлен с использованием специального высокочувствительного оборудования [4], которое в отличие от магнитометрических весов (метод Фарадея) с униполярно-астатичною системою и механико-магнитным зацеплением призмы [6], содержит бесконтактный высокочастотный преобразователь. При этом отклонение образца под действием магнитного поля определяется по изменению частоты генератора, точность измерения которой составляет 5 Гц. Отметим, что при отклонении образца от нулевого положения на 1 мм частота генератора изменится на 20 кГц, что соответствует точности смещения датчика 25 мкм (т. е. минимальному регистрируемому отклонению от исходного нулевого положения).

Авторы выражают благодарность к.т.н. Сажневу В.Н. за предоставленные материалы и обсуждение результатов.

Список литературы

1. Ольшанецкий В. Е. О высокоточной оценке истинных мартенситных точек в специальных сталях аустенитного и аустенитно-мартенситного классов при изменении температурно-силовых факторов / В. Е. Ольшанецкий, Г. В. Снежной // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2012. – №1. – С. 15–21.
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. Ольшанецкий В. Е. О закономерностях формирования мартенситных фаз в марганцовистом аустените при деформации сжатием / В. Е. Ольшанецкий, Г. В. Снежной, В. Н. Сажнев // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2012. – №2. – С. 8–14.
4. Сніжною Г. В. Автоматизована установка для визначення магнетної сприйнятливості криць та стовпів / 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.
5. Гольдштейн М. И. Специальные стали. Учебник для вузов / М. И. Гольдштейн, С. В. Грачев, Ю. Г. Векслер. – М. : Металлургия, 1985. – 408 с.
6. Мирошниченко Ф. Д. Магнитометрические весы с униполярной астагической системой и механико-магнитным зацеплением призмы / Ф. Д. Мирошниченко, В. Л. Снежной // Приборостроение. – 1966. – №2. – С. 48–50.

Одержано 20.09.2012

Сніжної Г.В., Ольшанецький В.Ю. Про зв'язок механічних властивостей високоманганових сталей з парамагнетною питомою сприйнятливістю аустеніту

Показано зв'язок механічних властивостей високоманганових сталей з магнетним станом аустенітної матриці, а саме з парамагнетною сприйнятливістю χ_0 . Зі зниженням цього чинника пов'язані підвищення границі міцності, ударної в'язкості, відносного подовження (звуження) і зменшення ударноабразивної зносостійкості та мікротвердості. Пропонується розглядати χ_0 як прогнозувальним індикатор для визначення механічних властивостей.

Ключові слова: аустеніт, ударна в'язкість, подовження, звуження, зносостійкість, розтягнута дислокація, мартенсит деформації, парамагнетна сприйнятливість.

Snizhnoi G., Olshanetskyi V. Relationship between high-manganese steel mechanical properties with paramagnetic specific susceptibility of austenite

The relationship between mechanical properties of high-manganese steel with a magnetic state of austenite matrix, namely, the paramagnetic susceptibility χ_0 , was shown. With decrease of parameter χ_0 tensile strength, impact strength, elongation (narrowing) rises as well as shock-abrasive wear resistance and micro-hardness decrease. Parameter χ_0 as an indicator for predicting the mechanical properties is proposed.

Key words: austenite, impact strength, elongation, narrowing, durability, stretched dislocation, deformation martensite, paramagnetic susceptibility.
