

УДК 669.1: 539.538: 539.4.019.3: 537.621.4

Г. В. СНЕЖНОЙ, В. Н. САЖНЕВ, В. Е. ОЛЬШАНЕЦКИЙ

Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОМАРГАНЦЕВЫХ СТАЛЕЙ

Экспериментально установлено, что физико-механические свойства высокомарганцевых сталей с возрастанием содержания углерода зависят от парамагнитного состояния аустенита: с понижением парамагнитной удельной магнитной восприимчивости χ_0 аустенита возрастают прочностные (предел прочности σ_b и условный предел текучести $\sigma_{0.2}$), а пластические (относительное удлинение δ и сужение Ψ) характеристики и зависимость ударной вязкости КСУ характеризуются экстремумом. Фосфор, как косвенный фактор, также оказывает влияние на магнитное состояние аустенита и, следовательно, на механические свойства исследуемых сталей.

Ключевые слова: сталь, углерод, фосфор, прочность, ударная вязкость, удлинение, сужение, деформация, удельная магнитная восприимчивость аустенита.

Введение

Высокомарганцевые стали считаются очень привлекательным материалом вследствие хорошего соотношения прочностных и пластических характеристик [1, 2]. На механические свойства сталей влияют химический состав, содержание карбидов и наличие вредных примесей. Разброс значений химических элементов, даже в пределах величин, указанных в марочном составе сталей, может существенно влиять на физико-механические и эксплуатационные свойства металлоизделий [3]. Существует мнение, что главной причиной упрочнения стали Гадфильда есть образование мартенсита деформации в плоскостях скольжения [4, 5]. Однако в [6, 7] показано, что на деформационное упрочнение этой стали не влияет образование мартенситных фаз. Поэтому актуальным является поиск новых подходов выяснения причин улучшения свойств данных сталей.

В исходном, закаленном с 1050°C, сталь Гадфильда является полностью аустенитной, т.е. парамагнитной с точки зрения магнитного состояния. Предполагается, что механические свойства высокомарганцевых сталей зависят от парамагнитного состояния аустенита, а другие факторы косвенно влияют на эти свойства и также могут быть мерой (индикатором) поведения механических свойств.

Цель работы: показать зависимость механических свойств высокомарганцевых сталей от парамагнитного состояния аустенита, которая описывается магнитной восприимчивостью. Исследовано влияние возрастающих концентраций углерода и фосфора на физико-механические и магнитные

свойства высокомарганцевой стали при постоянных концентрациях остальных основных элементов.

1. Материал и методика эксперимента

Опытные плавки проводили в литейной лаборатории Запорожского национального технического университета в 60-килограммовой индукционной тигельной печи с основной футеровкой. Шихта состояла из лома стали 15, электродного боя и ферросплавов (ферромарганец ФМн90 по ГОСТ 4755-91, ферросилиций ФС65 по ГОСТ 1415-93, феррофосфор ФФ18 по ТУ 14-5-72-76, феррохром ФХ001А по ГОСТ 47 57-91), никеля катодного НИ по ГОСТ 849-97. Для исключения влияния металлургических и технологических факторов на свойства стали применяли метод порционной разливки, используя одну исходную плавку.

Заливали литые образцы по ГОСТ 2176-77 для испытаний на разрыв и ударный изгиб. Термическую обработку образцов, закалку в воде на аустенит с температуры 1050°C, осуществляли в лабораторной электропечи. Испытания на разрыв проводили на машине марки УРМ-50. Для определения ударной вязкости образцы с U-образным надрезом испытывали на маятниковом копре МК-30А. Магнитные свойства стали определяли чувствительным магнитометрическим методом, аналогично [8].

При исследовании влияния углерода исходная плавка содержала: С-0.43, Si-0.3, P-0.064, S-0.009, Cr-0.88, Ni-0.38, Mn-14.9%. После отбора каждой порции металла расплав науглероживали электрод-

ным боем. Содержание углерода в полученных плавках варьировалось от 0.43 до 1.56%.

2. Результаты и их обсуждение

Физико-механические свойства исследованных сталей (σ_b – предел прочности, σ_{02} – условный предел текучести, δ – относительное удлинение, Ψ – относительное сужение, КСУ – ударная вязкость) в зависимости от номера плавки и содержания углерода приведены в таблице 1.

Таблица 1
Механические свойства исследованных сталей в зависимости от содержания углерода

№ пл.	C, %	σ_b , МПа	σ_{02} , МПа	δ , %	Ψ , %	КСУ, Дж/см ²
1	0.43	527	251	7.5	10.6	158
2	0.58	543	264	21.7	19.2	231
3	0.85	553	297	25.4	23.8	256
4	1.04	659	443	38.9	27.0	356
5	1.27	701	425	45.4	34.0	340
6	1.46	737	439	49.3	37.2	347
7	1.56	740	420	33.4	29.0	228

Как видно из рис.1 прочностные характеристики (σ_b и σ_{02}) с увеличением концентрации углерода монотонно возрастали, а пластические (δ , Ψ , КСУ) имели экстремальную зависимость с точкой экстремума в пределах 1.25–1.30 % углерода.

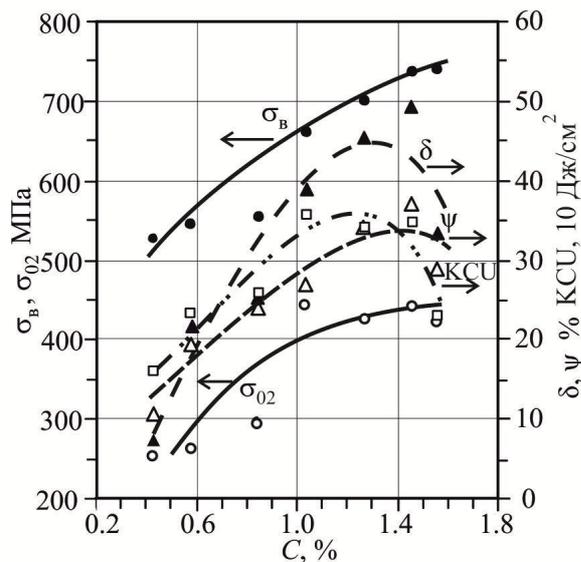


Рис. 1. Зависимость механических свойств исследованных сталей от содержания углерода

Полученные тенденции коррелирует с результатами, приведенными в [9], а именно, что при увеличении содержания углерода от 0 до 0.6 % в сплавах Fe–22Mn–C механические свойства (предел прочности на растяжение и удлинение) улучшаются. В [10] повышение прочностных характеристик объясняется образованием мартенситных фаз, а также упрочнением марганцовистого аустенита углеродом, создающим препятствия перемещению дислокаций при внешнем воздействии [11]. Однако количество $P_{\alpha'}$, возникшего в результате деформации α' – мартенсита (табл.2) в исследуемых образцах, незначительно (в пределах сотых долей процента), что не может быть основной причиной упрочнения стали при ее внешнем нагружении.

Экстремальное изменение пластических характеристик также связано с особенностями марганцовистого аустенита. Вначале, с изменением концентрации углерода от 0.6 до 1.25–1.30% их повышение объясняется увеличением стабильности аустенита [1]. В дальнейшем, при превышении этого уровня, снижение пластических характеристик объясняется поведением карбидов [2]. Это связано с тем, что концентрация углерода 1.3% близко подходит к границе его растворимости в марганцовистом аустените, вследствие чего при повышении концентрации углерода 1.3% в структуре литой стали увеличивается количество крупных карбидов по границам и внутри аустенитных зерен, а также дисперсных пластинчатых карбидов вдоль кристаллографических плоскостей. При проведении термической обработки растворение крупных карбидов способствует возникновению в металле микропустот, а вероятность получения остаточных карбидов после термической обработки становится тем больше, чем выше содержание углерода. Оба этих фактора и приводят к снижению пластических свойств металла.

Магнитометрические исследования были выполнены на образцах стали с содержанием углерода 0.58, 0.85, 1.04, 1.27 и 1.56%. При этом в образцах стали с 0.58% углерода после закалки наблюдается аустенитная структура с небольшим количеством $P_{\alpha'}$ α' -фазы, а в стали с содержанием углерода 0.85, 1.04, 1.27 и 1.56% – только аустенитная фаза (табл. 2).

Таким образом, основной фазой определяющей механические свойства исследуемых образцов высокомарганцевой стали является аустенит. Для образцов, вырезанных из шейки после пластического разрыва, определяли содержание $P_{\alpha'}$, возникшего в результате деформации α' – мартенсита деформации (табл. 2.).

Представляет интерес выяснить влияние углерода на парамагнитную удельную магнитную восприимчивость χ_0 аустенита. Из рис. 2 видно, что с

увеличением содержания углерода уменьшается χ_0 , т.е. увеличивается стабильность аустенита и улучшаются механические свойства.

Таблица 2

Содержание P_{α} образцов стали в исходном состоянии после закалки, $P_{\alpha'}$, возникшего α' -мартенсита деформации и значения парамагнитной удельной магнитной восприимчивости χ_0 аустенита

№ п.л.	C, %	P_{α} , %	$P_{\alpha'}$, %	$\chi_0, 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$
2	0.58	0.03	0.08	2.21
3	0.85	0.00	0.01	2.08
4	1.04	0.00	0.03	2.00
5	1.27	0.00	0.02	1.98
7	1.56	0.00	0.01	1.95

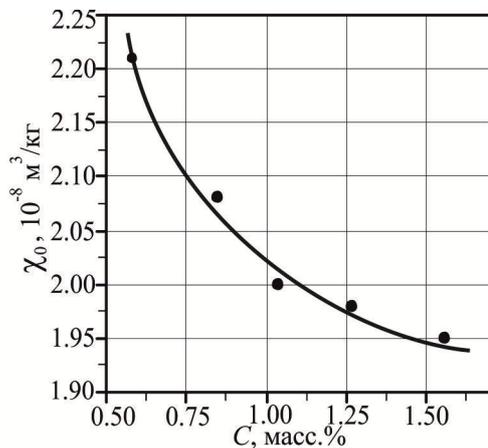


Рис. 2. Влияние содержания углерода С (при одинаковом содержании других легирующих элементов) на магнитное состояние аустенита (параметр χ_0)

Чтобы наглядно представить картину влияния магнитного состояния (структурно-чувствительной величины χ_0) аустенита на механические свойства, построим зависимости σ_B , σ_{02} , δ , Ψ и a_n от χ_0 , которые, соответственно, представлены на рис. 3-5.

Магнитное состояние аустенита коррелирует со свойствами стали - с понижением χ_0 возрастают прочностные характеристики (рис. 3).

Зависимости относительного удлинения δ и сужения Ψ от парамагнитной удельной магнитной восприимчивости χ_0 аустенита имеют вид, представленный на рис.4. Как видим, и в этом случае подтверждается тенденция - с понижением χ_0 возрастают показатели пластичности.

Зависимость ударной вязкости КСУ от магнитного состояния аустенита представлена на рис. 5. и характеризуется экстремумом.

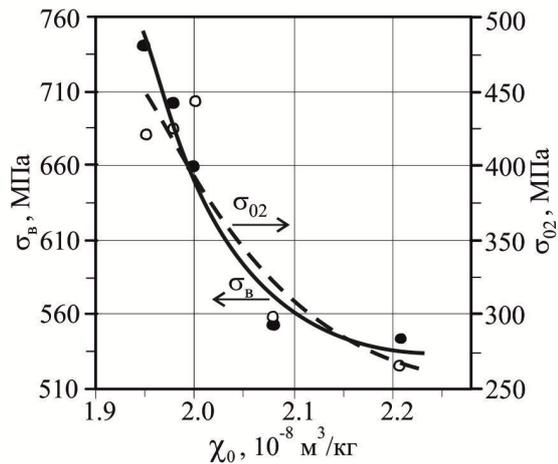


Рис. 3. Зависимость предела прочности σ_B и условного предела текучести σ_{02} от парамагнитной удельной магнитной восприимчивости χ_0 аустенита

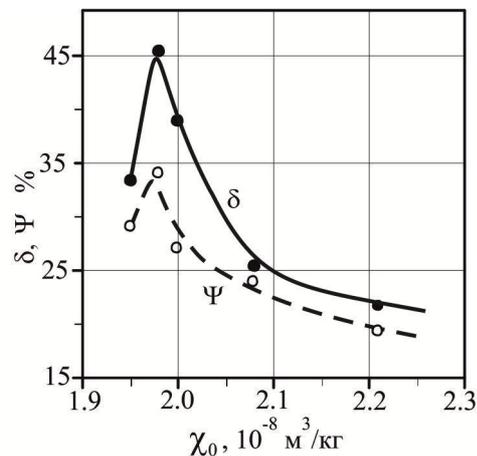


Рис. 4. Зависимость относительного удлинения δ и сужения Ψ от парамагнитной удельной магнитной восприимчивости χ_0 аустенита

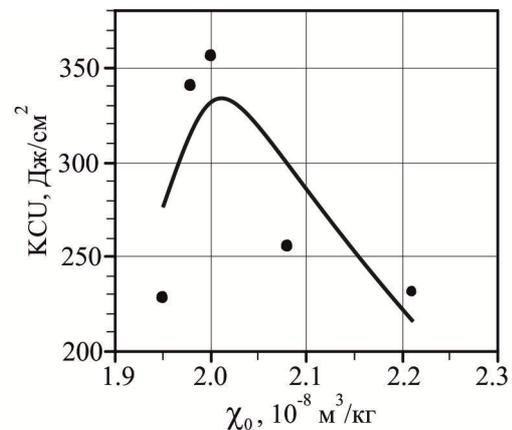


Рис. 5. Зависимость ударной вязкости КСУ от магнитной восприимчивости χ_0 аустенита

Такое поведение соответствует образцам стали с концентрациями углерода близкими к 1.3%, что и объясняет такую зависимость.

При исследовании влияния фосфора исходная плавка содержала: С – 1.3%; Mn – 12.6%; Si – 1.0%; P – 0.11%. Верхний предел содержания фосфора в высокомарганцевой стали для отливки по ГОСТ 977-88 – 0.12%. Поэтому представляло интерес изучить свойства стали с большим содержанием фосфора. Для этого после отбора каждой порции металла и заливки образцов в расплав вводили феррофосфор. Содержание фосфора в полученных плавках варьировалось от 0.11 до 0.33%.

Вредное влияние фосфора на свойства высокомарганцевой стали объясняется образованием хрупких соединений фосфидов железа и марганца, сложной карбидофосфидной эвтектики, которые располагаются в межосных пространствах дендритов и по границам зерен.

Из-за пониженной растворимости фосфора в аустените, фосфиды не переходят полностью в металл при термической обработке и тем самым ухудшают характеристики стали. Повышенное содержание фосфора в металле способствует ликвации углерода и марганца, и дополнительно загрязняет сталь карбидами. Практически все указанные выше фазы ферромагнитны, поэтому вероятность вредного влияния фосфора можно прогнозировать магнитным методом, для чего и были проведены настоящие исследования. Содержание P_{α} α -фазы образцов исследуемой стали с различным содержанием фосфора приведено на рис.6. При повышении содержания фосфора от 0.2% и выше увеличивается количество P_{α} α -фазы образцов исследуемой стали (рис.6) и при этом значительно ухудшаются физико-механические характеристики высокомарганцевой стали, износостойкость, увеличивается ее склонность к образованию трещин, укрупнению аустенитного зерна и трансформационному строению [11].

Проведенные исследования показали, что используя магнитный метод, усовершенствовав прибор для контроля магнитных свойств и проведя дополнительные исследования, можно прогнозировать возможность обобщенного метода контроля качества отливок из высокомарганцевой стали одновременно по нескольким негативным параметрам: повышенному содержанию фосфора, повышенному содержанию углерода, некачественной термической обработке и др.

Выводы

Экспериментально установлено, что физико-механические свойства высокомарганцевых сталей с возрастанием содержания углерода зависят от пара-

магнитного состояния аустенита: с понижением χ_0 возрастают прочностные характеристики (предел прочности σ_b и условный предел текучести σ_{02}), а пластические (относительное удлинение δ и сужение Ψ) и ударная вязкость КСЧ характеризуются экстремумами.

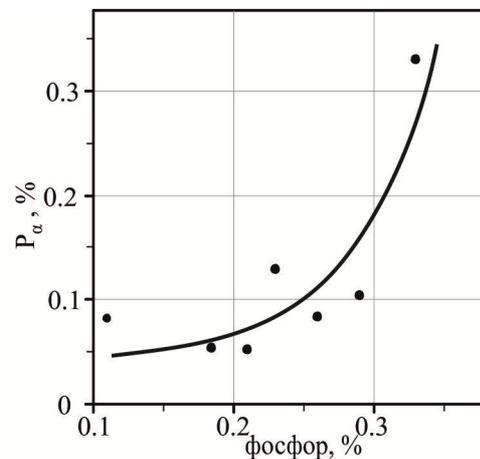


Рис. 6. Влияние содержания фосфора (при одинаковом содержании других легирующих элементов) на количество P_{α} α -фазы в исследуемой стали

Фосфор, как косвенный фактор, также оказывает влияние на магнитное состояние аустенита и, следовательно, на механические свойства исследуемых сталей.

Литература

1. Богачев, И. Н. Структура и свойства железомарганцевых сплавов [Текст] / И. Н. Богачев, В. Ф. Егорова. – М. : Металлургия, 1973. – 296 с.
2. Давыдов, Н. Г. Высокомарганцевая сталь [Текст] / Н. Г. Давыдов. – М. : Металлургия, 1979. – 176 с.
3. Большаков, В. И. Влияние химических компонентов на механические свойства стали 110Г13Л [Текст] / В. И. Большаков, О. П. Юшкевич, О. П. Носенко // Сб. науч. трудов «Стародубовские чтения 2015». Серия «Строительство, материаловедение, машиностроение». – 2015. – С. 98-104.
4. Schumann, H. Über Die Ursache der hohen Verfestigung Von Hartmanganstahl [Text] / H. Schumann // Neue Hütte. – 1974. – № 4. – P. 220-226.
5. Малинов, Л. С. Фазовые превращения при деформации в высокомарганцевом сплаве [Текст] / Л. С. Малинов, Е. Я. Харланова, Л. А. Голубович // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1976. – № 2. – С. 13-16.
6. Влияние упругих возбуждений на формирование структуры поверхностного слоя стали Гадфильда при трении [Текст] / А. В. Колубаев, Ю. Ф. Иванов, О. В. Сизова [и др.] // ЖТФ. – 2008. – Т. 78, № 2. – С. 811-814.

7. Сильман, Г. И. Диаграмма состояния сплавов системы Fe-C-Mn и некоторые структурные эффекты в этой системе [Текст] / Г. И. Сильман // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2006. – № 1. – С. 3-7.

8. Снежной, Г. В. Магнитное состояние аустенитной матрицы и механические свойства высокомарганцевых сталей [Текст] / Г. В. Снежной, В. Н. Сажнев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 9(96). – С. 115-120.

9. M. Ghasri-Khouzani. Effect of carbon content on the mechanical properties and microstructural evolution of Fe-22Mn-C steels [Text] / M. Ghasri-

Khouzani, J. R. McDermid // *Materials Science & Engineering A*. – 2015. – № 621. – P. 118-127.

10. Influence of carbon content on the microstructure, martensitic transformation and mechanical properties in austenite/ε-martensite dual-phase Fe-Mn-C steels [Text] / J. B. Seol, J. E. Jung, Y. W. Jang, C. G. Park // *Acta Materialia*. – 2013. – № 61. – P. 558-578.

11. Власов, В. И. Литая высокомарганцевистая сталь [Текст] / В. И. Власов, Е. Ф. Комолова. – М. : Машиз, 1963. – 195 с.

Поступила в редакцию 05.06.2015, рассмотрена на редколлегии 19.06.2015

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

ВПЛИВ ХІМІЧНИХ КОМПОНЕНТІВ НА МЕХАНІЧНІ І МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОМАРГАНЦЕВИХ СТАЛЕЙ

Г. В. Сніжної, В. М. Сажнев, В. Ю. Ольшанецький

Експериментально встановлено, що фізико-механічні властивості високомарганцевих сталей зі зростанням змісту вуглецю залежать від парамагнітного стану аустеніту: з пониженням парамагнітної питомої магнітної сприйнятливості χ_0 аустеніту зростають міцнісні (межа міцності σ_b і умовна межа плинності σ_{02}), а пластичні (відносне подовження δ і звуження Ψ) характеристики і залежність ударної в'язкості КСУ характеризуються екстремумами. Фосфор, як непрямий фактор, також впливає на магнітний стан аустеніту і, отже, на механічні властивості досліджуваних сталей.

Ключові слова: сталь, вуглець, фосфор, міцність, ударна в'язкість, подовження, звуження, деформація, питома магнітна сприйнятливості аустеніту.

INFLUENCE OF CHEMICAL COMPONENTS ON MECHANICAL AND MAGNETIC PROPERTIES MANGANESE STEELS

G. V. Snizhnoi, V. N. Sazhnev, V. E. Ol'shanetsky

Physical and mechanical properties of high-manganese steel with different carbon contents depend on the paramagnetic state of the austenite observed experimentally. With a decrease of the specific paramagnetic magnetic susceptibility χ_0 austenite the strength characteristics (tensile strength σ_b and yield strength σ_{02}) increase. With a decrease χ_0 austenite dependence of plastic (elongation δ and contraction Ψ) characteristics and toughness KCU contains maximum. Phosphorus as an indirect factor also affects the magnetic state of the austenite and therefore the mechanical properties of the studied steels.

Key words: steel, carbon, phosphorus, strength, toughness, elongation, contraction, deformation, specific magnetic susceptibility of austenite.

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

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

Ольшанецкий Вадим Ефимович – д-р техн. наук, проф., Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина, e-mail: olshan@zntu.edu.ua.