

I СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ. ОПІР РУЙНУВАННЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

УДК 669.15:537.621.4:620.193.4

Канд. физ.-мат. наук Г. В. Снежной¹, д-р техн. наук В. Г. Мищенко²,
канд. физ.-мат. наук В. Л. Снежной²¹ Запорожский национальный технический университет, ² Запорожский национальный университет;
г. Запорожье

ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ АУСТЕНИТА ПРИ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ АУСТЕНИТНЫХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ

Экспериментально установлено, что аустенит исследуемой стали 08X18H10, содержащий после стандартной закалки (1050 °С, в воду) незначительное количество δ - феррита, до одноосного растяжения характеризовался определенным магнитным состоянием, которое описывается удельной магнитной восприимчивостью $\chi_0 = 2,55 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, а после пластического одноосного растяжения магнитное состояние аустенита изменяется на 26 % ($\chi_0 = 3,22 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$). Такое отличие магнитных состояний аустенита может влиять на механические и служебные свойства аустенитных хромоникелевых сталей.

Ключевые слова: сталь, деформация, растяжение, аустенит, α' - мартенсит, магнитная восприимчивость.

Введение

Аустенит хромоникелевых сталей аустенитного класса с точки зрения магнитного состояния можно рассматривать как парамагнетик. Парамагнитный эффект возникает в аустените в связи с наличием нескомпенсированных орбитальных и спиновых магнитных моментов. При отсутствии внешнего магнитного поля векторы магнитных моментов располагаются равновероятно по всем направлениям под действием тепловой энергии и поэтому результирующий магнитный момент аустенита равен нулю. При наличии внешнего магнитного поля возникает преимущественное направление магнитных моментов вдоль поля, в результате чего суммарный магнитный момент аустенита не равен нулю.

Для описания магнитного состояния аустенита выбран чувствительный параметр – удельная магнитная

восприимчивость χ_0 [1]: $\chi_0 = \frac{\sum p_i}{m \cdot H}$, где p_i – неском-

пенсированный магнитный момент вещества, m – масса вещества, H – магнитное поле. Физически это означает, что удельная магнитная восприимчивость представляет физическую величину, численно равную сумме магнитных моментов единицы массы вещества при единичном магнитном поле. Парамагнитная восприимчивость χ_0 чувствительна к изменениям механических и служебных свойств аустенита.

Использовать другие методы, например, рентгеновские лучи для изучения магнитного состояния (магнитной атомной структуры) нельзя, так как рентгеновские лучи не имеют магнитных моментов, которые бы могли взаимодействовать с атомными магнитными моментами частиц вещества [2]. Для исследования магнитного атомного состояния можно привлекать нейтроны, которые обладают магнитным моментом и поэтому могут взаимодействовать с магнитными моментами атомов в кристаллах [2]. Однако этот метод является достаточно трудоемким. Следовательно, магнитометрический метод является наиболее простым и удобным [3].

В процессе холодной пластической деформации аустенитных хромоникелевых сталей протекают сложные $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращения, приводящие к нарушению равномерного распределения легирующих и примесных элементов [4]. Последние процессы приводят к изменению кристаллической и атомно-магнитных состояний аустенита [4]. Эти явления могут определять дальнейшие механические и служебные свойства сталей.

Изучению $\gamma \rightarrow \alpha'$ (α' - мартенсит деформации) магнитными методами в аустенитных хромоникелевых сталях посвящено много работ [5...8]. При этом значительные трудности возникают при исследовании начальной стадии $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращения, когда зарождается весьма низкое содержание α - фазы (0,000...0,5 %) и, когда при измерении α - фазы не учитывается намаг-

ниченность аустенита. Последнее приводит к значительным погрешностям до 1000 % [9]. Поэтому к полученным данным нужно относиться осторожно [6].

Сравнительно мало посвящено работ поведению аустенита при холодной пластической деформации до и после возникновения мартенсита деформации [10–12]. В настоящей работе исследуется изменение магнитного состояния (параметра χ_0) аустенита до и после пластической одноосной деформации растяжением стали 08X18H10 при комнатной температуре.

Материал и методика эксперимента

Для исследования выбрана аустенитная хромоникелевая сталь 08X18H10 в виде проволоки диаметром 4 мм, которая применяется для изготовления сварочных электродов. Химический состав стали (масс. %): С-0,068, Cr-17,90, Ni-10,1, Mn-1,56, Si-0,55, Nb-0,032, Ti-0,0075, Mo-0,101, Cu-0,162, P-0,030, S-0,011, N-0,057. С целью получения полностью аустенизированного состояния (100,00 %) стержни из этой проволоки подвергали нагреву до 1373 К, выдерживали 30 мин. и охлаждали в воде. Однако такая закалка не привела к полной аустенизации, т. к. образцы содержали незначительное количество δ -феррита. Затем эти стержни подвергали одноосной деформации растяжением на приборе ИР-100 при комнатной температуре. Стержни с исходной длиной 273 мм с кольцевым концентратором посередине шириной 0,5 мм и глубиной 0,25 мм под действием усилия 8,6 кН разрушались при длине 357 мм. Диаметр стержня до разрушения 4 мм, в точке разрыва 2,5 мм. Из этих стержней вырезали образцы холодным механическим способом в виде цилиндрической формы высотой 3 мм. Для снятия поверхностных напряжений образцы шлифовались абразивной бумагой и электрополировались до зеркального блеска.

Удельную магнитную восприимчивость χ , результирующую удельную магнитную восприимчивость $\chi_\infty = \chi_0 + \chi_p$ (χ_0 и χ_p соответственно удельные магнитные восприимчивости аустенитной и парапроцессной составляющей α -фазы образца) и весьма низкое содержание α -фазы (δ -феррит и α' -мартенсит деформации) определяли по методике, описанной в работах [9, 13, 14].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В таблицах 1,2 приведены соответственно экспериментальные значения для недеформированных и деформированных образцов результирующие удельные магнитные восприимчивости $\chi_\infty = \chi_0 + \chi_p$ количество δ -феррита P_δ и суммарное значение $P_{\delta+\alpha'}$ δ -феррита и α' -мартенсита в образцах, деформированных растяжением.

Обращает на себя внимание тот факт, что весьма низкое содержание P_δ δ -феррита в объемных про-

Таблица 1 – Экспериментальные значения χ_∞ и P_δ для недеформированных (исходных) образцов

№ недеформированных (исх.) образцов	$\chi_\infty, 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$	$P_\delta, \%$
1	2,80	0,0074
2	2,68	0,0035
3	2,67	0,0030
4	2,74	0,0058
5	2,70	0,0048
6	2,82	0,0081
7	2,90	0,0098
8	2,94	0,0113
9	2,85	0,0093
10	2,76	0,0065
		$\bar{P}_\delta = 0,0070\%$

центах порядка тысячных долей процента (см. табл. 1) по сравнению с суммарным содержанием $P_{\delta+\alpha'}$ (δ -феррита и α' -мартенсита) (см. табл. 2) примерно в 5 раз меньше. Если принять, что при деформации количество δ -феррита не изменяется ($P_\delta = \text{const}$), тогда среднее значение составляет $\bar{P}_\delta = 0,0070\%$ δ -феррита распределенного по длине недеформированного стержня (см. табл.1), то легко подсчитать приближенное количество образовавшегося α' -мартенсита по формуле $P_{\alpha'} = P_{\delta+\alpha'} - \bar{P}_\delta$ (см. табл. 2). На рис. 1 представлено графическое распределение количества α' -мартенсита, распределенного по длине стержня после деформации растяжением. Образец 40 соответствует точке разрыва. Как видим, в области разрушения количество возникающего α' -мартенсита в ~ 100 раз превышает количество локального мартенсита, образовавшегося по длине стержня до разрушения.

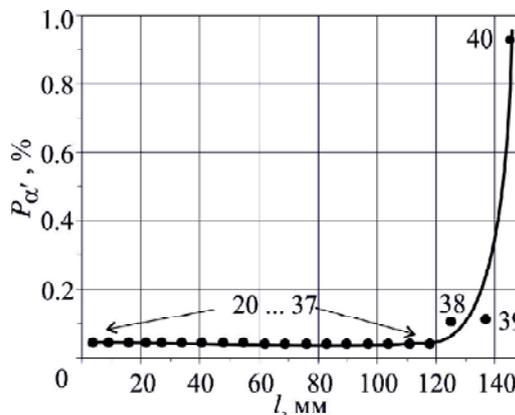


Рис. 1. Распределение α' -мартенсита по длине стержня после деформации растяжением стали 08X18H10. Цифрами указаны номера вырезанных образцов

Таблица 2 – Экспериментальные значения χ_∞ , $P_{\delta+\alpha'}$ и $P_{\alpha'} = P_{\delta+\alpha'} - \bar{P}_\delta$ для образцов, деформированных одноосным растяжением

№ деформированных образцов	$\chi_\infty, 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$	$P_{\delta+\alpha'}, \%$	$P_{\alpha'} = P_{\delta+\alpha'} - \bar{P}_\delta, \%$
20	3,57	0,0505	0,0435
21	3,55	0,0504	0,0434
22	3,67	0,0491	0,0421
23	3,68	0,0475	0,0405
24	3,69	0,0479	0,0409
25	3,62	0,0486	0,0416
26	3,56	0,0481	0,0411
27	3,59	0,0482	0,0412
28	3,62	0,0501	0,0431
29	3,58	0,0458	0,0388
30	3,58	0,0457	0,0387
31	3,54	0,0451	0,0381
32	3,56	0,0452	0,0382
33	3,57	0,0453	0,0383
34	3,58	0,0454	0,0384
35	3,61	0,0455	0,0385
36	3,63	0,0457	0,0387
37	3,67	0,0458	0,0388
38	4,3	0,1100	0,1030
39	4,9	0,1190	0,1120
40	12,7	0,9330	0,9260

Для нахождения удельных магнитных восприимчивостей аустенита χ_0 (недеф.) и χ_0 (деф.) соответственно недеформированного и деформированного образцов из линейной зависимости χ_∞ от P_δ (рис. 2), χ_∞ от $P_{\alpha'}$ (рис. 3) экстраполированием $P_\delta \rightarrow 0$ и $P_{\alpha'} \rightarrow 0$ (отсутствует феррофаза, т. е. $\chi_p = 0$ и поэтому $\chi_\infty = \chi_0 + \chi_p \rightarrow \chi_0$) определяем значение χ_0 (недеф.) и χ_0 (деф.) аустенита (соответственно для недеформированных и деформированных образцов). Из рис. 2, 3 следует, что χ_0 (недеф.) = $2,55 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ и χ_0 (деф.) = $3,22 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$.

Используя чувствительный магнитометрический метод, ранее установлен эффект роста удельной магнитной восприимчивости χ_0 аустенита при одноосном сжатии сталей 12X18H10T [11], 10X18H9-У [12], 08X18H10T [15] до истинной деформационной точки ε_s . В точке ε_s зарождается и с увеличением степени

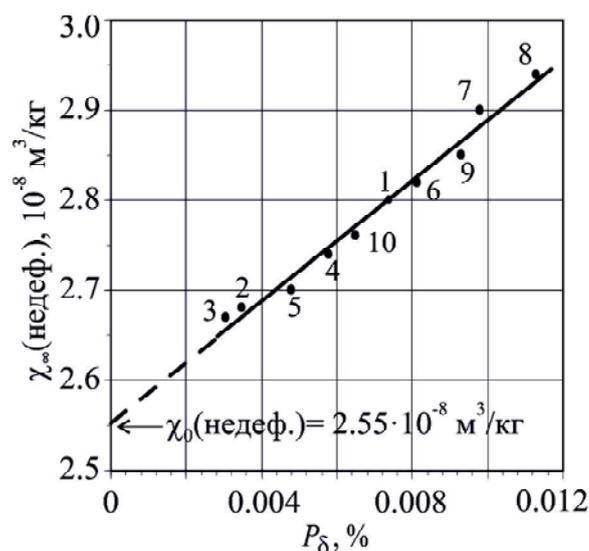


Рис. 2. Зависимость результирующей удельной магнитной восприимчивости χ_∞ (недеф.) от количества δ -феррита недеформированных (исходных) образцов, вырезанных вдоль стержня. Цифрами 1...10 указаны номера образцов

деформации накапливается мартенсит деформации при постоянном значении $\chi_0^{\max} = \text{const}$ (постоянное магнитное состояние). Так, для стали 12X18H10T [11] до деформации сжатием $\chi_0 = 3,32 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, а в точке ε_s удельная магнитная восприимчивость достигает $\chi_0^{\max} = 4,6 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$; для стали 10X18H9-У [12] $\chi_0 = 2,82 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, $\chi_0^{\max} = 3,06 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$; для стали 08X18H10T [15] $\chi_0 = 2,81 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, $\chi_0^{\max} = 3,23 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$.

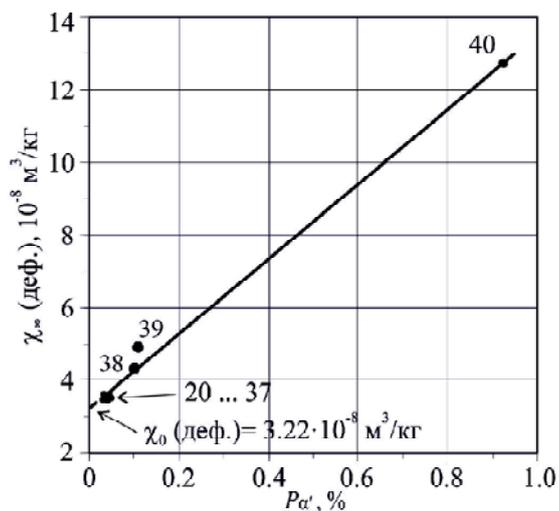


Рис. 3. Зависимость результирующей удельной магнитной восприимчивости $\chi_{\infty}(\text{деф.})$ от количества $P_{\alpha'}$ α' -мартенсита деформированных образцов одноосным растяжением. Цифрами 20...40 указаны номера образцов. Образец 40 соответствует точке разрыва

Таким образом, по аналогии с [10] можно принять, что исследуемая сталь 08X18H10 до одноосного растяжения характеризовалась определенным магнитным состоянием аустенита ($\chi_0 = 2,55 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$) и по мере достижения истинной деформационной мартенситной точки ε_s магнитное состояние возросло до постоянного максимального значения $\chi_0^{\max} = 3,22 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, при котором начал зарождаться и накапливаться α' -мартенсит деформации, т.е. магнитное состояние χ_0 изменилось более чем на 26%. В работах [16, 17] установлено, что механические и служебные свойства коррелируют с удельной магнитной восприимчивостью χ_0 аустенита стали AISI321. Предполагается, что такая корреляционная зависимость может иметь место и для исследуемой стали, деформированной одноосным растяжением.

Выводы

1. Установлено, что сталь 08X18H10 в виде стержня после стандартной термообработки (1050 °С 30 мин, охлаждение в воду) полностью не аустенизируется и количество δ -феррита по длине стержня оказывается

неоднородным и изменяется от 0,0030 до 0,0113%. Среднее количество δ -феррита составляет 0,0070%.

2. После одноосного растяжения исходной стали 08X18H10 количество α' -мартенсита в различных участках по длине деформированного стержня до зоны разрушения изменяется от 0,0030% до 0,0113%, т.е. значительно больше по сравнению со средним значением δ -феррита недеформированной стали. Непосредственно в зоне разрушения $P_{\alpha'}$ возросло до 0,926%.

3. Установлено различные магнитные состояния аустенита стали 08X18H10 до одноосного растяжения ($\chi_0 = 2,55 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$) и после одноосного растяжения ($\chi_0 = 3,22 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$), что, возможно, может влиять на механические и служебные свойства аустенитных хромоникелевых сталей.

Список литературы

1. Вонсовский С. В. Магнетизм / С. В. Вонсовский. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.
2. Вонсовский С. В. Природа магнетизма / С. В. Вонсовский. – М.: Знание, 1964. – 40 с.
3. Снежной В. Л. Определение низких содержаний альфа-фазы в аустенитных хромоникелевых сталях и влияние магнитного поля на $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение: дис. ... кандидата физ.-матем. наук: 046 – физика твердого тела / Снежной Валентин Лукьянович / Днепропетровск, 1968. – 130 с.
4. Ермаков Б. С. Роль остаточных сварочных деформаций в снижении работоспособности трубопроводов, эксплуатируемых в условиях низких температур / Б. С. Ермаков, С. О. Маликов, Ю. П. Солнцев // Известия СПбГУНиПТ. – 2007. – № 1. – С. 28–33.
5. Ажажа В. М. Применение магнитных методов для исследования эволюции структуры в аустенитных нержавеющих сталях после длительной эксплуатации энергоблоков на АЭС / В. М. Ажажа, В. А. Десненко, Л. С. Ожигов и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение» (94). – 2009. – № 4–2. – С. 241–246.
6. Максимкин О. П. Параметры образования мартенситной α' -фазы при деформации нержавеющих сталей, облученных в реакторах АХ ВВРр-К и БН-350 / О. П. Максимкин, Н. Н. Гусев, И. С. Осипов // Вестник НЯЦ РК. – 2007. – № 3. – С. 12–17.
7. Максимкин О. П. Обратное мартенситное $\alpha \rightarrow \gamma$ превращение в стали 12X18H10T, облученной до 56 СНА в реакторе БН-350 и деформированной при 293К / О. П. Максимкин, Б. К. Рахашев // Вестник НЯЦ РК. – 2009. – № 3. – С. 161–166.
8. Максимкин О. П. Особенности кинетики образования α' -мартенсита при деформации нержавеющей стали 12X18H10T, облученной нейтронами / О. П. Максимкин, К. В. Цай, Д. Х. Садвакасов // Вестник НЯЦ РК. – 2007. – № 1. – С. 4–13.
9. Снежной В. Л. Влияние магнитного момента парамагнитной матрицы на определение низких содержаний α -фазы в аустенитных сталях / В. Л. Снежной, Ф. Д. Мирошниченко, В. Г. Каниболоцкий, Г. А. Охромий // ФММ. – 1970. – Т. 30. – № 2. – С. 363–366.

10. 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.
11. Сніжної Г. В. Зародження мартенситу деформації в хромонікелевих сталях аустенітного класу / Г. В. Сніжної // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2011. – Т. 47. – № 3. – С. 84–89.
12. Сніжної Г. В. Магнетна поведінка аустеніту на початку утворення мартенситу деформації в криці 10X18H9-Y / Г. В. Сніжної // Фізика і хімія твердого тіла. – 2011. – Т. 12. – № 3. – С. 748–752.
13. Снежной Г. В. Интегральный физический метод идентификации α' -фазы в аустенитных хромоникелевых сталях / Г. В. Снежной, В. Г. Мищенко, В. Л. Снежной // Литье и металлургия. – 2009. – №3(52). – С. 241–244.
14. Снежной Г. В. Контроль количества δ -феррита в сталях типа 18-10 методом определения парапроцессной магнитной восприимчивости / Г. В. Снежной // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – №10(87). – С. 22–25.
15. Snizhnoi G.V. Magnetic state of the deformed austenite before and after martensite nucleation in austenitic stainless steels // G.V.Snizhnoi, M.S.Rasshchupkina / Journal of Iron and Steel Research, International. – 2012. – Vol. 19. – № 6. – P. 42–46.
16. Snizhnoi G. V. Dependence of the Corrosion Behavior of Austenitic Chromium-Nickel Steels on the Paramagnetic State of Austenite / G.V. Snizhnoi // Materials Science. – 2013. – Vol. 49. – №3. – P. 341–346.
17. Сніжної Г. В. Вплив магнітного стану аустенітної матриці на механічні властивості сталі AISI321 / Г. В. Сніжної // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2014. – № 7(114). – С. 105–109.

Одержано 10.11.2014

Сніжної Г.В., Міщенко В.Г., Сніжної В.Л. Еволюція магнітного стану аустеніту при холодній пластичній деформації аустенітних хромонікелевих сталей

Експериментально встановлено, що аустеніт досліджуваної сталі 08X18H10, який містить після стандартної закалки (1050 °С, у воду) незначну кількість δ -ферриту, до одноосового розтягування описувався певним магнітним станом, який характеризується питомою магнітною сприйнятливістю $\chi_0 = 2,55 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, а після пластичної деформації одноосовим розтягуванням магнітний стан аустеніту ($\chi_0 = 3,22 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$) змінюється майже на 26 %. Така відмінність магнітних станів аустеніту може бути однією з причин зміни механічних і службових властивостей аустенітних хромонікелевих сталей.

Ключові слова: сталь, деформація, розтягнення, аустеніт, α' -мартенсит, магнітна сприйнятливість.

Snezhnoi G., Mishcheno V., Snezhnoi V. The evolution of the magnetic state of austenite during cold plastic deformation of austenitic chromium-nickel steels

Austenite of steel 08X18H10 with insignificant quantity of δ -ferrite after standart quenching (1050 °C, water) before uniaxial tension is described by magnetic state which is characterized by specific magnetic susceptibility $\chi_0 = 2,55 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ has been established experimentally. After uniaxial tension deformation magnetic state of austenite ($\chi_0 = 3,22 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$) is changed by almost 26 %. This difference of magnetic state of austenite may be one of the reasons of changing mechanical and service properties of austenitic chromium-nickel steels.

Key words: steel, deformation, tensile, austenite, α' -martensite, magnetic susceptibility.