

УДК 669.018.539.213.537.662

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ ИСХОДНЫХ ИЗГИБНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ИХ РЕЛАКСАЦИЮ ПРИ ОТЖИГЕ В АМОРФНОМ СПЛАВЕ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА СОСТАВА $Fe_{78}Ni_1Si_8B_{13}$

Могильников П.С., ассистент кафедры физического материаловедения (pavel_mog@mail.ru)

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. На примере аморфного сплава на основе железа состава $Fe_{78}Ni_1Si_8B_{13}$ показано, что уровень исходных изгибных напряжений оказывает существенное влияние на развитие их релаксации в процессе отжига: чем выше эти напряжения, тем выше степень их релаксации и тем более низкая «критическая» температура отжига T_c , выше которой проявляется релаксация.

Ключевые слова: аморфные сплавы, релаксация изгибных напряжений, температура отжига.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-11-837-839

Атомная структура аморфных сплавов в результате отжига приобретает более низкоэнергетическое (более равновесное) состояние. Это происходит вследствие развития в аморфной фазе разных по своей природе необратимых релаксационных процессов (гомогенизация аморфной фазы), приводящих к выравниванию всех видов флуктуаций плотности. Один из методов изучения релаксационных процессов в аморфных сплавах при отжиге предложен в работе [1]. Он основан на изучении релаксации изгибных напряжений, искусственно создаваемых путем навивки ленты и ее жесткой фиксации на оправке определенного радиуса R_0 . В результате атомных перестроек в аморфной фазе ее структура при нагреве изменяется в таком направлении, которое в наибольшей степени отвечает равновесному состоянию в условиях действия изгибных напряжений. Вследствие этого исходные изгибные напряжения уменьшаются до определенного уровня – происходит релаксация этих напряжений.

Магнитно-мягкие аморфные сплавы широко используются в современной технике в виде витых сердечников, при изготовлении которых в ленте возникают изгибные напряжения, приводящие к деградации магнитных свойств [2 – 4]. Поэтому изучение закономерностей релаксации этих напряжений при отжиге аморфных сплавов приобретает и практическое значение.

В работах, посвященных изучению релаксации изгибных напряжений в аморфных сплавах, как правило не указывался радиус оправки R_0 , на которой фиксировалась аморфная лента, т. е. не отмечалось исходное значение изгибного напряжения σ_u . Очевидно, при этом предполагалось, что закономерности релаксации изгибных напряжений в процессе отжига не зависят от уровня исходных напряжений [2, 4 – 6].

Цель представленной работы – выявить наличие и характер влияния исходного уровня изгибных напряже-

ний на их релаксацию при отжиге в аморфном сплаве на основе железа состава $Fe_{78}Ni_1Si_8B_{13}$.

Изученный сплав получали методом спиннингования в виде лент толщиной 25 мкм и шириной 10 мм. Аморфное состояние сплава контролировали рентгеновским методом.

Напряжения σ_m на поверхности изогнутой ленты рассчитывали по уравнению [3]

$$\sigma_m = \frac{Et}{2R_0}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга; t – толщина ленты; R_0 – радиус оправки.

В соответствии с общепринятой в настоящее время методикой, предложенной авторами работы [1], релаксацию изгибных напряжений оценивали параметром

$$\gamma = 1 - \frac{R_0}{R_{T,t}}, \quad (2)$$

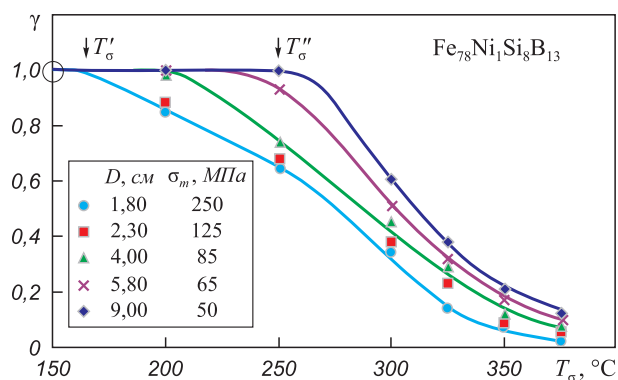
где R_0 – радиус оправки (обычно кварцевой), на которую навивают и закрепляют виток ленты; $R_{T,t}$ – остаточный радиус кривизны снятой с оправки ленты после отжига при температуре T в течение времени t . Из уравнения (2) ясно, что если после отжига снятая с оправки лента осталась прямой ($R = \infty$), то параметр релаксации равен 1, что отвечает отсутствию релаксации напряжений. Степень релаксации оценивали как $(1 - \gamma)$. Эксперименты проводили путем намотки и закрепления одного витка ленты на кварцевых оправках разного диаметра. Диаметр оправки D изменяли от 1,8 до 9,0 см, что отвечало изменению σ_m от 250 до 55 МПа.

Результаты экспериментов по влиянию уровня исходных изгибных напряжений на развитие релаксации

этих напряжений при отжиге приведены на рисунке. Видно, что при всех температурах отжига степень релаксации изгибных напряжений, измеренная за время выдержки 0,5 ч, зависит от уровня исходных напряжений. Чем выше исходные изгибные напряжения σ_m , тем больше степень их релаксации при отжиге, оцениваемая как $(1 - \gamma)$. Так, например, при температуре отжига $T_a = 375$ °С процесс релаксации практически полностью завершился за время выдержки 0,5 ч в лентах, навитых на оправку с $D = 1,8$ см ($\gamma \approx 0,02$), в то время как в лентах, навитых на оправку с $D = 9,0$ см этот процесс еще сравнительно далек от завершения ($\gamma \approx 0,13$).

Примечательным является и тот факт, что температура T_σ , выше которой удастся зафиксировать начальные стадии релаксации изгибных напряжений, также зависит от величины их исходных значений: чем они выше, тем «критическая» температура отжига T_σ ниже. Так, например, если эта температура для ленты, навитой на оправку с $D = 1,8$ см равна около 170 °С (T'_σ , см. рисунок), то для ленты, навитой на оправку с $D = 9,0$ см она располагается в районе 250 °С (T''_σ). Таким образом, можно констатировать, что в случае высоких исходных изгибных напряжений процесс их релаксации в аморфных лентах протекает более интенсивно, чем в лентах с низкими исходными напряжениями. В первом случае кривые релаксации $\gamma(T_a)$ располагаются ниже кривых, относящихся к изогнутым лентам с относительно низкими напряжениями, а «критическая» температура T_σ имеет более низкое значение ($T'_\sigma < T''_\sigma$).

Основываясь на результатах экспериментов, полученных в данной работе, можно прийти к следующему заключению. В сплавах на основе железа возможны случаи, когда закономерности релаксации изгибных напряжений под влиянием отжига зависят от их исходного уровня. Именно такой случай присущ аморфному сплаву состава $Fe_{78}Ni_1Si_8B_{13}$. Это проявляется в том, что с увеличением исходных изгибных напряжений степень релаксации этих напряжений увеличивается, а «критическая» температура отжига T_σ уменьшается. Эти закономерности свидетельствуют о том, что высокие исходные изгибные напряжения облегчают протекание



Влияние величины исходных изгибных напряжений σ_m (диаметр оправки D) и температуры отжига T_a на развитие процесса релаксации этих напряжений в течение 0,5 ч для аморфного сплава $Fe_{78}Ni_1Si_8B_{13}$

Influence of bending strain quantity σ_m and annealing temperature T_a on strain relaxation properties for amorphous $Fe_{78}Ni_1Si_8B_{13}$ alloy

тех атомных перестроек в аморфной фазе, которые приводят к релаксации изгибных напряжений при отжиге.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Luborsky F., Walter J. Stress relaxation in amorphous alloys // Mater. Sci. Eng. 1978. Vol. 35. No. 2. P. 255 – 261.
2. Matsujama T. Disaccommodation of amorphous magnetic alloys ($Fe_{1-x}Co_x$)₇₅Si₁₀B₁₅ // Proc. 4th Int. Conf. on Rapidly Quench. Metals. Sendai. 1981. Sendai (Japan). 1982. P. 1199 – 1202.
3. Зусман А.И., Соснин В.В. Магнитные свойства витых тороидов из аморфных сплавов // Аморфные прецизионные сплавы: Сб. тр. – М.: Металлургия, 1981. С. 13 – 21.
4. Кекало И.Б., Жданов А.И., Цветков В.Ю. Влияние упругой и пластической деформации на магнитные свойства аморфных сплавов // Структура, структурные превращения и магнитные свойства аморфных металлических сплавов: Сб. тр. – М.: Металлургия, 1986. С. 118 – 130.
5. Кекало И.Б., Шуваева Е.А., Введенский В.Ю. Релаксация напряжений в аморфном сплаве $Co_{60}Ni_{8.5}Fe_4(Cr,Mn)_{2.5}(Si,B)_{25}$ // Цветные металлы. 2007. № 6. С. 17 – 23.
6. Кекало И.Б., Тараничев В.Е., Цветков В.Ю. Энергетический спектр процессов структурной релаксации аморфного сплава $Fe_5Co_{70}Si_{15}B_{10}$ // Докл. АН СССР. 1984. Т. 278. № 5. С. 1115 – 1119.

Поступила 14 сентября 2016 г.

FEATURES OF THE INITIAL BENDING STRESSES INFLUENCE ON THE RELAXATION PROCESS DURING ANNEALING IN AMORPHOUS IRON-BASED $Fe_{78}Ni_1Si_8B_{13}$ ALLOY

P.S. Mogil'nikov

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

Abstract. It is shown for the amorphous alloy $Fe_{78}Ni_1Si_8B_{13}$ that the level of initial bending stresses has a significant influence on the relaxation process during annealing: the higher stresses cause the higher degree of their relaxation and the lower critical temperature of relaxation T_σ .

Keywords: amorphous alloys, iron base, relaxation, initial bending stresses.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-11-837-839

REFERENCES

1. Luborsky F., Walter J. Stress relaxation in amorphous alloys. Mater. Sci. Eng. 1978, vol. 35, no. 2, pp. 255–261.
2. Matsujama T. Disaccommodation of amorphous magnetic alloys ($Fe_{1-x}Co_x$)₇₅Si₁₀B₁₅. Proc. 4th Int. Conf. on Rapidly Quench. Metals. Sendai, 1981. Sendai (Japan), 1982, pp. 1199–1202.

3. Zusman A.I., Sosnin V.V. Magnetic properties of twisted toroids of amorphous alloys. In: *Amorfnye pretsizionnye splavy: Sb. tr.* [Amorphous alloys precision: Coll. of sci. papers]. Moscow: Metallurgiya, 1981, pp. 13–21. (In Russ.).
4. Kekalo I.B., Zhdanov A.I., Tsvetkov V.Yu. Influence of elastic and plastic deformation on magnetic properties of amorphous alloys. In: *Struktura, strukturnye prevrashcheniya i magnitnye svoistva amorfnykh metallicheskih splavov: Sb. tr.* [Structure, structural transformations and magnetic properties of amorphous metallic alloys: Coll. of sci. papers]. Moscow: Metallurgiya, 1986, pp. 118–130. (In Russ.).
5. Kekalo I.B., Shuvaeva E.A., Vvedenskii V.Yu. Strain relaxation on amorphous $(\text{Co}_{60}\text{Ni}_{8.5}\text{Fe}_4(\text{Cr,Mn})_{2.5}(\text{Si,B})_{25})$ alloy. *Tsvetnye metally*. 2007, no. 6, pp. 17–23. (In Russ.).
6. Kekalo I.B., Taranichev V.E., Tsvetkov V.Yu. Energy spectrum of the structural relaxation of amorphous $(\text{Fe}_5\text{Co}_{70}\text{Si}_{15}\text{B}_{10})$ alloy. *Dokl. AN SSSR*. 1984, vol. 278, no. 5, pp. 1115–1119. (In Russ.).

Information about the authors:

P.S. Mogil'nikov, Assistant of the Chair of Physical Materials
(pavel_mog@mail.ru)

Received September 14, 2016