DOI: 10.17117/nv.2015.01.052

Поступила (Received): 11.02.2015

<http://ucom.ru/doc/nv.2015.01.052.pdf>

vyatsu@vyatsu.ru

Карпов А.А., Грабар А.А.
Физические свойства ванадийсодержащих
сплавов железа в зависимости от содержания
хрома и температуры отжига

Karpov A.A., Grabar A.A.
Physical properties of vanadium-iron alloys, depending on
the chromium content and temperature of the annealing

В статье рассматриваются сплавы тройной системы Fe-V-Cr и обосновывается их использование в качестве магнитострикционных. Применение каждого магнитострикционного сплава определяется комплексом магнитных и механических свойств, а также его сохранением во всем интервале рабочих температур. Влияние хрома в сплавах Fe с содержанием 1%V рассмотрено в двух интервалах: 4–10%Cr и 12–16%Cr, в первом из которых хром мало влияет на внутреннее трение и неоднозначно воздействует на магнитострикцию насыщения. Во втором интервале наблюдается обратнопропорциональная зависимость между магнитострикцией насыщения и внутренним трением. Повышение содержания Cr в сплавах Fe, содержащих 1%V, ведет к уменьшению намагниченности насыщения и точки Кюри. Высокотемпературный отжиг по сравнению с низкотемпературным создает менее искаженную кристаллическую структуру, что отражается в более низком уровне коэрцитивной силы и более высоком уровне внутреннего трения, магнитострикции насыщения и отношения магнитострикции насыщения к коэрцитивной силе. Показано, что для исследуемых сплавов между удельным электросопротивлением и внутренним трением наблюдается тенденция к их обратнопропорциональной зависимости.

Ключевые слова: сплавы железа, концентрация хрома, физические свойства, отжиг, структура

The article deals with the alloys of the ternary system Fe-V-Cr and justified their use as magnetostrictive. The application of each magnetostrictive alloy is determined by complex magnetic and mechanical properties, as well as its preservation during the entire range of operating temperatures. Effect of chromium in the alloys with Fe content of 1% V considered in two ranges: 4-10% Cr and 12-16% Cr, the first of which chromium has little influence on the friction and uniquely affects the saturation magnetostriction. In the second interval is observed inverse relationship between the saturation magnetostriction and internal friction. Increased Cr content in the alloys of Fe, containing 1% V, leads to a reduction of the saturation magnetization and the Curie point. High-temperature annealing as compared with the low temperature produces less distortion of the crystal structure, which is reflected in a low coercive force and a higher level of internal friction, the saturation magnetostriction and the saturation magnetostriction relation to the coercive force. It is shown that for the alloys between electrical resistivity and internal friction tends to their inverse relationship.

Key words: alloys of iron, chromium concentration, physical properties, annealing the structure

Грабар Анна Анатольевна
Вятский государственный университет
г. Киров, ул. Московская, 36

Grabar Anna Anatoliyevna
Vyatka State University
Kirov, Moskovskaya st., 36

Карпов Антон Александрович
Ассистент
Вятский государственный университет
г. Киров, ул. Московская, 36

Karpov Anton Aleksandrovich
Assistant
Vyatka State University
Kirov, Moskovskaya st., 36

Введение (Introduction)

При воздействии внешнего магнитного поля большинство ферромагнитных материалов изменяют свою форму, удлиняясь или сжимаясь в направлении вектора индукции магнитного поля. Этот эффект называется магнитострикцией.

Материалы, обладающие эффектом магнитострикции, применяются для изготовления различных приборов и устройств. Так, например, прямой эффект магнитострикции (магнитострикция Джоуля) применяется в высокоточных приводах для создания нано- и микроперемещений или для генерации ультразвуковых волн при неразрушающем контроле изделий и ультразвуковой обработке металлов. Эффект обратной магнитострикции (эффект Виллари) используется в датчиках различных физических величин (положение, силы, моменты сил, уровня жидкости и др.), в устройствах для сбора вибрационной энергии, в неразрушающем контроле для детектирования ультразвуковых волн. В ряде устройств, требующих генерации и детектирования упругих колебаний и волн, используются оба типа магнитострикционных эффектов.

Влияние Cr на физические и механические свойства двойных сплавов Fe в области, богатой Fe показано в работах [1–4]. Увеличение концентрации ванадия до 13 % (здесь и далее % – массовые) в двойных сплавах Fe повышает точку Кюри, способствует улучшению свойств, характеризующих магнитомягкость, увеличивает внутреннее трение магнитомеханической природы [1, 2, 5].

Учитывая, что Cr повышает коррозионную стойкость сплавов Fe, а также может улучшать некоторые физические свойства, представляет интерес изучение влияния Cr на физические свойства сплавов системы Fe-V.

Материалы и методы (Materials and Methods)

Исследовали физические свойства сплавов Fe с легированием экономного характера: V $\approx$ 1 %, содержание Cr в интервале от 4 до 16 % (Таблица 1).

Таблица 1. Химический состав исследуемых сплавов

Марка сплава	Cr, %	V, %	C, %	Si, %	Ni, %	Al, %	Cu, %	Mn, %	P, %	Ti, %	S, %
01X4Ф1	4,18	0,867	0,0014	0,024	0,063	0,057	0,006	<0,12	<0,008	<0,09	<0,009
01X6Ф1	5,73	0,955	0,0014	0,042	0,067	0,065	0,0045				
01X8Ф1	8,03	0,883	0,0014	0,041	0,05	0,093	0,005				
01X10Ф1	10,17	0,877	0,0014	0,028	0,059	0,029	0,007				
01X12Ф1	12,0	0,88	0,0083	0,17	0,02	0,006	0,01				
01X14Ф1	14,2	0,88	0,01	0,16	0,02	0,005	0,011				
01X16Ф1	16,2	0,95	0,01	0,21	0,02	0,005	0,01				

Намагниченность насыщения M_s определяли на магнитометре типа МАГ в магнитном поле напряженностью 500 кА/м. Точку Кюри T_k определяли на магнитометре типа МАГ при скорости нагрева 1 град/мин.

Удельное электросопротивление ρ определяли на установке, изготовленной на базе потенциометра Р306.

Амплитудную зависимость внутреннего трения измеряли на установке типа крутильный маятник [6] на образцах с размерами рабочей части: диаметр – 5 мм, длина – 30 мм. В качестве характеристики внутреннего трения использовали логарифмический декремент, определяемый по формуле

$$\delta = \ln(A_i / A_{i+1}), \quad (1)$$

где A – амплитуда крутильных колебаний.

В качестве параметра внутреннего трения (характеристики демпфирующей способности) использовали максимум логарифмического декремента на его амплитудной зависимости δ_m .

Результаты (Results)

Из рис. 1 видно, что увеличение содержания Cr ведет к снижению величины структурномало чувствительных свойств: намагниченности насыщения и точки Кюри. При этом их зависимость от содержания Cr почти прямолинейная. Эти результаты совпадают с аналогичными закономерностями для двойных сплавов Fe–Cr [1, 2].

Рис. 1. Влияние содержания Cr в сплавах Fe–1%V, отожженных при 1000 °C, на намагниченность насыщения (а) и точку Кюри (б)

Уровень зависимости коэрцитивной силы от содержания Cr после высокотемпературного отжига существенно ниже по сравнению с низкотемпературным отжигом (рис. 2, а). Это свидетельствует о более низкой степени искаженности кристаллической структуры после высокотемпературного отжига. Для обоих температур отжига характерен минимум при содержании Cr около 6 %.

Рис. 2. Влияние содержания Cr в сплавах Fe-1%V, отожженных при 600 °C (1) и 1000 °C (2), на коэрцитивную силу (а), магнитострикцию насыщения (б) и характеристику λ_s/H_c (в)

О структурной обусловленности магнитострикции насыщения свидетельствует различный уровень ее зависимости от содержания Cr для низко- и высокотемпературного отжига за одним исключением, соответствующим содержанию Cr около 6 %, (рис. 2, б).

Влияние Cr на магнитострикцию насыщения неоднозначно, однако для сплавов с содержанием Cr более 10% характерно соответствие максимумов и минимумов для низко- и высокотемпературного отжига.

Необходимо отметить, что магнитострикция насыщения сплава Fe-12%Cr-1%V близка к магнитострикции насыщения таких известных магнитострикционных материалов, как алферы, никель, керамические ферриты.

По данным рис. 2,а и рис. 2,б построена зависимость параметра λ_s/H_c , предложенного в работе [7], от содержания Cr. Авторами работы [7] параметр λ_s/H_c предложен в качестве косвенной характеристики внутреннего трения магнитомеханической природы. В упомянутой работе, где изучались свойства чистого Fe и сплавов Fe-10%Cr, Fe-10%Cr-1%V, между параметрами λ_s/H_c и δ_m наблюдалась прямая зависимость. Сравнение же рис. 2, в с рис. 3 показывает отсутствие прямой зависимости между этими параметрами для обоих температур отжига. Это обстоятельство свидетельствует о том, что к интерпретации соотношений структурночувствительных свойств надо относиться осторожно, оговаривая границы применимости высказанных предположений.

На рис. 3 виден, во-первых, более высокий уровень демпфирующей способности сплавов после высокотемпературного отжига, что обусловлено, как и для более низкого уровня коэрцитивной силы, более низкой степенью искаженности кристаллической структуры, и, во-вторых, существенный рост демпфирующей способности при повышении содержания Cr в интервале 8–10 % и ярко выраженный максимум при содержании Cr 12 % после высокотемпературного отжига.

Рис. 3. Влияние содержания Cr в сплавах Fe-1%V на логарифмический декремент, сплавы отожжены при 600 °C (1) и 1000 °C (2)

Рис. 4. Влияние содержания Cr в сплавах Fe-1%V на удельное электросопротивление, сплавы отожжены при 1000 °C

Из рис. 4 видно, что повышение содержания Cr в интервале 4–8 % сопровождается повышением удельного электросопротивления сплавов, что обусловлено увеличением степени твердорастворного искажения кристаллической решетки. Согласно работе [8], удельное электросопротивление обратно пропорционально параметру вязкого затухания β , который можно рассматривать, как параметр, соответствующий параметру δ_m , обусловленному, в основном, внутренним трением магнитомеханической природы. На основании этого соотношение данных рис. 3 (график для высокотемпературного отжига) и рис. 4 можно интерпретировать следующим образом. Рост внутреннего трения при увеличении содержания Cr в интервале 4–8 % сдерживается ростом удельного электросопротивления. А в интервале содержаний Cr 8–10 % величина δ_m существенно растет из-за выхода удельного электросопротивления на насыщение.

Для сплавов с содержанием Cr в диапазоне 12–14% были проведены измерения механических свойств (Рис. 5). Прочность сплавов (рис. 5,а) сравнима с прочностью отожженных конструкционных углеродистых сталей, при этом происходит увеличение твердости по мере увеличения концентрации хрома. Предел прочности после высокотемпературного отжига ниже, чем после низкотемпературного отжига. Аналогично происходит и с твердостью сплавов (рис. 5,б), которая увеличивается по мере увеличения концентрации Cr. Пластичность

сплавов, характеризующая относительным удлинением (рис. 5,в), с увеличением концентрации хрома уменьшается.

Рис. 5. Влияние содержания Cr в сплавах Fe-1%V, отожженных при 600 °C (1) и 1000 °C (2), на предел прочности (а), твердость (б) и относительное удлинение (в)

Для исследования влияния высокотемпературного отжига на структуру были проведены измерения величины зерна сплавов с содержанием Cr в диапазоне 12–14% после отжига (рис. 6).

Рис. 6. Влияние содержания Cr в сплавах Fe-1%V, отожженных при 600 °C (1) и 1000 °C (2), на размер зерна

Как видно из рис. 6 отжиг приводит к значительному росту зерна. В исследуемых сплавах более крупное зерно приводит к высокому внутреннему трению (рис. 3).

Обсуждение и заключение

1. Повышению содержания Cr в исследуемых сплавах соответствует, как и в двойных сплавах Fe–Cr, снижение величин структурномалоувствительных свойств: намагниченности насыщения и точки Кюри.

2. Высокотемпературный отжиг по сравнению с низкотемпературным создает менее искаженную кристаллическую структуру. Это отражается в более низком уровне коэрцитивной силы и более высоком уровне внутреннего трения, комплексной характеристики λ_s/H_c и магнитострикции насыщения за одним исключением, соответствующим содержанию Cr около 6 %.

3. Формирование менее искаженной кристаллической структуры после высокотемпературного отжига подтверждается и механическими свойствами сплава – пределом прочности, твердостью, имеющих меньшие значения в сплавах после высокотемпературного отжига, и относительным удлинением, напротив имеющим большие значения.

4. Для исследуемых сплавов между удельным электросопротивлением и внутренним трением наблюдается тенденция к их обратнопропорциональной зависимости.

Список используемых источников:

1. Гудремон Э. Специальные стали. В 2-х т. М.: Металлургия, 1966.
2. Бозорт Р. Ферромагнетизм. М.: Изд. иностр. лит., 1956. 784 с.
3. Suzuki K., Fujita T., Hasebe M. Damping capacity and mechanical properties of sintered Fe–Cr–Mo high damping alloys // *Internal Friction and Ultrasonic Attenuation in Solids*. Tokyo: University of Tokyo Press, 1977. P. 757–761.
4. Скворцов А.И., Кондратов В.М. Демпфирующие и механические свойства двойных сплавов железа с хромом, молибденом, ванадием // *Термическая обработка и физика металлов*. Свердловск: УПИ, 1989. С. 49–53.
5. Скворцов А.И. Демпфирующие свойства сплавов железо–ванадий // *Известия АН СССР. Металлы*. 1988. № 6. С. 115–119.
6. Скворцов А.И. Создание высокодемпфирующих сплавов железа, цинк–алюминий и основ технологии их термической обработки: Автореферат дисс. на соиск. уч. ст. док. техн. наук. Екатеринбург: УГТУ, 1995. 38 с.
7. Ничипурук А.П., Потехин Б.А., Герасимов Е.Г., Потехин А.Б., Мансуров С.В. Декремент затухания механических колебаний и магнитные свойства железа и сплавов Fe–Cr, Fe–Cr–V // *Физика металлов и металловедение*. 1995. Т. 80, № 1. С. 49–53.
8. О’Делл Т.Н. Ферромагнитодинамика. М.: Мир, 1983. 253 с.

References:

1. Gudremon E. *Special steel. The 2 vols*. M.: Metallurgy, 1966.
2. Bozorth R. *Ferromagnetism*. M.: Foreign Lit., 1956.
3. Suzuki K., Fujita T., Hasebe M. Damping capacity and mechanical properties of sintered Fe–Cr–Mo high damping alloys // *Internal Friction and Ultrasonic Attenuation in Solids*. Tokyo: University of Tokyo Press, 1977. P. 757–761.
4. Skvortsov A.I., Kondrashov V.M. Damping and mechanical properties of binary alloys of iron with chromium, molybdenum, vanadium // *Physics and thermal processing of metals*. Sverdlovsk, UPI, 1989. P. 49–53.
5. Skvortsov A.I. The damping properties of the iron-vanadium alloys // *Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Metals*. 1988. № 6. P. 115–119.
6. Skvortsov A.I. Creating a high damping alloys of iron, zinc, aluminum and the foundations of the technology of their heat treatment: Abstract of diss. on soisk. Doc. tehn. Sciences. Yekaterinburg: Ural State Technical University, 1995. 38 p.

7. Nichipuruk A.P., Potekhin B.A., Gerasimov E.G., Potekhin A.B., Mansurov S.V. The damping decrement of mechanical vibrations and magnetic properties of iron and alloy Fe-Cr, Fe-Cr-V // *Physics of Metals and Metallography*. 1995. Vol. 80. N 1. P. 49-53.

8. O'Dell TN *Ferromagnitodinamika*. M.: Mir, 1983.

© 2015, Карпов А.А., Грабар А.А.

Физические свойства ванадийсодержащих сплавов
железа в зависимости от содержания хрома и
температуры отжига

© 2015, Karpov A.A., Grabar A.A.

*Physical properties of vanadium-iron alloys,
depending on the chromium content and temperature
of the annealing*