

Мельчаков М.А., Скворцов А.И. Демпфирующая способность, коэрцитивная сила и структура сплавов Fe–Cr–Al в зависимости от температуры термомангнитной обработки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 54–60. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.06

Melchakov M.A., Skvortsov A.I. Damping capacity, coercive force and structure of Fe–Cr–Al alloys depending on the temperature of thermomagnetic treatment. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 54–60. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.06

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение

Т. 22, № 1, 2020

Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science

<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.06

УДК 669.1

М.А. Мельчаков, А.И. Скворцов

Вятский государственный университет, Киров, Россия

**ДЕМПФИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ, КОЭРЦИТИВНАЯ СИЛА И СТРУКТУРА СПЛАВОВ
Fe–Cr–Al В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ**

Немаловажной характеристикой, которая определяет эксплуатационные свойства материала, является демпфирующая характеристика. Демпфирование отвечает как за гашение шума, так и за гашение вибраций, которые возникают в том или ином оборудовании. В то же время демпфирующие свойства можно изменять, используя как стандартные методы термической обработки, так и более перспективные методы термомангнитной обработки.

Изучено влияние температуры термомангнитной обработки на демпфирующую способность, коэрцитивную силу и структуру высокодемпфирующих сплавов системы Fe–Cr–Al с содержанием Cr = 5,2–19,9 %, Al = 0,4–3,8 %, подвергнутых предварительному отжигу. Термомангнитную обработку проводили в интервале температур 300–850 °С при напряженности переменного магнитного поля 4 А/см. Демпфирующие свойства исследовали с использованием обратного крутильного маятника на цилиндрических образцах. Используются методы: амплитудно-зависимого внутреннего трения, коэрцитивной силы, рентгеноструктурного анализа. Показано, что термомангнитная обработка может приводить как к повышению, так и к снижению демпфирующей способности, что зависит от температуры термомангнитной обработки. Определены значения температуры термомангнитной обработки, соответствующие максимальной демпфирующей способности сплава с учетом влияния двух легирующих элементов Cr и Al. Показано, что при анализе демпфирующих и магнитных свойств сплавов Fe–Cr–Al, получаемых в результате термомангнитной обработки, необходимо учитывать процессы фазовых превращений, влияющие на формирование магнитокристаллической структуры. В зависимости от химического состава сплава такими процессами могут быть процессы $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения, образования и растворения карбидов, сегрегаций атомов хрома, фазы типа Fe₃Al. Необходимо также учитывать возможность наложения упомянутых процессов друг на друга.

Ключевые слова: сплавы Fe–Cr, сплавы Fe–Al, сплавы Fe–Cr–Al, отжиг, термомангнитная обработка, демпфирующая способность, коэрцитивная сила, рентгеноструктурный анализ, фазовые превращения, магнетомеханическое затухание, ширина рентгеновских линий, магнитокристаллическая структура, кристаллическая структура.

M.A. Melchakov, A.I. Scvortsov

Vyatka State University, Kirov, Russian Federation

**DAMPING CAPACITY, COERCIVE FORCE AND STRUCTURE OF Fe–Cr–Al ALLOYS
DEPENDING ON THE TEMPERATURE OF THERMOMAGNETIC TREATMENT**

An important characteristic that determines the performance properties of a material is the damping. Damping is responsible for noise dampening and vibration dampening occurring in a particular equipment. At the same time the damping properties can be changed using both standard methods of heat treatment and more promising methods – methods of thermomagnetic treatment.

This paper studied the effects of the thermomagnetic treatment temperature on the damping capacity, coercive force and the structure of high damping Fe–Cr–Al alloys with a content Cr = 5.2–19.9 %, Al = 0.4–3.8 %, subjected to the pre-annealing. Thermomagnetic treatment was performed at the temperature range 300–850 °C with an alternating magnetic field strength 4A/cm. Damping properties were studied with a reverse torsional pendulum at the cylindrical samples. The used methods: amplitude-dependent internal friction, coercive force and X-ray diffraction analysis. It is shown that thermomagnetic treatment leads to both an increase and a decrease of the damping capacity; it depends on the temperature of the thermomagnetic treatment. It was determined the thermomagnetic treatment temperatures corresponding to the maximum damping alloy capacity, taking into account the influence of two alloying elements Cr and Al. It is shown that while study the damping and magnetic properties of Fe–Cr–Al alloys obtained as a result of thermomagnetic treatment, it is necessary to take into account the processes of phase transformations that affect the formation of the magnetocrystalline structure. The processes depending on the chemical composition of the alloy are the processes of $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation, formation and dissolution of carbides, segregation of chromium atoms, Fe₃Al phases. It is also necessary to take into account the possibility of overlapping these processes.

Keywords: Fe–Cr alloys, Fe–Al alloys, Fe–Cr–Al alloys, annealing, thermomagnetic treatment, damping ability, coercive force, X-ray structural analysis, phase transformations, magnetomechanical damping, X-ray lines width, magnetocrystalline structure, crystal structure.

Введение

Одними из значимых свойств материалов являются демпфирующие свойства, которые дают возможность судить о материале как о поглотителе вредных вибраций и шума. К таким материалам относятся, например, серые чугуны [1], сплавы железа с содержанием таких элементов, как Si [2–4], Al [5–7], Cr [8–11], Mn [12–14], сплавы цветных металлов, например Mg–Zr [15, 16], Cu–Mn [17, 18], другие сплавы, в том числе многокомпонентные [19–21].

Высокодемпфирующие сплавы классифицируют по механизмам внутреннего трения. Согласно работе [22], выделяется четыре основных механизма рассеивания энергии колебаний, один из которых – механизм магнитомеханической природы. Большая эффективность рассеивания энергии механических колебаний в сплавах с таким механизмом обусловлена сопутствующей колебаниям циклической перестройкой доменной структуры. При этом следует отметить, что поглощение энергии механических колебаний за счет механизма магнитомеханического затухания является очень чувствительным по отношению к различным способам обработки, которые изменяют фазовый состав, структуру, а также физические и механические свойства материала [4, 23].

Для варьирования демпфирующих свойств, кроме изменения химического состава сплавов, в большинстве случаев используют общеизвестные способы термической обработки. Однако сплавы с магнитомеханической природой внутреннего трения можно подвергать воздействию перспективного по отношению к демпфирующей способности способа обработки – термомагнитной обработки (ТМагО), т.е. одновременному воздействию температурой и магнитным полем [24]. Обработка магнитным полем при одновременном температурном воздействии на вышеуказанные сплавы не вызывает существенного изменения механических свойств, однако приводит к значительным изменениям магнитных свойств и, как следствие, к изменению их демпфирующей способности.

В работах [25, 26] показано, что и последующая после предварительного отжига ТМагО двухкомпонентных сплавов может привести как к повышению демпфирующей способности (на рис. 1 сплав Fe–15,4%Cr), так и после относительно небольшого повышения к ее снижению (на рис. 1 сплавы Fe–4%Al, Fe–6%Al).

Пример рис. 1 показывает, что демпфирующую способность сплавов, в которых основной механизм внутреннего трения – магнитомеханической природы, можно изменять за счет подбора режима термомагнитной обработки.

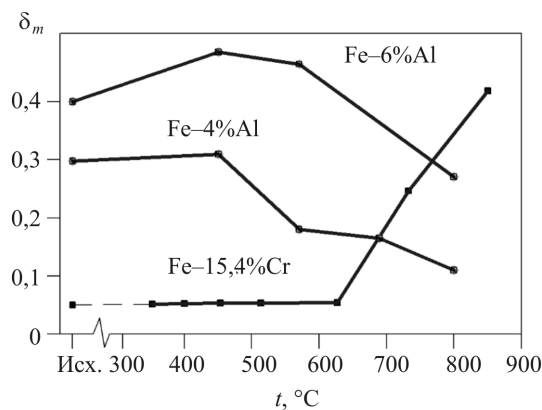


Рис. 1. Влияние температуры ТМагО на максимум логарифмического декремента на его амплитудной зависимости сплавов Fe, предварительно отожженных при температуре 1200 °С [25, 26]

Целью работы является изучение влияния температуры термомагнитной обработки на демпфирующие, магнитные свойства и структуру сплавов Fe–Cr–Al.

Материалы и методика эксперимента

Материалами исследования являются сплавы Fe–Cr–Al с различным содержанием компонентов (табл. 1).

По содержанию хрома исследуемые сплавы условно разбиты на три группы: 1 – сплавы с большим содержанием хрома (19,9%Cr); 2 – сплав со средним содержанием хрома (10,3%Cr); 3 – сплавы с относительно малым содержанием хрома (5,2%Cr).

Сплавы подвергали предварительному двойному отжигу (см. работу [27]) при температурах 1150 и 850 °С.

ТМагО осуществляли на установке, разработанной в ВятГУ [28], в вакууме при напряженности переменного магнитного поля $H = 4$ А/см.

Демпфирующие свойства (амплитудную зависимость внутреннего трения) определяли на обратном крутильном маятнике ВятГУ [29]. Размеры рабочей части образцов: диаметр 5 мм, длина 30 мм. Частота колебаний 20–25 Гц. В качестве основной характеристики использовали логарифмический декремент δ .

Рентгеноструктурный анализ проводили с использованием установки дифрактометр Shimadzu XRD-7000.

Коэрцитивную силу измеряли по методике, описанной в работе [30].

Результаты и их анализ

Результаты ранее проведенных исследований показывают (см. рис. 1), что ТМагО сплава Fe–15,4%Cr при температурах выше 630 °С приводит

Таблица 1

Химический состав сплавов, мас. %

Сплав	Cr	Al	C	Остальные примеси (Si, Ni, Cu, P, S, Mn)
Fe–5,2%Cr–2,7%Al	5,20	2,70	0,02	0,701
Fe–5,2%Cr–3,8%Al	5,20	3,80	0,02	0,723
Fe–10,3%Cr–0,45%Al	10,30	0,45	0,07	0,738
Fe–19,9%Cr–0,4%Al	19,90	0,40	0,05	0,761
Fe–19,9%Cr–1,8%Al	19,90	1,80	0,05	0,741

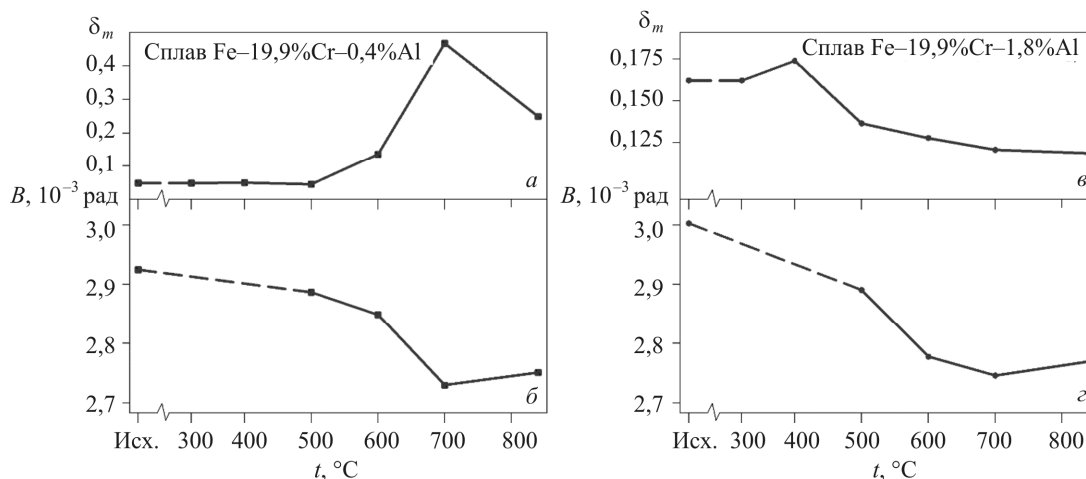


Рис. 2. Влияние температуры TMaG на максимум логарифмического декремента на его амплитудной зависимости и ширину рентгеновской линии (211) α_1 сплавов Fe–Cr–Al с различным содержанием Al: *a* – зависимость максимума логарифмического декремента от температуры TMaG сплава Fe–19,9%Cr–0,4%Al; *б* – зависимость ширины рентгеновской линии (211) α_1 от температуры TMaG сплава Fe–19,9%Cr–0,4%Al; *в* – зависимость максимума логарифмического декремента от температуры TMaG сплава Fe–19,9%Cr–1,8%Al; *г* – зависимость ширины рентгеновской линии (211) α_1 от температуры TMaG сплава Fe–19,9%Cr–1,8%Al

Таблица 2

Влияние температуры TMaG на коэрцитивную силу H_c (A/cm) сплавов Fe–Cr–Al с различным содержанием Al

Сплав	Исходное состояние	После TMaG 700 °C	После TMaG 840 °C
Fe–19,9%Cr–0,4%Al	335,6	302,8	321,3
Fe–19,9%Cr–1,8%Al	144,9	196,2	203,3

к существенному росту демпфирующей способности. В данном сплаве это может быть связано с рассасыванием при воздействии магнитного поля и достаточно высоких температур сегрегаций атомов хрома, которые образовались при предварительном отжиге и которые затрудняли перестройку доменной структуры при циклических колебаниях. TMaG при температурах около 450 °C сплавов Fe–4%Al и Fe–6%Al немного повышает их демпфирующую способность, а дальнейшее увеличение температуры TMaG ведет к ее снижению. Следует отметить, что в данных сплавах может протекать процесс выделения фазы типа Fe₃Al, что, вероятно, и привело при воздействии указанного в работе [25] режима TMaG к снижению демпфирующей способности этих сплавов выше 450 °C.

Данные рис. 2 и табл. 2 позволяют проанализировать соответствие демпфирующей способности высокохромистых сплавов с характеристиками кристаллической структуры: шириной рентгеновской линии и коэрцитивной силой – при увеличении температуры TMaG.

Наилучшее соответствие демпфирующей способности наблюдается с коэрцитивной силой, являющейся характеристикой совершенства кристаллической структуры. Причем этот результат соответствует данным G.W. Smith и J.R. Birchak, приведенным в работе [31]: $\delta_m \sim 1/H_c$. Соответствие же демпфирующей способности с шириной рентгеновской линии неоднозначно, причиной чего является различное содержание Al. Анализ влияния химического состава на демпфирующую

способность при ТМагО показывает, что высокохромистый с малым содержанием Al сплав Fe–19,9%Cr–0,4%Al обнаруживает схожую с двойным сплавом Fe–Cr зависимость, а высокохромистый с повышенным содержанием Al сплав Fe–19,9%Cr–1,8%Al – схожую с двойными сплавами Fe–Al зависимость (см. рис. 1, 2).

Из рис. 3 видно, что сплавы с более низким содержанием хрома: Fe–5,2%Cr–2,7%Al и Fe–5,2%Cr–3,8%Al – имеют после предварительного отжига более высокую демпфирующую способность по сравнению с высокохромистыми сплавами, из-за меньшего содержания в них углерода (см. табл. 1), т.е. карбидов. Форма графиков зависимости $\delta_m = f(t_{\text{ТМагО}})$ имеет сходство: для сплавов Fe–19,9%Cr–0,4%Al и Fe–5,2%Cr–2,7%Al в том, что имеется существенное повышение демпфирующей способности в интервале температур ТМагО 500–700 °С; для сплавов Fe–19,9%Cr–1,8%Al и Fe–5,2%Cr–3,8%Al в том, что имеется относительно небольшой максимум демпфирующей способности в области 400–500 °С.

Для сплава с промежуточным содержанием хрома Fe–10,3%Cr–0,45%Al уровень демпфирующей способности на ее зависимости от температуры ТМагО относительно не высок (рис. 4), что объясняется повышенным содержанием в сплаве углерода (см. табл. 1), т.е. карбидов. По этой причине изменение демпфирующей способности в зависимости от температуры ТМагО незначительно, а изменение коэрцитивной силы при изменении температуры ТМагО находится в пределах ошибки эксперимента, т.е. пренебрежимо мало. Понижение демпфирующей способности выше температуры ТМагО 700 °С, как и для сплава Fe–19,9%Cr–0,4%Al (см. рис. 2), связано с образованием карбидов из-за повышенного содержания в этих сплавах углерода (см. табл. 1). Не исключено, что в понижение демпфирующей способности сплава Fe–10,3%Cr–0,45%Al вносит свой вклад и $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение, протекающее при ТМагО 800 °С.

В табл. 3 путем выборки из рис. 1–4 сведены данные о максимальных величинах демпфирующей способности на зависимости $\delta_m = f(t_{\text{ТМагО}})$ и о соответствующих им температурах ТМагО для сплавов Fe с Cr, Al. Из табл. 3 видно, что для сплавов, в которых определяющую роль в формировании максимальной демпфирующей способности при ТМагО оказывает Al, температура, ей соответствующая, находится в пределах 400–500 °С (сплавы 2, 3, 5, 8). Для сплавов, в которых определяющую роль в формировании максимальной демпфирующей способности при ТМагО оказывает Cr, температура, ей соответствующая, находится в пределах 700–850 °С (сплавы 1, 4, 6, 7).

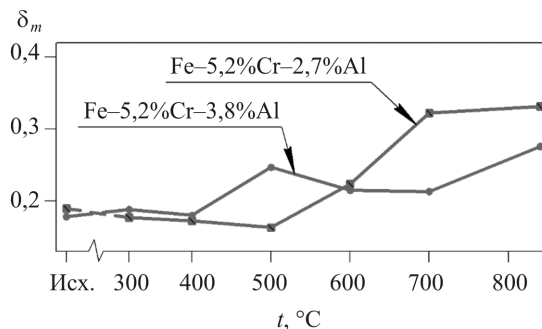


Рис. 3. Влияние температуры ТМагО на максимум логарифмического декремента на его амплитудной зависимости сплавов Fe–Cr–Al с различным содержанием Al

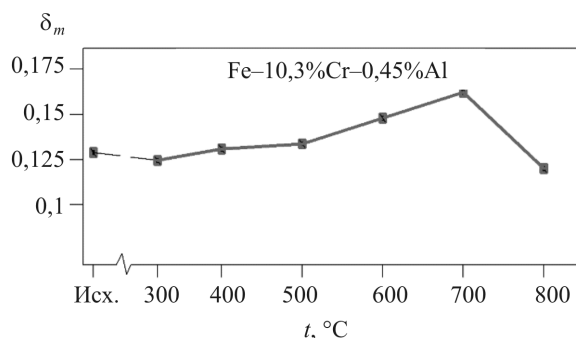


Рис. 4. Влияние температуры ТМагО на максимум логарифмического декремента на его амплитудной зависимости сплава Fe–10,3%Cr–0,45%Al

Таблица 3

Максимальная демпфирующая способность на зависимости $\delta_m = f(t_{\text{ТМагО}})$ и соответствующая ей температура ТМагО для сплавов Fe

№ п/п	Сплав	δ_m	$t, \text{ }^\circ\text{C}$
1	Fe–15,4%Cr	0,42	850
2	Fe–4%Al	0,31	450
3	Fe–6%Al	0,47	450
4	Fe–5,2%Cr–2,7%Al	0,33	850
5	Fe–5,2%Cr–3,8%Al	0,25	500
6	Fe–10,3%Cr–0,45%Al	0,16	700
7	Fe–19,9%Cr–0,4%Al	0,47	700
8	Fe–19,9%Cr–1,8%Al	0,17	400

Величина внутреннего трения магнитомеханической природы в конечном итоге зависит от состояния магнитокристаллической структуры, в частности от величины зерен, магнитных доменов, плотности энергии доменных границ. Крупнодоменной структуре соответствует более высокое магнитомеханическое затухание, чем мелкодоменной, так как она более восприимчива к перестройке при циклических колебаниях [32, 33]. Величина магнитных доменов «способность доменной структуры к перестройке» при циклических колебаниях

зависит от количества примесных фаз, например карбидов, дефектов кристаллической структуры, например границ зерен. Ввиду этого при анализе зависимости $\delta_m = f(t_{\text{ТМагО}})$ для исследуемых сплавов необходимо учитывать следующее. Изменение температуры ТМагО сплава с углеродом может инициировать как образование, так и растворение карбидов. От содержания углерода в сплаве зависит уровень зависимости $\delta_m = f(t_{\text{ТМагО}})$ по демпфирующей способности. Изменение температуры ТМагО сплава с повышенным содержанием хрома может инициировать как образование, так и растворение сегрегаций атомов хрома. Изменение температуры ТМагО сплава с повышенным содержанием алюминия может инициировать как образование, так и растворение фазы типа Fe₃Al. В трехкомпонентных сплавах Fe–Cr–Al возможно наложение упомянутых процессов друг на друга. Необходимо также учитывать то, что перечисленным структурным процессам сопутствует изменение химического состава феррита, от чего зависит плотность энергии доменных границ.

В заключение следует отметить, что для получения более всесторонних знаний о соответствии структурного состояния сплавов Fe–Cr–Al полученным результатам по влиянию режима термоманитной обработки на демпфирующие и магнитные свойства необходимы дополнительные исследования.

Выводы

1. Термоманитная обработка сплавов Fe–Cr–Al может приводить как к повышению, так и к снижению их демпфирующей способности, что зависит от температуры термоманитной обработки.

2. Максимальной демпфирующей способности при термоманитной обработке для сплавов, в которых определяющую роль в ее формировании оказывает Cr, соответствуют температуры, находящиеся в пределах 700–850 °С, а для сплавов, в которых определяющую роль в ее формировании оказывает Al, – 400–500 °С.

3. При анализе демпфирующих и магнитных свойств сплавов Fe–Cr–Al, получаемых в результате термоманитной обработки, необходимо учитывать процессы, влияющие на формирование магнитокристаллической структуры: процессы $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -превращения, образования и растворения карбидов, сегрегаций атомов хрома, фазы типа Fe₃Al. Необходимо также учитывать возможность наложения упомянутых процессов друг на друга, что, в свою очередь, зависит от химического состава сплава.

Список литературы

1. Пивоварский Е. Высококачественный чугуны. – М.: Металлургия, 1965. – Т. 1. – 650 с.

2. Frank R.C., Ferman J.W. Magnetomechanical damping in iron-silicon alloys // J. of Applied Physics. – 1965. – Vol. 36, no. 7. – P. 2235–2242.

3. Изучение динамики доменной структуры при деформировании и магнитоупругого затухания колебаний в монокристаллах сплава Fe–3%Si / И.Б. Кекало [и др.] // Физика металлов и материаловедение. – 1970. – Т. 30, № 3. – С. 566–576.

4. Damping and tribological properties of Fe–Si–C cast iron prepared using various heat treatments / T. Murakami, T. Inoue, H. Shimura, M. Nakano, S. Sasaki // Materials Sci. and Eng. – 2006. – Vol. 432, iss. 1–2. – P. 113–119.

5. Kiyoshi M., Yoshihira O., Shinya M. The mechanism of damping characteristics of Fe–Al alloy // Science and Industry. – 1990. – Vol. 64, no. 9. – P. 417–423.

6. Удовенко В.А., Тишаев С.И., Чудаков И.Б. Особенности структуры и свойств сплавов высококого демпфирования на основе α -железа // Металлы. – 1994. – № 1. – С. 98–105.

7. Grain size effects on magnetomechanical damping properties of ferromagnetic Fe–5 wt. % Al alloy / Young Ik Seo, Baek-Hee Lee, Young Do Kim, Kyu Hwan Lee // Materials Sci. and Eng. – 2006. – Vol. 431, iss. 1–2. – P. 80–85.

8. Кочард А. Магнитомеханическое затухание // Магнитные свойства металлов и сплавов. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – С. 328–363.

9. Karimi A., Azcoitia Ch., Degauque J. Relationships between magnetomechanical damping and magnetic properties of Fe–Cr (Al, Mo) alloys // J. of Magnetism and Magnetic Materials. – 2000. – Vol. 215–216. – P. 601–603.

10. Скворцов А.И. Влияние структуры на демпфирующую способность и механические свойства сплавов железа с магнитомеханическим затуханием // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2004. – № 5. – С. 18–25.

11. Damping capacity, magnetic and mechanical properties of Fe–18Cr alloy / A.K. Mohameda, M.Yu. Zadorozhnyy, D.V. Saveliev, I.B. Chudakov, I.S. Golovin // J. of Magnetism and Magnetic Materials. – 2020. – Vol. 494. – Article 165777.

12. Демпфирующие железомарганцевые сплавы на основе ϵ -мартенсита / Т.Ф. Воынова, И.Б. Медов, В.М. Мнасин, И.Б. Сидорова // Демпфирующие металлические материалы: тез. докл. 6-й республ. науч.-техн. конф., г. Киров, 15–19 апреля 1991 г.; КирПИ. – Киров, 1991. – С. 17–18.

13. Effects of Cr addition and cold pre-deformation on the mechanical properties, damping capacity, and corrosion behavior of Fe–17%Mn alloys / Hongying Sun, Benjamin Giron-Palomares, Wenhong Qu, Guang Chen, Hui Wang // J. of Alloys and Compounds. – 2019. – Vol. 803. – P. 250–259.

14. Effect of high strain amplitude and pre-deformation on damping property of Fe–Mn alloy / Haijun Wang, Hui Wang, Ruiqian Zhang, Rui Liu, Yu Xu, Rui Tang // J. of Alloys and Compounds. – 2019. – Vol. 770. – P. 252–256.

15. Магниево-железные сплавы с высокой демпфирующей способностью / М.Е. Дриц, Л.Л. Рохлин, В.В. Шередин, Ю.Н. Шульга // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1970. – № 11. – С. 48–51.

16. Effect of Zr content on damping property of Mg–Zr binary alloys / Rui-long Niu, Fang-jia Yan, Yun-si

Wang, Dong-ping Duan, Xue-min Yang // *Materials Sci. and Eng.* – 2018. – Vol. 718. – P. 418–426.

17. Jensen J.W., Rowland J.A. Manganese-copper high-damping alloys // *Production Eng.* – 1956. – Vol. 27, no. 5. – P. 135–137.

18. An investigation of stick-slip oscillation of Mn–Cu damping alloy as a friction material / X.C. Wang, J.L. Mo, H. Ouyang, B. Huang, X.D. Lu, Z.R. Zhou // *Tribology International.* – 2019. – Article 106024.

19. Investigation of the effect of alloying elements on damping capacity and magnetic domain structure of Fe–Cr–Al based vibration damping alloys / Lian Duan, Dong Pana, Hui Wang, JunWang // *J. of Alloys and Compounds.* – 2017. – Vol. 695. – P. 1547–1554.

20. Effect of minor Zr element on microstructure and properties of Fe–16Cr–2.5Mo damping alloys / Shanghua Yan, Ning Li, Jun Wang, Jiazhen Yan, Wenbo Liu, Dong Li, Xiaoxiao Mou, Liu Ying, Xiuchen Zhao // *J. of Alloys and Compounds.* – 2018. – Vol. 740. – P. 587–594.

21. Aging characteristics and properties of Fe–16Cr–2.5Mo–1.0Cu damping alloy / Xiaofeng Hu, Yuanyuan Song, Desheng Yan, Lijian Rong // *Materials Sci. and Eng.* – 2018. – Vol. 734. – P. 184–191.

22. Sugimoto K. Recent advances in high damping alloys // *Tetsu-to-Hagane.* – 1974. – Vol. 60, no. 14. – P. 2203–2220.

23. Girish B.M., Satish B.M., Mahesh K. Vibration damping of high-chromium ferromagnetic steel and its dependence on magnetic domain structure // *J. Alloys Compd.* – 2009. – Vol. 484. – P. 296–299.

24. Скворцов А.И., Скворцов А.А. Влияние термомагнитной обработки на демпфирующие свойства магнитомягких сплавов железа // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2006. – № 10. – С. 14–19.

25. Мельчаков М.А., Скворцов А.И., Чудаков И.Б. Влияние термической и термомагнитной обработок на свойства высокодемпфирующих сплавов железо–алюминий // *Технология металлов.* – 2011. – № 11. – С. 28–32.

26. Скворцов А.И., Мельчаков М.А. Демпфирующая способность и структура сплава Fe–15,4%Cr при различных температурах термомагнитной обработки и предварительного отжига // *Деформация и разрушение материалов.* – 2012. – № 4. – С. 22–25.

27. Скворцов А.И. Двойной отжиг демпфирующих сплавов железа с магнитомеханическим затуханием и схемы диаграмм распада α -фазы // *Технология металлов.* – 2004. – № 4. – С. 7–10.

28. Установка для термомагнитной обработки магнитомягких сталей и сплавов / А.А. Скворцов, В.М. Кондратов, А.И. Скворцов, А.А. Борисов // *Наука – производство – технологии – экология: сб. материалов Всерос. науч.-техн. конф., г. Киров, 22–26 апреля 2002 г.; ВятГУ.* – Киров, 2002. – Т. 3. – С. 66.

29. Скворцов А.И. Создание высокодемпфирующих сплавов железа, цинк–алюминий и основ технологии их термической обработки: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / УГТУ. – Екатеринбург, 1995. – 38 с.

30. Smith G.W., Birchak J.R. Internal stress distribution theory of magnetomechanical hysteresis an extension to include effects of magnetic field and applied stress // *J. of Applied Physics.* – 1969. – Vol. 40, no. 13. – P. 5174–5178.

31. Скворцов А.А., Мельчаков М.А. Влияние термомагнитной обработки на магнитные свойства сплавов сис-

темы Fe–Cr–Al с малым содержанием хрома // XVI Междунар. науч.-техн. урал. шк.-сем. металлосведов-молодых ученых: сб. науч. тр., г. Екатеринбург, 7–11 декабря 2015 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – Ч. 2. – С. 115–117.

32. Скворцов А.И. Структурный механизм магнитомеханического затухания в ОЦК-сплавах железа // *Известия АН. Серия физическая.* – 1993. – Т. 57, № 11. – С. 159–162.

33. Скворцов А.И. Роль кристаллической и магнитной структур в формировании высокого магнитомеханического затухания в сплавах железа // *Физика металлов и металловедение.* – 1993. – Т. 75, № 6. – С. 118–124.

References

1. Pivovarskii E. Vysokokachestvennyi chugun [High quality cast iron]. Moscow: Metallurgiya, 1965, vol. 1, 650 p.

2. Frank R.C., Ferman J.W. Magnetomechanical damping in iron-silicon alloys. *Journal of Applied Physics*, 1965, vol. 36, no. 7, pp. 2235–2242.

3. Kekalo I.B. et al. Izuchenie dinamiki domennoi struktury pri deformirovani i magnitoupругogo zatukhaniia kolebani i v monokristallakh splava Fe–3%Si [Study of domain structure dynamics at deformation and magnetoelastic damping of vibrations in single crystals of Fe–3%Si alloy]. *Fizika metallov i metallovedenie*, 1970, vol. 30, no. 3, pp. 566–576.

4. Murakami T., Inoue T., Shimura H., Nakano M., Sasaki S. Damping and tribological properties of Fe–Si–C cast iron prepared using various heat treatments. *Materials Sci. and Eng.*, 2006, vol. 432, iss. 1–2, pp. 113–119.

5. Kiyoshi M., Yoshihira O., Shinya M. The mechanism of damping characteristics of Fe–Al alloy. *Science and Industry*, 1990, vol. 64, no. 9, pp. 417–423.

6. Udovenko B.A., Tishaev S.I., Chudakov I.B. Osobennosti struktury i svoistv splavov vysokogo dempfirovaniia na osnove α -zheleza [Features of structure and properties of high damping alloys based on α -iron]. *Metally*, 1994, no. 1, pp. 98–105.

7. Young Ik Seo, Baek-Hee Lee, Young Do Kim, Kyu Hwan Lee. Grain size effects on magnetomechanical damping properties of ferromagnetic Fe–5 wt. % Al alloy. *Materials Sci. and Eng.*, 2006, vol. 431, iss. 1–2, pp. 80–85.

8. Kochard A. Magnitomekhanicheskoe zatukhanie [Magnetomechanical attenuation]. *Magnitnye svoistva metallov i splavov*. Moscow: Izdatelstvo inostranoi lit., 1961, pp. 328–363.

9. Karimi A., Azcoitia Ch., Degauque J. Relationships between magnetomechanical damping and magnetic properties of Fe–Cr (Al, Mo) alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2000, vol. 215–216, pp. 601–603.

10. Skvortsov A.I. Vliianie struktury na dempfirovaniye sposobnost' i mekhanicheskie svoistva splavov zheleza s magnitomekhanicheskim zatukhaniem [Effect of structure on damping capacity and mechanical properties of iron alloys with magneto-mechanical attenuation]. *Metallovedenie i termicheskaia obrabotka metallov*, 2004, no. 5, pp. 18–25.

11. Mohameda A.K., Zadorozhnyy M.Yu., Saveliev D.V., Chudakov I.B., Golovin I.S. Damping capacity, magnetic and mechanical properties of Fe–18Cr alloy. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, vol. 494, Article 165777.

12. Volynova T.F., Medov I.B., Mnasin V.M., Sidорова I.B. Dempfirovaniye zhelezomargantsevy splavy na osnove e-martensita [Damping ferromanganese alloys based on e-martensite]. *Dempfirovaniye metallicheskie materialy: tezisy dokl. 6-i respubl. nauch.-tekhn. konf. Kirov*, 1991, pp. 17–18.

13. Hongying Sun, Benjamin Giron-Palomares, Wenhong Qu, Guang Chen, Hui Wang. Effects of Cr addition and cold pre-deformation on the mechanical properties, damping capacity, and corrosion behavior of Fe-17%Mn alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 803, pp. 250–259.
14. Haijun Wang, Hui Wang, Ruiqian Zhang, Rui Liu, Yu Xu, Rui Tang. Effect of high strain amplitude and pre-deformation on damping property of Fe–Mn alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 770, pp. 252–256.
15. Drits M.E., Rokhlin L.L., Sheredin V.V., Shul'ga Iu.N. Magnievye splavy s vysokoi dempfiruiushchei sposobnost'iu [Magnesium alloys with high damping capacity]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1970, no. 11, pp. 48–51.
16. Ruilong Niu, Fangjia Yan, Yunsi Wang, Dongping Duan, Xuemin Yang. Effect of Zr content on damping property of Mg–Zr binary alloys. *Materials Sci. and Eng.*, 2018, vol. 718, pp. 418–426.
17. Jensen J.W., Rowland J.A. Manganese-copper high-damping alloys. *Production Eng.*, 1956, vol. 27, no. 5, pp. 135–137.
18. Wang X.C., Mo J.L., Ouyang H., Huang B., Lu X.D., Zhou Z.R. An investigation of stick-slip oscillation of Mn–Cu damping alloy as a friction material. *Tribology International*, 2019, Article 106024.
19. Lian Duan, Dong Pana, Hui Wang, Jun Wang. Investigation of the effect of alloying elements on damping capacity and magnetic domain structure of Fe–Cr–Al based vibration damping alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 695, pp. 1547–1554.
20. Shanghua Yan, Ning Li, Jun Wang, Jiazhen Yan, Wenbo Liu, Dong Li, Xiaoxiao Mou, Liu Ying, Xiuchen Zhao. Effect of minor Zr element on microstructure and properties of Fe–16Cr–2.5Mo damping alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 740, pp. 587–594.
21. Xiaofeng Hu, Yuanyuan Song, Desheng Yan, Lijian Rong. Aging characteristics and properties of Fe–16Cr–2.5Mo–1.0Cu damping alloy. *Materials Sci. and Eng.*, 2018, vol. 734, pp. 184–191.
22. Sugimoto K. Recent advances in high damping alloys. *Tetsu-to-Hagane*, 1974, vol. 60, no. 14, pp. 2203–2220.
23. Girish B.M., Satish B.M., Mahesh K. Vibration damping of high-chromium ferromagnetic steel and its dependence on magnetic domain structure. *Journal Alloys Compd.*, 2009, vol. 484, pp. 296–299.
24. Skvortsov A.I., Skvortsov A.A. Vliianie termomagnitnoi obrabotki na dempfiruiushchie svoystva magnitomiagkikh splavov zheleza [The effect of thermomagnetic treatment on the damping properties of soft magnetic iron alloys]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2006, no. 10, pp. 14–19.
25. Mel'chakov M.A., Skvortsov A.I., Chudakov I.B. Vliianie termicheskoi i termomagnitnoi obrabotok na svoystva vysokodemfiriushchikh splavov zhelezo–aliuminii [Influence of thermal and thermomagnetic treatment on the properties of highly-damping iron-aluminum alloys]. *Tekhnologiya metallov*, 2011, no. 11, pp. 28–32.
26. Skvortsov A.I., Mel'chakov M.A. Demfiriushchaia sposobnost' i struktura splava Fe–15,4%Cr pri razlichnykh temperaturakh termomagnitnoi obrabotki i predvaritel'nogo otzhiga [Damping capacity and structure of Fe-15.4%Cr alloy at various temperatures of thermomagnetic treatment and pre annealing]. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2012, no. 4, pp. 22–25.
27. Skvortsov A.I. Dvoinoi otzhig dempfiriushchikh splavov zheleza s magnitomekhanicheskim zatukhaniem i skhemy diagramm raspada α -fazy [Double annealing of damping iron alloys with magnetomechanical attenuation and decay diagrams of α -phase]. *Tekhnologiya metallov*, 2004, no. 4, pp. 7–10.
28. Skvortsov A.A., Kondratov V.M., Skvortsov A.I., Borisov A.A. Ustanovka dlia termomagnitnoi obrabotki magnitomiagkikh stali i splavov [Machine for Thermomagnetic Treatment of Magnetic-Thick Steels and Alloys]. *Nauka – proizvodstvo – tekhnologii – ekologiya: sb. materialov Vseros. nauch.-tekhn. konf., 22–26 aprelya 2002 g.* Kirov, 2002, vol. 3, pp. 66.
29. Skvortsov A.I. Sozdanie vysokodemfiriushchikh splavov zheleza, tsink–aliuminii i osnov tekhnologii ikh termicheskoi obrabotki [Creation of high-damping iron, zinc-aluminum alloys and basics of technology for their thermal treatment.]. Doctors degree dissertation. Ekaterinburg, 1995, 38 p.
30. Smith G.W., Birchak J.R. Internal stress distribution theory of magnetomechanical hysteresis an extension to include effects of magnetic field and applied stress. *Journal of Applied Physics*, 1969, vol. 40, no. 13, pp. 5174–5178.
31. Skvortsov A.A., Mel'chakov M.A. Vliianie termomagnitnoi obrabotki na magnitnye svoystva splavov sistemy Fe–Cr–Al s malym sodержaniem khroma [The effect of thermomagnetic treatment on the magnetic properties of Fe–Cr–Al system alloys with low chromium content]. Ekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2015, pp. 115–117.
32. Skvortsov A.I. Strukturnyi mekhanizm magnitomekhanicheskogo zatukhaniia v OTsK-splavakh zheleza [Structural mechanism of magneto-mechanical attenuation in OCC-alloys of iron]. *Izvestiia AN. Seriya fizicheskaya*, 1993, vol. 57, no. 11, pp. 159–162.
33. Skvortsov A.I. Rol' kristallicheskoi i magnitnoi struktur v formirovanii vysokogo magnitomekhanicheskogo zatukhaniia v splavakh zheleza [The role of crystalline and magnetic structures in the formation of high magnetomechanical attenuation in iron alloys]. *Fizika metallov i metallovedenie*, 1993, vol. 75, no. 6, pp. 118–124.

Получено 21.01.2020

Опубликовано 25.03.2020

Сведения об авторах

Мельчаков Михаил Александрович (Киров, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и основ конструирования Вятского государственного университета; e-mail: melchakov@vyatsu.ru.

Скворцов Александр Иванович (Киров, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры материаловедения и основ конструирования Вятского государственного университета; e-mail: skvorcov@vyatsu.ru.

About the authors

Mikhail A. Melchakov (Kirov, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Materials Science and Design Basics, Vyatka State University; e-mail: melchakov@vyatsu.ru.

Aleksander I. Scvortsov (Kirov, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Materials Science and Design Basics, Vyatka State University; e-mail: skvorcov@vyatsu.ru.