

**Мельчаков Михаил Александрович**

**Влияние термической и термомагнитной обработок на свойства и структуру высокодемпфирующих сплавов Fe–Cr, Fe–Al**

05.16.01 – Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov i spлавов

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

Работа выполнена на кафедре «Материаловедение и технология материалов»  
ФГБОУ ВПО «Вятский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Скворцов Александр Иванович

Официальные оппоненты: Потехин Борис Алексеевич  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Уральского государственного  
лесотехнического университета»  
зав. кафедрой «Технология металлов»

Михайлов Сергей Борисович  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный  
университет имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина»  
доцент кафедры металловедения

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Тюльский государственный университет»

Защита состоится 18 января 2013 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д212.285.04 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 28, ауд. МТ-329.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Автореферат разослан «10» декабря 20 12 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета, д.т.н., профессор

Мальцева Л.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Перспективным способом борьбы с вредными вибрацией и шумом в технических изделиях является применение материалов с высокими демпфирующими свойствами. К таким материалам относятся, в частности, сплавы Fe с магнитомеханической природой внутреннего трения. Существенный вклад в разработку и исследование таких сплавов внесли зарубежные ученые: Кочард А., Сугимото К., Masumoto Н., Sawaya S., Hinai М. и др., российские ученые: Головин С.А., Головин И.С., Кекало И.Б., Кондратов В.М., Крылов Б.С., Михайлов С.Б., Постников В.С., Потехин Б.А., Скворцов А.И., Удовенко В.А., Чудаков И.Б., Шекалов Б.И. и др.

Известно, что основой повышения демпфирующей способности материалов являются оптимизация химического состава и совершенствование способов обработки. Перспективным способом обработки демпфирующих сплавов Fe с магнитомеханической природой внутреннего трения является термомагнитная обработка. Начало этого научного направления положено в Проблемной лаборатории металлических материалов с высокими вибропоглощающими свойствами Вятского государственного университета в 2002 г. Вначале исследования носили оценочный характер. Далее необходимы были систематические комплексные исследования, включающие исследования влияния состава, предварительной термической обработки и последующей термомагнитной обработки на структуру и свойства. А начинать надо (по принципу: от простого к сложному) с двойных сплавов. При этом необходимо учитывать, что совокупность уже разработанных демпфирующих сплавов Fe с магнитомеханической природой внутреннего трения довольно обширна. Основные комбинации химических элементов разработанных сплавов: Fe–Si, Fe–Co, Fe–Mo, Fe–Al, Fe–Cr–Al, Fe–Cr–Mo, Fe–Cr–V, Fe–Al–Ti, Fe–Co–Si, Fe–Cr–V–Al, Fe–Cr–Co–Mo, Fe–Cr–Al–Ti, Fe–Cr–Mo–Ti, Fe–Cr–Al–Nb, Fe–Cr–Mo–Nb, – содержат, в большинстве случаев, Cr. В ряде комбинаций присутствует относительно недорогой Al. Эти элементы являются основными в демпфирующих сплавах системы Fe–Cr–Al: Sentalloy, Vacrosil 010, Fe–15%Cr–1%Al, Fe–8%Cr–4%Al, Fe–5%Cr–3%Al.

В связи с этим представляет интерес изучение влияния обработки, включающей термомагнитную обработку, на структуру и свойства двойных сплавов систем Fe–Cr, Fe–Al с составом, близким к оптимальному по демпфирующей способности. Сравнительный характер таких исследований представляет интерес и с металловедческой точки зрения по следующим причинам: размерное различие атомов Cr и Al относительно атома Fe велико, Cr с Fe образует область расслоения  $\alpha$ -твердого раствора, а, по данным литературы, Al может образовывать с Fe упорядоченную по типу DO<sub>3</sub> фазу в области ферритных (по диаграмме состояния) сплавов.

Если близкий к оптимальному по демпфирующей способности состав сплавов Fe–Al известен (работы Удовенко В.А., Чудакова И.Б.) – 4–6 %Al, то в литературе данные о влиянии состава и термической обработки на демпфирующие свойства сплавов Fe–Cr неоднозначны, а порой противоречивы.

**Тематика данной работы соответствует темам НИР:**

- «Определение механизмов влияния термомагнитной обработки на демпфирующие, магнитные свойства и магнитокристаллическую структуру магнитомягких сплавов железа», проводимой в 2004–2008 гг. Проблемной лабораторией металлических материалов с высокими вибропоглощающими свойствами Вятского государственного университета в соответствии с заданием Министерства образования (Федерального агентства по образованию) РФ, номер государственной регистрации 01200404105.

- «Определение закономерностей влияния элементов структуры наноразмерного уровня на демпфирующие и механические свойства демпфирующих сплавов железа, цинк–алюминий», проводимой в 2009–2013 гг. Проблемной лабораторией металлических материалов с высокими вибропоглощающими свойствами Вятского государственного университета в соответствии с заданием Министерства образования (Федерального агентства по образованию) РФ, номер государственной регистрации 01200951786.

**Цель работы:** исследование возможности повышения демпфирующих свойств сплавов Fe–Cr, Fe–Al на основе установления закономерностей влияния предварительной термической и последующей термомагнитной обработок на структуру.

**Задачи исследования:**

1. Усовершенствовать методику определения демпфирующих свойств металлических материалов при крутильных колебаниях за счет повышения точности определения характеристик внутреннего трения.

2. Изучить связь магнитомеханического затухания с параметрами структуры и свойствами сплавов Fe–Cr, Fe–Al.

3. Установить влияние режимов термомагнитной обработки на процессы, происходящие в структуре ферритных сплавов Fe–Cr, Fe–Al.

4. Определить рациональные режимы термической и термомагнитной обработок для исследованной группы сплавов, обеспечивающие их максимальные демпфирующие свойства.

**Научная новизна** полученных результатов:

1. Установлено, что для сплавов Fe–Cr, при содержании Cr=7–11 %, преобладающих наибольшее число фазовых превращений при отжиге, основной причиной экстремумов свойств является мелкозернистость. Местоположение экстремумов свойств по шкале содержаний Cr зависит от температуры отжига.

2. Установлено, что напряженность магнитного поля 2...5 А/см при термомагнитной обработке оказывает наибольшее влияние на прирост демпфирующей способности сплавов Fe.

3. Выявлены оптимальные режимы термической и термомагнитной обработок, обеспечивающие высокий уровень демпфирующих свойств сплавов Fe–15,4%Cr, Fe–4%Al и Fe–6%Al.

**Достоверность результатов и сделанных выводов обеспечивается:**

- использованием комплекса современных методов исследования структуры и свойств (методы внутреннего трения, ферромагнитного резонанса, свето-

вая микроскопия, рентгеноструктурный анализ, магнитные методы исследования);

- достаточно большим объемом экспериментальных данных;
- хорошей повторяемостью результатов измерений физико-механических свойств, допустимой величиной погрешности эксперимента.

#### **Практическая значимость**

1. Разработано программное обеспечение для обработки виброграмм, позволяющее уменьшить погрешность определения нулевой линии и усреднить значения логарифмического декремента (зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ – свидетельство об официальной регистрации № 2012611792).

2. Выявлены новые возможности термомагнитной обработки, позволяющие регулировать структуру и, соответственно, свойства ферромагнитных сплавов на основе Fe.

3. С научно-методической точки зрения введение в практику исследований внутреннего трения определения способности к восстановлению магнитомеханического затухания путем термомагнитной обработки при оптимальной температуре позволит более полно характеризовать демпфирующие сплавы с магнитомеханическим затуханием.

4. Выявленные в настоящей работе закономерности изменения свойств, структуры сплавов Fe–Cr, Fe–Al в зависимости от режимов обработки могут быть полезными при разработке, совершенствовании технологии термической и термомагнитной обработок изделий из сплавов, аналогичных исследованным, в частности, многофункциональных, коррозионностойких сплавов.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Усовершенствованная за счет уменьшения разброса экспериментальных данных, повышения точности измерений и расчетов методика определения демпфирующих свойств металлических материалов.

2. Закономерности влияния содержания Cr (до 20 %) и режима термической обработки на демпфирующие, механические, магнитные свойства и структуру сплавов Fe–Cr.

3. Существенное влияние переменного магнитного поля напряженностью 2...5 А/см при термомагнитной обработке на свойства, процессы расслоения в хромистых и процессы упорядочения в алюминиевых ферритных сплавах.

4. Режимы термической и термомагнитной обработок, позволяющие обеспечить высокий уровень демпфирующих свойств сплавов Fe–15,4%Cr, Fe–4%Al и Fe–6%Al.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на конференциях: XX и XXI Уральских школах металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» (Екатеринбург, 2010 и Магнитогорск, 2012); XVII–XIX Международных научно-технических конференциях «Машиностроение и техносфера XXI века». (Севастополь, 2010, 2011, 2012); «Демпфирующие и акустические материалы» (Киров, 2010); Всероссийская ежегодная научно-технической конференция «Общество, наука, инновации» (Киров, 2011, 2012); 51-й Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (Харьков, 2011); Вторые москов-

ские чтения по проблемам прочности материалов, посвященные 80-летию со дня рождения академика РАН Ю.А. Осипьяна (Москва-Черноголовка, 2011); 7 международная конференция «Фазовые превращения и прочность кристаллов», посвященная 110-летию со дня рождения академика Г.В. Курдюмова (Черноголовка, 2012).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 17 работ, среди которых 3 в изданиях, рекомендованных ВАК, и одно свидетельство на полезную модель программного обеспечения.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, выводов и списка литературы. Объем диссертации: 96 страниц, 49 рисунков, 8 таблиц. Список литературы – 72 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснованы актуальность работы, выбор объекта исследования, приведены положения, выносимые на защиту, показана научная новизна полученных результатов и их практическая значимость, приведены сведения об апробации результатов работы, публикациях, структуре и объеме диссертации.

**В первой главе** проанализированы литературные данные по теме диссертации. Из анализа литературы следует, что для увеличения магнитомеханического затухания необходимо совершенствовать способы обработки. Высокие показатели демпфирования для большинства сплавов с магнитомеханической природой внутреннего трения достигаются после отжига при высоких температурах. Согласно литературным данным, термомагнитная обработка может как повышать, так и снижать демпфирующую способность магнитомягких сплавов.

На основании проведенного анализа литературы и предварительных исследований сформулированы цель работы и задачи исследований.

**Во второй главе** описаны материалы, способы обработки и методы исследований.

**Материалы.** В работе использованы сплавы Fe–Cr (Cr до 20%) различной чистоты, Fe технической чистоты (сталь 10895) и высокой чистоты (табл. 1) и сплавы Fe–4% Al, Fe–6% Al вакуумной выплавки (табл. 2).

Таблица 1

Химический состав сплавов Fe–Cr

№ группы		1				2			
		Чистые				Повышенной чистоты			
№ сплава		1	2	3	4	5	6	7	8
Содержание, масс. %	Cr	1,3	5,1	13,8	19,6	4,8	7,8	10,7	14,8
	C	0,05	0,04	0,05	0,04	0,02	0,03	0,03	0,02
	Сумма примесей	1,0–1,25				0,7–0,85			

Продолжение таблицы 1

№ группы	3							4	
	Высокой чистоты								
№ сплава	9	10	11	12	13	14	15	Fe	
Содержание, масс. %	Cr	4,2	5,6	8,1	10,1	13,2	15,4	17,3	0,007
	C	<0,01							0,007
	Сумма примесей	0,1–0,3							

Таблица 2

Химический состав сплавов Fe–Al, масс. %

Сплав	Al, %	C, %	Mn	Cr	Cu	Mo	Nb	Ti	Si	S	P
			не более, %								
Fe–4%Al	4,0	0,007	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,025	0,005
Fe–6%Al	6,0	0,008	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,025	0,005

**Способы обработки.** Основной способ термической обработки – вакуумный отжиг: интервал температур – 450–1200 °С, вакуум –  $p < 10^{-1}$  Па.

Термомагнитная обработка проводилась на установке, разработанной в ВятГУ. Интервал температур – 350–840 °С, вакуум –  $p < 10^{-3}$  Па.

С целью доработки режима термомагнитной обработки были проведены исследования по выявлению оптимальной напряженности магнитного поля при термомагнитной обработке для сплавов с ферритной (Fe–15,4%Cr) и феррито-карбидной (Сталь 25X12Ю2С) структурой. Выявлено, что максимум демпфирующей способности  $\delta_m$  достигается после проведения термомагнитной обработки при напряженности переменного магнитного поля 2...5 А/см.

#### **Методы исследований.**

**Метод внутреннего трения.** Установка для исследований – крутильный маятник. Диапазон амплитуд относительных деформаций –  $(2...30) \cdot 10^{-5}$ . Частота колебаний маятника – 19...25 Гц. Температура – от комнатной (20...24 °С) до 900 °С. Напряженность постоянного магнитного поля насыщения – 28 кА/м.

Для повышения точности определения амплитудной зависимости логарифмического декремента, определяемого по формуле:

$$\delta_k = \ln(A_k/A_{k+1}), \quad (1)$$

где  $A_k$  и  $A_{k+1}$  – амплитуды колебаний, осуществлена доработка установки внутреннего трения и методики обработки виброграмм.

Вследствие сложности устранения внешних помех и точного определения нулевой линии: 1) введено усреднение результатов исследования по формуле

$$\delta_k = \left( \sum_{n=k-m}^{n=k+m} \delta_n \right) / (2m + 1), \quad (2)$$

где  $m$  – параметр усреднения;

2) внесены следующие изменения в формулу логарифмического декремента (1)

$$\delta_k = \ln \left[ \frac{(|A_k| + |A_{-k}|)}{(|A_{k+1}| + |A_{-(k+1)}|)} \right], \quad (3)$$

где  $A_k$  и  $A_{-(k+1)}$  – две последующие друг за другом отрицательные амплитуды, что снижает погрешность определения нулевой линии.

Наилучший результат обработки был достигнут способом совместной обработки по формулам (2) и (3) при параметре  $m=5$  (рис. 1).

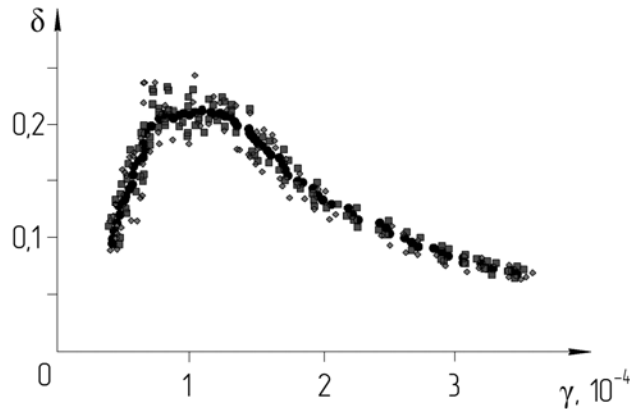


Рис. 1. Амплитудные зависимости внутреннего трения сплава Fe–4%Al, полученные различными способами обработки виброграмм:  
 ◆ – способ обработки по формуле (1); ■ – способ устранения неточности нулевой отметки; ● – способ устранения неточности нулевой отметки и усреднение при параметре  $m=5$

Механические свойства определяли: при растяжении – на установках Р-5, УМЭ-10ТМ, ИМ-20; твердость – на микротвердомере ПМТ-3; ударную вязкость – на копре МК-30.

Исследования магнитных свойств проводили на феррозондовом магнитометре и установке продольной магнитострикции.

Исследование структуры осуществляли: на оптическом микроскопе Neophot-21, на дифрактометре ДРОН-3М в  $\text{Co}$ -излучении, методом ядерной гамма-резонансной спектроскопии (спектрометр ЯГРС-4М), методом ферромагнитного резонанса (радиоспектрометр РЭ-1301). Выявление доменной структуры проводили методом порошковых фигур.

**В третьей главе** приведены результаты исследований по установлению закономерностей влияния содержания Cr до 20 %, температуры отжига (850, 1000, 1150 °С) и характера фазовых превращений при отжиге на демпфирующие, механические, физические свойства и структуру сплавов Fe–Cr различной чистоты по примесям.

Для сплавов с  $\alpha$ - $\gamma$  превращениями после отжига 1000 и 1150 °С характерно наличие ярко выраженных минимумов демпфирующей способности, пластичности и максимумов прочности, коэрцитивной силы, при содержании Cr=7–11%. При отжиге 1000 °С экстремумы свойств соответствуют наиболее



мелкозернистому сплаву Fe–8,1%Cr, как находящемуся наиболее близко к минимуму  $\gamma$ -петли по температуре. При охлаждении, после  $\alpha$ – $\gamma$  превращений, рекристаллизационные процессы, процессы роста зерна, в этом сплаве, протекают наименее интенсивно, т.к. они идут при наименее низких температурах. При отжиге 1150 °C (рис. 2) причиной экстремумов свойств является то, что в сплавах, соответствующих экстремумам, фазовые превращения протекают с наибольшим числом измельчающих зерно фазовых перекристаллизаций, в сравнении с другими сплавами.

При отжиге 850 °C фазовые превращения протекают лишь в сплаве Fe–7,8%Cr, что является причиной минимума  $\delta_m$ .

Положение экстремумов свойств по шкале содержания Cr зависит от температуры отжига. Например, для сплавов 3 группы (табл. 1), минимум демпфирующей способности при отжиге 1000 °C находится при содержании Cr=8,1 %, при отжиге 1150 °C при содержании Cr=10,1 %.

Сплавы, не претерпевающие фазовых превращений (Cr>13,8%), более крупнозернисты, чем сплавы, претерпевающие превращения. Это является причиной их более высокой демпфирующей способности (рис. 2).

В ферритном сплаве высокой чистоты домены значительно крупнее (рис. 3, б), чем в ферритном сплаве повышенной чистоты (рис. 3, а), – средняя толщина основных доменов соответственно 0,185 и 0,039 мм. Это является структурной причиной на порядок более высокой демпфирующей способности сплава высокой чистоты (рис. 2).

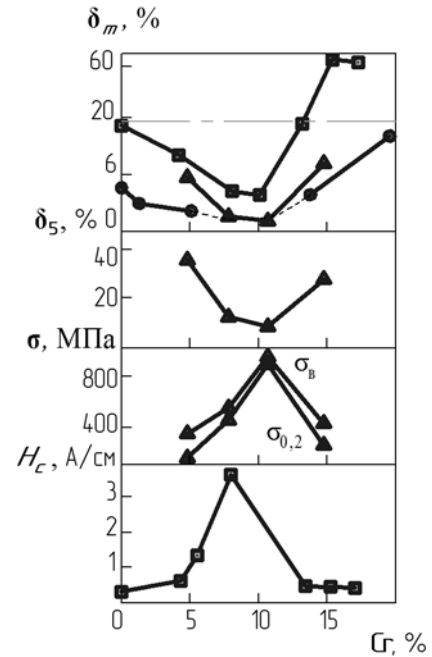


Рис. 2. Зависимость демпфирующих, физико-механических свойств сплавов Fe–Cr от содержания хрома после отжига 1150 °C. ● – чистые сплавы; ▲ – сплавы повышенной чистоты; ■ – сплавы высокой чистоты;  $\delta_m$  – максимум логарифмического декремента на его амплитудной зависимости,  $\delta_5$  – относительное удлинение,  $H_c$  – коэрцитивная сила

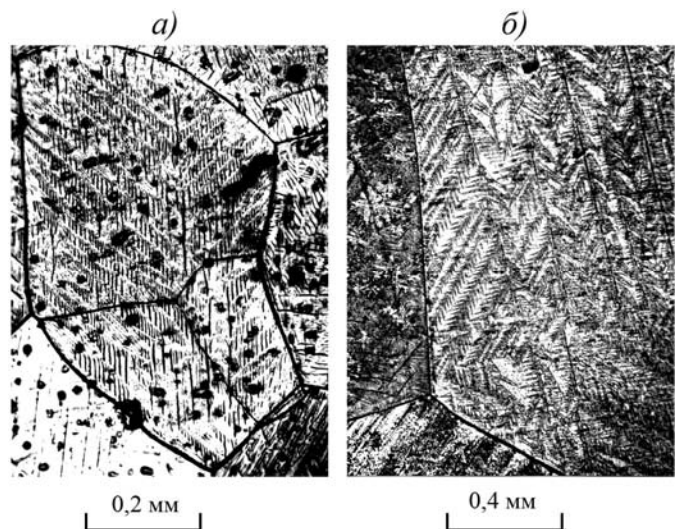


Рис. 3. Доменно-зеренная структура после отжига 1150 °C для сплавов: а – Fe–14,8%Cr (сплав 8), б – Fe–15,4%Cr (сплав 14, табл. 1)

Анализ результатов исследований физико-механических свойств показал, что наряду с влиянием зерна необходимо учитывать влияние степени расслоения твердого раствора, увеличивающийся с увеличением содержания Cr. Например, величина  $\delta_m$  сплава Fe–17,3%Cr значительно меньше по сравнению со сплавом Fe–15,4%Cr после отжига при 1000 °С (соответственно – 0,42 и 0,64).

Результаты исследований показали, что максимальной демпфирующей способностью обладают ферритные сплавы Fe–Cr. Однако, чем больше содержание Cr, тем больше может быть, степень расслоения твердого раствора, согласно диаграмме состояния системы Fe–Cr. В действительности, степень расслоения твердого раствора зависит и от способа обработки, что было подтверждено для сплавов Fe–4,2%Cr и Fe–17,3%Cr методом ядерной гамма-резонансной спектроскопии. Эти исследования показали, что с уменьшением скорости охлаждения при отжиге от 1000 °С увеличивается степень расслоения твердого раствора.

В четвертой главе приведены результаты исследований влияния режимов предварительного отжига и термомагнитной обработки на структуру, демпфирующие свойства и твердость ферритного сплава Fe–15,4%Cr высокой чистоты. Основная цель этих исследований – выявление возможности и способов регулирования термомагнитной обработкой степени расслоения твердого раствора и, соответственно, свойств. Сплав Fe–15,4%Cr был выбран, как сплав с наименьшей степенью расслоения твердого раствора из ферритных сплавов, т.е. с наиболее высокой демпфирующей способностью при оптимальном способе обработки.

С целью получения в нем высокой степени расслоения твердого раствора были проведены предварительные отжики при температурах 600, 800, 1000 и 1200 °С с низкими скоростями охлаждения. Увеличение температуры отжига от 600 до 1200 °С сопровождается ростом ферритного зерна, снижением твердости и уменьшением ширины рентгеновской линии  $(310)_{\alpha_1}$ , особенно существенными в интервале температур 1000–1200 °С (рис. 4). Последнее свидетельствует об уменьшении степени искаженности кристаллической структуры сплава.

На рис. 5 и 6 показана возможность регулирования свойств ферритного сплава Fe–15,4%Cr температурой предварительного отжига и термомагнитной обработки. Характеристики неупругости слабо изменяются при повышении температуры термомагнитной обработки от 350 до 630 °С. Их изменение наблюдается при температурах термомагнитной обработки в диапазоне 630–840 °С, т.е. при темпе-

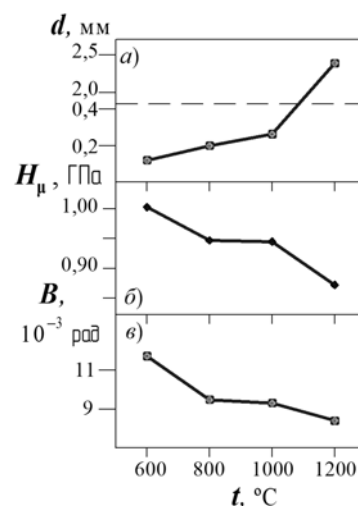


Рис. 4. Влияние температуры отжига на средний диаметр зерна  $d$  (а), твердость  $H_\mu$  (б) и на ширину рентгеновской линии  $(310)_{\alpha_1}$   $B$  (в) сплава Fe–15,4%Cr

Рис. 4. Влияние температуры отжига на средний диаметр зерна  $d$  (а), твердость  $H_\mu$  (б) и на ширину рентгеновской линии  $(310)_{\alpha_1}$   $B$  (в) сплава Fe–15,4%Cr

ратурах выше линии ограниченной растворимости Cr в  $\alpha$ -Fe. При этом, чем выше температура предварительного отжига, тем больше прирост  $\delta_m$  и уменьшение  $f_{min}^2$ .

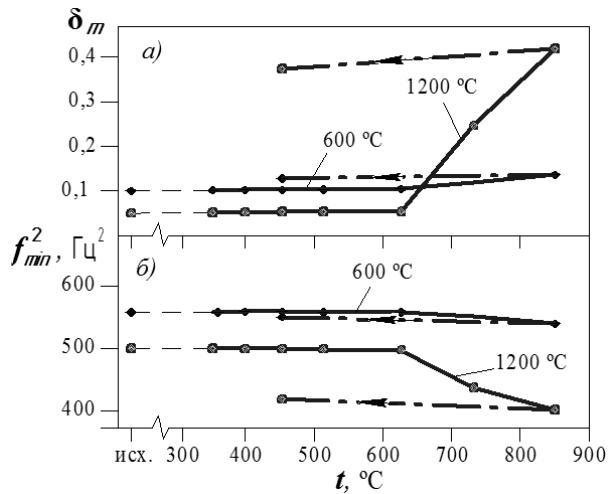


Рис. 5. Влияние температуры термомагнитной обработки на величины максимума логарифмического декремента (а) и минимума квадрата частоты (б) на их амплитудной зависимости сплава Fe–15,4%Cr, предварительно отожженного при 600 и 1200 °C

Интересным результатом является инициируемое термомагнитной обработкой в интервале температур 350–520 °C твердение сплава Fe–15,4%Cr (на рис. 7 это показано для отожженного при температуре 600 °C сплава), чему соответствует дополнительное расщепление рентгеновских линий  $(310)\alpha_1$  и  $(310)\alpha_2$ . Эффект твердения уменьшается с увеличением температуры предварительного отжига (с 0,16 до 0,05 ГПа для температур отжига соответственно 600 и 1200 °C). Это свидетельствует о том, что термомагнитная обработка вызывает существенное перераспределение атомов хрома в этом интервале температур, причем характер и степень перераспределения зависит от температуры предварительного отжига.

Повышению демпфирующей способности отожженного при 1200 °C сплава Fe–15,4%Cr при повышении температуры термомагнитной обработки в интервале 630–840 °C соответствует небольшое увеличение периода решетки  $\alpha$ -твердого раствора (на  $4 \cdot 10^{-5}$  нм). Предполагается, что это обусловлено рассасыванием сегрегаций из атомов Cr, являющихся барьерами перемещению до-

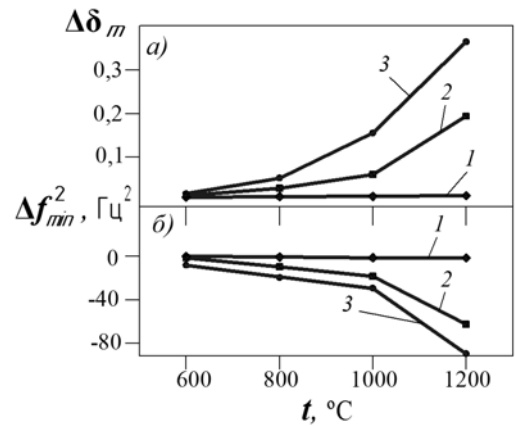


Рис. 6. Влияние температуры отжига на величины повышения максимума логарифмического декремента (а) и снижения минимума квадрата частоты (б) на их амплитудной зависимости за счет термомагнитной обработки сплава Fe–15,4%Cr при 450 (1), 730 (2), 840 °C (3)

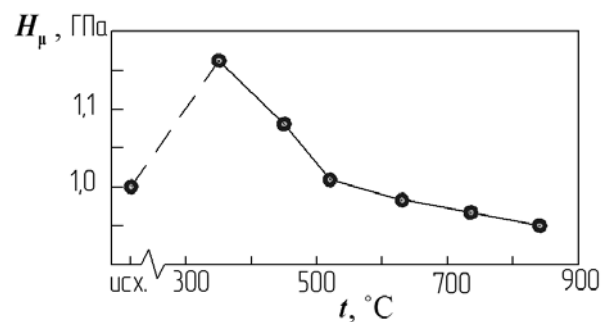


Рис. 7. Зависимость микротвердости от температуры термомагнитной обработки сплава Fe–15,4%Cr, отожженного при 600 °C

менных границ, затрудняющих перестройку доменной структуры при циклических колебаниях.

О возможности уменьшения степени неоднородности кристаллической структуры сплава Fe–15,4%Cr за счет термомагнитной обработки свидетельствуют и результаты ферромагнитного резонанса: термомагнитная обработка уменьшает коэффициент структурной анизотропии, и тем больше, чем крупнее зерно.

Термомагнитная обработка в исследуемом интервале температур не приводит к существенному изменению величины зерна. Можно лишь отметить, что причиной небольшого роста демпфирующей способности отожженного при 600 °С сплава Fe–15,4%Cr при повышении температуры термомагнитной обработки в интервале 630–840 °С (рис. 5), может быть, наряду с уменьшением степени расслоения твердого раствора, также небольшое укрупнение среднего диаметра зерна (на 13 мкм).

Изменение доменной структуры при термомагнитной обработке иллюстрирует рис. 8. Это видно, в частности, по смене направлений векторов намагниченности основных доменов.

В пятой главе рассмотрены результаты исследования влияния температур отжига, термомагнитной обработки на структуру, демпфирующие свойства и твердость высокодемпфирующих сплавов Fe–4%Al, Fe–6%Al.

Анализ результатов исследования показал, что отсутствует соответствие: для сплава Fe–6%Al – между величинами  $\delta_m$  и диаметра зерна (отсутствует прямая связь), между твердостью  $H_\mu$  и  $\delta_m$  (нет обратной связи), а для сплава Fe–4%Al – между величинами  $\delta_m$  и диаметра зерна (рис. 9, 10). Это свидетельствует о наличии внутризеренных концентрационных неоднородностей в этих сплавах после отжига при соответствующих температурах.

Усиление магнитомеханического затухания за счет термомагнитной обработки имеет место в крупнозернистых сплавах после отжига 1200 °С и термомагнитной обработки при температуре 450 °С (рис. 10). Оно обусловлено уменьшением степени упорядочения твердого раствора. Дальнейшее увеличение температуры термомагнитной обработки

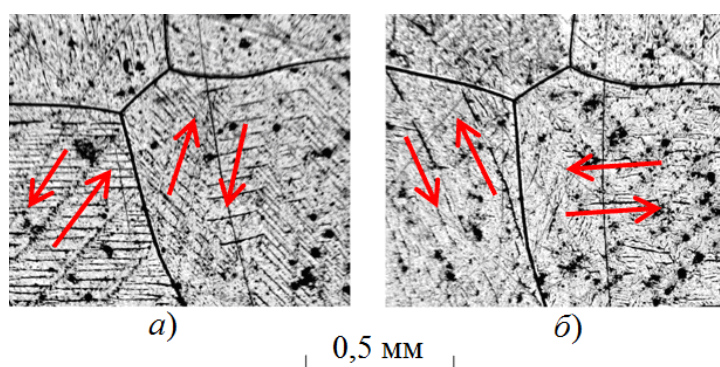


Рис. 8. Доменно-зеренная структура сплава Fe–15,4%Cr до (а) и после ТМагО (б)  
 —→ - вектора намагниченности основных доменов (направление условное)

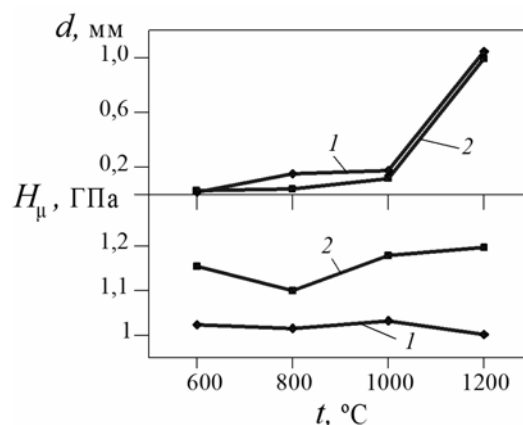


Рис. 9. Влияние температуры отжига на средний диаметр зерна  $d$  и микротвердость  $H_\mu$  сплавов: Fe–4%Al (1) и Fe–6%Al (2)

приводит к снижению демпфирующей способности. Превышение точки Кюри при повышении температуры термомагнитной обработки до 800 °С (рис. 10) не оказывает влияния на эту закономерность.

Сравнение данных рис. 10 и 11 показывает, что при повышении температуры термомагнитной обработки соответствие (обратная связь) между  $\delta_m$  и  $H_c$  для сплава Fe–4%Al есть, а для сплава Fe–6%Al – нет.

Анализ результатов исследований позволяет предположить, что при повышении температуры термомагнитной обработки выше 450 °С преобладает процесс образования зон упорядочения, ведущий к ослаблению магнитомеханического затухания. Этот процесс более интенсивен в мелкозернистом состоянии сплавов до температур термомагнитной обработки, зависящих от состава сплава: до примерно 680 °С в сплаве с Al=4 % и до примерно 580 °С в сплаве с Al=6 % (рис. 10).

Наибольшей способностью к восстановлению магнитомеханического затухания обладает крупнозернистый сплав Fe–6%Al. За способность к восстановлению принят рост  $\delta_m$  после термомагнитной обработки при температуре, равной 450 °С, относительно предыдущей термомагнитной обработки при более высокой температуре, в данном случае, при 800 °С. В отличие от сплавов Fe–Al подобная процедура для сплава Fe–15,4%Cr не ведет к усилению магнитомеханического затухания (рис. 5).

**В шестой главе** проведен сравнительный анализ структуры, физических и механических свойств после различных видов обработки для ферритных сплавов систем Fe–Cr, Fe–Al.

Наилучшие значения комплексных характеристик физико-механических свойств, учитывающих демпфирующую способность (табл. 3) достигнуты:

- для сплава Fe–15,4%Cr – после отжига 1200 °С и последующей термомагнитной обработки при 840 °С;
- для сплава Fe–4%Al – после отжига 1000 °С;
- для сплава Fe–6%Al – после отжига 1200 °С и последующей термомагнитной обработки при 450 °С.

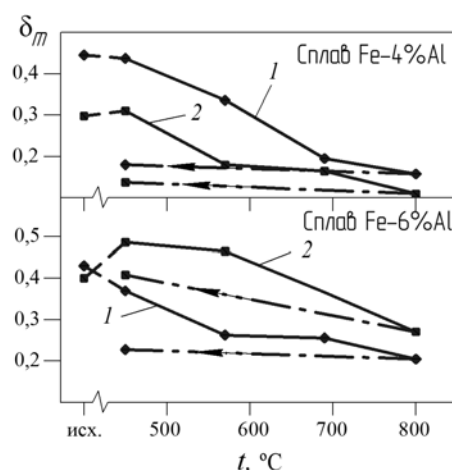


Рис. 10. Влияние температуры термомагнитной обработки на демпфирующую способность сплавов Fe–4%Al и Fe–6%Al после отжига при 1000 (1), 1200 °С (2) и на эффект восстановления демпфирующей способности

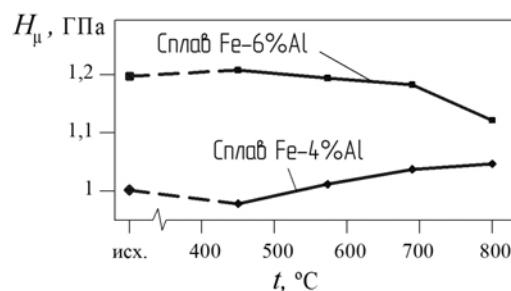


Рис. 11. Влияние температуры термомагнитной обработки на микротвердость сплавов Fe–4%Al и Fe–6%Al после отжига при 1200 °С

Комплексные характеристики физико-механических свойств сплавов Fe–Cr, Fe–Al после отжига 1000, 1200 °С и последующей термомагнитной обработки (ТМагО)

Сплав		Fe–15,4%Cr		Fe–4%Al		Fe–6%Al	
Температура отжиг, °С		1000	1200	1000	1200	1000	1200
$\delta_m \cdot H_\mu$ , 10 МПа	исх.	10,2	5,6	<b>43,9</b>	27,1	43,9	35,3
	ТМагО	24,2	<b>37,9</b>	44	30,3	42,8	<b>58,7</b>
$\delta_m \cdot H_\mu / \rho$ , МПа·см <sup>3</sup> /г	исх.	13,1	7,2	<b>57,3</b>	35,3	56,9	45,7
	ТМагО	31,2	<b>48,8</b>	57,4	39,5	55,4	<b>76</b>
$\delta_m$ – максимум логарифмического декремента на его амплитудной зависимости; $H_\mu$ – микротвердость; $\rho$ – плотность; Температура ТМагО: для сплава Fe–15,4%Cr – 840 °С; для сплавов Fe–Al – 450 °С							

Установлено, что для ферритных сплавов: Fe–15,4%Cr – с одной стороны, и Fe–4%Al, Fe–6%Al с другой стороны во взаимосвязи термической и термомагнитной обработок, свойств и структуры есть сходства и различия.

*Сходство* 1. Наибольший положительный эффект термомагнитной обработки присущ крупнозернистому состоянию сплавов. 2. Для сплавов Fe–Cr, Fe–Al характерно существенное влияние на демпфирующую способность концентрационной неоднородности твердого раствора, степень которой зависит от режима обработки.

*Различия* 1. С повышением температуры термомагнитной обработки до 450 °С в сплавах Fe–Al возможно усиление магнитомеханического затухания, а в сплаве Fe–15,4%Cr магнитомеханическое затухание не меняется. Выше температуры термомагнитной обработки 450 °С магнитомеханическое затухание в сплавах Fe–Al падает, а в сплаве Fe–15,4%Cr в интервале температур 630–840 °С усиливается существенно. 2. В интервале температур термомагнитной обработки 300–550 °С на зависимости твердости сплава Fe–15,4%Cr от температуры термомагнитной обработки имеются максимумы, величина которых зависит от температуры предварительного отжига. Для сплавов Fe–Al такого соответствия нет. 3. Для сплавов Fe–Al характерен эффект восстановления (обратимости) магнитомеханического затухания. Для сплава Fe–15,4%Cr такого соответствия нет. 4. При предварительном отжиге, последующей термомагнитной обработке для сплава Fe–15,4%Cr характерны процессы, связанные с выделением, растворением, перераспределением зон расслоения твердого раствора, а для сплавов Fe–Al характерны процессы, связанные с выделением, растворением, перераспределением зон упорядочения типа Fe<sub>3</sub>Al.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Усовершенствована методика определения высокого демпфирования за счет уменьшения погрешности определения нулевой линии виброграмм и усреднения значений характеристики внутреннего трения на его амплитудной зависимости.

2. Экспериментально обоснован диапазон напряженности переменного магнитного поля при термомагнитной обработке – 2...5 А/см, соответствующий максимуму демпфирующей способности.

3. Установлено, что мелкозернистость сплавов Fe–Cr, по составу находящихся вблизи минимума температур  $\alpha$ – $\gamma$  превращений, претерпевающих наибольшее количество фазовых превращений при отжиге (содержание Cr=7–11 %), является причиной экстремумов их физико-механических свойств. Конкретное положение экстремумов свойств по шкале содержаний Cr зависит от температуры отжига.

4. Показано, что увеличивающееся с повышением содержания Cr и уменьшением скорости охлаждения при отжиге расслоение твердого раствора в сплавах Fe–Cr снижает, в частности, демпфирующую способность. А на ферритном сплаве Fe–15,4%Cr показано, что термомагнитной обработкой можно, за счет снижения степени расслоения твердого раствора, существенно увеличивать демпфирующую способность (ее максимальный прирост составил  $\Delta\delta_m=0,32$ ).

5. Установлено, что чем выше температура предварительного отжига, т.е. чем крупнее зерно, тем больше прирост демпфирующей способности при последующей термомагнитной обработке сплава Fe–15,4%Cr (после отжига 600, 1200 °С и термомагнитной обработки 840 °С прирост  $\delta_m=0,02$  и 0,32 составляет, соответственно). Данный эффект связан с тем, что границы зерен затрудняют процессы перераспределения атомов Cr, препятствуют их изотропному распределению в объеме сплава при термомагнитной обработке.

6. Установлено, что при термомагнитной обработке сплава Fe–15,4%Cr граничной температурой, отделяющей температурно-независимую демпфирующую способность от температурно-зависимой, является точка ограниченной растворимости Cr в  $\alpha$ -Fe. Температурно-зависимой области демпфирующей способности сплава после высокотемпературного отжига характерно ее резкое повышение с увеличением температуры термомагнитной обработки (после отжига 1200 °С и термомагнитной обработки при 630 и 840 °С прирост  $\delta_m$  составляет, соответственно, 0,003 и 0,32).

7. Показано, что мелкозернистые ( $d\approx 0,15$  мм) сплавы Fe–4%Al, Fe–6%Al не восприимчивы к усилению магнитомеханического затухания за счет термомагнитной обработки, в отличие от крупнозернистых ( $d\approx 1$  мм) сплавов. В крупнозернистом сплаве Fe–6%Al ( $d\approx 1$  мм) за счет термомагнитной обработки при температуре 450 °С, позволившей уменьшить степень упорядочения твердого раствора по типу Fe<sub>3</sub>Al, достигнута максимальная на настоящее время для сплавов Fe–Al демпфирующая способность –  $\delta_m=0,48$ . Повышение температуры термомагнитной обработки выше 450 °С ведет к ослаблению магнитомеханического затухания за счет усиления процессов упорядочения в исследуемых сплавах.

8. Установлено, что крупнозернистые сплавы Fe–Al, по сравнению с мелкозернистыми, обладают и большей способностью к восстановлению магнитомеханического затухания. При этом наибольшая способность к восстановлению

магнитомеханического затухания выявлена у крупнозернистого сплава – Fe–6% Al (прирост  $\Delta\delta_m=0,14$ ).

9. Сравнительным анализом закономерностей влияния термической и термомагнитной обработок на свойства и структуру изучаемых ферритных сплавов Fe–Cr, Fe–Al определены их сходства и различия. *Одинаковым* и для сплавов Fe–Cr, и для сплавов Fe–Al является то, что 1) наибольший положительный эффект по демпфирующей способности за счет термомагнитной обработки достигается в крупнозернистых сплавах; 2) существенное влияние на демпфирующую способность оказывает степень внутризеренной концентрационной неоднородности. *Различия* заключаются в том, что 1) температуры термомагнитной обработки, соответствующие максимальному приросту демпфирующей способности, различны: в сплаве Fe–15,4%Cr – 840 °С, в крупнозернистых сплавах Fe–Al – 450 °С; 2) при температурах термомагнитной обработки 350–550 °С сплаву Fe–15,4%Cr характерен процесс дисперсионного твердения, а сплаву Fe–Al – нет; 3) структурными причинами изменения магнитомеханического затухания в зависимости от режимов термической и термомагнитной обработок являются процессы, связанные в ферритных сплавах Fe–Cr – с зонами расслоения твердого раствора, в ферритных сплавах Fe–Al – с областями упорядочения по типу Fe<sub>3</sub>Al.

10. Определены режимы обработки, соответствующие наибольшим значениям комплексных характеристик свойств, учитывающих демпфирующую способность и прочность. Для сплава Fe–15,4%Cr это – отжиг 1200 °С и термомагнитная обработка при 840 °С; для сплава Fe–4%Al – отжиг 1000 °С; для сплава Fe–6%Al – отжиг 1200 °С и термомагнитная обработка при 450 °С.

11. Прикладной характер результатов работы заключается в следующем: 1) выявлены новые возможности термомагнитной обработки, позволяющие управлять процессами перераспределения атомов, степенью неоднородности твердого раствора и, соответственно, свойствами ферромагнитных сплавов на основе Fe; 2) с научно-методической точки зрения введение в практику исследований внутреннего трения определения способности к восстановлению магнитомеханического затухания путем термомагнитной обработки при оптимальной температуре позволит более полно характеризовать демпфирующие сплавы с магнитомеханическим затуханием; 3) выявленные в настоящей работе закономерности изменения свойств, структуры сплавов Fe–Cr, Fe–Al в зависимости от режимов обработки могут быть полезными при разработке, совершенствовании технологии термической и термомагнитной обработок изделий из сплавов, аналогичных исследованным, в частности, многофункциональных, коррозионноустойчивых сплавов.

## ПУБЛИКАЦИИ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ

### Рецензируемые научные журналы и издания, определенные ВАК

1. Скворцов А.И., Мельчаков М.А. Фазовые, структурные превращения и демпфирующие свойства сплавов железо–хром // Материаловедение. – 2011. – №10. – С. 6–10.



2. **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.

3. 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.

#### **Другие публикации**

1. Скворцов А.И., **Мельчаков М.А.**, Борисов А.А. Демпфирующие свойства сплавов на основе железо–хром в зависимости от напряженности магнитного поля при термомагнитной обработке // *XX Уральская школа металлургов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов»*, Изд-во УГТУ-УПИ, 2010. С. 71–72.

2. Скворцов А.И., Кондратов В.М., **Мельчаков М.А.** Зеренно-доменная структура демпфирующих сплавов железа в зависимости от обработки // *Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XVII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 13–18 сентября 2010 г. В 3-х томах*. – Донецк: ДонНТУ, 2012. Т.3. – С. 107–109.

3. **Мельчаков М.А.**, Скворцов А.И., Борисов А.А. Влияние температуры и напряженности магнитного поля при термомагнитной обработке на демпфирующие свойства сплавов железа с магнитомеханическим затуханием // *Демпфирующие и акустические материалы: Сборник материалов межвузовской научно-технической конференции 2010 г.* – Киров: Изд-во ГОУ ВПО «ВятГУ», 2010. С. 28–31.

4. Скворцов А.И., **Мельчаков М.А.** Влияние температуры термической и последующей термомагнитной обработок на демпфирующие свойства, твердость и структуру сплавов Fe–Al // *Общество, наука, инновации (НТК-2011): ежегод. открыт. всерос. научн.-технич. конф., 18–29 апр. 2011.: сб. материалов / Вят. гос. ун-т; отв. ред. С.Г. Литвинец*. – Киров, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD–ROM). (Факультет автоматизации машиностроения. Секция «Материаловедение и технологии обработки сварки. Наноматериалы и нанотехнологии». Статья № 3).

5. **Мельчаков М.А.** Способы дополнительной обработки графиков при исследовании амплитудно-зависимого внутреннего трения // *Общество, наука, инновации (НТК-2011): ежегод. открыт. всерос. научн.-технич. конф., 18–29 апр. 2011.: сб. материалов / Вят. гос. ун-т; отв. ред. С.Г. Литвинец*. – Киров, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD–ROM). (Факультет автоматизации машиностроения. Секция «Материаловедение и технологии обработки сварки. Наноматериалы и нанотехнологии». Статья № 11).

6. **Мельчаков М.А.**, Скворцов А.И. Термомагнитная обработка и свойства сплавов Fe–Al // *Материалы 51-й Международной конференции «Актуальные проблемы прочности»*. 16–20 мая 2011 года. Харьков, Украина. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2011. С. 181–182.

7. Скворцов А.И., **Мельчаков М.А.**, Кондратов В.М. Термомагнитная обработка и свойства высокодемпфирующих сплавов железо–хром, железо–

алюминий // Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XVIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12–17 сентября 2011 г. В 4-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2011. Т. 3. – С. 93–94.

8. Скворцов А.И., **Мельчаков М.А.** Структура и физико-механические свойства высокодемпфирующих сплавов на основе Fe–Cr в зависимости от термической и термомагнитной обработок // Вторые московские чтения по проблемам прочности материалов посвященные 80-летию со дня рождения академика РАН Ю.А. Осипьяна. Москва Черноголовка, 2011. С. 107–108.

9. Программа для ЭВМ «Обработчик виброграмм» : свидетельство об офиц. регистрации № 2012611792 / **Мельчаков М. А.**; заявитель и правообладатель ВятГУ. – Заявка № 2011619712; заявл. 16.12.11; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 16.02.2012.

10. **Мельчаков М.А.** Демпфирующая способность, механические свойства и структура сплавов Fe–Cr, Fe–Al в зависимости от термомагнитной и термической обработок. // Актуальные проблема физического металловедения сталей и сплавов: материалы XXI Уральской школы металловедов-термистов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. С. 211–212.

11. Скворцов А.И., Кондратов В.М., **Мельчаков М.А.** Воздействие термомагнитной обработкой на структурные превращения и внутреннее трение магнитомеханической природы в высокодемпфирующих сплавах Fe–Cr, Fe–Al. // Актуальные проблема физического металловедения сталей и сплавов: материалы XXI Уральской школы металловедов-термистов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. С. 212–213.

12. Оптимизация свойств высокодемпфирующих сплавов Fe–Cr, Fe–Al обработкой, включающей термомагнитную обработку [Электронный ресурс] / **Мельчаков М.А.** // Всероссийская ежегодная научно-техническая конференция «Общество, наука, инновации» (НТК-2012). Общеуниверситетская секция, БФ, ГФ, ФЭМ, ФАВТ, ФАМ, ФПМТ, ФСА, ХФ, ЭТФ : 16–27 апр. 2012 г. : сб. материалов / Вят. гос. ун-т ; отв. ред. С. Г. Литвинец. – Киров, 2012. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – (Секция «Материаловедение и технологии сварки. Наноматериалы и нанотехнология», статья 9).

13. Скворцов А.И., **Мельчаков М.А.**, Воздействие термомагнитной обработки на структуру и свойства высокодемпфирующего ферритного сплава системы железо–хром / Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XIX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 17–22 сентября 2012 г. В 3-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2012. Т. 2. – С. 324–325.

14. **Мельчаков М.А.**, Скворцов А.И. Кристаллическая структура ферритного сплава системы Fe–Cr до и после термомагнитной обработки // Фазовые превращения и прочность кристаллов: сб. тезисов VII Международной конференции (29 октября – 2 ноября 2012, Черноголовка). Черноголовка, 2012. С. 114.