

Физическое моделирование получения наноструктур в сплавах с высокой демпфирующей способностью на основе системы Fe–Cr

© Б.Е. Винтайкин¹, Н.А. Беляков¹, И.Б. Чудаков²,
П.А. Саидахметов³, Т.А. Турмамбеков⁴

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

²ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, Москва, 105005, Россия

³ЮКГУ им. М. Ауэзова, 160012, Республика Казахстан

⁴МКТУ им. Х.А. Ясави, 160315, Республика Казахстан

Приведены методы моделирования процессов получения наноструктур в результате распада на ферро- и парамагнитную фазы твердых растворов с объемно-центрированной кубической (ОЦК) решеткой на основе систем Fe–C, Fe–Cr–Co в целях прогнозирования оптимальных способов создания материалов с высокими демпфирующими свойствами. Изложены требования к структуре сплавов с высокими демпфирующими свойствами. Выбраны два перспективных подхода к получению высоких демпфирующих свойств сплавов с помощью многоступенчатой термообработки. При первом подходе используют сплавы со структурой типа ферромагнитной губки, при втором — один из 12 основных типов структуры, возникающих при распаде в сплавах на основе Fe–Cr, но с малыми различиями как состава фаз, так и их намагниченностей. Моделирование основано на прямой минимизации свободной энергии двухфазного сплава при учете химического взаимодействия, магнитного и атомного упорядочения, упругих деформаций фаз. Рассмотрены оптимальные типы наноструктур для получения демпфирующих свойств и схемы их получения. Определены области нестабильности и метастабильности твердых растворов и перспективные области составов и температур многоэтапных термообработок, направленных на получение высоких демпфирующих свойств этих сплавов.

Ключевые слова: термодинамическое моделирование, твердый раствор, сплавы высокого демпфирования, спинодальная область.

Введение. В современной технике для уменьшения шумов и вибраций станков, машин и других конструкций используют сплавы высокого демпфирования. Даже если несколько деталей машины изготовлено из таких сплавов, уровни шума и вибрации машин, механизмов или элементов конструкции значительно снижаются. Чтобы достичь высокого уровня демпфирующей способности сплавов, требуется сформировать в них специальную структуру. Согласно модельным представлениям [1], для перехода ферромагнитных сплавов на основе системы Fe–Cr в высокодемпфирующее состояние необходимо одновременно выполнить два условия. Одно из них заключается в формировании специфической дисперсной магнитной доменной структуры с повышенной плотностью подвижных 90-градусных границ доменов,

способных к гистерезисному перемещению в поле внешних знакопеременных напряжений, второе — в реализации структуры, обеспечивающей оптимальные (не слишком малые) значения коэрцитивной силы и потерь на перемагничивание. В сплавах на основе системы Fe–Cr структура оптимизируется путем достижения необходимой степени расслоения твердого раствора при термической обработке. При этом специфическая дисперсная структура с повышенной долей 90-градусных границ доменов образуется в ходе термообработки при достаточно медленном охлаждении вследствие того, что обеспечивается более полная аккомодация упругих напряжений магнитострикционной природы в системе магнитных доменов при комнатной температуре. Также в сплавах высокого демпфирования необходим механизм преобразования механической энергии колебаний в энергию, связанную с перемагничиванием материала, в первую очередь за счет обратного магнитострикционного эффекта [2, 3].

Перечисленным условиям удовлетворяют сплавы на основе систем Fe–Cr и Fe–Cr–Co с ОЦК-решеткой. В этих сплавах за счет проведения термообработки по различным режимам можно сформировать разные структурные состояния с различными формой, взаимным расположением и составами нанобластей фаз, на которые распадается изначально однородный твердый раствор [4–6]. Несколько типов структуры способны обеспечить незначительные препятствия для движения доменных стенок. Такой структурой может быть ферромагнитная губка [7], в которой имеются мелкие изолированные частицы парамагнитной фазы в матрице ферромагнитной фазы. Другими типами структуры могут быть системы наночастиц со слегка различающимися составами частиц и их окружающей фазы; эти области являются ферромагнитными со слегка различающимися намагниченностями, что также служит препятствием для движения доменных стенок сквозь такую структуру [6]. Можно получить много типов таких структур — 12 основных и множество переходных. Они систематизированы в работе [6]. В частности, можно использовать оптимальную для постоянных магнитов наноструктуру, в которой вытянутые по одному направлению наночастицы фазы изолированы тонкими прослойками ферромагнитной фазы с меньшей намагниченностью насыщения, или же оптимальную для полужестких магнитных сплавов [8] структуру с взаимопроникающими областями фаз, в которой наночастицы ферро- и ферромагнитной фаз с меньшей намагниченностью насыщения нельзя считать ни матрицей, ни выделениями.

Постановка задачи. Создание перечисленных структур и связанных с ними демпфирующих свойств возможно в результате оптимального подбора параметров термообработки и состава сплава — твердого раствора на основе железа. Для решения этой задачи весьма

эффективным оказался метод, который базируется на моделировании процессов формирования наноструктур в магнитно-упорядоченных сплавах на основе железа, никеля и хрома [9–11]. При таком подходе огромное множество натуральных экспериментов заменяют вычислительными экспериментами, с помощью которых ищется оптимальное решение задачи. По результатам расчетов выбирают оптимальные составы сплавов и параметры их термообработки, с ними и проводят затем небольшое число экспериментов. Такой подход значительно экономит время и средства по сравнению с методом экспериментального поиска, который заключается в подборе составов и параметров термообработок и не позволяет найти оптимальное, истинное решение.

Указанный метод был успешно применен при моделировании формирования наноструктур для случая разработки высококоэрцитивных и полужестких сплавов на основе системы Fe–Cr–Co. В данной работе рассмотрены перспективы его применения при разработке схем термообработок сплавов высокого демпфирования.

Главные типы структуры в сплавах на основе Fe–Cr–Co. В системе Fe–Cr–Co за счет проведения термообработки при разных температурах даже на сплаве одного состава можно сформировать 12 основных и множество переходных типов структуры, они систематизированы в работе [6]. При высокой температуре (700...500 °C) в этой системе происходит распад твердого альфа-раствора с ОЦК-решеткой на две фазы: 1) ферромагнитную, состоящую в основном из Fe и Co; 2) парамагнитную, состоящую в основном из хрома [4, 5]. Асимметричная форма области расслоения с острым гребнем (рис. 1) позволяет даже на сплаве одного состава получать три типа наноструктур:

- 1) изолированные выделения ферромагнитной фазы в парамагнитной матрице;
- 2) взаимопроникающие области фаз;
- 3) изолированные выделения парамагнитной фазы в ферромагнитной матрице.

Поверхность раздела областей фаз и связанная с ней поверхностная энергия минимальны, если в виде изолированных выделений выпадает фаза с меньшей объемной долей.

В сплавах на основе Fe–Cr–Co образовавшиеся фазы 1 и 2 обладают близкими значениями параметров решетки, из-за чего фазы когерентно связаны между собой, так что кристаллическая решетка не нарушается на границе раздела фаз. Изменять разность параметров решетки фаз и связанную с ней энергию упругих деформаций их кристаллических решеток можно путем легирования сплавов Fe–Cr–Co четвертым элементом. Молибден и вольфрам распределяются в парамагнитную фазу с большим параметром решетки и увеличивают разность параметров решетки фаз, а Al, Nb, Ti, V и ряд других элементов распределяются в ферромагнитную фазу с меньшим параметром решетки

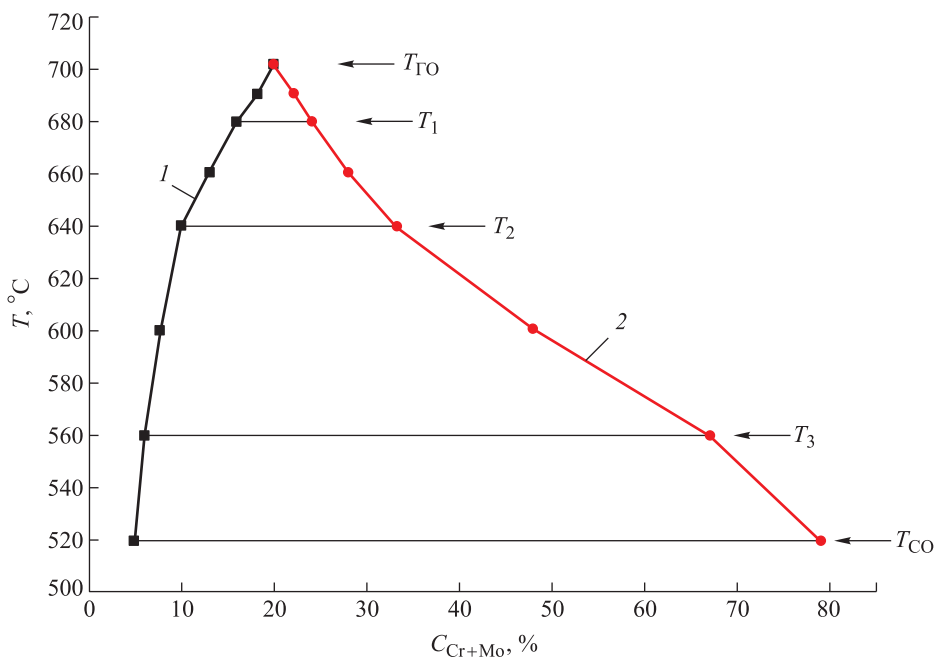


Рис. 1. Три типичные температуры T_1 , T_2 , T_3 формирования главных типов структуры в сплавах на основе Fe–Cr–Co, температура $T_{ГО}$ гомогенизирующей обработки и температура T_{CO} ступенчатого отпуска:
 1 — ферромагнитная фаза; 2 — парамагнитная фаза

и уменьшают эту разность. При увеличении энергии упругих деформаций кристаллических решеток фаз происходит формирование более неравноосных областей фаз, длинные оси которых ориентированы вдоль направлений с минимальным модулем Юнга $\langle 100 \rangle$ (в случае сплавов Fe–Cr–Co с ОЦК-решеткой). В каждом из трех основных типов структуры появляются два подтипа — с равно- и неравноосными областями фаз, тогда получается шесть типов структуры.

Выстраивание равноосных областей длинными осями вдоль направления магнитного поля происходит при использовании внешнего магнитного поля в процессе термообработки, особенно на ее начальном этапе, когда формируется структура. Этому соответствуют меньшие значения магнитостатической энергии. В структурах с сильно неравноосными областями отсутствуют игольчатые выделения фаз с длинными осями, перпендикулярными направлению магнитного поля. В случае систем взаимопроникающих пластинчатых областей фаз отсутствуют пакеты с пластинками, перпендикулярными направлению магнитного поля.

По результатам воздействия магнитного поля на формирование структуры каждый из шести типов структуры можно подразделить на два, тогда всего получается 12 основных типов структуры с сильно различающимися магнитными свойствами. Магнитные свойства, оптимальные для постоянных магнитов, — высокие значения коэрцитивной силы и магнитной энергии [4, 5] — соответствуют изолированным выделениям ферромагнитной фазы в парамагнитной матрице. Средние значения коэрцитивной силы, необходимые для магнитомягких сплавов [8] отвечают взаимопроникающим областям фаз. Изолированным областям парамагнитной фазы в ферромагнитной матрице соответствуют малые значения коэрцитивной силы, оптимальные для магнитомягких сплавов высокого демпфирования [7].

Формирование этих 12 типов структур осуществимо за счет выбора состава сплава и температур многоэтапной термообработки, поскольку получение структуры за один этап не всегда возможно. Создание структуры первого типа облегчается после гомогенизирующей обработки (ГО). Структуру второго типа можно получить после ГО при достаточно быстром охлаждении [5]. Если ступенчатый отпуск (СО) проводить небольшими ступенями при понижающейся температуре, то можно сохранять тип структуры, сформировавшейся при температурах T_1 , T_2 , T_3 (см. рис. 1). Моделирование процессов распада в этих сплавах позволяет существенно облегчить и ускорить подбор такого большого количества параметров термообработки.

Для получения магнитных свойств, оптимальных для сплавов высокого демпфирования, термообработку следует заканчивать при температуре 650...550 °С. После такой обработки обе фазы останутся ферромагнитными при комнатной температуре, что может оказаться полезным для сплавов высокого демпфирования.

Термодинамическая модель сплавов на основе Fe–Cr–Co. Описанная в работах [9–11] термодинамическая модель учитывает несколько вкладов в свободную энергию: химический, магнитного упорядочения в ферромагнитной фазе, атомного упорядочения, энергии упругих деформаций фаз, намагничивания ферромагнитных областей во внешнем магнитном поле. Модель весьма точно описывает процессы в сплавах, поскольку ее параметры были уточнены по специально разработанным методикам полного или частичного определения составов фаз, возникающих в процессе распада [12–14].

Модель позволяет очень точно вычислять наблюдаемые экспериментально границы области расслоения с особым гребнем, как бы переходящим в поверхность точек Кюри твердых тройных растворов на основе Fe–Cr–Co. В многокомпонентных сплавах с помощью этой модели можно также определять спинодальные области (области, в

которых вторая производная свободной энергии по некоторым направлениям в пространстве концентраций меньше нуля, вследствие чего сплав неустойчив). Кроме того, можно определять области температур и составов сплавов, отвечающие метастабильным состояниям, где, в частности, вторая производная свободной энергии по некоторым направлениям в пространстве концентраций близка к нулю.

С помощью этой модели были найдены оптимальные составы и режимы термообработки двух новых классов магнитных материалов на основе системы Fe–Cr–Co и скорректированы параметры термообработки и составы уже существующих на основе этой системы сплавов [15]. Эта модель позволила с хорошей точностью определить границы области расслоения в сплавах Fe–Ni, описанной в [16, 17].

Составы сплавов для высокопластичных постоянных магнитов Fe–Cr–Co были уточнены путем минимизации разности параметров решетки в фазах, возникающих при распаде в широком диапазоне температур.

Применение модели для разработки сплавов высокого демпфирования. Данная модель использована для предсказания перспективных составов сплавов высокого демпфирования на основе структуры типа ферромагнитной губки [7] и на основе структур с двумя ферромагнитными фазами, различающимися намагниченностями насыщения (рис. 2).

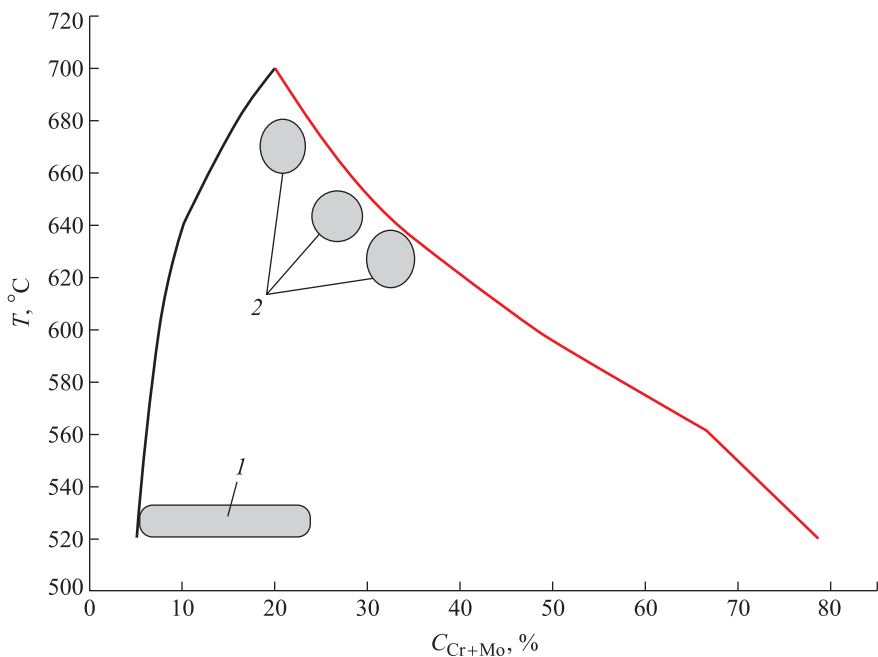


Рис. 2. Области перспективных составов и температур для материалов высокого демпфирования на основе системы Fe–Cr–Co: 1 — для получения структуры типа ферромагнитной губки; 2 — для сплавов с малым отличием намагниченностей насыщения фаз

Модель позволила найти расчетным путем области абсолютно неустойчивых и метастабильных состояний на диаграммах состояния, т. е. области, в которых следует ожидать формирование неоднородных по составу нано- и микроструктур сплавов. Согласно теории перемагничивания магнитных материалов, такие структуры должны обеспечивать получение петель магнитного гистерезиса, отвечающих сплавам, которые эффективно рассеивают энергию механических колебаний. Области перспективных составов и температур отмечены на рис. 2.

Заключение. Применение термодинамической модели процессов формирования наноструктур в сплавах на основе систем Fe–Cr, Fe–Cr–Co, Fe–Ni позволяет определять области перспективных составов и температур термообработки этих сплавов, проводимой в целях получения высоких демпфирующих свойств в этих материалах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chudakov I.B., Polyakova N.A., Mackushev S.Yu., Udovenko V.A. On the Formation of High Damping State in Fe–Al and Fe–Cr Alloys. *Solid State Phenomena*, 2008, vol. 137, pp. 109–118.
- [2] Кочард А. Магнитомеханическое затухание. Вонсовский С.В., ред. *Магнитные свойства металлов и сплавов*. Сб. ст. Москва, Изд-во иностр. лит. 1961, с. 328–363.
- [3] Головин И.С. *Внутреннее трение и механическая спектроскопия металлических материалов*. Москва, Издательский дом МИСиС, 2012, 247 с.
- [4] Kaneko H., Homma M., Nakamura Y. New ductile permanent magnet of Fe–Cr–Co system. *AIP Conf. Proc.*, 1972, no. 5, pp. 1088–1092.
- [5] Беляцкая И.С. О формировании высококоэрцитивного состояния в сплавах на основе Fe–Cr–Co. *Металлы*, 1984, № 1, с. 97–103.
- [6] Винтайкин Б.Е., Кузьмин Р.Н., Сухарева Е.А. Классификация типов кристаллической структуры, возникающих при магнитном распаде в монокристаллах ОЦК твердых растворов на основе Fe–Cr–Co. *Кристаллография*, 1990, т. 35, вып. 2, с. 414–417.
- [7] Rossiter P.L., Houghton M.E. Magnetic Properties and Micro-Structure of Fe–27,5 Cr–17,5 Co–0,5Al Alloys. *Phys. Stat. Sol.*, 1978, vol. 47, no. 2, pp. 597–608.
- [8] Никаноров В.Б., Селезнев А.П., Яковлев Б.А. Повышение технико-экономических показателей серийных гистерезисных электродвигателей. *Известия вузов. Сер. Электромеханика*, 1987, № 3, с. 49–54.
- [9] Могутнов Б.М., Томилин И.А., Шварцман Л.А. *Термодинамика сплавов железа*. Москва, Металлургия, 1984, 208 с.
- [10] Беляков Н.А., Винтайкин Б.Е. Роль энергии упругих деформаций кристаллических решеток когерентно-сопряженных фаз в формировании фазового равновесия в многокомпонентных сплавах на основе системы железо–хром–кобальт. *Металловедение и термообработка металлов*, 2011, № 1, с. 44–50.
- [11] Беляков Н.А., Винтайкин Б.Е. Исследование влияния энергии упругих деформаций когерентно-сопряженных фаз на фазовое равновесие в сплавах на основе системы Fe–Cr–Co методами термодинамического моделирования. *Вестник МГТУ. Сер. Естественные науки*, 2012, № 5, с. 65–74.

- [12] Винтайкин Б.Е., Кузьмин Р.Н. Определение состава фаз в многокомпонентных твердых растворах при совместном использовании мессбауэровской спектроскопии и рентгеновской дифрактометрии. *Письма в ЖТФ*, 1986, т. 12, вып. 24, с. 1531–1534.
- [13] Винтайкин Б.Е., Винтайкин Е.З., Мильчарек Я., Микке К. Влияние энергии магнитного упорядочения на форму области расслоения в спинодально распадающихся сплавах Fe–Cr–Co. *Металлы*, 1999, № 6, с. 89.
- [14] Юрчиков Е.Е., Сериков В.В., Иванова Г.В. Исследование структурных превращений в сплаве Fe–Cr–Co–Si методами ядерного гамма- и магнитного резонанса. *ФММ*, 1977, т. 44, вып. 1, с. 65–71.
- [15] Alekseev N.A., Sidorov E.V., Vintaikin B.E. Commercial single-crystal permanent magnets from alloy Fe–Cr–Co–Mo. *Intern. Conf. Intermag-90*. Brighton (UK), 1990, p. 34.
- [16] Chamberod A., Laugier J., Penisson J. Electron Irradiation Effects on Iron–Nickel Invar Alloys. *J. Magn. a Magn. Mater.*, 1979, no. 10, pp. 139–144.
- [17] Грузин Л.П., Родионов Ю.Л., Пряхин В.А. О диаграмме состояния железо-никелевых сплавов. *ДАН СССР*, 1980, т. 251, В. 6, с. 1384–1388.

Статья поступила в редакцию 04.12.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Винтайкин Б.Е., Беляков Н.А., Чудаков И.Б., Саидахметов П.А., Турмамбеков Т.А. Физическое моделирование получения наноструктур в сплавах с высокой демпфирующей способностью на основе системы Fe–Cr. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 4.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/msm/nnm/1389.html>

Винтайкин Борис Евгеньевич родился в 1961 г., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1984 г. Д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физики МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 публикаций. Области научных интересов: физика твердого тела, термодинамическое моделирование, магнитные материалы.
e-mail: vintaikb@mail.ru

Беляков Никита Андреевич родился в 1984 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2007 г. Магистр техники и технологии, аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 публикаций. Области научных интересов: физика твердого тела, термодинамическое моделирование, параллельные вычисления.
e-mail: nickbelyakov@mail.ru

Чудаков Иван Борисович родился в 1962 г., окончил МИФИ в 1985. Канд. физ.-мат. наук, исполняющий обязанности заведующего лабораторией ЦНИИчермет им. И.П. Бардина. Автор более 80 публикаций. Области научных интересов: физика твердого тела, физика магнитных явлений, металловедение, термическая обработка. e-mail: i-chudakov@yandex.ru

Саидахметов Пулат Аблатыевич родился в 1958 г., окончил Таджикский государственный университет им. В.И. Ленина в 1980 г. Канд. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой теории и методов преподавания физики Южноказахстанского государственного университета им. М. Ауэзова. Автор более 80 публикаций. Области научных интересов: теоретическая физика, моделирование.
e-mail: timpf_ukgu@mail.ru

Турмамбеков Торбай Абдрахманович родился в 1957 г., окончил Казахский государственный университет им. С.М. Кирова в 1982 г. Д-р физ.-мат. наук, заведующий кафедрой физики Международного казахско-турецкого университета им. Х.А. Ясави. Автор более 120 публикаций. Области научных интересов: физика твердого тела, металловедение.

e-mail: torebay.turmambekov@iktu.kz, tore_bai@mail.ru

Physical modeling of nanostructures formation in alloys with high damping capacity on the basis of Fe-Cr

© B.E. Vintaykin¹, N.A. Belyakov¹, I.B. Chudakov²,
P.A. Saidakhmetov³, T.A. Turmambekov⁴

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

²Bardin Central Institute of Ferrous Metals, Moscow, 105005, Russia

³Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, 160012, RK

⁴IKTU n.a. H.A. Jasavi, Turkestan, 160315, RK

The article considers application of physical modeling techniques of the processes of nanostructure production as a result of disintegration of alloys based on bcc solid solutions in the systems of Fe–Cr Fe–Cr–Co into ferromagnetic and paramagnetic phases with the purpose of predicting the best ways of obtaining materials with high damping properties. The requirements for the optimal structure of ferromagnetic alloys with high damping properties and methods of its obtaining are analysed. Two approaches to obtaining high damping properties by means of a multi-stage heat treatment of the alloys are selected as promising. The alloy with a structure of ferromagnetic sponge was selected as a first approach, as a second - one of the 12 basic types of structures appearing in the process of disintegration of alloys based on Fe–Cr, but with a small difference in the compositions of the phases and slight differences in phase magnetizations. Modeling was based on the direct minimization of the free energy of a two-phase alloy, with due regard for the contributions: chemical, magnetic and atomic ordering, the elastic phase deformations, and some others. The used approach is based on the modeling processes and allows replacing real experiments with computing thereby it can accelerate the process of alloy structure and heat treatments optimization and reduce its cost. The optimum types of nanostructures for producing damping properties and schemes for their obtaining are considered. Domains of instability and metastability of solid solutions are calculated as well as prospective ranges of compositions and multistage thermal treatment temperatures for obtaining high damping properties of these alloys.

Keywords: *thermodynamic modeling, solid solutions, high damping properties alloys, spinodal gap.*

REFERENCES

- [1] Chudakov I.B., Polyakova N.A., Mackushev S.Yu., Udovenko V.A. On the Formation of High Damping State in Fe–Al and Fe–Cr Alloys. *Solid State Phenomena*, 2008, vol. 137, pp. 109–118.
- [2] Kochard A. Magnitomekhanicheskoe zatukhanie [Magnetomechanical damping. Vonsovsky S.V., ed. In: *Magnitnye svoistva metallov i splavov* [The magnetic properties of metals and alloys]. Collection of papers. Moscow, Inostrannaya literature Publ., 1961, pp. 328–363.
- [3] Golovin I.S. *Vnutrennee trenie i mekhanicheskaya spektroskopiya metallicheskikh materialov* [Internal friction and mechanical spectroscopy of metallic materials]. Moscow, MISIS Publ., 2012, 247 p.
- [4] Kaneko H., Homma M., Nakamura Y. New ductile permanent magnet of Fe–Cr–Co system. *AIP Conf. Proc.*, 1972, no. 5, pp. 1088–1092.

- [5] Belyatskaya I.S. *Metally – Metals*, 1984, no. 1, pp. 97–103.
- [6] Vintaykin B.E., Kuzmin R.N., Sukhareva E.A. *Kristallografiya – Crystallography*, 1990, vol. 35, no. 2, pp. 414–417.
- [7] Rossiter P.L., Houghton M.E. Magnetic Properties and Micro-Structure of Fe–27,5 Cr–17,5 Co–0,5Al Alloys. *Phys. Stat. Sol.*, 1978, vol. 47, no. 2, pp. 597–608.
- [8] Nikanorov V.B., Seleznev A.P., Yakovlev B.A. *Izvestiya vuzov. Seriya Elektromekhanika – Proceedings of higher education institutions. Series Electromechanics*, 1987, no. 3, pp. 49–54.
- [9] Mogutnov B.M., Tomilin I.A., Shvartsman L.A. *Termodinamika splavov zheleza* [Thermomechanics of ferrous alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984, 208 p.
- [10] Belyakov N.A., Vintaykin B.E. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov – Physical Metallurgy and Metal Heat Treatment*, 2011, no. 1, pp. 44–50.
- [11] Belyakov N.A., Vintaykin B.E. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya Estestvennye nauki – Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Natural Sciences*, 2012, no. 5, pp. 65–74.
- [12] Vintaykin B.E., Kuzmin R.N. *Pisma v ZhTEF – JETP Letters*, 1986, vol. 12, no. 24, pp. 1531–1534.
- [13] Vintaykin B.E., Vintaykin E.Z., Milcharek Ya., Mikke K. *Metally – Metals*, 1999, no. 6, p. 89.
- [14] Yurchikov E.E., Serikov V.V., Ivanova G.V. *Fizika Metallov i Metallovedenie – The Physics of Metals and Metallography*, 1977, vol. 44, issue. 1, pp. 65–71.
- [15] Alekseev N.A., Sidorov E.V., Vintaikin B.E. Commercial single-crystal permanent magnets from alloy Fe–Cr–Co–Mo. *Intern. Conf. Intermag–90*. Brighton (UK), 1990, p. 34.
- [16] Chamberod A., Laugier J., Penisson J. Electron Irradiation Effects on Iron–Nickel Invar Alloys. *J. Magn. a Magn. Mater.*, 1979, no. 10, pp. 139–144.
- [17] Gruzin L.P., Rodionov Yu.L., Pryakhin V.A. *Doklady Akademii nauk SSSR – Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1980, vol. 251, B. 6, pp. 1384–1388.

Vintaikin B.E. (b. 1961) graduated from Lomonosov Moscow State University in 1984. Dr. Sci. (Phys. & Math.), Professor of the Physics Department of Bauman Moscow State Technical University. Author of over 100 scientific works in the field of physics. Research interests: solid state physics, magnetic materials, the diffraction study. e-mail: vintaikb@mail.ru

Belyakov N.A. (b. 1984) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2007. Master of Engineering and Technology, post-graduate of the Department of Physics at Bauman Moscow State Technical University. Author of 20 publications. Research interests: solid state physics, thermodynamic modeling, parallel computing. e-mail: nickbelyakov@mail.ru

Chudakov I.B. (b. 1962) graduated from Moscow Engineering Physics Institute in 1985. Candidate of Sciences (Phys. and Math.), acting head of the Laboratory at Bardin Central Institute of Ferrous Metals. Author of more than 80 works. Research interests: solid state physics, physics of magnetic phenomena, metallurgical science, heat treatment. e-mail: i-chudakov@yandex.ru

Saidakhmetov P.A. (b. 1958) graduated from Tajik State University named after V.I. Lenin in 1980. Candidate of Sciences (Phys. and Math.), head of the Department of Theory and Methods of Teaching Physics at Auezov South Kazakhstan University. Author of

more than 80 works. Research interests: theoretical physics, modelling. e-mail: timpf_ukgu@mail.ru

Turmambekov T.A. (b. 1957) graduated from Kazakh State University named after S.M. Kirov in 1982. Dr. Sci. (Phys. & Math.), head of the Department of Physics at IKTU n.a. H.A. Jasavi. Author of more than 120 works. Research interests: solid state physics, metallurgical science. e-mail: torebay.turmambekov@iktu.kz; tore_bai@mail.ru