

## РАЗДЕЛ 3. МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)  
DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.01.022  
УДК 669.1

### ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА НА ДЕМПФИРУЮЩИЕ, МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРЫ СПЛАВОВ Fe–V

М.А. Мельчаков, В.А. Лисовский

*Демпфирующие свойства как свойства, отвечающие за гашение вибраций и шума, являются немаловажной характеристикой материалов, варьированием которой можно добиться либо снижения колебаний системы, как следствие, точности и надежности оборудования, либо увеличения качества звучания конструкций, например, звучание колоколов. В данной работе были произведены исследования влияния температуры отжига в диапазоне от 1000–1300 °С на демпфирующие свойства высокодемпфирующих сплавов Fe–0,1 % V, Fe–4 % V. Демпфирующие свойства определяли на обратном крутильном маятнике, цилиндрических образцах с размером рабочей части 5 мм. В результате исследования получено, что сплав, содержащий мало ванадия при увеличении температуры термической обработки, повышал максимум логарифмического декремента. Сплав же с большим процентным содержанием ванадия незначительно снижал демпфирующие свойства. Данные сплавы имеют магнитомеханическую природу внутреннего трения. В связи с этим, для понимания причин, приводящих к изменениям демпфирующих свойств в данных сплавах, произведен анализ магнитных свойств и структуры. Магнитные свойства, а именно магнитострикция, определялась с использованием тензорезисторов по полумостовой схеме. В результате комплексного исследования проанализирована взаимосвязь демпфирующих и магнитных свойств со структурой сплавов Fe–V, имеющих магнитомеханическую природу внутреннего трения.*

*Ключевые слова: сплавы Fe–V; отжиг; демпфирующие свойства; магнитомеханическое затухание, высокое демпфирование, обратный крутильный маятник, магнитные свойства; магнитострикция, рентгеноструктурный анализ, кристаллическая структура.*

#### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что немаловажной механической характеристикой конструкционных материалов, которая определяет их пригодность для производства различных элементов конструкций, является демпфирующая способность материала – способность поглощать энергию колебаний. В то же время рост основных параметров в современных машинах, таких как скорость, температура, давление, требует повышенного внимания к демпфирующим свойствам материала, поскольку применение материалов с высокими демпфирующими свойствами способствует снижению возможностей возникновения резонансных колебаний и, как следствие, преждевременного разрушения деталей машин.

Одним из способов поглощения энергии колебаний является магнитомеханическая природа, в которой особое место имеют сплавы железа: Fe–Si [1], Fe–Cr [2], Fe–Al [3], Fe–V [4] и другие. Данные сплавы с магнитомеханической природой внутреннего трения обладают высокой демпфирующей способностью. Разработка таких материалов и способов их обработки представляет научный и практический интерес.

Целью данной работы является изучение влияния термической обработки на взаимосвязь демпфирующих, магнитных свойств и структуры сплавов Fe–V.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалами исследования являлись сплавы Fe – 0,1 % V и Fe – 4 % V (% , масс.) технической чистоты.

Демпфирующие свойства (логарифмический декремент колебаний) определяли на установке типа обратный крутильный маятник методом затухающих крутильных колебаний [4] по формуле:

$$\delta = \ln \left( \frac{A_i}{A_{i+1}} \right),$$

где  $A_i$  и  $A_{i+1}$  – амплитуды последующих друг за другом затухающих колебаний.

Термическая обработка сплавов проводилась в вакуумной печи типа СНВЭ–2.4.2/16 со скоростью охлаждения при отжиге ~275 °С/час.

Измерение магнитострикции производилось с применением полупроводниковых тензорезисторов на сульфиде самария с использованием схемы полумост.

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА НА ДЕМПФИРУЮЩИЕ, МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРЫ СПЛАВОВ Fe–V

Для исследований микроструктуры образцов использовался микроскоп Neophot-21.

Рентгеноструктурный анализ проводился

на рентгеновском дифрактометре XRD–7000 в Co-излучении.

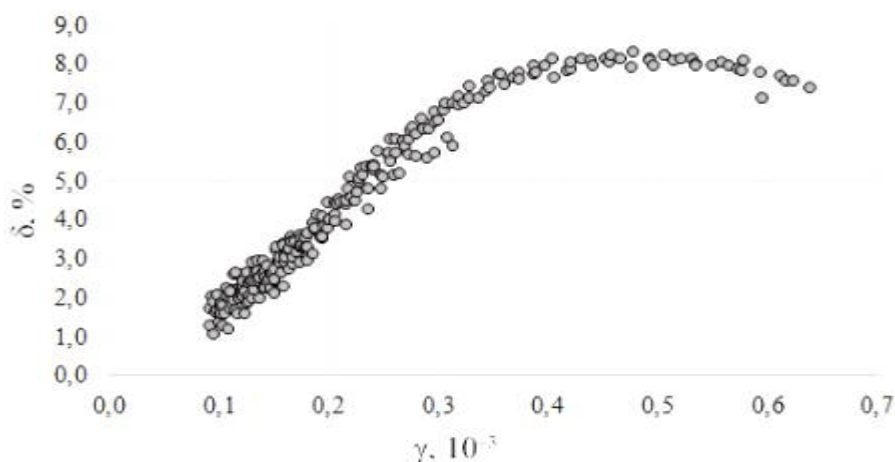


Рисунок 1 – Виброграммы для сплава Fe–4 % V после отжига 1000 °С

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с ранее поставленными задачами работы, проведено исследование влияния температуры отжига на демпфирующие свойства сплавов системы Fe–V. На рисунке 1 приведена виброграмма сплава Fe–4 % V после отжига при температуре 1000 °С, показывающая величину амплитуд колебаний  $\gamma$ .

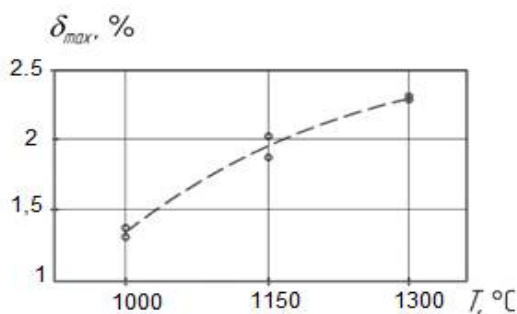


Рисунок 2 – Влияние температуры отжига на максимум логарифмического декремента для сплава Fe–0,1 % V

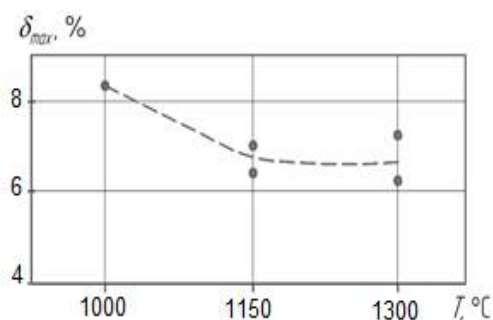


Рисунок 3 – Влияние температуры отжига на максимум логарифмического декремента для сплава Fe–4 % V

В результате испытаний выявили, что в сплаве Fe–0,1 % V происходит увеличение максимума логарифмического декремента при увеличении температуры отжига (рисунок 2).

В результате испытаний выявили, что в сплаве Fe–0,1 % V происходит увеличение максимума логарифмического декремента при увеличении температуры отжига (рисунок 3).

Для сплавов Fe–4 % V происходит незначительное уменьшение демпфирующих свойств при увеличении температуры отжига.

Как известно из работ [6, 7], для увеличения демпфирующей способности сплавов с магнитомеханической природой внутреннего трения необходимо создать условия для беспрепятственной перестройки доменной структуры, а именно, чтобы границы зерен не мешали перемещению и изменению доменов. Исследования структуры показали, что для обоих исследуемых сплавов повышение температуры отжига приводит к увеличению среднего размера зерна (рисунок 4).

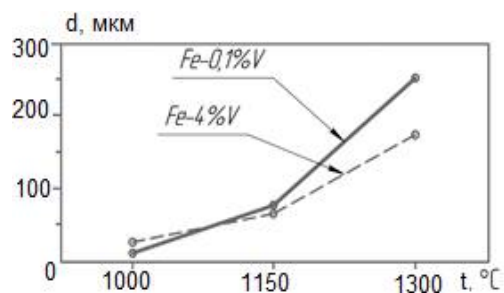


Рисунок 4 – Зависимость среднего размера зерна от температуры отжига для сплавов Fe–0,1 %V и Fe–4 %V

В данном случае для сплава с малым содержанием ванадия 0,1 % наблюдается явная корреляция с ростом демпфирующих свойств при увеличении температуры отжига. Однако, для сплава с 4 % ванадия зависимости нет. В данном случае на демпфирующие свойства будут оказывать влияние другие изменения в сплаве.

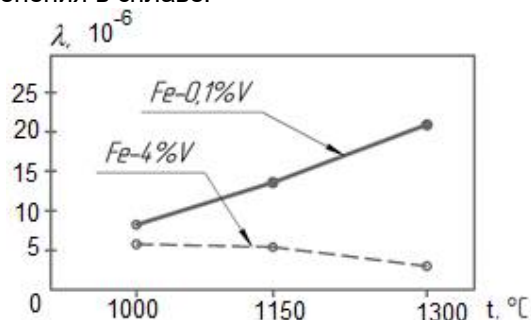


Рисунок 5 – Зависимость магнитострикции  $\lambda$  при индуктивности магнитного поля 800 мТл от температуры отжига для сплавов Fe–0,1 % V и Fe–4 % V

Из графиков рисунка 5 видно, что при увеличении температуры отжига происходит увеличение магнитострикции для сплава Fe–0,1 % V и незначительное уменьшение для сплава Fe–4 % V. Изменение магнитострикции в сплавах хорошо согласуется с изменением демпфирующих свойств, согласно формуле G.W. Smith, J.R. Birchak [8]:

$$\Psi_{\max} \approx 2\delta_{\max} \sim \frac{\lambda^2 E}{J_s H_c},$$

или более точных параметров, согласно работам [9]:

$$Q_{\max}^{-1} = \frac{\delta_{\max}}{\pi} = \frac{0,34K\lambda E}{\pi \sigma_i},$$

где  $\Psi_{\max}$  – удельная энергия затухания;  
 $K$  – коэффициент формы петли гистерезиса;  
 $Q_{\max}^{-1}$  – обратная добротность;  
 $\lambda$  – магнитострикция;  
 $E$  – модуль Юнга;  
 $J_s$  – намагниченности насыщения;  
 $H_c$  – коэрцитивной силы и имеет следующую зависимость;  
 $\sigma_i$  – внутренние напряжения.

Проведенный рентгеноструктурный анализ показал, что при увеличении температуры отжига для сплава Fe–0,1 % V происходит уменьшение ширины кристаллической решетки, что говорит об уменьшении ее искаженности. Для сплава Fe–4 % V рентгеноструктур-

ный анализ не показал существенных изменений с учетом ошибки эксперимента.

Исходя из проведенных исследований, в сплаве с малым содержанием 0,1 % ванадия увеличение температуры отжига привело к увеличению демпфирующих свойств в результате влияния отжига на искаженность кристаллической решетки, величину зерна и магнитные свойства – магнитострикцию. В сплаве с большим содержанием ванадия 4 % увеличение температуры отжига привело к незначительному снижению демпфирующих свойств, что было вызвано малым уменьшением магнитострикции в сплаве.

## ВЫВОДЫ

При увеличении температуры отжига в сплавах Fe–0,1 % V происходит увеличение максимума логарифмического декремента; для сплавов Fe–4 % V происходит уменьшение демпфирующих свойств.

При увеличении температуры отжига в сплавах Fe–0,1 % V происходит увеличение магнитострикции и уменьшение степени искаженности кристаллической решетки, что положительно сказывается на демпфирующих свойствах сплава.

В сплаве Fe–4 % V незначительное снижение магнитострикции и увеличение искаженности кристаллической решетки приводит к уменьшению демпфирующих свойств в сплаве.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изучение динамики доменной структуры при деформировании и магнитоупругого затухания колебаний в монокристаллах сплава Fe–3%Si / И.Б. Кекало [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 1970. – Т. 30. – № 3. – С. 566–576.
2. Удовенко, В.А. Тонкая кристаллическая и магнитная структура высокодемпфирующих сплавов на основе системы Fe–Cr [Текст] / В.А. Удовенко, И.Б. Чудаков, Н.А. Полякова // Физика металлов и металловедение. – 1993. – Т. 45. – № 3. – С. 48–55.
3. Высокодемпфирующие сплавы и стали на основе Fe–Al : структура, свойства и особенности применения [Текст] / И.Б. Чудаков [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – № 5. – С. 33–37.
4. Писаренко, Г.С. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов [Текст] : Справочник / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – Киев : Наукова думка, 1971. – 375 с.
5. Амплитудно-зависимое внутреннее трение твердых материалов и комплексные характеристики физико-механических свойств, учитывающие демпфирование : учеб. пособие / А.И. Скворцов. – Киров : ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2013. – 39 с.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА НА ДЕМПФИРУЮЩИЕ, МАГНИТНЫЕ  
СВОЙСТВА И СТРУКТУРЫ СПЛАВОВ Fe-V

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

7. Михайлов, С.Б. Влияние термической обработки на формирование магнитоупругого демпфирования высокохромистых ферритных сталей [Текст] / С.Б. Михайлов, Н.А. Михайлова // XV Конференция по вопросам рассеяния энергии при колебаниях механических систем : тез. докл. – Киев : ИПП, 1989. – С. 86.

8. Smith, G.W. Internal stress distribution theory of magnetomechanical effects / G.W. Smith, J.R. Birchak // *Journal of Applied Physics*. – Vol. 41. – № 3. – 1970. – P. 1412.

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

10. Постников, В.С. Внутреннее трение в металлах [Текст]. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.С. Постников. – Москва : *Металлургия*, 1974. – 351 с.

**Мельчаков Михаил Александрович**,  
к.т.н., доцент кафедры «Материаловедения и основ конструирования» ФГБОУ ВО «ВятГУ»,  
г. Киров. E-mail: melchakov@vyatsu.ru.

**Лисовский Виталий Алексеевич**,  
к.т.н., декан факультета технологий, инжиниринга и дизайна ФГБОУ ВО «ВятГУ»,  
г. Киров. E-mail: lisvitalex@yandex.ru.