



МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 539.4

В.О. ОСТРИКОВ, магистр техн. наук

аспирант кафедры «Технология машиностроения, автоматизация и робототехника»¹

E-mail: jobkcc21@gmail.com

О.М. ОСТРИКОВ, д-р техн. наук, канд. физ.-мат. наук, доц.

заведующий кафедрой «Графика»²

E-mail: omostrikov@mail.ru

¹Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, г. Гомель, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 20.05.2025.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СТАТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА С ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ ФЕРРОМАГНИТНЫМ АУСТЕНИТНЫМ КРИСТАЛЛОМ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ С ЕДИНИЧНОЙ МАРТЕНСИТНОЙ ПРОСЛОЙКОЙ

Рассмотрено поведение выступающего в роли исполнительного элемента ферромагнитного кристалла с эффектом памяти формы в электромагнитном приводе. Описана конструкция электромагнитного измерительного преобразователя с исполнительным элементом ферромагнитным кристаллом с памятью формы. Показана конструктивная особенность, заключающаяся в комбинировании магнитных и немагнитных компонентов для лучшего прохождения магнитного поля через рабочий элемент. Изучено влияние магнитного поля на возникновение сдвиговых сил на границах раздела аустенит/мартенсит, приводящих к деформации находящегося в жесткой заделке ферромагнитного кристалла с эффектом памяти формы. Целью решения статической задачи явилось нахождение силы, создаваемой образцом в результате действия магнитного поля и приводящей в движение штоков посредством изменения линейных размеров исполнительного элемента. В ходе решения статической задачи составлены системы равновесия сил и моментов для мартенситной прослойки, первого и второго аустенитного объема. Установлено, что задача статически неопределима из-за несовпадения числа неизвестных величин с числом уравнений. Для решения данной проблемы было принято допущение, в котором представлено равенство и параллельность сил, возникающих на границах раздела аустенит/мартенсит в результате действия магнитного поля. Использование известных параметров кристаллической решетки позволило рассчитать угол поворота мартенситной прослойки относительно поверхности кристалла, а также угол поворота границ раздела аустенит/мартенсит и высоту мартенситной прослойки. Принимая за известные значения сил, возникающих на границах раздела аустенит/мартенсит и параллельных приложенному магнитному полю, было определено, что данные силы равны компенсационным силам, обеспечивающим статическое равновесие, и величине силы, возникающей на торце образца, имеющем прямое соединение со штоком. Найдена зависимость между силами, возникающими в результате действия магнитного поля на границах раздела аустенит/мартенсит, и сдвиговыми силами, направленными параллельно границам раздела аустенит/мартенсит.

Ключевые слова: электромагнитный привод, ферромагнитный кристалл с памятью формы, мартенситная прослойка, граница раздела

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2026-2-75-80-86>

Введение. Эффект памяти формы в ферромагнитных кристаллах состава Гейслера впервые был обнаружен К. Уллакко в Массачусетском технологическом институте в 1996 году [1]. Материалы данного класса, деформирующиеся под действием магнитного поля, обладают относительно высокими деформационными свойствами [2, 3]. Исследование ферромагнитных анизотропных твердых тел с памятью формы на основе никеля, марганца и галлия показало проявление больших магнитоиндуцированных деформаций (6 %) [4] в результате действия магнитных полей до 400 кА/м.

Теоретически возможность создания ферромагнитных кристаллов с эффектом памяти формы, деформируемых под действием магнитного поля, предложена в период с 1995 по 1996 год К. Уллакко [1, 5, 6]. Описание результатов экспериментальных исследований в этой области впервые были опубликованы в работе [1]. Данные результаты были получены при магнитоуправляемом переходе аустенита в мартенсит на примере Fe-Ni при криогенных температурах.

Для обратимости деформаций должны быть приложены восстанавливающие механические напряжения или магнитное поле, направленное противоположно приводному полю.

Магнитная активация и изменение размеров под действием нагрузок делают ферромагнитные кристаллы с эффектом запоминания формы интересными в плане практического применения в качестве активного элемента привода из-за уникальных свойств, большой области перемещения и быстрого времени отклика. Данные свойства делают ферромагнитные кристаллы с памятью формы перспективными для применения, например, в структурной перестройке беспилотных летательных аппаратов и резонаторах с регулируемой жидкостью для контроля шума и вибрации [4].

Перспективы практического использования ферромагнитных кристаллов с памятью формы закладывают основу для актуальности разработки методов инженерных расчетов технологических параметров технических систем, использующих данные материалы в качестве рабочего элемента. В работах [7–10] заложена основа применения классических методов механики для решения статических задач для материалов с памятью формы. Полученные результаты позволяют выполнить анализ воздействия на границы раздела аустенит/мартенсит внешних нагрузок и магнитного поля, а также применить полученные значения сдвиговых сил, действующих вдоль границ раздела аустенит/мартенсит [7–10], для расчета параметров уравнения движения межфазной границы [11].

Предлагаемые классические методы механики для решения задач, где выступающий в роли исполнительного элемента электромагнитного привода, комбайна колебательных движений, позиционных датчиков и линейных приводов ферро-

магнитный кристалл с памятью формы находится в различных условиях нагружения, могут быть применены в проектных расчетах. Отсутствие в литературе конкретных примеров применения инженерных расчетов к указанным выше техническим системам еще раз подтверждает актуальность данной работы.

Цель работы — применить ранее не используемые для определения технологических параметров материалов с памятью формы классические методы механики в решении статических задач, а также для анализа воздействия известных из экспериментальных данных величин магнитного поля на механически ненагруженный ферромагнитный кристалл с памятью формы, выступающий в роли исполнительного элемента электромагнитного привода.

Постановка задачи. На рисунке 1 представлен электромагнитный измерительный преоб-

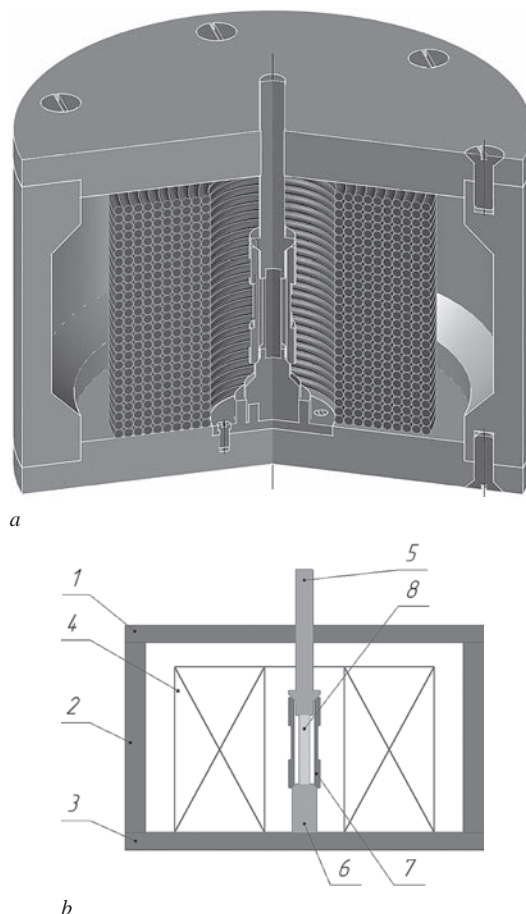


Рисунок 1 — Электромагнитный измерительный преобразователь на основе кристалла Ni-Mn-Ga [11]:

a — трехмерное изображение с вырезом; *b* — схематическое изображение составных частей: 1 — верхняя плита; 2 — корпус цилиндрического преобразователя; 3 — нижняя плита; 4 — соленоид; 5 — шток; 6 — нижняя опора кристалла; 7 — центральная секция, представляющая собой корпус для кристалла; 8 — ферромагнитный кристалл с памятью формы
Figure 1 — Electromagnetic measuring transducer based on Ni-Mn-Ga crystal [11]: *a* — three-dimensional image with a cutout; *b* — schematic representation of the components: 1 — upper plate; 2 — housing of the cylindrical transducer; 3 — lower plate; 4 — solenoid; 5 — rod; 6 — lower crystal support; 7 — central section, which is the housing for the crystal; 8 — ferromagnetic crystal with shape memory

разователь, использующий в качестве рабочего элемента кристалл Ni-Mn-Ga в условиях действующих вдоль оси образца внешнего поля и механической нагрузки. Представленный прибор является модификацией датчика с водным охлаждением, используемого для тестирования терфенола-Д, описанного А. Маллой в работе [12].

Для создания магнитного потока, проходящего через рабочий элемент, необходимо применять магнитные и немагнитные компоненты. Так, детали 1–3 изготовлены из магнитной стали, что обеспечивает прохождение большей части магнитного поля, создаваемого в соленоиде, через корпус преобразователя, снижая попадания его в окружающую среду; деталь 7 изготавливается из немагнитной стали, а детали 5, 6 — из магнитной стали.

Такое сочетание материалов в создании электромагнитного привода позволяет обеспечить прохождение через образец магнитного потока максимальной величины.

На рисунке 2 представлен призматический ферромагнитный кристалл с эффектом памяти формы, находящийся в магнитном поле выступающий в роли рабочего элемента электромагнитного привода. В данном кристалле имеются две аустенитные части длинами l_{a1} и l_{a2} , а также мартенситная прослойка длиной l_m (см. рисунок 2). Магнитное поле \vec{B} , в котором находится образец, оказывает на него такое воздействие, которое вызывает возникновение на границах раздела аус-

тенил/мартенсит сил $\vec{F}_{B(mag)}$ и $\vec{F}_{C(mag)}$. Как было показано в работе [8], в общем случае неоднородного магнитного поля \vec{B} силы, действующие на границах раздела, не параллельны и не равны по величине (т. е. $F_{B(mag)} \neq F_{C(mag)}$).

Решение задачи. Ввиду отсутствия в современной литературе инженерных расчетов технологических параметров технических систем, использующих в качестве рабочего элемента ферромагнитный кристалл с памятью формы, для доказательства правильности проведенного такого расчета в данной работе и подтверждения его достоверности приведем подробное решение поставленной задачи.

Для решения задачи необходимо рассчитать силу \vec{F}_D , действующую на торце образца, демонстрирующую действие магнитного поля на ферромагнитный кристалл с памятью формы, а также моменты сил, возникающие в аустенит-мартенситных частях $\vec{M}_A, \vec{M}_B, \vec{M}_C$. Помимо этого, необходимо определить направление и величину реакции \vec{R}_A (см. рисунок 2).

Решение статической задачи можно рассматривать как частный случай описанной в работе [8] задачи. Для этого составим систему сил и моментов сил, действующих на второй аустенитный объем (см. рисунок 2):

$$\sum_i F_{ix} = F_D \cos \gamma - F_C \cos \omega + F_{C(mag)} \cos \chi = 0; \quad (1)$$

$$\sum_i F_{iy} = -F_D \sin \gamma - F_C \sin \omega + F_{C(mag)} \sin \chi = 0; \quad (2)$$

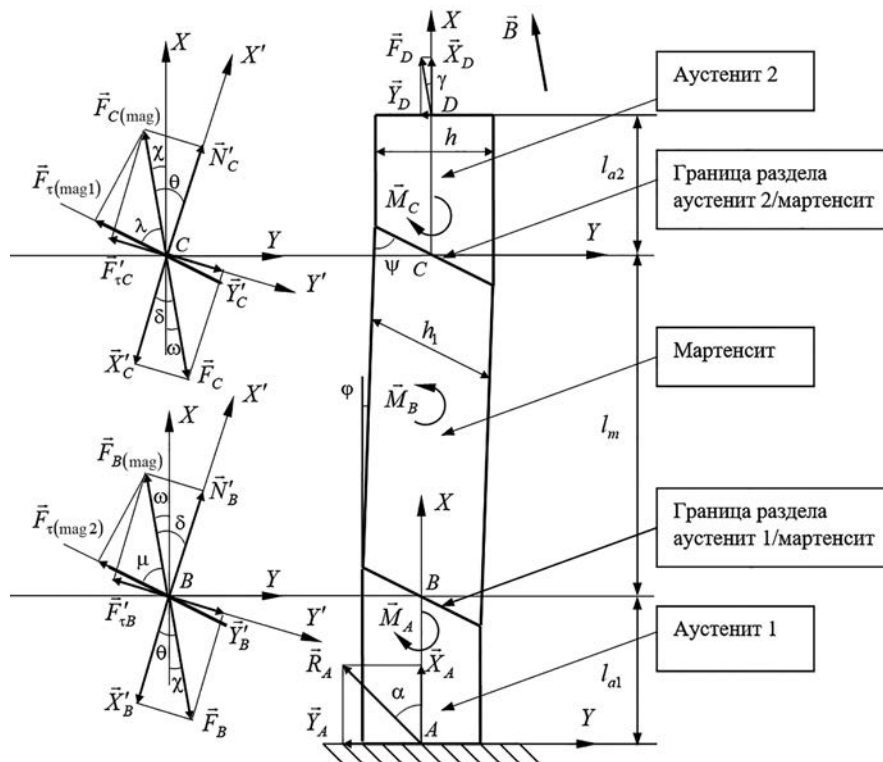


Рисунок 2 — Схематическое изображение выступающего в роли исполнительного элемента ферромагнитного кристалла с памятью формы, совершающего перемещения под действием магнитного поля
 Figure 2 — Schematic representation of the ferromagnetic crystal with shape memory acting as an actuating element that moves under the influence of the magnetic field

$$\sum_i M_C(F_i) = -F_D \sin\gamma + M_C = 0. \quad (3)$$

где выполнены замены:

$$\begin{aligned} N_C &= F_{C(\text{mag})} \cos\chi; \quad F_{\tau C} = F_{C(\text{mag})} \sin\chi; \quad X_C = F_C \cos\omega; \\ Y_C &= F_C \sin\omega; \quad X_D = F_D \cos\gamma; \quad Y_D = F_D \sin\gamma, \end{aligned} \quad (4)$$

где γ , θ и ϑ — углы, показанные на рисунке 2; сила \vec{F}_D уравнивает действие силы $\vec{F}_{C(\text{mag})}$, инициированной магнитным полем; сила \vec{F}_C уравнивает действие силы $\vec{F}_{B(\text{mag})}$, также возникшей при включении магнитного поля; M_C — момент сил (см. рисунок 2). Предполагалось, что $\vec{F}_{B(\text{mag})}$ параллельна \vec{F}_C .

Тогда в условии статического равновесия из (1)–(3) получим:

$$X_D = F_C \cos\omega - F_{C(\text{mag})} \cos\chi; \quad (5)$$

$$Y_D = F_C \sin\omega - F_{C(\text{mag})} \sin\chi; \quad (6)$$

$$M_C = F_D l_{a2} \sin\gamma. \quad (7)$$

Следует учесть, что

$$\vec{F}_D = X_D \vec{i} + Y_D \vec{j}; \quad F_D = \sqrt{X_D^2 + Y_D^2}; \quad \text{tg}\gamma = \frac{Y_D}{X_D}. \quad (8)$$

Рассмотрение равновесия мартенситного объема (см. рисунок 2) приводит к системе уравнений:

$$\sum_i F_{iX'} = F_{C(\text{mag})} \cos\theta - F_C \cos\delta + F_{B(\text{mag})} \cos\delta - F_B \cos\theta = 0; \quad (9)$$

$$\sum_i F_{iY'} = -F_{C(\text{mag})} \sin\theta + F_C \sin\delta - F_{B(\text{mag})} \sin\delta + F_B \sin\theta = 0; \quad (10)$$

$$\sum_i M_B(F_i) = F_{C(\text{mag})} l_m \sin\theta - F_C l_m \sin\delta + M_B - M_C = 0; \quad (11)$$

$$\sum_i M_C(F_i) = -F_{B(\text{mag})} l_m \sin\delta + F_B l_m \sin\theta - M_B + M_C = 0, \quad (12)$$

где произведены замены:

$$N'_C = F_{C(\text{mag})} \cos\theta; \quad F'_{\tau C} = F_{C(\text{mag})} \sin\theta; \quad (13)$$

$$X'_C = F_C \cos\delta; \quad Y'_C = F_C \sin\delta;$$

$$N'_B = F_{B(\text{mag})} \cos\delta; \quad F'_{\tau B} = F_{B(\text{mag})} \sin\delta; \quad (14)$$

$$X'_B = F_B \cos\theta; \quad Y'_B = F_B \sin\theta,$$

где θ и δ — углы, показанные на рисунке 2; \vec{F}_B сила, действующая на границе раздела аустенит/мартенсит и уравнивающая действие силы $\vec{F}_{C(\text{mag})}$ на другой границе мартенситного объема; \vec{F}_C — сила, действующая на границе раздела аустенит/мартенсит и уравнивающая действие силы $\vec{F}_{B(\text{mag})}$ на другой границе мартенситного объема; M_B — момент сил.

Из (11) и (12) получаем:

$$(F_{C(\text{mag})} + F_B) \sin\theta = (F_{B(\text{mag})} + F_C) \sin\delta. \quad (15)$$

Для первого аустенитного объема (см. рисунок 2) получим:

$$\sum_i F_{iX} = F_{B(\text{mag})} \cos\omega - F_B \cos\chi + R_A \cos\alpha = 0; \quad (16)$$

$$\sum_i F_{iY} = -F_{B(\text{mag})} \sin\omega + F_B \sin\chi + R_A \sin\alpha = 0; \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \sum_i M_A(F_i) &= F_{B(\text{mag})} l_{a1} \sin\vartheta - F_B l_{a1} \sin\theta + \\ &+ M_A - M_B + M_C = 0, \end{aligned} \quad (18)$$

где выполнены замены:

$$\begin{aligned} N_B &= F_{B(\text{mag})} \cos\omega; \quad F'_{\tau B} = F_{B(\text{mag})} \sin\omega; \quad X_B = F_B \cos\chi; \\ Y_B &= F_B \sin\chi; \quad X_A = R_A \cos\alpha; \quad Y_A = R_A \sin\alpha. \end{aligned} \quad (19)$$

Отсюда

$$X_A = F_B \cos\chi - F_{B(\text{mag})} \cos\omega; \quad (20)$$

$$Y_A = -F_B \sin\chi + F_{B(\text{mag})} \sin\omega; \quad (21)$$

$$\begin{aligned} M_A &= -F_{B(\text{mag})} l_{a1} \sin\omega + F_B l_{a1} \sin\chi + \\ &+ F_{C(\text{mag})} l_m \sin\chi - F_C l_m \sin\omega, \end{aligned} \quad (22)$$

причем

$$\vec{R}_A = X_A \vec{i} + Y_A \vec{j}; \quad R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2}; \quad \text{tg}\alpha = \frac{Y_A}{X_A}. \quad (23)$$

Результаты и их обсуждение. Зададим высоту аустенитного объема $h = 2$ мм и толщину образца $b = 2$ мм. Используя соотношение параметров кристаллической решетки $c/a = 0,94$, полученное в работе [12], рассчитаем высоту мартенситной прослойки:

$$h_1 = h \frac{a}{c} = 1,88 \text{ мм}. \quad (24)$$

Угол поворота границ раздела аустенит/мартенсит к поверхности кристалла найдем по формуле [12]:

$$\psi = \arctan\left(\frac{c}{a}\right) = 43,23^\circ. \quad (25)$$

Тогда угол поворота мартенситной прослойки относительно поверхности кристалла может быть рассчитан по формуле [12]:

$$\delta = \frac{\pi}{2} - 2\psi = 3,54^\circ. \quad (26)$$

Длина образца принята такой, чтобы внутренние напряжения от нагрузок на торцах образца и внутри него можно было бы считать приблизительно одинаковыми во всех точках.

Примем за известные $\psi = 43,23^\circ$, $\varphi = 3,54^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\chi = 10^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $\delta = 20^\circ$, $\lambda = 43,23^\circ$, $\mu = 43,23^\circ$, $l_a = 1,56$ мм, $l_m = 0,47$ мм. Как отмечено в [12], максимальная деформация образца достигается при величине магнитной напряженности 1,85 Тл. Таким образом, примем силы $F_{C(\text{mag})} = 1,85$ Н и $F_{B(\text{mag})} = 1,85$ Н.

В случае находящегося в жесткой заделке и под действием магнитного поля ферромагнитного кристалла с эффектом памяти формы, выступающего в роли рабочего элемента в электромагнитном приводе, неизвестными являются $F_{\tau(\text{mag}1)}$, $F_{\tau(\text{mag}2)}$, F_D , F_C , F_B , $R_{A(1)}$. Далее выполним расчет численных значений этих сил.

Несовпадение числа неизвестных с числом уравнений говорит о том, что задача является статически неопределимой и для ее решения, как и в работе [8], целесообразно введение допущения:

$$F_{B(\text{mag})} = F_{C(\text{mag})}. \quad (27)$$

Обоснованность данного допущения определяется тем, что длина мартенситной прослойки l_m достаточно мала для того, чтобы в ее области магнитное поле с малой неоднородностью можно было считать однородным [8]. С другой стороны, соотношение (27) можно считать справедливым для заданного однородного магнитного поля.

Тогда из (9), (10) получим:

$$F_B \cos\theta = F_{C(\text{mag})} (\cos\theta + \cos\delta) - F_C \cos\delta; \quad (28)$$

$$F_B \sin\theta = F_{C(\text{mag})} (\sin\theta + \sin\delta) - F_C \sin\delta. \quad (29)$$

Выполним окончательные преобразования в (28) и (29):

$$F_C = F_{C(\text{mag})} \frac{\sin\theta + \sin\delta - \text{tg}\theta(\cos\theta + \cos\delta)}{\sin\delta - \cos\delta \text{tg}\theta}. \quad (30)$$

Подставляя (30) в (5) и (6), получим:

$$X_D = F_{C(\text{mag})} \times \left(\frac{\sin\theta + \sin\delta - \text{tg}\theta(\cos\theta + \cos\delta)}{\sin\theta - \cos\delta \text{tg}\theta} \cos\omega - \cos\chi \right); \quad (31)$$

$$Y_D = F_{C(\text{mag})} \times \left(\frac{\sin\theta + \sin\delta - \text{tg}\theta(\cos\theta + \cos\delta)}{\sin\theta - \cos\delta \text{tg}\theta} \sin\omega - \sin\chi \right). \quad (32)$$

Ввиду параллельности векторов $\vec{F}_{B(\text{mag})}$ и $\vec{F}_{C(\text{mag})}$ в однородном магнитном поле из данных рисунка 2 будем иметь $\omega = \chi$ и $\theta = \delta$. Это позволяет (31) и (32) преобразовать к виду:

$$X_D = F_{C(\text{mag})} \cos\chi; \quad (33)$$

$$Y_D = F_{C(\text{mag})} \sin\chi. \quad (34)$$

Из (9), (10) получим:

$$F_C \cos\delta = F_{B(\text{mag})} (\cos\theta + \cos\delta) - F_B \cos\theta; \quad (35)$$

$$F_C \sin\delta = F_{B(\text{mag})} (\sin\theta + \sin\delta) - F_B \sin\theta. \quad (36)$$

Выполним окончательные преобразования в (35) и (36):

$$F_B = F_{B(\text{mag})} \frac{\sin\theta + \sin\delta - \text{tg}\delta(\cos\theta + \cos\delta)}{\sin\theta - \cos\theta \text{tg}\delta}. \quad (37)$$

Подставляя (37) в (20) и (21), получим:

$$X_A = F_{B(\text{mag})} \times \left(\frac{\sin\theta + \sin\delta - \text{tg}\delta(\cos\theta + \cos\delta)}{\sin\theta - \cos\theta \text{tg}\delta} \cos\chi - \cos\omega \right); \quad (38)$$

$$Y_A = -F_{B(\text{mag})} \times \left(\frac{\sin\theta + \sin\delta - \text{tg}\delta(\cos\theta + \cos\delta)}{\sin\theta - \cos\theta \text{tg}\delta} \sin\chi + \sin\omega \right). \quad (39)$$

Принимая во внимание, что $\omega = \chi$ и $\theta = \delta$, преобразуем (38) и (39):

$$X_A = F_{B(\text{mag})} \cos\omega; \quad (40)$$

$$Y_A = -F_{B(\text{mag})} \sin\chi. \quad (41)$$

Подстановка (33) и (34) в (8) дает:

$$F_D = |F_{C(\text{mag})}|; \quad \gamma = \omega. \quad (42)$$

Подстановка (40) и (41) в (23) дает:

$$R_A = |F_{B(\text{mag})}|; \quad \alpha = \omega. \quad (43)$$

Учитывая (27) и то, что в однородном магнитном поле $\theta = \delta$, из (9) получим, что:

$$2F_{C(\text{mag})} - F_C - F_B = 0, \quad (44)$$

а из (15) —

$$F_B = F_C. \quad (45)$$

Тогда из (44) и (45) следует:

$$F_{C(\text{mag})} = F_C. \quad (46)$$

А из (27), (41), (45) и (46) получаем:

$$F_{B(\text{mag})} = F_{C(\text{mag})} = F_B = F_C = |F_D| = |R_A| = 1,85 \text{ Н}. \quad (47)$$

Как было отмечено в работе [8], компенсационные силы \vec{F}_B и \vec{F}_C обеспечивают статическое равновесие границ раздела в механически ненагруженном ферромагнитном кристалле с памятью формы, находящемся в магнитном поле.

Вдоль границ раздела аустенит/мартенсит действуют силы $\vec{F}_{\tau(\text{mag}1)}$ и $\vec{F}_{\tau(\text{mag}2)}$, величины которых находятся по формулам:

$$F_{\tau(\text{mag}1)} = F_{C(\text{mag})} \cdot \cos\lambda; \quad (48)$$

$$F_{\tau(\text{mag}2)} = F_{B(\text{mag})} \cdot \cos\mu, \quad (49)$$

где λ и μ — углы наклона сил $\vec{F}_{C(\text{mag})}$ и $\vec{F}_{B(\text{mag})}$ к границам раздела аустенит/мартенсит соответственно.

С учетом (47) из (48) и (49) получим:

$$F_{\tau(\text{mag}1)} = F_{\tau(\text{mag}2)} = 1,35 \text{ Н}. \quad (50)$$

В таблице представлена зависимость возникающих на границах раздела аустенит/мартенсит сил $F_{C(\text{mag})}$, $F_{B(\text{mag})}$ и сдвиговых сил $\vec{F}_{\tau(\text{mag}1)}$, $\vec{F}_{\tau(\text{mag}2)}$ от величины магнитного поля.

Максимальная обратимая деформация была получена при 1,85 Тл, а при 3,8 Тл наблюдается блокировка деформации [12].

Таблица — Результаты расчета сил на границах раздела аустенит/мартенсит в зависимости от величины магнитного поля
Table — Calculation results of the forces at the austenite/martensite interfaces depending on the magnitude of the magnetic field

B , Тл	$F_{C(mag)}, F_{B(mag)}$, Н	$F_{\tau(mag1)}, F_{\tau(mag2)}$, Н
0,55	0,55	0,40
1,20	1,20	0,87
1,85	1,85	1,35
2,50	2,50	1,82
3,15	3,15	2,30
3,80	3,80	2,77

Приведенные в таблице результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными [2–6].

В данной работе при решении статической задачи были применены экспериментальные данные о поведении ферромагнитного кристалла с памятью формы, находящегося под действием магнитного поля. Показана возможность использования кристалла с эффектом запоминания формы в роли исполнительного элемента электромагнитного привода. Результаты, полученные в данной работе, дополняют результаты работ [8–10].

Выводы. Таким образом, применяя классические методы механики, а именно метод силового баланса и метод уравнивающих моментов сил, решена статическая задача для предложенной модели механического электромагнитного привода, использующего в роли рабочего элемента ферромагнитный сплав с эффектом памяти формы. Впервые получена зависимость величины сил, действующих вдоль границ раздела аустенит/мартенсит, от величины магнитного поля.

Достоверность полученных результатов основана на использовании в решении поставленных задач классических методов механики деформированного твердого тела, апробированных на широком спектре применяемых на практике конструкционных материалов.

Предлагаемые классические методы механики для решения задач, где выступающий в роли исполнительного элемента электромагнитного привода, комбайна колебательных движений, позиционных датчиков и линейных приводов ферромагнитный кристалл с памятью формы находится в различных условиях нагружения, могут быть применены в проектных расчетах при создании технических

систем нового поколения, физический принцип функционирования которых основан на уникальных физико-механических свойствах материалов с эффектом запоминания формы.

Список литературы

- Ullakko, K. Magnetically controlled shape memory alloys: a new class of actuator materials / K. Ullakko // *Journal of Materials Engineering and Performance*. — 1996. — Vol. 5, iss. 3. — P. 405–409. — DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02649344>.
- Gabdullin, N. Review of properties of magnetic shape memory (MSM) alloys and MSM actuator designs / N. Gabdullin, S.H. Khan // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2015. — Vol. 588. — DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/588/1/012052>.
- MSM actuators: design rules and control strategies / B. Holz, L. Riccardi, H. Janocha, D. Naso // *Advanced Engineering Materials*. — 2012. — Vol. 14, iss. 8. — P. 668–681. — DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.201200045>.
- Giant 5.8% magnetic-field-induced strain in additive manufactured Ni-Mn-Ga magnetic shape memory alloy / V. Laitinen, A. Saren, A. Sozinov, K. Ullakko // *Scripta Materialia*. — 2022. — Vol. 208. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2021.114324>.
- Large magnetic-field-induced strains in Ni₂MnGa single crystals / K. Ullakko, J.K. Huang, C. Kantner [et al.] // *Applied Physics Letters*. — 1996. — Vol. 69, iss. 13. — P. 1966–1968. — DOI: <https://doi.org/10.1063/1.117637>.
- Magnetically controlled shape memory effect in Ni₂MnGa intermetallics / K. Ullakko, J.K. Huang, V.V. Kokorin, R.C. O’Handley // *Scripta Materialia*. — 1997. — Vol. 36, iss. 10. — P. 1133–1138. — DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(96\)00483-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(96)00483-6).
- Остриков, В.О. Статика и динамика границы раздела аустенит/мартенсит в нагруженном призматическом монокристалле с эффектом памяти формы, находящемся в жесткой заделке / В.О. Остриков, О.М. Остриков // *Машиностроение: републ. межвед. сб. науч. тр. / БНТУ; редкол.: В.К. Шелег (гл. ред.) [и др.]*. — Мн., 2021. — Вып. 33. — С. 139–147.
- Остриков, В.О. Статическая и динамическая задача для единичной мартенситной прослойки в ферромагнитном монокристалле с эффектом памяти формы, находящемся в магнитном поле в жесткой заделке / В.О. Остриков, О.М. Остриков // *Проблемы физики, математики и техники*. — 2023. — № 1(54). — С. 43–46. — DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_1_54_43.
- Василевич, Ю.В. Статика и динамика границ раздела аустенит / мартенсит мартенситной прослойки в нагруженном призматическом ферромагнитном монокристалле с эффектом памяти формы, находящемся в жесткой заделке / Ю.В. Василевич, В.О. Остриков, О.М. Остриков // *Машиностроение: републ. межвед. сб. науч. тр. / БНТУ; редкол.: В.К. Шелег (гл. ред.) [и др.]*. — Мн., 2023. — Вып. 34. — С. 139–146.
- Остриков, В.О. Расчет сил, действующих на непараллельных границах раздела аустенит/мартенсит в ферромагнитном монокристалле с памятью формы, находящемся в жесткой заделке / В.О. Остриков, О.М. Остриков // *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. Естественные науки*. — 2024. — № 3(144). — С. 116–121.
- Saren, A. Dynamic twinning stress and viscous-like damping of twin boundary motion in magnetic shape memory alloy Ni-Mn-Ga / A. Saren, K. Ullakko // *Scripta Materialia*. — 2017. — Vol. 139. — P. 126–129. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.06.010>.
- Malla, A. Effect of composition on the magnetic and elastic properties of shape memory Ni-Mn-Ga: diss. ... for the degree of Master of Science / Malla Aayush; Ohio State University. — Ohio, 2003. — 191 p.

OSTRIKOV Vladislav O., M. Sc. in Eng.

Ph. D. Student of the Department “Mechanical Engineering Technology, Automation and Robotics”
E-mail: jobkkc21@gmail.com

OSTRIKOV Oleg M., D. Sc. in Eng., Ph. D. in Phys. and Math., Assoc. Prof.

Head of the Department “Graphics”
E-mail: omostrikov@mail.ru

¹Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Republic of Belarus

²Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

METHOD FOR CALCULATING STATIC TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF AN ELECTROMAGNETIC DRIVE WITH A FERROMAGNETIC AUSTENITIC SHAPE-MEMORY CRYSTAL ACTUATOR WITH A SINGLE MARTENSITIC INTERLAYER

The behavior of a ferromagnetic crystal acting as an actuating element with a shape memory effect in an electromagnetic drive is considered. The design of an electromagnetic measuring transducer with the shape-memory ferromagnetic crystal actuating element is described. A design feature is shown, which consists in combining magnetic and non-magnetic components for better passage of the magnetic field through the working element. The effect of a magnetic field on the occurrence of shear forces at the austenite/martensite interfaces has been studied, which lead to deformation of a ferromagnetic crystal with a shape memory effect in a rigid enclosure. The purpose of solving the static problem was to find the force created by the sample as a result of the action of the magnetic field and driving the rod by changing the linear dimensions of the actuator. In the course of solving the static problem, systems of equilibrium of forces and moments for the martensitic layer, the first and second austenitic volumes are compiled. It is established that the problem is statically indefinable due to the discrepancy between the number of unknown quantities and the number of equations. To solve this problem, an assumption was made that represents the equality and parallelism of forces arising at the austenite/martensite interfaces as a result of the action of the magnetic field. Using the known parameters of the crystal lattice, it was possible to calculate the angle of rotation of the martensitic interlayer relative to the crystal surface, as well as the angle of rotation of the austenite/martensite interfaces and the height of the martensitic interlayer. Taking the known values of the forces occurring at the austenite/martensite interfaces and parallel to the applied magnetic field, it was determined that these forces are equal to the compensating forces providing static equilibrium and the magnitude of the force occurring at the end of the sample having a direct connection to the rod. A relationship has been found between the forces resulting from the action of the magnetic field at the austenite/martensite interfaces and shear forces directed parallel to the austenite/martensite interfaces.

Keywords: electromagnetic drive, ferromagnetic crystal with shape memory, martensitic interlayer, interface

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2026-2-75-80-86>

References

- Ullakko K. Magnetically controlled shape memory alloys: a new class of actuator materials. *Journal of materials engineering and performance*, 1996, vol. 5, iss. 3, pp. 405–409. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02649344>.
- Gabdullin N., Khan S.H. Review of properties of magnetic shape memory (MSM) alloys and MSM actuator designs. *Journal of physics: conference series*, 2015, vol. 588. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/588/1/012052>.
- Holz B., Riccardi L., Janocha H., Naso D. MSM actuators: design rules and control strategies. *Advanced engineering materials*, 2012, vol. 14, iss. 8, pp. 668–681. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.201200045>.
- Laitinen V., Saren A., Sozinov A., Ullakko K. Giant 5.8% magnetic-field-induced strain in additive manufactured Ni-Mn-Ga magnetic shape memory alloy. *Scripta materialia*, 2022, vol. 208. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2021.114324>.
- Ullakko K., et al. Large magnetic-field-induced strains in Ni₂MnGa single crystals. *Applied physics letters*, 1996, vol. 69, iss. 13, pp. 1966–1968. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.117637>.
- Ullakko K., Huang J.K., Kokorin V.V., O'Handley R.C. Magnetically controlled shape memory effect in Ni₂MnGa intermetallics. *Scripta materialia*, 1997, vol. 36, iss. 10, pp. 1133–1138. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(96\)00483-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(96)00483-6).
- Ostrikov V.O., Ostrikov O.M. Statika i dinamika granitsy razdela austenit/martensit v nagruzhennom prizmaticheskom monokristalle s efektom pamyati formy, nakhodyashchemsya v zhestkoy zadelke [Statics and dynamics of the austenite/martensite interface in a loaded prismatic single crystal with a shape memory effect located in a rigid seal]. *Mashinostroenie*, 2021, iss. 33, pp. 139–147 (in Russ.).
- Ostrikov V.O., Ostrikov O.M. Statische i dinamicheskiye zadacha dlya edinichnoy martensitnoy prosloyki v ferromagnitnom monokristalle s efektom pamyati formy, nakhodyashchemsya v zhestkoy zadelke [A static and dynamic problem for a single martensitic layer in a ferromagnetic single crystal with a shape memory effect in a magnetic field in a rigid embodiment]. *Problems of physics, mathematics and technics*, 2023, no. 1(54), pp. 43–46. DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_1_54_43 (in Russ.).
- Vasilevich Yu.V., Ostrikov V.O., Ostrikov O.M. Statika i dinamika granits razdela austenit / martensit martensitnoy prosloyki v nagruzhennom prizmaticheskom ferromagnitnom monokristalle s efektom pamyati formy, nakhodyashchemsya v zhestkoy zadelke [Statics and dynamics of the austenite / martensite interface of a martensitic interlayer in a loaded prismatic ferromagnetic single crystal with a shape memory effect located in a rigid seal]. *Mashinostroenie*, 2023, iss. 34, pp. 139–146 (in Russ.).
- Ostrikov V.O., Ostrikov O.M. Raschet sil, deystviyushchikh na neparallelnykh granitsakh razdela austenite/martensit v ferromagnitnom monokristalle s pamyatyu formy, nakhodyashchemsya v zhestkoy zadelke [Calculation of forces acting at non-parallel austenite/martensite interfaces in a ferromagnetic single crystal with shape memory located in a rigid embedding]. *Proceedings of Francisk Skorina Gomel State University. Humanities*, 2024, no. 3(144), pp. 116–121 (in Russ.).
- Saren A., Ullakko K. Dynamic twinning stress and viscous-like damping of twin boundary motion in magnetic shape memory alloy Ni-Mn-Ga. *Scripta materialia*, 2017, vol. 139, pp. 126–129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.06.010>.
- Malla A. *Effect of composition on the magnetic and elastic properties of shape memory Ni-Mn-Ga*. Master's Thesis. Ohio, 2003. 191 p.