

УДК 539.372:669.018.2
EDN ZSWQBT (<https://elibrary.ru/zswqbt>)
DOI 10.33113/mkmk.ras.2024.30.04.08



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОБРАТИМОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА РАБОТУ ВИБРОЗАЩИТНОГО УСТРОЙСТВА С РАБОЧИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ*

Беляев Ф.С.^{1,2}, Волков А.Е.¹, Сисюк А.А.¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия

²Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

В работе исследовалась необходимость учета необратимой деформации при моделировании работы виброзащитных устройств с рабочими элементами из сплавов с памятью формы. Для описания механического поведения этих сплавов применялась микроструктурная модель, способная описывать их основные функциональные свойства. Ее использование позволило проводить расчеты как с учетом необратимой микропластической деформации, сопровождающей мартенситные превращения, так и без ее учета. В качестве модельного устройства рассматривалась одномерная колебательная система с двумя геликоидальными пружинами из никелида титана, изолирующими полезную массу от внешних воздействий. Расчеты показали, что учет микропластической деформации приводит к снижению резонансной частоты колебаний, причем этот эффект усиливается с ростом амплитуды внешнего воздействия и не зависит от фазового состава материала. В дальнейших исследованиях сравнивалось поведение устройства для случаев учета микропластической деформации и без нее, при соответствующих им частотах резонанса. Показано, что микропластическая деформация приводит к качественному изменению формы деформационных петель при колебаниях, вызывая уменьшение максимальных напряжений и деформаций, что положительно сказывается на виброзащитных свойствах устройства. Также наблюдается снижение эффективной жесткости устройства. С ростом амплитуды возмущающего воздействия увеличивается разница между амплитудами деформаций в рассматриваемых случаях. Особенно сильно это проявляется для мартенситного и двухфазного состояний. Лишь при малых амплитудах воздействия разница между исследуемыми случаями незначительна вследствие того, что им соответствуют упругие колебания или колебания с незначительными фазовыми превращениями, не вызывающими сильного развития микропластической деформации. В результате было показано, что механизм микропластической деформации качественно улучшает работу виброзащитного устройства и его учет необходим для получения адекватных результатов при расчетах.

Ключевые слова: сплавы с памятью формы; моделирование; виброзащита; TiNi; колебания; микроструктурная модель

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF IRREVERSIBLE DEFORMATION ON THE OPERATION OF A VIBRATION PROTECTION DEVICE WITH SHAPE MEMORY ALLOYS WORKING ELEMENTS

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 23-21-00167.

Belyaev F.S.^{1,2}, Volkov A.E.¹, Sisiuk A.A.¹

¹*Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia*

²*Institute for Problems of Mechanical Engineering RAS, Saint-Petersburg, Russia*

ABSTRACT

The necessity of taking into account irreversible deformation in modeling of the operation of vibration protection devices with shape memory alloys working elements is investigated in this study. To describe the mechanical behavior of these alloys, a microstructural model was used that is capable of describing their main functional properties. Its use made it possible to perform calculations both with and without taking into account irreversible microplastic deformation accompanying martensitic transformations. A one-dimensional oscillatory system with two helicoidal springs made of titanium nickelide isolating the payload mass from external excitations was considered as a model device. The calculations showed that taking into account microplastic deformation leads to a decrease in the resonant frequency of oscillations, and this effect increases with an increase in the amplitude of the external excitations and does not depend on the phase composition of the material. In further studies, the behavior of the device was compared for cases of taking into account microplastic deformation and without it, at the corresponding resonance frequencies. It is shown that microplastic deformation leads to a qualitative change in the shape of deformation loops during vibrations, causing a decrease in maximum stresses and strains, which has a positive effect on the vibration protection properties of the device. A decrease in the effective rigidity of the device is also observed. With an increase in the excitation's amplitude, the difference between the deformation amplitudes in the cases under consideration increases. This is especially pronounced for the martensitic and two-phase states. The difference between the studied cases is insignificant only at small amplitudes of excitation due to the fact that they correspond to elastic vibrations or vibrations with slight phase transformations that do not cause significant development of microplastic deformation. As a result, it was shown that the mechanism of microplastic deformation qualitatively improves the operation of the vibration protection device and its consideration is necessary to obtain adequate results in calculations.

Keywords: shape memory alloys; modeling; vibration protection; TiNi; vibrations; microstructural model

ВВЕДЕНИЕ

Сплавы с памятью формы (СПФ) – класс функциональных материалов, применяемый на практике для решения многих инженерных задач. Благодаря уникальным свойствам, таким как эффект памяти формы и псевдоупругость (способность восстанавливать значительную неупругую деформацию при нагреве или разгрузке, соответственно), псевдопластичность (накопление неупругой деформации за счет переориентации мартенсита) и др., СПФ позволяют создавать механические устройства, значительно превосходящие их традиционные аналоги.

В настоящее время широкое применение нашли специальные устройства – демпферы и изоляторы – как для защиты новых гражданских сооружений, так и для модернизации существующих [1]. Однако обычные пассивные элементы обладают рядом недостатков и ограничений, связанных, например, со старением и соответствующими проблемами с долговечностью для изоляторов на основе резины. Для фрикционных устройств это необходимость технического обслуживания и вопросы надежности в долгосрочной перспективе. Для большинства типов демпферов необходима замена после сильных землетрясений либо восстановление геометрии. Внедрение в изоляционные

и демпфирующие системы сплавов с памятью формы позволяет решить эти проблемы [2-11].

Одним из важных преимуществ СПФ в подобных приложениях является высокая демпфирующая способность, позволяющая эффективно поглощать энергию внешнего возмущения и гасить вибрации как в высокотемпературном аустенитном, так и в низкотемпературном мартенситном состоянии. При достаточной деформации аустенита происходит прямое мартенситное превращение, для которого требуется энергия на совершение работы по перестройке кристаллической решетки. Для сплавов на основе TiNi подробно этот эффект был исследован в работе [12]. В мартенситном состоянии диссипация энергии происходит при переориентации мартенсита.

В большинстве первых разработок виброизолирующих устройств использовались проволочные рабочие элементы из СПФ. Устройства виброзащиты с проволочными элементами из СПФ потенциально могут применяться в распорках и основаниях колонн в качестве гистерезисного демпфера для строительных конструкций. Проведенные эксперименты по пульсирующему растягивающему нагружению с различными амплитудами показали, что такие устройства имеют высокую усталостную прочность и эффективно диссипируют энергию, а приращение остаточной деформации и уменьшение рассеиваемой энергии замедляются с увеличением количества циклов нагружения [13]. Позднее были изучены и другие конфигурации. Например, в работе [14] было предложено использовать в качестве демпфера кольцо из никелида титана. Эксперименты показали, что такое устройство может обладать высокой способностью к перегрузке и потенциально применимо в качестве пассивного виброизолятора в различных отраслях промышленности.

Возможность контроля фазового состояния рабочего элемента из СПФ, а значит и его механических свойств, путем изменения температуры оказывается очень важной при необходимости корректировки работы устройства виброзащиты. Например, при защите конструкций от вибраций с помощью инерционного демпфера существует проблема изменения собственной частоты конструкции, например, при загруженности здания или неравномерном движении транспорта по мосту. В результате демпфер может потерять свою эффективность. В работе [15] было проведено исследование, подтверждающее возможность настройки инерционного демпфера с применением элементов из СПФ. При виброизоляции стальной рамы удалось увеличить жесткость изоляционного устройства и уменьшить эквивалентный коэффициент демпфирования повышением температуры от -40°C до $+65^{\circ}\text{C}$, тем самым настроив демпфер под три типа модельных землетрясений.

При циклических нагрузках, характерных для устройств виброзащиты, важна высокая усталостная прочность материала при больших деформациях. СПФ обладают высокой усталостной прочностью за счет того, что основным механизмом неупругой деформации является не дислокационное скольжение, а обратимое движение межфазных (в аустенитном состоянии) или междоменных (в мартенситном состоянии) границ.

Поскольку СПФ характеризуются нелинейной диаграммой деформирования, а также зависимостью характеристик от температуры, то для успешного конструирования устройств виброзащиты на их основе требуются надежные средства моделирования механического поведения рабочих элементов. В работах [16,17] проводилось моделирование виброзащитных устройств

с геликоидальными и прорезными пружинами из сплава TiNi. Для описания механического поведения рабочих элементов применялась микроструктурная модель [18], способная описывать все основные эффекты СПФ. Благодаря высокой предсказательной силе данной модели удалось получить хорошую оценку работы виброзащитных устройств при различных фазовых состояниях рабочих элементов.

Одной из главных проблем при использовании СПФ является нестабильность их свойств. Поскольку мартенситные превращения представляют собой трансформацию кристаллической решетки, то есть искажение исходной структуры, рост кристалла новой фазы в аустенитной матрице сопровождается появлением межфазных напряжений. Это приводит к накоплению вблизи растущих мартенситных кристаллов необратимой микропластической деформацией. С одной стороны, такая деформация вызывает необратимое формоизменение и порождение деформационных дефектов, которые ускоряют усталостное разрушение. Кроме того, изменения могут затрагивать кинетику последующих мартенситных превращений и функциональные свойства материала. Особенно сильно это проявляется при циклических термосиловых воздействиях. С другой стороны, поскольку для образования дефектов требуется энергия, то микропластическая деформация является дополнительным механизмом демпфирования, что обеспечивает очередное преимущество СПФ в системах гашения вибраций.

Таким образом, влияние микропластической деформации на виброзащитные свойства СПФ неоднозначно. В теоретических работах [16,17] при описании виброзащитных систем считалось, что микропластическая деформация вносит незначительный вклад в общую деформацию и не учитывалась. Однако неясно какое именно влияние она оказывает на демпфирующие свойства СПФ и можно ли ею пренебрегать при расчетах. Целью данной работы является исследование влияния микропластической деформации на эффективность работы виброзащитных устройств.

1. МИКРОСТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ

Для описания механического поведения СПФ в настоящей работе использовалась разработанная ранее авторами микроструктурная модель [19]. Представительный объем, рассматриваемый в ее рамках, соответствует материальной точке материала. Микроструктурная модель подразумевает наличие нескольких структурных уровней, которые для лучшего описания поведения сплава должны отражать реальную микроструктуру материала. В предложенной модели считается, что представительный объем состоит из зерен с различной ориентацией кристаллографических осей, которые, в свою очередь, состоят из объемов занятых аустенитом и/или ориентационными вариантами мартенсита.

Согласно гипотезе Рейсса, деформация представительного объема вычисляется путем ориентационного усреднения деформаций составляющих его зерен

$$\varepsilon = \sum_{\omega} f(\omega) \varepsilon^{gr}(\omega), \quad (1)$$

где ω – ориентация кристаллографических осей, $f(\omega)$ – объемная доля зерен с ориентацией ω , а $\varepsilon^{gr}(\omega)$ – деформация этих зерен. Деформация зерна может быть представлена как сумма вкладов отдельных деформационных механизмов

$$\varepsilon^{gr} = \varepsilon^E + \varepsilon^T + \varepsilon^{Ph} + \varepsilon^{MP}, \quad (2)$$

где ε^E – упругая деформация, определяемая законом Гука, ε^T – температурная деформация, обусловленная тепловым расширением, ε^{Ph} – фазовая деформация, ε^{MP} – микропластическая деформация.

Для описания фазовой деформации в модели введены внутренние переменные Φ_n , такие, что $\frac{\Phi_n}{N}$ – объемная доля n -ого варианта мартенсита,

где N – количество возможных вариантов мартенсита. При этом фазовая деформация зерна ε^{Ph} вычисляется путем усреднения по всем вариантам мартенсита

$$\varepsilon^{Ph} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Phi_n D^n, \quad (3)$$

где D^n – тензор деформации Бейна для n -ого варианта мартенсита.

Условие мартенситного превращения имеет вид

$$F_n = \pm F^{fr}, \quad (4)$$

где F_n – обобщенная термодинамическая сила, вызывающая рост n -го варианта мартенсита, F^{fr} – диссипативная сила, препятствующая движению межфазных границ и отвечающая за наличие температурно-фазового гистерезиса, знак «+» соответствует прямому превращению, а «-» – обратному.

Растущий мартенситный кристалл, ввиду несовместности его деформации с аустенитной матрицей, создает внутренние напряжения, вызывающие микропластическую деформацию. При расчете этой микропластической деформации главное предположение состоит в том, что микропластическая деформация, порожденная ростом определенного варианта мартенсита, пропорциональна девиатору бейновской деформации этого варианта

$$\varepsilon^{MP} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \kappa \varepsilon_n^{mp} dev(D^n), \quad (5)$$

где ε_n^{mp} – мера микропластической деформации, связанной с ростом n -ого варианта мартенсита, κ – масштабный коэффициент.

Условия начала микропластического течения аналогичны условию пластического течения в одномерном случае с учетом трансляционного и изотропного упрочнений, где роль напряжения играет обобщенная термодинамическая сила F_n^p , а кинематическому и изотропному упрочнению соответствуют термодинамические силы F^y и F_n^p

$$|F_n^p - F_n^p| = F^y, \quad (F_n^p - F_n^p) dF_n^p > 0, \quad (6)$$

Обобщенная термодинамическая сила, вызывающая микропластическую деформацию, вычисляется следующим образом

$$F_n^p = \mu \sum_{m=1}^N A_{nm} (\Phi_m - b_m), \quad (7)$$

где b_m – плотность ориентированных дефектов, A – матрица, определяющая взаимодействие вариантов мартенсита подробно описанная в работе [20], а коэффициент μ вычисляется следующим образом

$$\mu = -\frac{q_0(M_s - M_f)}{T_0(1 - 2\alpha)}, \quad (8)$$

$$T_0 = \frac{M_s + A_f}{2}, \quad (9)$$

где q_0 – скрытая теплота превращения, M_s и M_f – температуры начала и конца прямого мартенситного превращения, A_f – температура конца обратного превращения, T_0 – температура термодинамического равновесия фаз (аустенита и мартенсита), α – материальная постоянная.

Деформационные дефекты, возникающие в результате микропластического течения, можно разделить на две группы: ориентированные дефекты, которые создают дальнедействующие поля напряжений, и рассеянные дефекты. Для вычисления плотностей ориентированных дефектов b_n и рассеянных дефектов f предложены следующие эволюционные уравнения

$$\dot{b}_n = \dot{\varepsilon}_n^{mp} - \frac{1}{\beta^*} |b_n| \dot{\varepsilon}_n^{mp} H(b_n \dot{\varepsilon}_n^{mp}), \quad (10)$$

$$\dot{f} = \sum_{m=1}^N |\dot{\varepsilon}_m^{mp}| + r_1 (f - f_0) \Phi^{sr} H(-\Phi^{sr}), \quad (11)$$

где H – функция Хевисайда, β^* – максимальная плотность ориентированных дефектов, r_1 – коэффициент восстановления рассеянных дефектов, f_0 – равновесное значение рассеянных дефектов.

Для получения замкнутой системы уравнений, позволяющей вычислить все внутренние переменные, необходимо ввести законы упрочнения. В модели считается, что рассеянные дефекты препятствуют движению дислокаций и тем самым создают изотропное упрочнение, а скопления ориентированных дефектов, порождая поля внутренних напряжений, создают трансляционное упрочнение. Для связи упрочнений с плотностями дефектов предлагаются линейные зависимости

$$F_n^p = a_p b_n, \quad (12)$$

$$F^y = a_y f, \quad (13)$$

где a_p и a_y – трансляционный и изотропный коэффициенты упрочнения соответственно.

2. МОДЕЛЬ ВИБРОЗАЩИТНОГО УСТРОЙСТВА

В работе исследуется поведение одномерной колебательной системы, в которой полезная масса изолируется от внешних вибрационных воздействий двумя геликоидальными пружинами из СПФ. Принципиальная схема устройства изображена на рис.1, основные параметры системы приведены в Таблице 1. Система подвергается гармоническому внешнему воздействию с заданной частотой и амплитудой. В качестве материала пружин выбран эквиатомный сплав

TiNi, который в модели задается соответствующим набором материальных постоянных, представленных в Таблице 2. Фазовое состояние сплава в начале эксперимента задается выбором начальной температуры.

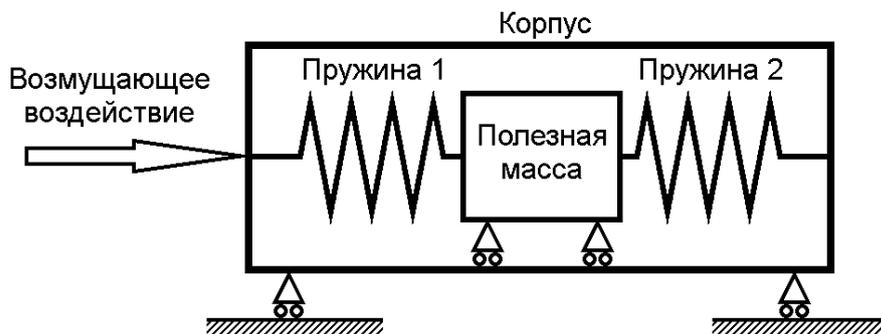


Рис.1. Схема виброзащитного устройства.

Таблица 1.

Параметр модели	Значение
Диаметр проволоки	0,5 мм
Диаметр витка	8,0 мм
Количество витков	5
Масса груза	0,22 кг

Таблица 2.

Материальная постоянная	Обозначение	Значение
Число вариантов мартенсита	N	12
Скрытая теплота превращения	q_0	-180 МДж/м ³
Характеристические температуры	M_f	303 К
	M_s	323 К
	A_s	340 К
	A_f	360 К
Температура термодинамического равновесия	T_0	341.5 К
Коэффициент взаимодействия вариантов мартенсита	α	0.2
Масштабирующий коэффициент микропластической деформации	κ	2.3
Коэффициент изотропного упрочнения	a_y	0.107 МПа
Коэффициент трансляционного упрочнения	a_ρ	4 МПа
Максимальная плотность ориентированных дефектов	β^*	2.8
Начальная плотность рассеянных дефектов	f_0	37.38
Коэффициент восстановления рассеянных дефектов	r_1	0

Движение груза описывается уравнением

$$m\ddot{x} = -F_1 + F_2 - \mu\dot{x}, \quad (14)$$

где F_1 и F_2 – силы упругости, возникающие в пружинах, а μ – коэффициент сопротивления (вязкого трения). В предположении, что проволока испытывает только кручение, а распределение напряжений линейно, получаем

$$F_1 = k_1\tau_1, \quad F_2 = k_2\tau_2, \quad (15)$$

$$k_1 = \frac{\pi d_1^3}{8D_1}, \quad k_2 = \frac{\pi d_2^3}{8D_2}, \quad (16)$$

где τ_1, τ_2 – касательные напряжения материала, k_1, k_2 – жесткости пружин, D_1, D_2 – диаметры их витков, а d_1, d_2 – диаметры проволоки. В рамках принятой микроструктурной модели данное дифференциальное уравнение решается численно с помощью улучшенного метода Эйлера.

Использование для расчетов микроструктурной модели дает возможность учитывать или не учитывать определенные деформационные механизмы, в частности можно проводить расчеты с учетом микропластической деформации и без ее учета. Это позволит сделать выводы о влиянии необратимой деформации на работу устройства и необходимости ее учета. Расчеты проводились для аустенитного, мартенситного и смешанного (с объемной долей мартенсита 50%) начальных фазовых состояний. Сравнение поведения материала с учетом микропластической деформации и без учета производилось при фиксированных амплитудах внешнего воздействия при частотах, соответствующих резонансу в каждом случае.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Наибольший интерес при исследовании колебательной системы представляет ее поведение при резонансной частоте, как наиболее сложный режим работы. Из-за сложности и нелинейности деформационных свойств СПФ найти резонансную частоту аналитически не представляется возможным. Поэтому она определялась численно, для чего проводилась серия экспериментов с различными частотами и была найдена та, при которой амплитуда колебаний груза оказалась наибольшей. На рис.2 приведен характерный график, показывающий зависимость амплитуды колебания груза при разных частотах внешнего воздействия с одинаковой амплитудой 55 мм для пружин, находящихся в мартенситном состоянии (температура 300 К). На данном рисунке видно, что для двух случаев – с учетом микропластической деформации и без ее учета – резонансные частоты, отмеченные на рисунке стрелками, оказываются разными. Поэтому для адекватного сравнения этих двух случаев далее будут рассматриваться колебания при резонансных частотах.

Исследование зависимостей частоты резонанса от амплитуды воздействия показало, что в мартенситном и аустенитном состоянии учет микропластической деформации приводит к снижению этой частоты при воздействиях с амплитудами более 30 мм при учете микропластической деформации (рис.3,4). В смешанном состоянии с объемной долей мартенсита 50% это справедливо и для малых смещений (рис.5). Поэтому при проектировании устройств, которые потенциально будут работать в режиме наведения микропластической деформации, необходимо учитывать сдвиг резонансной частоты.

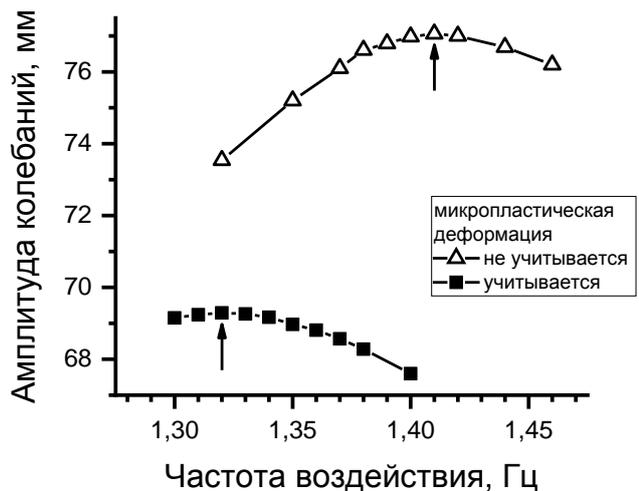


Рис.2. Зависимости амплитуды колебания груза от частоты внешнего воздействия при температуре 300 К. Амплитуда внешнего воздействия 55 мм.

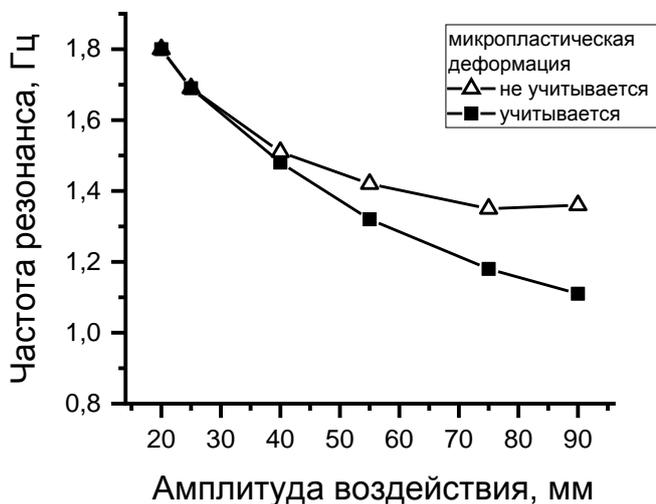


Рис.3. Зависимости частоты резонанса от амплитуды внешнего воздействия в аустенитном состоянии, при температуре 361 К.

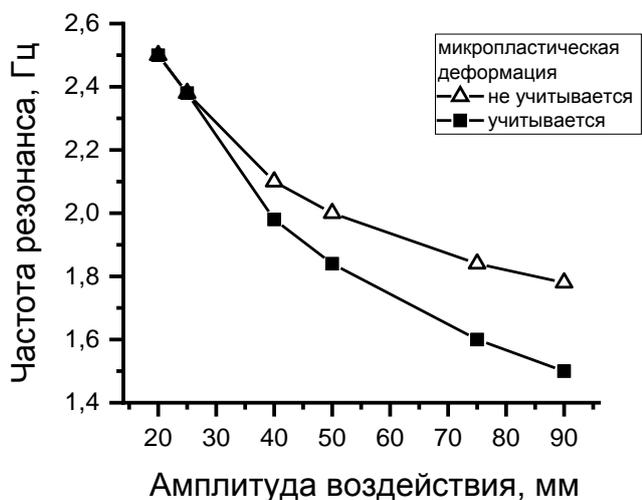


Рис.4. Зависимости частоты резонанса от амплитуды внешнего воздействия в мартенситном состоянии, при температуре 303 К.

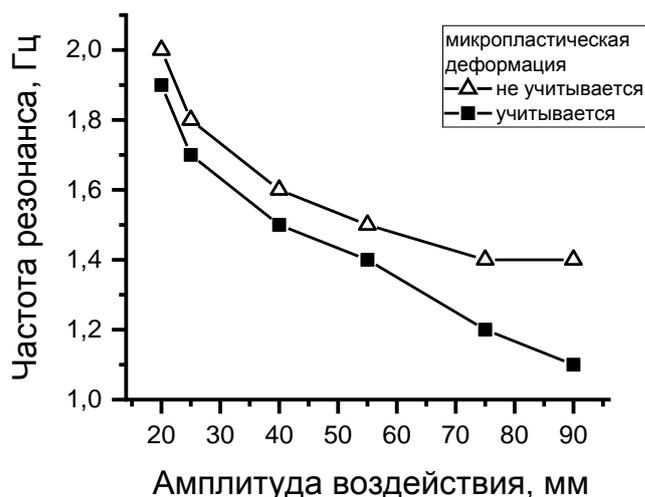


Рис.5. Зависимости частоты резонанса от амплитуды внешнего воздействия в двухфазном состоянии, при температуре 331 К.

Для исследования специфики влияния микропластической деформации на поведение рассматриваемой системы для отдельной пружины из TiNi построены диаграммы деформирования для малой амплитуды внешнего воздействия (25 мм) и большой амплитуды (75 мм). Амплитуды выбраны таким образом, чтобы в первом случае деформации были небольшими, вследствие чего микропластическая деформация была бы невелика, а во втором случае она могла бы значительно развиться.

Из рис.6 видно, что в аустенитном состоянии учет микропластической деформации приводит к качественному изменению формы деформационной петли как для большой амплитуды, так и для малой, в том числе уменьшаются максимальные напряжения и деформации, при этом гораздо быстрее происходит стабилизация цикла деформирования. Аналогичное снижение максимальных напряжения и деформации происходит и в мартенситном состоянии при большой амплитуде внешнего воздействия приводящее к уменьшению эффективной жесткости пружины. В случае малой амплитуды изменения эти незначительны (рис.7).

Рис.8 иллюстрирует поведение материала в двухфазном состоянии. В первых циклах колебаний наблюдаются значительные деформации при небольшом напряжении, поскольку в смешанном состоянии напряжение наведения мартенсита крайне низко. После полного перехода в мартенситное состояние материал поведение материала пружины аналогично изображенному на рис.7. Стоит отметить, что без учета микропластической деформации мартенситное превращение заканчивается уже в начале первого цикла, в то время как в случае ее учета превращение происходит дольше – четыре цикла при малой амплитуде и один цикл при большой.

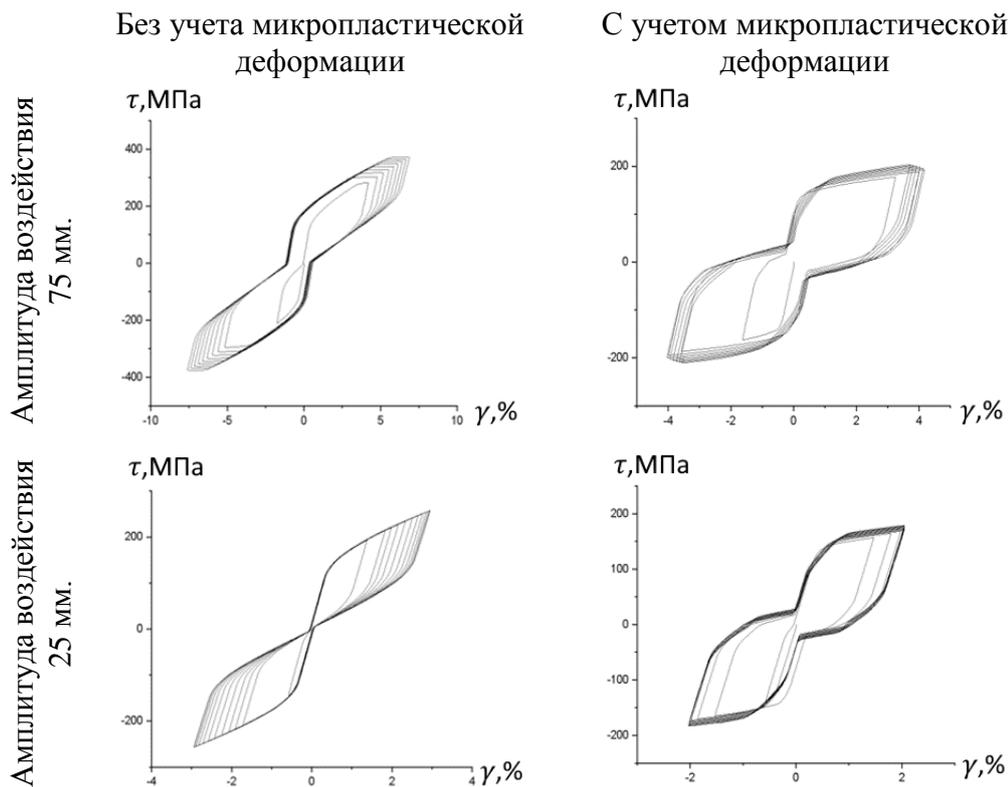


Рис.6. Деформационные зависимости для рабочего элемента в аустенитном состоянии.

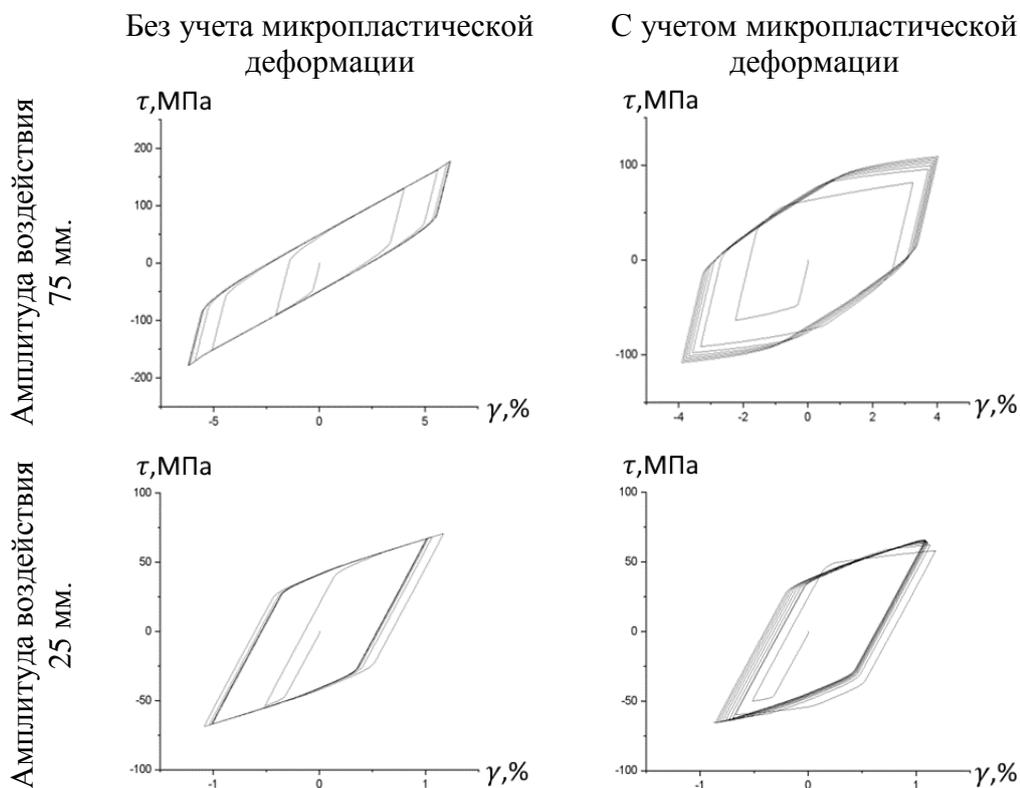


Рис.7. Деформационные зависимости для рабочего элемента в мартенситном состоянии.

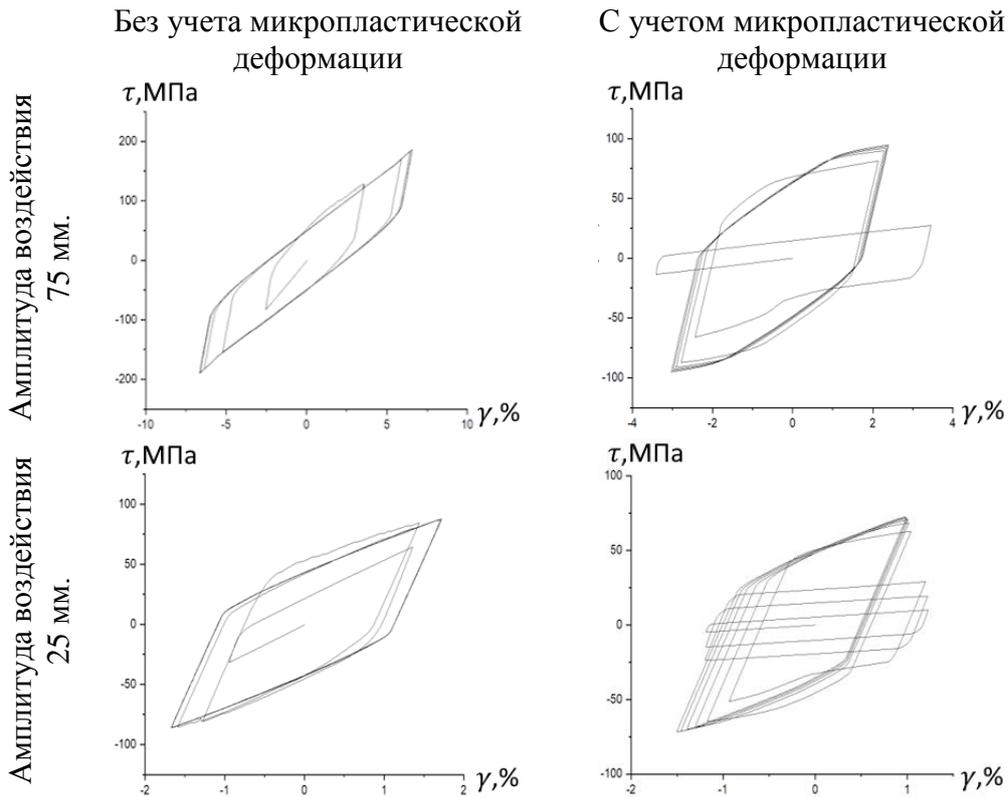


Рис.8. Деформационные зависимости для рабочего элемента в двухфазном состоянии.

Подчеркнем еще раз, что во всех случаях при учете микропластической деформации, максимальная деформация значительно меньше, чем без ее учета, причем с ростом амплитуды воздействия эта разница увеличивается. Данные, представленные на рис.9-11, позволяют сделать вывод о том, что в мартенситном и двухфазном состояниях разница деформаций растет гораздо сильнее, чем в случае аустенита, и при амплитуде 90 мм деформации отличаются более чем в два раза.

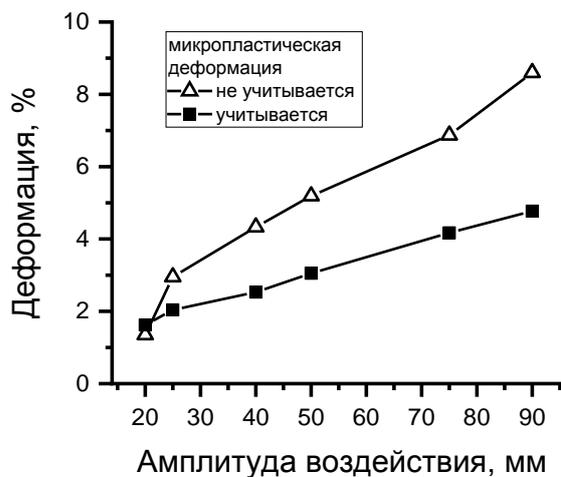


Рис.9. Зависимости максимальной амплитуды деформации от амплитуды внешнего воздействия при температуре 361 К (аустенитное состояние).

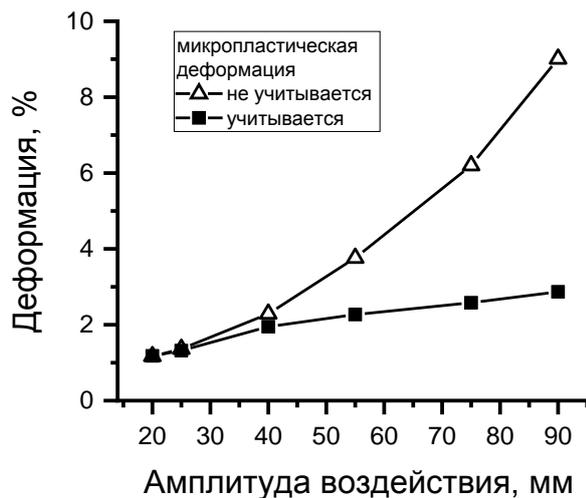


Рис.10. Зависимости максимальной амплитуды деформации от амплитуды внешнего воздействия при температуре 303 К (мартенситное состояние).

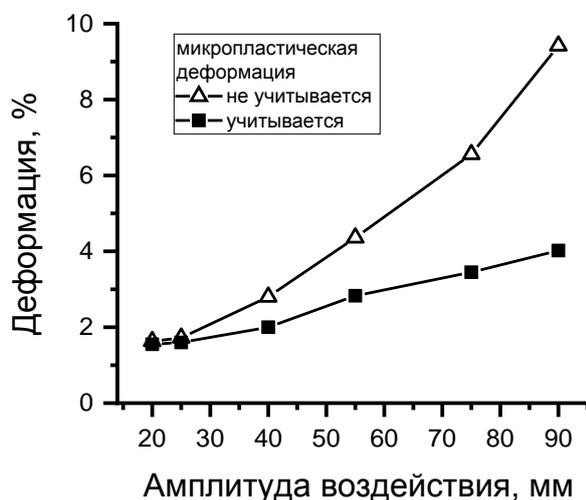


Рис.11. Зависимости максимальной амплитуды деформации от амплитуды внешнего воздействия при температуре 331 К (двухфазное состояние).

Стоит отметить, что для малых амплитуд воздействий (до 25-30 мм) разницы деформаций практически нет, поскольку этим амплитудам соответствуют либо чисто упругие деформации пружины, либо упругие с незначительной долей фазовой деформации, не вызывающей микропластических сдвигов.

ВЫВОДЫ

В результате работы можно сделать следующие выводы о влиянии микропластической деформации на работу СПФ в составе виброзащитного устройства:

1. Учет микропластической деформации влияет на расчетную частоту резонанса устройства, приводя к ее снижению при любом фазовом составе материала. Этот эффект растет с увеличением амплитуды возмущающего воздействия.

2. Микропластическая деформация приводит к качественному изменению диаграмм деформирования, снижению амплитуд напряжений и деформаций и эффективной жесткости устройства.

3. Микропластическая деформация качественно меняет поведение виброзащитных устройств и, являясь дополнительным диссипативным механизмом, улучшает их демпфирующие свойства. Для получения адекватных результатов при расчетах виброзащитных устройств необходимо осуществлять учет микропластической деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dolce M. *Passive control of structures* / Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering, Vienna, Austria. – 1995.
2. Abul H., Safkat T.A., Hafiz A. *A review of utilizing shape memory alloy in structural safety* // Aiub journal of science and engineering. – 2020. – Vol.19. – Iss.3. – Pp.116-125.
3. Alam M.S., Youssef M.A., Nehdi M. *Utilizing shape memory alloys to enhance the performance and safety of civil infrastructure: a review* // Can. J. Civ. Eng. – 2007. – Vol.34. – Pp.1075-1086.
4. Azarbayjani A., Edalat M.E., Kheirikhah M.M. *Earthquake vibration control devices based on shape memory alloys: a review* / Proceedings of 6th International Conference of Seismology and Earthquake Engineering. Tehran, Iran. – 2011.
5. Humbeeck J.V., Kustov S. *Active and passive damping of noise and vibrations through shape memory alloys: applications and mechanisms* // Smart Mater. Struct. – 2005. – Vol.14. – Pp.S171-S185.
6. Jahangira H., Bagheri M. *Evaluation of Seismic Response of Concrete Structures Reinforced by Shape Memory Alloys* // Int. J. Eng., IJE TRANSACTIONS C: Aspects. – 2020. – Vol.33. – No.3. – Pp.410-418.
7. McCormick J., DesRoches R., Fugazza D., Auricchio F. *Seismic Vibration Control Using Superelastic Shape Memory Alloys* // Journal of Engineering Materials and Technology. – 2006. – Vol.128. – Pp.294-301.
8. Menna C., Auricchio F., Asprone D. *Applications of Shape Memory Alloys in Structural Engineering* // Chapter in Shape Memory Alloy Engineering. – 2015. – Pp.369-403.
9. Somraj D., Surajit D., Purnachandra S. *State of art review of shape memory alloy used in civil structures as seismic control device* // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2015. – Vol.04. – Special Iss.13. – Pp.195-203.
10. Song G., Ma N., Lib H.-N. *Applications of shape memory alloys in civil structures* // Engineering Structures. – 2006. – Vol.28. – Pp.1266-1274.
11. Dolce M., Cardone D. *Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications. Martensite and austenite NiTi bars subjected to torsion* // International Journal of Mechanical Sciences. – 2001. – Vol.43. – Pp.2631-2656.
12. Cai W., Lu X.L., Zhao L.C. *Damping behavior of TiNi-based shape memory alloys* // Materials Science and Engineering A. – 2005. – Vol.394. – Pp.78-82.
13. Tamai H., Kitagawa Y. *Pseudoelastic behavior of shape memory alloy wire and its application to seismic resistance member for building* // Computational Materials Science. – 2002. – Vol.25. – Pp.218-227.

14. Dong Y.S., Xiong J.L., Lin P.H. *A passive damping device with TiNi shape memory alloy rings and its properties* // Materials Science and Engineering A. – 2006. – Vol.416. – Pp.92-97.
15. Huang H., Mosalam K.M., Chang W. *Adaptive tuned mass damper with shape memory alloy for seismic application* // Engineering Structures. – 2020. – Vol.223. – 111171.
16. Volkov A.E., Evard M.E., Vikulenkov A.V., Uspenskiy E.S. *Simulation of Vibration Isolation by Shape Memory Alloy Springs Using a Microstructural Model of Shape Memory Alloy* // Materials Science Forum. – 2013. – Vols.738-739. – Pp.150-154.
17. Volkov A.E., Evard M.E., Red'kina K.V. et al. *Simulation of Payload Vibration Protection by Shape Memory Alloy Parts* // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2014. – Vol.23. – Pp.2719-2726.
18. Evard M.E., Volkov A.E. *Modeling of Martensite Accommodation Effect on Mechanical Behaviour of Shape Memory Alloys* // J. Eng. Mater. Technol. – 1999. – Vol.121. – Pp.102-104.
19. Belyaev F.S., Volkov A.E., Evard M.E. *Microstructural modeling of fatigue fracture of shape memory alloys at thermomechanical cyclic loading* // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol.1959. – 070003.
20. Бе́ляев Ф.С., Волков А.Е. *Влияние взаимодействия вариантов мартенсита на обратимую фазовую деформацию в сплавах с памятью формы* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2015. – Т.21. – №2. – С.190-196.

REFERENCES

1. Dolce M. *Passive control of structures*. Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering. Vienna, Austria, 1995.
2. Abul H., Safkat T.A., Hafiz A. *A review of utilizing shape memory alloy in structural safety*. Aiub journal of science and engineering, 2020, Vol.19, Iss.3, Pp.116-125.
3. Alam M.S., Youssef M.A., Nehdi M. *Utilizing shape memory alloys to enhance the performance and safety of civil infrastructure: a review*. Can. J. Civ. Eng., 2007, Vol.34, Pp.1075-1086.
4. Azarbayjani A., Edalat M.E., Kheirikhah M.M. *Earthquake vibration control devices based on shape memory alloys: a review*. Proceedings of 6th International Conference of Seismology and Earthquake Engineering. Tehran, Iran, 2011.
5. Humbeeck J.V., Kustov S. *Active and passive damping of noise and vibrations through shape memory alloys: applications and mechanisms*. Smart Mater. Struct., 2005, Vol.14, Pp.S171-S185.
6. Jahangira H., Bagheri M. *Evaluation of Seismic Response of Concrete Structures Reinforced by Shape Memory Alloys*. Int. J. Eng., IJE TRANSACTIONS C: Aspects, 2020, Vol.33, No.3, Pp.410-418.
7. McCormick J., DesRoches R., Fugazza D., Auricchio F. *Seismic Vibration Control Using Superelastic Shape Memory Alloys*. Journal of Engineering Materials and Technology, 2006, Vol.128, Pp.294-301.
8. Menna C., Auricchio F., Asprone D. *Applications of Shape Memory Alloys in Structural Engineering*. Chapter in Shape Memory Alloy Engineering, 2015, Pp.369-403.

9. Somraj D., Surajit D., Purnachandra S. *State of art review of shape memory alloy used in civil structures as seismic control device*. International Journal of Research in Engineering and Technology, 2015, Vol.04, Special Iss.13, Pp.195-203.
10. Song G., Ma N., Lib H.-N. *Applications of shape memory alloys in civil structures*. Engineering Structures, 2006, Vol.28, Pp.1266-1274.
11. Dolce M., Cardone D. *Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications. Martensite and austenite NiTi bars subjected to torsion*. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, Vol.43, Pp.2631-2656.
12. Cai W., Lu X.L., Zhao L.C. *Damping behavior of TiNi-based shape memory alloys*. Materials Science and Engineering A, 2005, Vol.394, Pp.78-82.
13. Tamai H., Kitagawa Y. *Pseudoelastic behavior of shape memory alloy wire and its application to seismic resistance member for building*. Computational Materials Science, 2002, Vol.25, Pp.218-227.
14. Dong Y.S., Xiong J.L., Lin P.H. *A passive damping device with TiNi shape memory alloy rings and its properties*. Materials Science and Engineering A, 2006, Vol.416, Pp.92-97.
15. Huang H., Mosalam K.M., Chang W. *Adaptive tuned mass damper with shape memory alloy for seismic application*. Engineering Structures, 2020, Vol.223, 111171.
16. Volkov A.E., Evard M.E., Vikulenkov A.V., Uspenskiy E.S. *Simulation of Vibration Isolation by Shape Memory Alloy Springs Using a Microstructural Model of Shape Memory Alloy*. Materials Science Forum, 2013, Vols.738-739, Pp.150-154.
17. Volkov A.E., Evard M.E., Red'kina K.V. et al. *Simulation of Payload Vibration Protection by Shape Memory Alloy Parts*. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, Vol.23, Pp.2719-2726.
18. Evard M.E., Volkov A.E. *Modeling of Martensite Accommodation Effect on Mechanical Behaviour of Shape Memory Alloys*. J. Eng. Mater. Technol., 1999, Vol.121, Pp.102-104.
19. Belyaev F.S., Volkov A.E., Evard M.E. *Microstructural modeling of fatigue fracture of shape memory alloys at thermomechanical cyclic loading*. AIP Conference Proceedings, 2018, Vol.1959, 070003.
20. Belyaev F.S., Volkov A.E. *Vliyanie vzaimodejstviya variantov martensita na obratimuyu fazovuyu deformatsiyu v splavakh s pamyat'yu formy [Effect of interaction of martensite variants on reversible phase deformation of shape memory alloys]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2015, Vol.21, No.2, Pp.190-196.

Поступила в редакцию 07 ноября 2024 года.

Сведения об авторах:

Беляев Федор Степанович – к.ф.-м.н., с.н.с., Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: belyaev_fs@mail.ru

Волков Александр Евгеньевич – д.ф.-м.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: volkov@math.spbu.ru

Сисюк Артемий Александрович – асп., Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: artemysisyuk@yandex.ru