

А.П. Лысенко, Б.А. Ярцев

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

КОМПОЗИТНЫЕ УПРУГИЕ МУФТЫ

Объект и цель научной работы. Объектом работы являются упругие муфты – виброизоляторы специальных конструкций, апробированные средства снижения величин динамических воздействий на приводные механизмы судовых пропульсивных комплексов. Цель статьи – обобщить данные об отечественных и мировых достижениях в области разработки конструкций, выбора материалов и методов расчета напряженно-деформированного состояния, прочности и диссипативных характеристик композитных упругих муфт, а также обозначить дальнейшие пути развития методологии создания и прогнозирования характеристик данных устройств и области их рационального применения.

Материалы и методы. Основные выводы сделаны на основе методов системного анализа и системного подхода, а также принципов исторической преемственности и сравнимости российских и иностранных аналогов: конструкций, гипотез и расчетных схем.

Основные результаты. Показана необходимость использования методов математического моделирования диссипативно-жесткостных характеристик и прочности при разработке конструкций композитных упругих муфт. Описаны существующие методы определения напряженно-деформированного состояния композитных конструкций, критерии прочности и методы прогнозирования диссипативных свойств.

Заключение. При выборе рациональных составов и структур армирования упругих муфт наиболее проблемным является вопрос получения достоверной экспериментальной информации о влиянии температуры и влажности окружающей среды, циклического деформирования на упруго-диссипативные и прочностные свойства материалов. При этом существуют все предпосылки для появления новых вариантов конструктивного исполнения композитных упругих муфт: постоянно расширяется номенклатура связующих и армирующих материалов, активно развиваются универсальные программные комплексы, растет интерес к внедрению полимерных композиционных материалов даже в тех областях техники, где они ранее не использовались. Следует ожидать появления и более углубленной методологии прогнозирования характеристик виброизоляторов такой конструкции.

Ключевые слова: композитная упругая муфта, конструкция, напряженно-деформированное состояние, прочность, диссипативные свойства.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Лысенко А.П., Ярцев Б.А. Композитные упругие муфты. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 1(383): 13–28.

УДК 621.825:678.067.2/8

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-13-28

A. Lysenko, B. Yartsev

Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

ELASTIC COMPOSITE COUPLINGS

Object and purpose of research. This paper studies elastic couplings, e.g. vibration insulators of special structures, proven dampers of dynamic effects upon marine propulsion drives. The purpose of this study is to generalize the data on Russian and global achievements in development of these structures, selection of their material, as well as in calculation of stress-strain state, strength and dissipation performance of composite elastic couplings, and also to outline the ways of further progress in improvement of methodology for development and performance prediction of these structures, as well as for their optimal use.

Materials and methods. Main conclusions of this work are based on system analysis and system approach methods, as well as on principles of historical succession and comparability between Russian and foreign products, hypotheses and calculation layouts.

Main results. It has been shown that development of composite elastic couplings must always include mathematical simulation of their dissipation and stiffness performance and strength. The paper describes existing stress-strain state calculation methods for composite structures, as well as strength criteria and prediction methods for dissipation performance.

Conclusion. The most difficult task in selecting optimal compositions and stacking sequences of elastic couplings is to obtain reliable test data on how ambient temperature and humidity, as well as cyclic straining, affect elastic dissipation and strength properties of materials. There exist all pre-requisites for developing new designs of elastic composite couplings: ever-widening spectrum of binders and reinforcing materials, vigorous progress in software packages, growing interest to introduction of polymeric composite materials even for totally new applications. It shall be expected that there will also appear a more advanced performance prediction methodology for vibration insulators of this design.

Key words: elastic composite coupling, structure, stress-strain state, strength, dissipation performance.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Lysenko A., Yartsev B. Elastic composite couplings. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 1(383): 13–28 (in Russian).

УДК 621.825:678.067.2/.8

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-13-28

Введение

Introduction

Характерной особенностью современных пропульсивных комплексов кораблей и судов являются большие мощности энергетических установок, высокие скорости рабочих процессов, значительные усилия, возникающие в ходе работы. Механизмы, передающие вращательное движение от двигателей к исполнительным механизмам машин, подвергаются динамическим воздействиям, порождаемым либо возникающими при выполнении рабочего процесса переменными силами, либо возникающими при неравномерном движении рабочих органов машины переменными инерционными силами. Следовательно, работа судовых пропульсивных комплексов сопровождается вибрациями и ударами, которые снижают прочность и долговечность приводных механизмов, являются причиной усталостных явлений, увеличивают шум в передачах и т.п. Поэтому задача повышения надежности валопроводов, подверженных динамическим нагрузкам, прежде всего, должна решаться путем снижения самих динамических нагрузок [1].

Апробированным средством снижения величин динамических воздействий на приводные механизмы являются виброизоляторы специальных конструкций – упругие муфты. Первое применение упругих муфт для снижения уровней возникающих в судовых валопроводах динамических нагрузок относится к середине XX века. За последующие десятилетия, как в нашей стране, так и за рубежом, было предложено множество подобных конструкций, которые условно можно свести к двум основным группам: металлические и резинометалличе-

ские упругие муфты [2]. Несмотря на некоторые недостатки (сложность механизма, большая масса, высокая стоимость), эти муфты позволяют создавать валопроводы требуемого качества. Однако наметившийся в последнее время массовый переход на низкочастотную амортизацию судовых энергетических установок, требующий существенного повышения деформативности упругих муфт, инициировал проведение исследований по разработке конструкций упругих соединительных муфт, обеспечивающих, наряду с передачей крутящего момента, компенсацию больших взаимных смещений соединяемых валов. Результатом исследований стало создание упругих муфт из полимерных композиционных материалов (ПКМ), характеризующихся малой плотностью, высокой прочностью, пониженным (по сравнению с металлами и сплавами) модулем упругости и повышенной демпфирующей способностью. Кроме того, демпфирующая способность ПКМ легко увеличивается за счет введения в состав слоистой структуры вязкоупругих материалов. Отмеченные особенности композитных структур позволяют создавать работоспособные конструкции упругих муфт с рациональными уровнями диссипативно-жесткостных характеристик.

Конструкции композитных упругих муфт

Designs of elastic composite couplings

Первую композитную упругую муфту в середине 1970-х гг. предложил В.В. Вейбл [3]. Конструкция муфты, представляющая собой систему определенным образом ориентированных относительно оси вращения стержней из намоточного углепластика,

обеспечивает высокую податливость, накладывая при этом ограничения на величину передаваемого крутящего момента. Десятилетием позднее Д.П. Мак-Гир предпринял попытку устранения указанного ограничения, предложив композитную конструкцию основного упругого элемента – податливого банджа, позволяющую значительно повысить величину передаваемого крутящего момента за счет существенного снижения податливости [4]. Очевидно, что недостатки обеих рассмотренных композитных упругих муфт не позволяют надеяться на возможность их применения в составе судовых валопроводов.

Д.Дж. Лаври с соавторами разработали легкую упругую муфту, состоящую из жестких металлических фланцев, к которым крепится упругий элемент, изготавливаемый непрерывной намоткой органических волокон (рис. 1) [5]. Муфта, требующая минимальной балансировки, широко используется в высокоскоростных передачах. Однако, как отмечают сами авторы изобретения, величины осевой, изгибной и сдвиговой жесткостей превышают желаемые значения. Уменьшение жесткостей возможно лишь за счет крайне нежелательного увеличения диаметра конструкции. Помимо этого, осевое сжатие и перекос мембран, часто возникающие в процессе соединения муфты с ведущим и ведомым валами, негативно влияют на условия ее работы.

Податливая композитная упругая муфта, описанная в [5], получила оригинальное развитие путем ее интегрирования в конструкцию монолитного гибкого вала из ПКМ (рис. 2) [6]. Такие валы применяются в роторах вертолетов и ветровых турбин. Интегрированная упругая муфта обеспечивает стабильность передачи крутящего момента, компенсируя линейные и угловые смещения оси вала, порождаемые изменениями упора и изгибом лопастей. Муфта изготавливается одновременно с валом методом намотки.

Еще одна конструкция упругой муфты, компенсирующая угловые смещения соединяемых валов, предложена в [7]. Минимизация крутильной жесткости такой муфты достигается за счет соединения

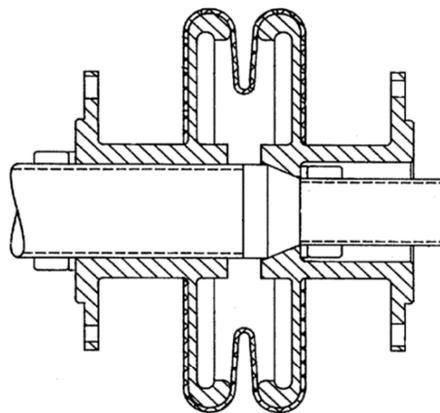


Рис. 1. Принципиальная конструкция упругой муфты Д.Дж. Лаври с соавторами

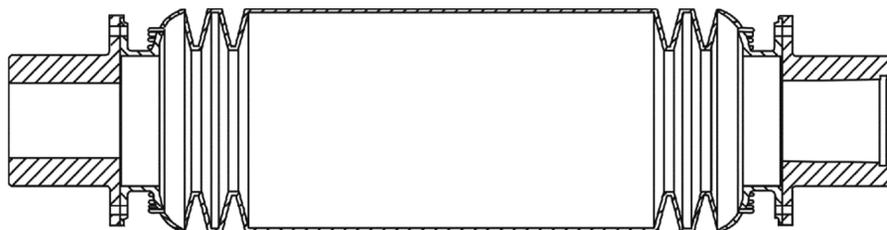
Fig. 1. Principal design of elastic coupling suggested by D.J. Lawrie et al

ведущего и ведомого металлических фланцев композитным цилиндрическим промежуточным валом, более податливым по сравнению с металлическим прототипом. Недостатками конструкции являются высокие жесткости муфты при изгибе и поперечном сдвиге. Замена цилиндрического упругого элемента гиперболическим снижает изгибную и сдвиговую жесткости (рис. 3) [8–10]. Изготавливаемый методом намотки гиперболический упругий элемент крепится к установленным на концах соединяемых валов металлическим фланцам. В процессе намотки армирующие волокна оптимальным образом ориентируются относительно оси вращения упругого элемента. Небольшие габариты упругой муфты определяются основными предполагаемыми объектами ее эксплуатации: насосными и компрессорными установками.

Эффективные судовые упругие муфты из ПКМ разработаны фирмой Geislinger (Австрия), в начале 1990-х гг. получившей первые патенты на такие конструкции [11–13]. Позднее перечень запатентованных конструкций вырос [14–18]. Фирма Geislinger производит упругие муфты из ПКМ под брендом Geislinger Gesilco [19]. Эти муфты разработаны в соответствии с требованиями стандарта ISO 9001

Рис. 2. Принципиальная конструкция вала с интегрированными упругими муфтами

Fig. 2. Principal design of shaft with integrated elastic couplings



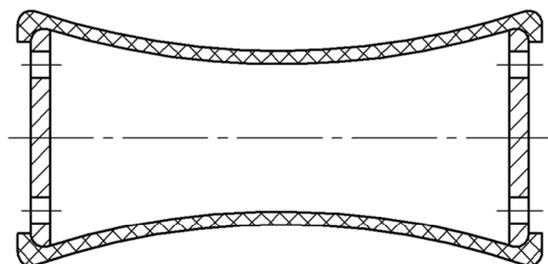


Рис. 3. Принципиальная конструкция гиперболической упругой муфты

Fig. 3. Principal design of hyperbolic composite coupling

и сертифицированы основными классификационными обществами. Муфты Geislinger Gesilco, предназначенные для передачи крутящего момента и компенсации радиальных, угловых, а также осевых расхождений соединяемых валов, обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными прототипами. К этим преимуществам относятся: малая масса, возможность компенсации больших расцентровок соединяемых валов, снижение реакций опор, высокий уровень виброизоляции, минимальное количество отдельных элементов, легкость обслуживания, высокая коррозионная стойкость, простота монтажа. В настоящее время выпускаются три типа муфт Geislinger Gesilco [19]: типа Gesilco Butterfly, типа Gesilco Classic и типа Gesilco Composhaft.

Муфта типа Gesilco Butterfly (рис. 4а) состоит из двух композитных полумуфт, каждая из которых содержит мембрану (1), промежуточный полувал (2) и фланец (3). Полумуфты соединяются по фланцам болтами. Использование вкладышей переменной толщины позволяет компенсировать монтажные допуски и осевые расцентровки. На внутреннем радиусе мембран в предварительно подготовленные отверстия установлены стальные втулки (4).

Муфта типа Gesilco Classic (рис. 4б) состоит из двух композитных мембран (1) и композитного промежуточного вала (2). На внешнем радиусе мембран для снижения смятия ПКМ предусмотрена установка металлических втулок (3). Соединение муфты с ведущим и ведомым валами осуществляется при помощи болтов.

Муфта типа Gesilco Composhaft (рис. 4в) представляет собой совокупность двух двойных мембран (1) и промежуточного вала (2), соединенных в единую конструкцию болтами. Для компенсации монтажных допусков и осевых расцентровок используются вкладыши переменной толщины (3). На внутреннем радиусе наружных мембран в предварительно подготовленные отверстия установлены металлические втулки (4). Существенным преимуществом муфты типа Gesilco Composhaft является возможность создания конструкции меньшего диаметра для обеспечения передачи крутящего момента, который обеспечивают Gesilco Butterfly и Gesilco Classic.

При проектировании композитной упругой муфты основное внимание уделяется минимизации осевой, изгибной, сдвиговой и крутильной жесткостей. Если первые три жесткости связаны с деформативностью мембран, то крутильная жесткость упругой муфты определяется крутильной жесткостью промежуточного вала, размеры которого выбираются из условия обеспечения прочности при кручении. Поэтому в состав промежуточного вала для усиления

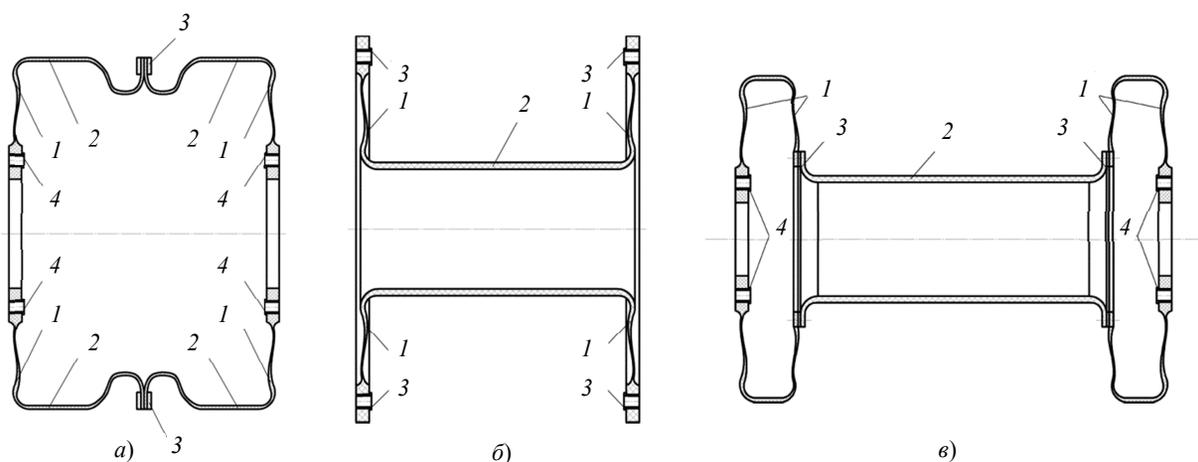


Рис. 4. Принципиальные конструкции упругих муфт Geislinger Gesilco: а) Gesilco Butterfly; б) Gesilco Classic; в) Gesilco Composhaft

Fig. 4. Principal designs of Geislinger Gesilco elastic couplings: а) Gesilco Butterfly; б) Gesilco Classic; в) Gesilco Composhaft

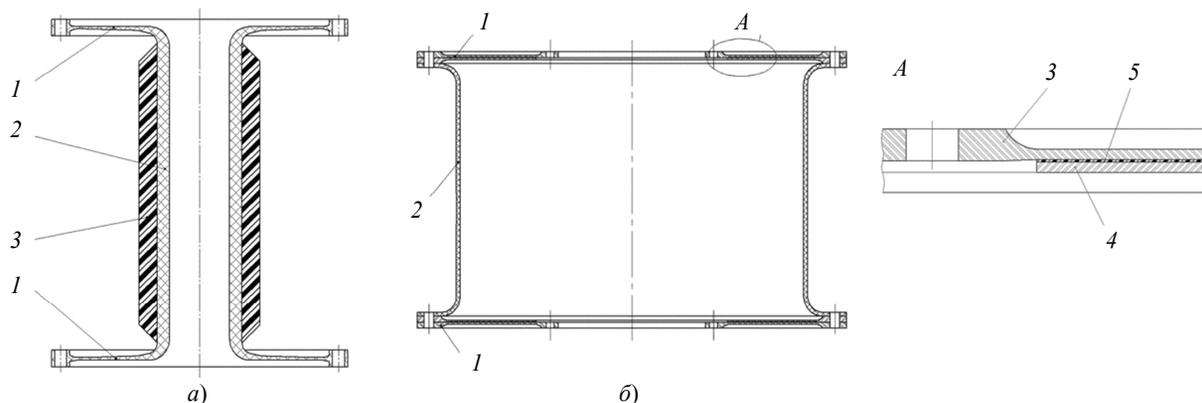


Рис. 5. Принципиальные конструкции композитных упругих муфт с повышенными диссипативными характеристиками: а) монолитная; б) сборная

Fig. 5. Principal designs of elastic composite couplings with enhanced dissipation performance: a) monolithic; b) compound

иногда вводятся стеклоровинги. Использование гофрированных мембран позволяет повысить уровень касательных эйлеровых напряжений, возникающих в результате приложения крутящего момента [20].

Среди отечественных разработок в области судовых упругих муфт следует отметить конструкцию упругой торсионной муфты, состоящей из двух полумуфт, соединенных упругим торсионом [21]. Ведомая композитная полумуфта имеет вид катушки с двумя фланцами различного диаметра. Фланец большего диаметра выполнен в виде гофрированной мембраны с возможностью компенсации осевых перемещений. Стальной торсион выполнен в виде вала. Ведущая полумуфта, компенсирующая поперечные перемещения, представляет собой стальную мембрану. В целом, данная упругая муфта, являющаяся вариацией муфт типа Gesilco Classic, повышает эффективность компенсации осевых и поперечных перемещений соединяемых валов.

Существующие конструкции композитных упругих муфт обеспечивают передачу номинального крутящего момента $M_T^{nom} \in [5 \text{ кНм}, 40 \text{ кНм}]$ при одновременной компенсации расцентровок соединяемых валов до величины $\Delta_{max} = 10 \text{ мм}$. Недостатком этих муфт является низкий уровень диссипативных характеристик, поскольку коэффициент механических потерь, как правило, не превосходит величину $\eta_{max} = 0,01$. Поэтому особую актуальность приобрела задача создания новых конструкций упругих муфт из ПКМ с более высоким демпфированием. Один из способов повышения диссипативных характеристик связан с формированием неоднородных структур, образуемых совокупностью слоев с различными физико-механическими свойствами и интегрированных в единую конструкцию упругой муфты. При этом

одни слои обеспечивают прочность и надежность конструкции в целом, в то время как другие позволяют реализовывать высокие уровни демпфирования. В настоящее время существуют два варианта конструкции композитных упругих муфт с повышенными диссипативными характеристиками [22, 23], различающиеся способом реализации демпфирования: монолитная и сборная (рис. 5).

Монолитная композитная муфта (рис. 5а) является модификацией упругой композитной муфты фирмы Geislinger (тип Gesilco Classic) и представляет собой монококовую конструкцию, основными элементами которой являются мембраны (1), крепящиеся к металлическим контрфланцам, и промежуточный вал (2). На наружную поверхность промежуточного вала нанесен слой жесткого вибропоглощающего полимера (3).

Сборная композитная муфта (рис. 5б) образована двумя трехслойными кольцевыми мембранами (1), соединенными с промежуточным валом (2). Кольцевые мембраны состоят из жестких наружных слоев – несущего внешнего (3) и прикрывающего внутреннего (4), соединенных между собой слоем мягкого вибропоглощающего полимера (5). Толщина слоя мягкого вибропоглощающего полимера существенно меньше толщины жестких наружных слоев мембран. Реализация взаимных линейных и угловых перемещений жестких наружных слоев трехслойных кольцевых мембран обеспечивается за счет отсутствия связи внутренней кромки жесткого прикрывающего внутреннего слоя с ведущим или ведомым валом.

Приведенный обзор существующих конструкций свидетельствует об устойчивой тенденции расширения использования ПКМ при создании упругих муфт. Среди всех типов ПКМ наибольшее распро-

странение получил стеклопластик. Это «связано с высокой прочностью и малым модулем упругости стеклопластика при низкой плотности и практически линейной диаграмме деформирования. В то же время полимерная матрица может обладать способностью к демпфированию и шумопоглощению. Именно эти качества определяют эффективность стеклопластика при создании упругих элементов» [24, 25]. Одновременно показано, что разработка конструкций композитных упругих муфт связана с необходимостью удовлетворения комплексу взаимно исключающих требований. Очевидно, что наиболее эффективный подход к поиску компромиссных решений основан на использовании методов математического моделирования диссипативно-жесткостных характеристик и прочности композитных упругих муфт, краткий обзор которых приводится далее.

Методы описания деформирования композитных конструкций

Description methods for straining of composite structures

Линейность диаграмм деформирования современных волокнистых ПКМ в системах координат, связанных с направлениями армирования слоев, обуславливает физически линейную постановку задач по определению напряженно-деформированного состояния большинства композитных конструкций. Такая постановка основана на применении либо теорий анизотропных пластин и оболочек различной степени точности (2D-теории), либо теории упругости анизотропного тела (3D-теории).

Для описания деформирования слоистых тонкостенных анизотропных конструкций используются приближенные 2D-теории, построенные на основе трех основных подходов [26, 27]: метод гипотез [26–36], метод разложения в ряд по толщине [37–39], метод асимптотического решения трехмерных уравнений [36, 40]. Первый подход наиболее близок к инженерным представлениям. Исходная задача упрощается после принятия определенных допущений (гипотез). Такие гипотезы связаны, прежде всего, с именами Г. Кирхгоффа, С.П. Тимошенко [41], Е. Рейсснера [42], Х.М. Муштари [43]. Согласно [44–46] все математические теории, полученные на основе метода гипотез, можно разделить на две группы: теории, вводящие какие-либо предпосылки относительно деформирования отдельного слоя (гипотеза ломаной линии) [28, 29], и теории, основанные на гипотезах, касающихся работы пакета

в целом (гипотеза эквивалентного слоя) [26, 27, 30–35]. Их основное различие заключается в представлении о пакете слоев как о совокупности конечного множества независимых слоев (гипотеза ломаной линии) или как о целостном эквиваленте (гипотеза эквивалентного слоя). Характерной чертой теорий, основанных на гипотезе ломаной линии, является зависимость порядка разрешающей системы уравнений от количества слоев. Это может сделать проблематичным расчет сложных реальных конструкций даже при небольшом числе слоев. Для теорий второй группы (гипотеза эквивалентного слоя) порядок разрешающей системы уравнений остается постоянным независимо от количества слоев.

Использование теорий эквивалентного слоя позволяет с удовлетворительной точностью оценить глобальные свойства неоднородной конструкции: прогибы, частоты собственных колебаний, усилия и моменты [44–46]. Накопление ошибок, возникающих в результате удовлетворения условию непрерывности поперечных деформаций на границе слоев (при наличии разрывности напряжений), увеличивается с повышением степени неоднородности конструкции по толщине. Теории, основанные на гипотезе ломаной линии, позволяют избежать этого противоречия, поэтому они предпочтительны при исследовании локальных явлений.

В настоящее время теории слоистых анизотропных пластин и оболочек используются для расчета параметров напряженно-деформированного состояния, устойчивости и динамического отклика конструкций из ПКМ как в линейной, так и в нелинейной постановках [33, 44–56]. В частности, авторы работ [8–10] применяли 2D-теории для прогнозирования характеристик композитных упругих муфт.

Радикально повысить точность прогнозирования и глобальных, и локальных свойств неоднородных конструкций из ПКМ можно путем использования 3D-теорий механики деформируемого твердого тела. Простейшей из них является линейная теория упругости анизотропного тела, приводящая к системе линейных дифференциальных уравнений в частных производных [57–59]. Для этой теории решено большое число задач, и хорошо разработан аппарат их решения. Кроме того, сегодня практически все задачи линейной теории упругости можно численно решить с помощью универсальных программных комплексов (CAE), основанных на использовании метода конечных элементов [60, 61]. Опыты для определения констант, входящих в обобщенный закон Гука [62], давно стандартизированы, и их описание включено в соответствующие национальные

и международные стандарты. Поэтому использование модели линейной теории упругости в качестве расчетной позволяет для любой формы элемента конструкции и любого вида внешних воздействий, приложенных к этому элементу, получать значения параметров напряженно-деформированного состояния.

С целью повышения точности результатов, получаемых с помощью расчетной модели как количественно, так и качественно, необходим учет конечности деформаций [63–65]. Если в расчетной модели используется предположение о конечности деформаций, то при определении параметров напряженно-деформированного состояния элемента конструкции следует помнить о невыполнимости принципа суперпозиции деформаций. Аналитических методов получения точных решений для таких систем, за исключением редчайших случаев, нет. С появлением пакетов компьютерной алгебры стало возможным получение приближенного аналитического решения вышеуказанных задач этими методами. Наконец, проектировщик может воспользоваться универсальными САЕ, основанными на использовании МКЭ.

Здесь уместно отметить, что выбор рациональных составов и структур армирования отечественных композитных упругих муфт осуществлялся путем совместного анализа результатов многопараметрических 3D конечно-элементных расчетов, выполненных в программном комплексе Ansys как в линейной, так и в нелинейной постановках [20, 66–71].

Критерии прочности

Strength criteria

Характерной чертой деформирования композитных конструкций, работающих при нагрузках, близких к предельным, является появление локальных зон разрушения. Это далеко не всегда приводит к исчерпанию несущей способности, но может влиять на распределение напряженно-деформированного состояния и, следовательно, работоспособность конструкции в целом. В связи с этим важным аспектом проектирования является оценка прочности всех элементов конструкции, основанная на использовании одного из трех различных подходов [72]: физический подход, подход с позиций механики деформируемого твердого тела (механика разрушения), феноменологический (инженерный) подход.

Физический подход основан на общих принципах описания реакции твердого тела на внешнее механическое воздействие и широко использует простые физические модели, допускающие количественную оценку [73–75].

Предметом механики разрушения является исследование развития одной или нескольких трещин в конструкции на основе определения сингулярного напряженного состояния в их устьях. Для композитов наиболее характерно разрушение за счет накопления микродефектов, при котором наблюдается «размазывание» концентрации напряжений. Кроме того, механизм и формы разрушения конструкции из ПКМ существенно различны даже при одинаковых геометрии и нагрузке, что обусловлено значительным влиянием неоднородности материала, наличия инородных включений, отслоения волокон от матрицы и др. на рост трещины [24, 25, 76–79].

Наиболее часто моделирование разрушения в конструкциях из ПКМ выполняется на основе феноменологического подхода, позволяющего интегрально исследовать зарождение и развитие зон накопления повреждений, что соответствует физической природе происходящих процессов. При анализе процессов разрушения ПКМ на основе феноменологического подхода различают два уровня детализации процессов зарождения и накопления повреждений: микромеханический и макромеханический [76, 77, 80–82].

Высокая степень детализации на микроуровне, рассматривающая волокно и матрицу как самостоятельные акторы процесса деформирования, как правило, не позволяет моделировать работу конструкции в целом. Кроме того, многие особенности реальных композитов не учитываются существующими микромеханическими моделями. Геометрические параметры структуры композита – «упаковка» армирующих волокон, форма и характерные размеры их сечений – случайные параметры. В ряде случаев волокна искривлены вследствие несовершенства технологии изготовления материала. На границе раздела связующего и армирующего материалов протекают сложные химические процессы, в результате которых происходит изменение характеристик компонентов вследствие их взаимодействия, образование трещин, отслоения на границе раздела и т.д. Моделирование начала разрушения композита, порождаемого локальными физическими процессами, предъявляет повышенные требования к точности определения напряженно-деформированного состояния образующих его компонентов. Отсюда – принципиальная невозможность использования многих простейших микромеханических моделей, достаточных для описания интегральных характеристик композита. Оценку прочности композита в рамках микромеханического подхода существенно затрудняет необходимость рассмотре-

ния кинетики разрушения материала, т.к. локальные значения параметров напряженно-деформированного состояния компонентов композита часто достигают предельных значений уже на начальных этапах нагружения композита, что, однако, не приводит к исчерпанию его несущей способности [80].

Использование макромеханического уровня, рассматривающего композит как однородный анизотропный материал, несмотря на пренебрежение локальными эффектами, позволяет с достаточной степенью достоверности исследовать напряженно-деформированное состояние и прочность всей конструкции. Макромеханические феноменологические теории прочности фактически представляют собой расчетный критерий, с помощью которого можно определить прочность материалов при сложном напряженном состоянии, пользуясь данными о прочности, полученными из относительно простых опытов на одноосное растяжение/сжатие и сдвиг. Эти критерии обычно позволяют определить разрушающую нагрузку, но не форму разрушения. Для анизотропных материалов предложено большое число таких критериев. Широкое распространение среди инженеров получили критерии Е.К. Ашкенази, А.К. Малмейстера, И.И. Гондельблата, В.А. Копнова, С. Цая и Р. Хилла, С. Цая и Э.М. Ву и других исследователей, подробно описанные в научной литературе [83–92]. При расчете слоистых композиционных материалов на прочность существующие критерии прочности используются по одной из двух схем:

1. Принимается, что слоистый материал состоит из однородных ортотропных слоев. Материал рассчитывается последовательно слой за слоем, с использованием формулы взаимодействия в качестве критерия прочности. Предполагается, что разрушение не происходит, если в любом слое или группе слоев критерий не выполняется.
2. Слоистый материал считается однородным и анизотропным (не обязательно ортотропным). Критерий применяется к слоистому материалу в целом.

При применении первой расчетной схемы нужны исходные данные о прочности лишь для каждого типа слоя в слоистом материале, но необходимо производить расчет распределения напряжений в слоях для всех сочетаний нагрузок и ориентаций слоев. С другой стороны, при использовании второй расчетной схемы не требуется расчет распределения напряжений в слоях, поскольку эта схема основана на прочностных характеристиках слоистого материала в целом; однако для каждой из рассматриваемых структур армирования материала следует находить основные прочностные характеристики.

Таким образом, для оценки прочности на основе феноменологического подхода нужны определенные с той или иной степенью точности параметры напряженно-деформированного состояния элемента конструкции и свойства материала, сравнение с которыми позволит сделать вывод о сохранении работоспособности элемента конструкции. В настоящее время наиболее проблемным является вопрос получения достоверной информации о свойствах материалов. Это обусловлено изменением упругих и прочностных характеристик композита, обусловленных влиянием температуры и влажности окружающей среды, циклическим деформированием и др. Постоянно возрастающая номенклатура связующих и армирующих материалов, большая переменность структурных параметров ПКМ на их основе и длительность проведения экспериментальных исследований не позволяют быстро получать и накапливать необходимую эмпирическую информацию. Проблема осложняется недостаточной разработанностью или отсутствием методов проведения ускоренных испытаний [93, 94]. В то же время следует отметить, что в последнее время появились работы по ускоренному прогнозированию долговечности полимерных композитов [95–97], вселяющие надежду на успешное решение указанной проблемы в обозримом будущем.

Методы прогнозирования диссипативных свойств

Dissipation performance prediction methods

Одним из преимуществ композитных конструкций являются высокие демпфирующие свойства. Поскольку характерные для ПКМ уровни диссипации энергии превосходят аналогичные показатели для металлов и сплавов на 1-2 десятичных порядка, то, в отличие от конструкций из традиционных материалов, демпфирование в композитных конструкциях рассматривается не как полезный вторичный эффект, а как один из основных параметров проектирования [98–100]. Этим и объясняется устойчивый интерес к проблеме рассеяния энергии при колебаниях слоистых композитных конструкций, подтверждающийся рядом обзоров, содержащих анализ работ на данную тему [98–105]. Не останавливаясь подробно на рассмотрении публикаций, отметим лишь, что основная масса статей посвящена созданию математических моделей, а также расчетному и экспериментальному исследованию влияния составов и структур армирования композита, граничных условий и температурных режимов экс-

плутации на демпфирующую способность ПКМ. Выполненные исследования позволили установить диапазоны изменения диссипативных характеристик конструкционных ПКМ в зависимости от перечисленных факторов и показать недостаточность реализуемых уровней рассеяния энергии для снижения амплитуд резонансных колебаний некоторых композитных конструкций до требуемых величин. В связи с этим появились предложения по способам существенного повышения диссипации энергии за счет введения в состав слоистой структуры вязкоупругих материалов (VDM – viscoelastic damping material) [106–116], пьезоэлектрических элементов [117, 118], металлов с памятью формы [119, 120] или использования иных способов [121].

В реальной практике наибольшее распространение получил предложенный еще для повышения демпфирования металлических конструкций [122–126] первый из перечисленных способов. Авторы подавляющего большинства публикаций рассматривают структуры, в состав которых включены слои «мягких» вязкоупругих материалов (CLD – constrained layer damping) [106–116, 126]. Между тем относительно низкие упругие характеристики большинства конструкционных ПКМ позволяют создавать композитные конструкции с высокими диссипативными свойствами путем включения в их состав слоев «жестких» вязкоупругих материалов (FLD – free layer damping). Эффективность таких конструкций обусловлена соизмеримостью вкладов силовых и демпфирующих слоев в потенциальную энергию деформации механической системы в целом [68–71, 127–129].

Наиболее распространенный способ оценки демпфирующей способности конструкций из ПКМ связан с рассмотрением их свободных затухающих колебаний. Моделирование процессов рассеяния энергии осуществляется на основе либо вязкоупругого, либо энергетического подходов [98–105]. Вязкоупругий подход заключается в исследовании собственных затухающих колебаний анизотропного линейного вязкоупругого тела, реологические соотношения которого, как правило, записываются в форме комплексных модулей [130–132]. Применение комплексных модулей позволяет не только объединять упруго-диссипативные характеристики материала в одном выражении, но и, используя принцип упруго-вязкоупругого соответствия в линейной теории вязкоупругости, записывать уравнения движения диссипативных механических систем путем замены упругих модулей и упругих переменных соответствующими комплексными модулями и ком-

плексными переменными в уравнениях движения упругой механической системы [130–134]. Нахождение комплексных собственных частот и комплексных собственных форм приводит к алгебраической проблеме комплексных собственных значений [105, 128, 134]. В работах [105, 127, 128, 135] показано, что математическая формулировка энергетического метода прогнозирования диссипативных свойств композитных структур [100, 136–144] является частным случаем вязкоупругого подхода. Для этого достаточно в задаче на комплексные собственные значения ввести допущение о равенстве нулю мнимых частей всех элементов комплексного собственного вектора. В работах [68, 127, 128] предложен приближенный метод численного определения величин коэффициентов механических потерь композитных слоистых конструкций, образованных конечным числом произвольно ориентированных ортотропных слоев ПКМ и слоем вязкоупругого материала. Метод позволяет использовать возможности универсальных САЕ без какой-либо их модификации и применяется для прогнозирования диссипативных характеристик композитных упругих муфт с учетом влияния температуры окружающей среды [69–71]. Необходимые для выполнения расчетов диссипативные характеристики ортотропных слоев ПКМ определялись экспериментально на параллельно армированных стержневых образцах, определенным образом ориентированных относительно осей упругой симметрии [136, 144–148].

Заключение

Conclusion

Представленный обзор обобщает отечественные и зарубежные достижения в области разработки конструкций, выбора материалов и методов расчета напряженно-деформированного состояния, прочности и диссипативных характеристик композитных упругих муфт. Показано, что за последние десятилетия различными авторами предложен ряд конструкций и установлены области рационального применения композитных упругих муфт. Отмечено, что при выборе рациональных составов и структур армирования упругих муфт наиболее проблемным является вопрос получения достоверной экспериментальной информации о влиянии температуры и влажности окружающей среды, циклического деформирования на упруго-диссипативные и прочностные свойства материалов. Учитывая постоянно расширяющуюся номенклатуру связующих и армирующих материалов, бурное развитие универсаль-

ных САЕ и наметившийся в нашей стране интерес к внедрению полимерных композиционных материалов даже в тех областях техники, где они ранее не использовались, следует ожидать появления новых вариантов конструктивного исполнения композитных упругих муфт и более углубленной методологии прогнозирования их характеристик.

Библиографический список

References

1. Вибрации в технике. Справочник. Т. 6. Защита от вибрации и ударов / Под ред. К.В. Фролова. М.: Машиностроение. 1995. [Vibrations in engineering. Reference book. Vol. 6. Vibration and impact protection / Under editorship of K. Frolov. Moscow: Mashinostroyeniye, 1995. (in Russian)].
2. Поляков В.С., Барбаш И.Д., Ряховский О.А. Справочник по муфтам. Л.: Машиностроение. 1979. [V. Polyakov, I. Barbash, O. Ryakhovskiy. Couplings. Reference book. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1979. (in Russian)].
3. Universal joint. US 4116018. United States Patent. Appl. No. 723770. Filed: 16.09.1976. Date of patent: 26.09.1978.
4. Composite coupling having hubs connectable to drive and driven members. US 4968286. United States Patent. Appl. No. 163667. Filed: 03.03.1988. Date of patent: 06.11.1990.
5. Flexible composite coupling. US 5551918. United States Patent. Appl. No. 1843671. Filed: 28.02.1992. Date of patent: 03.09.1996.
6. High torque density flexible composite driveshaft. US 2012/0283029 A1. United States Patent. Appl. No. 13/493719. Filed: 11.06.2012. Pub. Date: 08.11.2012.
7. Composite coupling with a machining portion. US 8424921 B2. United States Patent. Appl. No. 12/333467. Filed: 12.12.2008. Date of patent: 23.04.2013.
8. Ghoneim H., Lawrie D.J. Dynamic analysis of a hyperbolic composite coupling // Journal of Sound and Vibration. 2007; 301: 43–58.
9. Ghoneim H. Dynamic analysis of a spinning composite «deep» hyperbolic coupling // International Journal of Solids and Structures. 2008; 45: 4484–97.
10. Ghoneim H., Sakif Noor. Pumping potential of a hyperbolic shell-of-revolution flexible-matrix-composite structure // Composite Structures. 2013; 95: 10–15.
11. Kupplungsglied aus faserverstärktem Kunststoff. EP 0534925 A2. Europäische Patentanmeldung. Anmeldenummer: 92890188.3 Anmeldetag: 01.09.1992. Veröffentlichungstag der Anmeldung: 31.03.1993.
12. Kupplungsglied aus faserverstärktem Kunststoff. EP 0534927 B1. Europäische Patentschrift. Anmeldenummer: 92890190.9 Anmeldetag: 01.09.1992. Veröffentlichungstag der Patentschrift: 06.12.1995.
13. Torque-transmitting coupling member. US 5314382. United States Patent. Appl. No. 937963. Filed: 28.08.1992. Date of patent: 24.05.1994.
14. Dry coupling. US 5890965. United States Patent. Appl. No. 676127. Filed: 13.11.1995. Date of patent: 06.04.1999.
15. Elastic torque-transmitting coupling. US 6095924. United States Patent. Appl. No. 09/012,617. Filed: 23.01.1998. Date of patent: 01.08.2000.
16. Kupplungskombination aus einer Ausgleichkupplung und einer drehelastischen Kupplung EP 0953782 B1. Europäische Patentschrift. Anmeldenummer: 99890099.7 Anmeldetag: 24.03.1999. Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung: 27.10.2004.
17. Ausgleichkupplung. EP 1526299 A1. Europäische Patentanmeldung. Anmeldenummer: 04450186.4. Anmeldetag: 06.10.2004. Veröffentlichungstag: 27.04.2005.
18. Membrane compensating coupling and hole anchor connection. US 7677980 B2. United States Patent. Appl. No. 11/774612. Filed: 09.07.2007. Date of patent: 16.03.2010.
19. Каталог фирмы «GEISLINGER & Co»: «Couplings and Dampers». 2012. [GEISLINGER & Co catalogue, 2012].
20. Тисленко И.Н., Федонюк Н.Н., Ярцев Б.А. Влияние формы мембран на устойчивость при кручении упругой муфты из полимерных композиционных материалов // ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова». 2006. № 27(311). С. 126–135. [I. Tislenko, N. Fedonyuk, B. Yartsev. Effect of membrane shape upon torsional stability of elastic coupling made of polymeric composite materials // KSRC Transactions. 2006; 27(311): 126–35. (in Russian)].
21. Упругая торсионная муфта. Патент RU 2268414 C2. Российская Федерация № 2004103548/11: заявлено 03.02.2004; опубликовано 20.01.2006. Бюл. № 02. [Elastic torsional coupling. Patent RU 2268414 C2. Russian Federation No. 2004103548/11: application date February 03, 2004; publication date January 20, 2006, Bulletin No. 02. (in Russian)].
22. Композитная виброизолирующая соединительная муфта. Патент RU 2530915 C2. Российская Федерация № 2012135806/11: заявлено 21.08.2012; опубликовано 20.10.2014. Бюл. № 29. [Composite vibration-insulation coupling. Patent RU 2530915 C2. Russian Federation No. 2012135806/11: application date August 21, 2012; publication date October 20, 2014, Bulletin No. 29. (in Russian)].
23. Сборная композитная виброизолирующая соединительная муфта. Патент RU 2530929 C2. Российская Федерация № 2012135805/11: заявлено 21.08.2012; опубликовано 20.10.2014. Бюл. № 29. [Compound composite vibration-insulation coupling. Patent RU 2530929 C2. Russian Federation No. 2012135805/11:

- application date August 21, 2012; publication date October 20, 2014, Bulletin No. 29. (in Russian)].
24. *Полилов А.Н.* Экспериментальная механика композитов. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. [*A. Polilov.* Experimental mechanics of composites. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2015. (in Russian)].
 25. *Полилов А.Н.* Этюды по механике композитов. М.: Физматлит, 2016. [*A. Polilov.* Essays on mechanics of composites. Moscow: Fizmatlit, 2016. (in Russian)].
 26. *Амбарцумян С.А.* Общая теория анизотропных оболочек. М.: Наука, 1974. [*S. Ambartsumyan.* General theory of anisotropic shells. Moscow: Nauka, 1974. (in Russian)].
 27. *Амбарцумян С.А.* Теория анизотропных пластин. М.: Наука, 1987. [*S. Ambartsumyan.* Anisotropic plate theory. Moscow: Nauka, 1987. (in Russian)].
 28. *Григолюк Э.И., Чулков П.П.* Устойчивость и колебания трехслойных оболочек. М.: Машиностроение, 1973. [*E. Grigolyuk, P. Chulkov.* Stability and vibrations of three-layered shells. Moscow: Mashinostroyeniye, 1973. (in Russian)].
 29. *Болотин В.В., Новичков Ю.Н.* Механика многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1980. [*V. Bolotin, Yu. Novichkov.* Mechanics of multilayered structures. Moscow: Mashinostroyeniye, 1980. (in Russian)].
 30. *Палий О.М., Спиро В.Е.* Анизотропные оболочки в судостроении. Л.: Судостроение, 1977. [*O. Paliy, V. Spiro.* Anisotropic shells in shipbuilding. Leningrad: Sudostroyeniye, 1977. (in Russian)].
 31. *Рассказов А.О., Соколовская И.И., Шульга Н.А.* Теория и расчет слоистых ортотропных пластин и оболочек. Киев: Вища школа, 1986. [*A. Rasskazov, I. Sokolovskaya, N. Shulga.* Theory and calculation of laminated orthotropic plates and shells. Kiev: Vysha shkola, 1986. (in Russian)].
 32. *Хорошун Л.П., Козлов С.В., Иванов Ю.А., Кошевой И.К.* Обобщенная теория неоднородных по толщине пластин и оболочек. Киев: Наукова думка, 1988. [*L. Horoshun, S. Kozlov, Yu. Ivanov, I. Koshevoy.* Generalized theory of thickness-heterogeneous plates and shells. Kiev: Naukova dumka, 1988. (in Russian)].
 33. *Баженов В.А., Сахаров А.С., Гондляр А.В., Мельников С.Л.* Нелинейные задачи механики многослойных оболочек. Киев: Издательство НИИ строительной механики, 1994. [*V. Bazhenov, A. Sakharov, A. Gondlyakh, S. Melnikov.* Non-linear problems in mechanics of laminated shells. Kiev: Publishing House of Structural Mechanics Research Institute, 1994. (in Russian)].
 34. *Родионова В.А., Титаев Б.Ф., Черных К.Ф.* Прикладная теория анизотропных пластин и оболочек. СПб.: Издательство СПбГУ, 1996. [*V. Rodionova, B. Titaev, K. Chernykh.* Applied anisotropic plates and shells theory. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State University, 1996. (in Russian)].
 35. *Reddy J.N.* Mechanics of laminated composite plates and shells. Second edition. CRC Press, 2004.
 36. *Hwu C.* Anisotropic elastic plates. Springer, 2010.
 37. *Lo K.H., Christensen R.M., Wu E.M.* A high order theory of plate deformation. Part 1. Homogeneous plates // Journal of applied mechanics. 1977; 44: 663–8.
 38. *Lo K.H., Christensen R.M., Wu E.M.* A high order theory of plate deformation. Part 2. Laminated plates // Journal of applied mechanics. 1977; 44: 669–76.
 39. *Векуа И.Н.* Некоторые общие методы построения различных вариантов теории пологих оболочек. М.: Наука, 1982. [*I. Vekua.* Some general construction methods for different variants of shallow shell theory. Moscow: Nauka, 1982. (in Russian)].
 40. *Гольденвейзер А.Л.* Теория упругих тонких оболочек. М.: Наука, 1976. [*A. Goldenweiser.* Theory of thin elastic shells. Moscow: Nauka, 1976. (in Russian)].
 41. *Тимошенко С.П.* К учету сдвига в дифференциальном уравнении поперечных колебаний призматических стержней / Тимошенко С.П. Статические и динамические проблемы теории упругости. Киев: Наукова думка, 1975. С. 56–57. [*S. Timoshenko.* On shear consideration in the differential equation for transverse vibrations of prismatic rods in S. Timoshenko. Static and dynamic problems of elasticity theory. Kiev: Naukova Dumka, 1975: 56–7. (in Russian)].
 42. *Reissner E.* The effect of transverse-shear deformation on the bending of elastic plates // Journal of applied mechanics. 1945; 12(2): 69–77.
 43. *Муштару Х.М.* Теория изгиба плит средней толщины // Известия АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение. 1959. № 2. С. 107–113. [*Kh. Mushtari.* Bending theory of medium-thickness plates // Izvestiya AN SSSR. OTN Mekhanika i mashinostroyeniye (Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Technical Sciences. Mechanics and engineering). 1959; 2: 107–13. (in Russian)].
 44. *Григолюк Э.И., Коган Ф.А.* Современное состояние теории многослойных оболочек // Прикладная механика. 1972. Т. 8. № 6. С. 3–17. [*E. Grigolyuk, F. Kogan.* Current status of multi-layered shell theory // Prikladnaya Mekhanika (International Applied Mechanics). 1972; 8(6): 3–17. (in Russian)].
 45. *Дудченко А.А., Лурье С.А., Образцов И.Ф.* Анизотропные многослойные пластины и оболочки // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Серия: Механика деформируемого твердого тела. 1983. Т. 15. С. 3–68. [*A. Dudchenko, S. Lurie, I. Obratsov.* Anisotropic multi-layered plates and shells // Itogi nauki i tekhniki (Achievements in science and technology). VINITI. Series: Mechanics of deformable solid body. 1983; 15: 3–68. (in Russian)].
 46. *Альтенбах Х.* Основные направления теории многослойных тонкостенных конструкций. Обзор // Механика композитных материалов. 1998. Т. 34. № 3.

- C. 333–348. [H. Altenbach. Main fields of layered thin-walled structures theory. Review // *Mekhanika kompozitnykh materialov* (Mechanics of composite materials). 1998; 34(3): 333–48. (in Russian)].
47. *Капанья П.К., Ратичи С.* Последние достижения в исследовании слоистых балок и пластин. Часть I. Влияние сдвигов и устойчивость // *Аэрокосмическая техника*. 1990. № 5. С. 43–57. [R.K. Kapania, S. Raciti. Recent advances in analysis of laminated beams and plates. Part I-Shear effects and buckling // *Aerokosmicheskaya Tekhnika* (Russian translation of AIAA Journal). 1990; 5(43–57)].
48. *Капанья П.К., Ратичи С.* Последние достижения в исследовании слоистых балок и пластин. Часть II. Колебания и распространение волн // *Аэрокосмическая техника*. 1990. № 5. С. 58–73. [R.K. Kapania, S. Raciti. Recent advances in analysis of laminated beams and plates. Part II: Vibrations and wave propagation // *Aerokosmicheskaya Tekhnika* (Russian translation of AIAA Journal). 1990; 5: 58–73].
49. *Sayyad A.S., Ghugal Y.M.* On the free vibration analysis of laminated composite and sandwich plates: a review of recent literature with some numerical results // *Composite Structures*. 2015; 129: 177–201.
50. *Васильев В.В.* Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. [V. Vasilyev. Mechanics of composite structures. Moscow: Mashinostroyeniye, 1988. (in Russian)].
51. *Голушко С.К., Немировский Ю.В.* Прямые и обратные задачи механики упругих композитных пластин и оболочек вращения. М.: Физматлит, 2008. [S. Golushko, Yu. Nemirovsky. Direct and inverse mechanical problems for elastic composite plates and shells-of-revolution. Moscow: Fizmatlit, 2008. (in Russian)].
52. *Сухинин С.Н.* Прикладные задачи устойчивости многослойных композитных оболочек. М.: Физматлит, 2010. [S. Sukhinin. Applied problems on stability of multi-layered composite shells. Moscow: Fizmatlit, 2010. (in Russian)].
53. *Баженов В.А., Кривенко О.П., Соловей Н.А.* Нелинейное деформирование и устойчивость упругих оболочек неоднородной структуры. Модели, методы, алгоритмы, малоизученные и новые задачи. М.: Книжный дом «Либроком», 2013. [V. Bazhenov, O. Krivenko, N. Solovey. Non-linear straining and stability of elastic shells with heterogeneous structure. Model, methods, algorithms, little-explored and new challenges. Moscow: Knizhny Dom Librokom, 2013. (in Russian)].
54. *Каледин В.О., Аульченко С.М., Миткевич А.Б., Решетникова Е.В., Седова Е.А., Шпакова Ю.В.* Моделирование статики и динамики оболочечных конструкций из композиционных материалов. М.: Физматлит, 2014. [V. Kaledin, S. Aulchenko, A. Mitkevich, Ye. Reshetnikova, Ye. Sedova, Yu. Shpakova. Static and dynamic simulation of composite shells. Moscow: Fizmatlit, 2014. (in Russian)].
55. *Соломонов Ю.С., Георгиевский В.П., Недбай А.Я., Андриюшин В.А.* Методы расчета цилиндрических оболочек из композиционных материалов. М.: Физматлит, 2009. [Yu. Solomonov, V. Georgievsky, A. Nedbay, V. Andryushin. Calculation methods for cylindrical composite shells. Moscow: Fizmatlit, 2009. (in Russian)].
56. *Соломонов Ю.С., Георгиевский В.П., Недбай А.Я., Андриюшин В.А.* Прикладные задачи механики композитных цилиндрических оболочек. М.: Физматлит, 2014. [Yu. Solomonov, V. Georgievsky, A. Nedbay, V. Andryushin. Applied problems of mechanics for cylindrical composite shells. Moscow: Fizmatlit, 2014. (in Russian)].
57. *Лехницкий С.Г.* Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977. [S. Lekhnitsky. Anisotropic body elasticity theory. Moscow: Nauka, 1977. (in Russian)].
58. *Черных К.Ф.* Введение в анизотропную упругость. М.: Наука, 1988. [K. Chernykh. Anisotropic elasticity: An Introduction. Moscow: Nauka, 1988. (in Russian)].
59. *Rand O., Rovenski V.* Analytical methods in anisotropic elasticity with symbolic computational tools. Boston, Basel, Berlin: Birkhauser, 2005.
60. *Кузьмин М.А., Лебедев Д.Л., Попов Б.Г.* Расчеты на прочность многослойных композитных конструкций. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. [M. Kuzmin, D. Lebedev, B. Popov. Strength calculations of multi-layered composite structures. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2012. (in Russian)].
61. *Басов К.А.* Справочник пользователя ANSYS. М.: КомпьютерПресс, 2002. [Basov K.A. Handbook of ANSYS users. Moscow: ComputerPress, 2002. (In Russian)].
62. *Рабинович А.Л.* Введение в механику армированных полимеров. М.: Наука, 1970. [Rabinovich A.L. Introduction into mechanics of reinforced polymers. Moscow: Nauka, 1970. (in Russian)].
63. *Ляв А.* Математическая теория упругости. М. – Л.: ОНТИ, 1935. [A.E.H. Love. A treatise on the mathematical theory of elasticity. Moscow – Leningrad: ONTI, 1935. (in Russian)].
64. *Лурье А.И.* Нелинейная теория упругости. М.: Наука, 1980. [A. Lurie. Non-linear elasticity theory. Moscow: Nauka, 1980. (in Russian)].
65. *Новожилов В.В.* Основы нелинейной теории упругости. М.: Едиториал УРСС, 2003. [V. Novozhilov. Fundamentals of non-linear elasticity theory. Moscow: Editorial URSS, 2003. (in Russian)].
66. *Тисленко И.Н., Федонюк Н.Н., Ярцев Б.А.* Расчетно-экспериментальное исследование виброакустических характеристик упругой соединительной муфты из полимерных композиционных материалов // *Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова*. 2006. № 30(314).

- C. 58–71. [*I. Tislenko, N. Fedonyuk, B. Yartsev*. Analytical & experimental study on vibroacoustic performance of elastic coupling made of polymeric composite materials // *KSRC Transactions*. 2006; 30(314): 58–71. (in Russian)].
67. *Лысенко А.П., Ярцев Б.А.* Упругие вибропоглощающие соединительные муфты из полимерных композиционных материалов. 1. Конструкции, нагрузки, материалы // *Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова*. 2013. Вып. 75(359). С. 51–60. [*A. Lysenko, B. Yartsev*. Polymer composite vibration-absorbing elastic clamping couplings. 1. Structures, loads, materials // *KSRC Transactions*. 2013; 75(359): 51–60. (in Russian)].
68. *Лысенко А.П., Ярцев Б.А.* Упругие вибропоглощающие соединительные муфты из полимерных композиционных материалов. 2. Алгоритмы расчета упруго-диссипативных характеристик и прочности // *Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова*. 2013. Вып. 76(360). С. 71–78. [*A. Lysenko, B. Yartsev*. Elastic vibration absorbing couplings made of polymer composites. Part 2. Algorithms for estimation of elastic / dissipative characteristics and strength // *KSRC Transactions*. 2013; 76(360): 71–8. (in Russian)].
69. *Лысенко А.П., Ярцев Б.А.* Упругие вибропоглощающие соединительные муфты из полимерных композиционных материалов. 3. Верификация алгоритмов расчета диссипативно-жесткостных характеристик и прочности // *Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова*. 2014. Вып. 83(367). С. 81–88. [*A. Lysenko, B. Yartsev*. Elastic vibration-absorbing couplings made of polymeric composites. 3. Verification of calculation algorithms for dissipation & stiffness parameters and strength // *KSRC Transactions*. 2014; 83(367): 81–8. (in Russian)].
70. *Лысенко А.П.* Упругие виброизолирующие соединительные муфты из полимерных композиционных материалов // *Машиностроение и инженерное образование*. 2015. № 2. С. 2–8. [*A. Lysenko*. Elastic vibration-insulating couplings made of polymeric composites // *Mashinostroyeniye i inzhenernoye obrazovanie (Engineering and education of engineers)*. 2015; 2: 2–8. (in Russian)].
71. *Лысенко А.П.* Сборная композитная упругая муфта с повышенным вибропоглощением // *Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова*. 2017. Вып. 1(379). С. 81–88. [*A. Lysenko*. Built-up composite elastic coupling with enhanced vibration absorption // *KSRC Transactions*. 2017; 1(379): 81–8. (in Russian)].
72. *Левин В.А.* Нелинейная вычислительная механика прочности. Т. 1. Модели и методы. Образование и развитие дефектов. М.: Физматлит, 2015. [*V. Levin*. Non-linear computational strength mechanics. Vol. I. Models and methods. Generation and development of defects. Moscow: Fizmatlit, 2015. (in Russian)].
73. *Нарисава И.* Прочность полимерных материалов. М.: Химия, 1987 [*I. Narisawa*. Strength of polymer materials. Moscow: Khimiya Publishers, 1987. (in Russian)].
74. *Зуев Л.Б., Данилов В.И.* Физические основы прочности материалов. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2013. [*L. Zuev, V. Danilov*. Physical fundamentals for strength of materials. Dolgoprudny: Publishing House Intellect, 2013. (in Russian)].
75. *Бобрышев А.Н., Ерофеев В.Т., Козомазов В.Н.* Полимерные композиционные материалы. М.: АСВ, 2013. [*A. Bobryshev, V. Yerofeev, V. Kozomazov*. Polymeric composite materials. Moscow: ASV, 2013. (in Russian)].
76. *Фудзии Т., Дзакко М.* Механика разрушения композиционных материалов. М.: Мир, 1982. [*T. Fuji, M. Dzako*. Failure Mechanics of Composite Materials. Moscow: Mir, 1982. (in Russian)].
77. *Васильев В.В., Тарнопольский Ю.М.* Композиционные материалы. Справочник. М.: Машиностроение, 1990. [*V. Vasilyev, Yu. Tarnopolsky*. Composite materials. Reference book. Moscow: Mashinostroyeniye, 1990. (in Russian)].
78. *Пэйгано Н.* Межслойные эффекты в композитных материалах. М.: Мир, 1993. [*N.J. Pagano*. Interlaminar Response of Composite Materials. Moscow: Mir, 1993. (in Russian)].
79. *Работнов Ю.Н.* Введение в механику разрушения. М.: Книжный дом «Либроком», 2009. [*Yu. Rabotnov*. Introduction to failure mechanics. Moscow: Knizhnyy Dom Librokom, 2009. (in Russian)].
80. *Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Попов Б.Г.* Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1984. [*N. Alfutov, P. Zinovyev, B. Popov*. Calculation of multilayered plates and shells made of polymeric composites. Moscow: Mashinostroyeniye, 1984. (in Russian)].
81. *Jones R.M.* Mechanics of composite materials. Second edition. UK: Taylor & Francis, 1999.
82. *Розен Б., Кулкарни С., Мак-Лафлин П.* Механизмы усталости и потери несущей способности в слоистых композитах / Неупругие свойства композиционных материалов. М.: Мир, 1978. С. 33–103. [*Rosen B.W., Kulkarni S.V., McLaughlin P.V.* Failure and Fatigue Mechanisms in Composite Materials. Inelastic Behaviour of Composite Materials. Moscow: Mir, 1978: 33–103. (Russian translation)].
83. *Ашкенazi Е.К., Ганов Э.В.* Анизотропия конструкционных материалов. Л.: Машиностроение, 1972. [*Ye. Ashkenazi, E. Ganov*. Anisotropy of structural materials. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1972. (in Russian)].
84. *Ву Э.М.* Феноменологические критерии разрушения анизотропных сред. Композиционные материалы. Т. 2. Механика композиционных материалов. М.: Мир, 1978. С. 401–491. [*E.M. Wu*. Phenomenological criteria of fracture of anisotropic environments. Vol. 2.

- The mechanics of composite materials. Moscow: Mir, 1978: 401–91. (in Russian)].
85. Винсон Ж.П., Сураковский П.Л. Поведение конструкций из композитных материалов. М.: Металлургия, 1991. [J. Vinson, R. Sierakowski. The Behaviour of Structures Composed of Composite Materials. Moscow: Metallurgiya, 1991. (in Russian)].
 86. Tuttle M.E. Structural analysis of polymeric composite materials. CRC Press, 2006.
 87. Kaw A.K. Mechanics of composite materials. Second edition. UK: Taylor & Francis, 2006.
 88. Lee D.G., Suh N.P. Axiomatic design and fabrication of composite structures: applications in robots, machine tools, and automobiles. UK: Oxford University Press, 2006.
 89. Voyiadjis G.Z., Kattan P.I. Mechanics of composite materials with MATLAB. Springer, 2005.
 90. Gay D., Hoa S.V., Tsai S.W. Composite materials. Design and applications. CRC Press, 2003.
 91. Camanho P.P., Davila C.G., Pinho S.T., Remmers J.J.C. Mechanical response of composites. Springer, 2008.
 92. Реслер И., Хардерс Х., Бекер М. Механическое поведение конструкционных материалов. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. [I. Roesler, J. Harders, M. Baeker. Mechanical Behaviour of Engineering Materials (Dolgoprudny: Publishing House Intellect, 2011. (in Russian)].
 93. Павлов П.А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность. Л.: Машиностроение, 1988. [P. Pavlov. Fundamentals of fatigue and long-term strength calculations of machine elements for engineers. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1988. (in Russian)].
 94. Adams D.F., Carlsson L.A., Pipes R.B. Experimental characterization of advanced composite materials. USA: CRC Press LLC, 2003.
 95. The application of fracture mechanics to polymers, adhesives and composites. Editor Moor D.R. Elsevier, 2004.
 96. Лавров А.В. Вариант метода ускоренного прогнозирования долговечности полимерных конструкционных материалов при различных режимах нагружения // Механика композиционных материалов и конструкций. 2004. Т. 10. № 4. С. 532–544. [A. Lavrov. A variant of express prediction method for service life of polymeric structural materials in different loading conditions // Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsii (Mechanics of composite materials and structures). 2004; 10(4): 532–44. (in Russian)].
 97. Damage and fracture of composite materials and structures. Editor Tamin M.N. Springer, 2012.
 98. Bert C.W. Composite materials: a survey of damping capacity of fiber reinforced composites // Damping Applications for Vibration Control. ASME AMD-38. 1980: 53–63.
 99. Gibson R.F. Dynamic mechanical properties of advanced composite materials and structures: a review // Shock & Vibration Digest. 1987; 19(7): 13–22.
 100. Зиновьев П.А., Ермаков Ю.Н. Характеристики рассеяния энергии при колебаниях в элементах конструкций из волокнистых композитов (обзор). М.: ЦНИИ научно-техн. информации. 1989. [P. Zinovyev, Yu. Yermakov. Energy dissipation parameters for structural vibrations of fibrous composites. Review. Moscow: Central Research Institute of Scientific & Technical Information, 1989. (in Russian)].
 101. Benchechou B., Coni M., Howarth H., White R. Some aspects of vibration damping improvement in composite materials // Composites. Part B: Engineering. 1998; 29B: 809–17.
 102. Chandra R., Singh S.P., Gupta K. Damping studies in fiber-reinforced composites – a review // Composite Structures. 1999; 46: 41–51.
 103. Finegan I.C., Gibson R.F. Recent research on enhancement of damping in polymer composites // Composite Structures. 1999; 44(2–3): 89–98.
 104. Treviso A., Van Genechten B., Mundo D., Tournour M. Damping in composite materials: properties and models // Composites: Part B. 2015; 78: 144–52.
 105. Рябов В.М., Ярцев Б.А. Собственные затухающие колебания композитных конструкций // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1. Математика, механика, астрономия. 2012. Вып. 4. С. 32–38. [V. Ryabov, B. Yartsev. Natural decaying vibrations of composite structures // Vestnik of St. Petersburg University, Series 1. Mathematics, mechanics, astronomy. 2012; 4: 32–8. (in Russian)].
 106. Berthelot J-M. Damping analysis of orthotropic composites with interleaved viscoelastic layers: modeling // Journal of Composite Materials. 2006; 40(21): 1889–909.
 107. Berthelot J-M., Sefrani Y. Damping analysis of unidirectional glass fiber composites with interleaved viscoelastic layers: experimental investigation and discussion // Journal of Composite Materials. 2006; 40(21): 1911–32.
 108. Hao M. Vibration, damping. Analysis of a sandwich beam containing a viscoelastic constraining layer // Journal of Composite Materials. 2005; 39(18): 1621–43.
 109. Rao M., Echempati R., Nadella S. Dynamic analysis and damping of composite structures embedded with viscoelastic layers // Composites. Part B: Engineering. 1997; 28(5–6): 547–54.
 110. Chen Q., Levy C. Vibration analysis and control of flexible beam by using smart damping structures // Composites. Part B: Engineering. 1999; 30(4): 395–406.
 111. Ganapathi M., Patel B., Boisse P., Polit O. Flexural loss factors of sandwich and laminated composite beams using linear and nonlinear dynamic analysis // Composites. Part B: Engineering. 1999; 30(3): 245–56.
 112. Fotsing E., Sola M., Ross A., Ruiz E. Lightweight damping of composite sandwich beams: experimental

- analysis // Journal of Composite Materials. 2012; 47(12): 1501–11.
113. Meaud J., Sain T., Hulbert G., Waas A. Analysis and optimal design of layered composites with high stiffness and high damping // International Journal of Solids and Structures. 2013; 50(9): 1342–53.
 114. Rao M. Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes // Journal of Sound and Vibrations. 2003; 262(3): 457–74.
 115. Botelho E., Campos A., de Barros E., Pardini L., Rezende M. Damping behavior of continuous fiber/metal composite materials by the free vibration method // Composites. Part B: Engineering. 2005; 37(2–3): 255–63.
 116. Youzera H., Meftah S., Challamel N., Tounsi A. Non-linear damping and forced vibration analysis of laminated composite beams // Composites. Part B: Engineering. 2012; 43(3): 1147–54.
 117. Moita J., Martins P., Mota Soares C. Optimal dynamic control of laminated adaptive structures using a higher order model and a genetic algorithm // Computer and Structures. 2008; 86(3–5): 198–206.
 118. Gibson R. A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures // Composite Structures. 2010; 92(12): 2793–810.
 119. Zhang R-x, Ni Q.-Q., Masuda A., Yamamura T., Iwamoto M. Vibration characteristics of laminated composite plates with embedded shape memory alloys // Composite Structures. 2006; 74(4): 389–98.
 120. Ni Q.-Q., Zhang R-x, Natsuki T., Iwamoto M. Stiffness and vibration characteristics of SMA/ER3 composites with shape memory alloy short fibers // Composite Structures. 2007; 79(4): 501–7.
 121. Zhou X.Q., Yu D.Y., Shao X.Y., Zhang S.Q., Wang S. Research and applications of viscoelastic vibration damping materials: a review // Composite Structures. 2016; 136: 460–80.
 122. Kerwin E. Damping of flexural waves by a constrained viscoelastic layer // Journal of Acoustical Society of America. 1959; 3(7): 952–62.
 123. Ungar E. Loss factors of viscoelastically damped beam structures // Journal of Acoustical Society of America. 1962; 34(8): 1082–9.
 124. Чернышев В.М. Демпфирование колебаний механических систем покрытиями из полимерных материалов. М.: Наука, 2004. [V. Chernyshev. Vibration damping in mechanical systems by means of polymeric coatings. Moscow: Nauka, 2004. (in Russian)].
 125. Li J., Narita Y. Analysis and optimal design for the damping property of laminated viscoelastic plates under general edge conditions // Composites. Part B: Engineering. 2013; 45(1): 972–80.
 126. Ray D., Bose N., Mohanty A., Misra M. Modification of the dynamic damping behaviour of jute/vinylester composites with latex interlayer // Composites. Part B: Engineering. 2007; 38(3): 380–5.
 127. Дмитриева А.М., Лысенко А.П., Ярцев Б.А. Простейший подход к определению диссипативных характеристик ортотропных композитных тонкостенных стержней замкнутого профиля // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2012. Вып. 66(350) С. 13–32. [A. Dmitrieva, A. Lysenko, B. Yartsev. A simplest approach to determination of dissipation parameters for closed-profile orthotropic composite thin-walled rods // KSRC Transactions. 2012. 66(350):13–32. (in Russian)].
 128. Армашев К.И., Паршина Л.В., Ярцев Б.А. Диссипативные свойства неоднородных композитных структур // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2016. Вып. 94(378). С. 47–64. [K.I. Armashev, L.V. Parshina, B.A. Yartsev. Dissipative properties of inhomogeneous composite structures // KSRC Transactions. 2016; 94(378); 47–64. (in Russian)].
 129. Shaposhnikov V.M., Yartsev B.A. Restructuring vibration absorption // Naval Architect. May 2016: 77–9.
 130. Кристенсен П. Введение в механику композитов. М.: Мир, 1982. [R. Christensen. Mechanics of Composite Materials. Moscow: Mir, 1982. (in Russian)].
 131. Кристенсен П. Введение в теорию вязкоупругости. М.: Мир, 1974. [R. Christensen. Theory of Viscoelasticity: An Introduction. Moscow: Mir, 1974. (in Russian)].
 132. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел. М.: Наука, 1977. [Yu. Rabotnov. Elements of hereditary mechanics of solids. Moscow: Nauka, 1977. (in Russian)].
 133. Мейз Дж. Теория и задачи механики сплошных сред. М.: Книжный дом «Либроком», 2010. [G. Mase. Theory and Problems of Continuum Mechanics. Moscow: Knizhny Dom Librokom, 2010. (in Russian)].
 134. Вибрации в технике. Справочник. Т. 1. Колебания линейных систем / Под ред. В.В. Болотина. М.: Машиностроение, 1978. [Vibrations in engineering. Reference book. Volume 1. Vibrations of linear systems / Under editorship of V. Bolotin. Moscow: Mashinostroyeniye, 1978. (in Russian)].
 135. Рябов В.М., Ярцев Б.А. О методах вычисления коэффициентов механических потерь конструкций из полимерных композиционных материалов // Методы вычислений. 2001. Вып. 19. С. 180–188. [V. Ryabov, B. Yartsev. On calculation methods for mechanical loss factors of polymeric composite structures // Metody vychisleniy (Calculation methods). 2001; 19: 180–8. (in Russian)].
 136. Ni R.G., Adams R.D. The damping and dynamic moduli of symmetric laminated composite beams – theoretical and experimental results // Journal of Composite Materials. 1984; 18(3):104–21.
 137. Lin D.X., Ni R.G., Adams R.D. Prediction and measurement of the vibrational damping parameters of carbon and glass fibre-reinforced plastics plates // Journal of Composite Materials. 1984; 18(3):132–52.

138. *Зиновьев П.А., Ермаков Ю.Н.* Анизотропия диссипативных свойств волокнистых композитов // Механика композитных материалов. 1985. № 5. С. 816–825. [*P. Zinovyev, Yu. Yermakov.* Anisotropy of dissipation properties in fibrous composites // *Mekhanika kompozitnykh materialov* (Mechanics of Composite Materials). 1985; 5: 816–25. (in Russian)].
139. *Сараванос Д.А., Чамис С.С.* Механика демпфирования слоистых волокнистых композитов с учетом гидротермических эффектов // Аэрокосмическая техника. 1991. № 6. С. 37–45. [*D. Saravanos, C. Chamis.* Mechanics of Damping for Fiber Composite Laminates Including Hygro-Thermal Effects // *Aerokosmicheskaya Tekhnika* (Russian translation of AIAA Journal). 1991; 6: 37–45.]
140. *Saravanos D.A., Chamis C.C.* Unified micromechanics of damping for unidirectional and off-axis fiber composites // *Journal of Composite Technology & Research*. 1990; 12(1): 31–40.
141. *Saravanos D.A., Pereira J.M.* Effects of interply damping layers on the dynamic characteristics of composite plates // *AIAA Journal*. 1992; 30(12): 2906–913.
142. *Saravanos D.A.* Analysis of passive damping in thick composite structures // *AIAA Journal*. 1993; 31(8):1503–10.
143. *Saravanos D.A.* Integrated damping mechanics for thick composite laminates and plates // *Transactions of the ASME. Journal of Applied Mechanics*. 1994; 61(2): 375–83.
144. *Zinoviev P.A., Ermakov Y.N.* Energy dissipation in composite materials. Lancaster, USA: Technomic Publishing Co, 1994.
145. *Пелех Б.Л., Саяк Б.И.* Экспериментальные методы исследования динамических свойств композиционных структур. Киев: Наукова думка, 1990. [*B. Pelekh, B. Salyak.* Experimental methods for dynamic studies of composite structures. Kiev: Naukova dumka, 1990. (in Russian)].
146. *Рябов В.М., Ярцев Б.А.* Итерационный метод определения упругих и диссипативных характеристик полимерных композиционных материалов. Часть I. Теоретические основы // Вопросы материаловедения. 2000. № 2(22). С. 55–61. [*V. Ryabov, B. Yartsev.* Iterative calculation method for elastic and dissipative parameters of polymeric composites. Part I. Theoretical fundamentals // *Voprosy materialovedeniya* (Inorganic Materials: Applied Research). 2000; 2 (22): 55–61. (in Russian)].
147. *Рябов В.М., Ярцев Б.А.* Итерационный метод определения упругих и диссипативных характеристик полимерных композиционных материалов. Часть II. Минимизация экспериментальных погрешностей // Вопросы материаловедения. 2000. № 2(22) С. 61–70. [*V. Ryabov, B. Yartsev.* Iterative calculation method for elastic and dissipative parameters of polymeric composites. Part II. Mitigation of test errors // *Voprosy materialovedeniya* (Inorganic Materials: Applied Research). 2000; 2(22): 61–70. (in Russian)].
148. *Рябов В.М., Ярцев Б.А.* Итерационный метод определения упругих и диссипативных характеристик полимерных композиционных материалов. Часть III. Экспериментальная проверка // Вопросы материаловедения. 2000. № 2(22) С. 70–76. [*V. Ryabov, B. Yartsev.* Iterative calculation method for elastic and dissipative parameters of polymeric composites. Part III. Experimental verification // *Voprosy materialovedeniya* (Inorganic Materials: Applied Research). 2000; 2(22): 70–6. (in Russian)].

Сведения об авторах

Лысенко Александр Петрович, инженер 1 категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Телефон: 8 (812) 415-34-88. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.
Ярцев Борис Александрович, д.т.н., начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Телефон: 8 (812) 415-42-73. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

About the authors

Lysenko, Aleksandr P., Engineer 1st category, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-34-88. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.
Yartsev, Boris A., D. Sc., Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-42-73. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 15.02.18
Принята в печать / Accepted: 02.03.18
© Лысенко А.П., Ярцев Б.А., 2018