

УПРУГИЕ ВИБРОИЗОЛИРУЮЩИЕ СОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ МУФТЫ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.П. Лысенко

Разработана конструкция виброизолирующей соединительной муфты из полимерных композиционных материалов. Предлагается приближенный алгоритм прогнозирования диссипативных свойств композитных конструкций, позволяющий использовать возможности коммерческих программных комплексов, реализующих численные процедуры метода конечных элементов. Также показаны алгоритмы расчета характеристик прочности и устойчивости конструкции. Приводятся результаты численных исследований диссипативно-жесткостных характеристик и прочности виброизолирующей соединительной муфты.

Ключевые слова: материалы полимерные композиционные, муфта упругая, напряженно-деформированное состояние, прочность, диссипативно-жесткостные характеристики.

ELASTIC VIBRATION-ABSORBING COUPLING FROM POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS

A.P. Lysenko

The article introduces the design of the vibration-absorbing coupling made of composite materials and proposes an approximate algorithm of forecasting dissipative properties of composite structures which allows making use of commercial software packages based on numerical procedures of finite-element method. The algorithms for the calculation of structure's strength and stability are presented. The results of numerical investigation into dissipative-stiffness properties and strength of vibration-absorbing coupling are reported.

Keywords: polymer composite materials, elastic coupling, stress-strain state, strength, dissipative-stiffness characteristics.

Введение

Выбор полимерных композиционных материалов (ПКМ) в качестве основных материалов для изготовления виброизолирующих соединительных муфт (ВСМ) обусловлен их пониженной по сравнению с металлом жесткостью, а также возможностью варьирования деформативными свойствами за счет изменения структуры армирования и применения различных армирующих материалов. Отмеченные особенности ПКМ позволяют создавать конструкции муфт, удовлетворяющие основному, предъявляемому к ним требованию, вытекающему из функционального назначения, – максимальной деформативности во всех направлениях при обеспечении передачи заданного номинального крутящего момента. Кроме того,

использование ПКМ в конструкции упругой соединительной муфты открывает большие возможности для повышения ее вибропоглощающих свойств, поскольку по сравнению с металлами они обладают существенно более высокими демпфирующими свойствами (на 2–3 порядка). Приоритет создания упругих муфт из ПКМ принадлежит фирме «Geislinger», получившей в 1993 г. первый патент на такую конструкцию [1]. Начиная с 2002 г., в интересах отечественного судостроения ФГУП «Крыловский государственный научный центр» также выполняет работы по созданию аналогичных изделий [2, 3].

К недостаткам существующих композитных конструкций ВСМ относятся, в первую очередь довольно низкий уровень вибропоглощающих

характеристик. Максимальное значение коэффициента механических потерь не превышает величины $\eta_{\max} = 0,01$. Поэтому особую актуальность приобретает задача создания новых конструкций упругих муфт из ПКМ, отличающихся более высокими диссипативными характеристиками [4].

Целью данной работы являлось разработка алгоритмов расчета упруго-диссипативных характеристик и прочности ВСМ, а также проведение численных исследований влияния технологических и эксплуатационных факторов на указанные параметры.

Алгоритмы расчета диссипативно-жесткостных характеристик и прочности ВСМ

В настоящей работе рассматривается монолитная муфта из ПКМ (рис. 1), представляющая собой монококовую стеклопластиковую конструкцию, основными элементами которой являются мембраны (1), крепящиеся к металлическим контрфланцам, и промежуточный вал (2). Несущие элементы муфты (мембраны и промежуточный вал) изготовлены из армированного стеклопластика. На наружную поверхность промежуточного вала нанесен слой жесткого вибропоглощающего полимера (3).

Напряженно-деформированное состояние ВСМ, к которой приложены силовые (крутящий момент) и кинематические (взаимные линейные и угловые смещения мембран) воздействия, определяется путем последовательного решения ряда задач статической и динамиче-

ской линейной теории упругости. В расчетах на жесткость и прочность учитываются упругие и прочностные характеристики стеклопластика (принимается модель ортотропного материала) и вибропоглощающего материала, который рассматривается как изотропный материал. Расчеты проводились на основе метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе ANSYS. Прочность конструкции муфты считается обеспеченной, если в любой точке каждого слоя ПКМ выполняется критерий прочности Цая-Бу [5]. Устойчивость плоской формы равновесия мембран, находящихся под воздействием номинального крутящего момента M_T^{nom} , определяется из решения задачи на собственные значения.

Жесткостные характеристики упругой виброизолирующей соединительной муфты из ПКМ при осевом и поперечном смещениях, изгибе и кручении определяются из рассмотрения ее статического равновесия. Максимально допускаемые взаимные смещения мембран находятся для каждой комбинации воздействия номинального крутящего момента M_T^{nom} и взаимных смещений мембран в различных направлениях с последующей проверкой полученных напряжений на удовлетворение критерию прочности.

Расчет диссипативных свойств ВСМ, являющихся одним из важнейших показателей эффективности муфты, выполняется на основе модели комплексных модулей, описывающей затухающие гармонические колебания, в том числе и анизотропного линейного вязкоупругого тела. Следует особо отметить, что использование комплексных модулей подразумевает необходимость выполнения вычислений в комплексной области, т.е. поля перемещений, деформаций и напряжений становятся комплексными, что вызывает на первый взгляд непреодолимые затруднения для использования любого ныне существующего коммерческого программного комплекса, возможности которого ограничиваются вычислениями только в вещественной области. Более того, при использовании этого комплекса для расчета амплитудно-частотных характеристик конструкций необходимо задать величины коэффициента механических потерь η для каждой формы колебаний. Последнее требование достаточно легко выполнимо только в случае привлечения гипотезы пропорционального

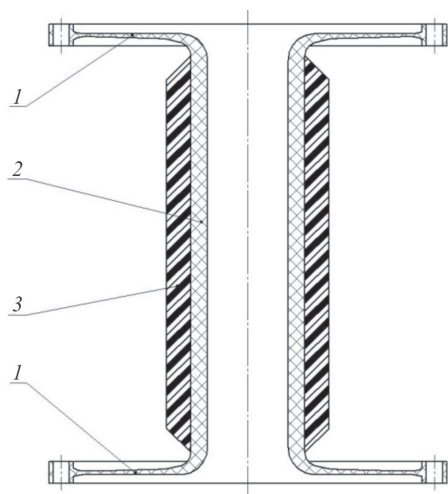


Рис. 1. Монолитная композитная ВСМ:

1 – мембрана; 2 – промежуточный вал;
3 – слой жесткого вибропоглощающего материала

демпфирования, которая не выполняется для анизотропных материалов. Для преодоления отмеченных затруднений предложен приближенный двухэтапный метод определения величин η виброизолирующей муфты из ПКМ, позволяющий воспользоваться вычислительными возможностями коммерческих программных комплексов [6].

На первом этапе определяются упруго-диссипативные характеристики силовых элементов муфты на основе использования предложенного в работе [6] приближенного подхода к определению диссипативных характеристик ортотропных композитных конструкций, позволяющего достаточно точно прогнозировать величины коэффициентов механических потерь всех форм колебаний при $\eta \leq 0,03 - 0,04$. Достоинством этого подхода является замена решения одной комплексной задачи решением двух вещественных задач. В начале, используя в качестве упругих характеристик ПКМ вещественные части комплексных модулей упругости $E_{ij} = \text{Re } E_{ij} + i \text{Im } E_{ij}$ и сдвига $G_{ij} = \text{Re } G_{ij} + i \text{Im } G_{ij}$ (индексы i, j соответствуют координатным осям x, y, z), выполняется расчет собственных колебаний недиссипативной механической системы:

$$(\mathbf{C} - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{u} = 0,$$

где $\mathbf{C}$ – матрица жесткости; $\mathbf{M}$ – матрица масс; $\mathbf{u}$ – собственный вектор; ω – круговая частота колебаний.

При этом определяются частоты f_k и формы n низших тонов собственных колебаний силовых элементов муфты. Полученные значения $f'_k = \text{Re } f_k$ ($k = 1, \dots, n$) идентифицируются как вещественные части комплексных собственных частот. Затем решается еще одна задача на собственные значения. Теперь в качестве упругих характеристик ПКМ используются мнимые части комплексных модулей упругости $\text{Im } E_{ij}$ и сдвига $\text{Im } G_{ij}$. Как и ранее, определяются частоты f_k и формы n низших тонов собственных колебаний силовых элементов муфты. Вычисленные значения $f''_k = \text{Im } f_k$ ($k = 1, \dots, n$) считаются мнимыми частями комплексных собственных частот.

Анализ собственных форм колебаний, полученных в результате решения двух задач на собственные значения, позволяет установить пары тождественных форм колебаний, в которых одна из форм соответствует вещественной

части комплексной собственной частоты f'_k , а вторая – мнимой части комплексной собственной частоты f''_k . Приближенное значение коэффициента механических потерь k -го тона колебаний силового элемента муфты вычисляются по формуле

$$\eta_k = \left(\frac{f''_k}{f'_k} \right)^2.$$

На втором этапе определяются величины коэффициентов механических потерь η всех форм колебаний упругой виброизолирующей муфты в целом. Из решения задачи на собственные значения средствами коммерческого программного комплекса вычисляются значения низших собственных частот колебаний конструкции f_m ($m = 1, \dots, n$). Причем рассматриваемый частотный диапазон должен содержать все формы колебаний муфты: продольные, поперечные, изгибные и крутильные. Затем, зная частотные диапазоны каждой формы колебаний, решается задача об установившихся вынужденных колебаниях диссипативной механической системы

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\mathbf{u} = \mathbf{F},$$

где $\mathbf{B}$ – матрица демпфирования; $\mathbf{F}$ – вектор нагрузки, переменной во времени; $\mathbf{u}$ – вектор перемещений; $\dot{\mathbf{u}}$ – вектор скоростей; $\ddot{\mathbf{u}}$ – вектор ускорений.

При этом строится амплитудно-частотная характеристика муфты на отрезке $[f_{m1}, f_{m2}]$, где f_{m1} и f_{m2} – левая и правая абсциссы амплитудно-частотной характеристики, соответствующие ординатам $A = 0,707 A_m$; A_m – максимальная амплитуда, соответствующая собственной частоте f_m .

Численное значение коэффициента механических потерь, соответствующий m -ой форме колебаний муфты, в целом вычисляется по формуле

$$\eta_m = \frac{\Delta f_m}{f_m} = \frac{f_{m2} - f_{m1}}{f_m}.$$

Численный эксперимент

На основе разработанных алгоритмов проведены численные исследования влияния эксплуатационных и технологических факторов, а также комбинированного приложения нагрузки на упруго-диссипативные характеристики и прочность монолитной композитной ВСМ.

Среди множества эксплуатационных факторов основное внимание уделено рассмотрению влияния температуры T на величины собственных частот колебаний ВСМ f_i и соответствующих этим частотам коэффициентов механических потерь η , поскольку известно, что упруго-диссипативные характеристики изотропного вибропоглощающего полимера являются функциями температуры и частоты колебаний, т.е.

$$E = \operatorname{Re} E(f, T) + i \cdot \operatorname{Im} E(f, T),$$

$$G = \operatorname{Re} G(f, T) + i \cdot \operatorname{Im} G(f, T),$$

$$\eta = \operatorname{Re} \eta(f, T) + i \cdot \operatorname{Im} \eta(f, T).$$

где E , G – модули продольной упругости и сдвига вибропоглощающего материала.

Учитывая, что температура стеклования вибропоглощающего полимера наружного слоя промежуточного вала существенно ниже температуры стеклования жестких слоев стеклопластика, можно заключить, что именно материал вибропоглощающего слоя и будет оказывать наибольшее влияние на изменение величины коэффициентов механических потерь ВСМ по мере повышения температуры эксплуатации. Исследование этого влияния на параметры динамического отклика конструкции выполнялось путем варьирования вещественных частей комплексного модуля упругости $\operatorname{Re} E$ и комплексного модуля сдвига $\operatorname{Re} G$ материала вибропоглощающего слоя при фиксированном значении коэффициента механических потерь. Подобный подход моделирует ряд материалов, различающихся между собой только температурой стеклования. Упругие и диссипативные характеристики материала несущих элементов ВСМ остаются неизменными. Результаты численных исследований, представленные на рис. 2, позволили установить существование области рационального отношения крутильных жесткостей силового и вибропоглощающего слоев промежуточного вала, обеспечивающего достижение максимального уровня рассеяния энергии при $E/E_0 \in [40; 1000]$. Экстремум функции коэффициента механических потерь крутильных колебаний ВСМ $\eta_T = 0,66$ наблюдается при значениях $E/E_0 \approx 300$ ($E_0 = 0,04$ ГПа – модуль упругости изотропного вибропоглощающего материала при температуре $T = 60^\circ\text{C}$ и частоте колебаний $f = 80$ Гц). Исследование проводилось при фиксированном значении относительной толщины вибропоглощающего

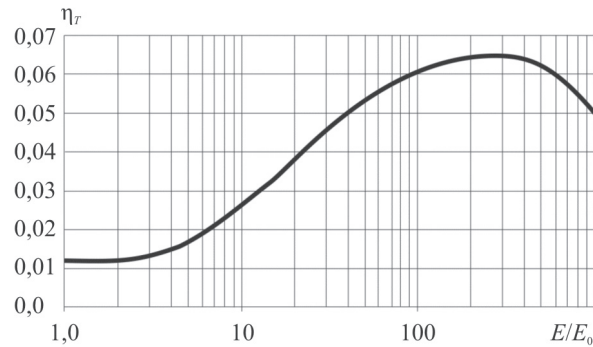


Рис. 2. Зависимость коэффициента механических потерь для первой крутильной формы колебаний η_T монолитной ВСМ от величины модуля упругости вибропоглощающего материала

материала $H/t = 1,5$ (H – толщина слоя вибропоглощающего материала, t – толщина силового элемента промежуточного вала) и величинах модуля упругости $E \in [0,04; 40]$ ГПа.

Помимо анализа влияния упругих характеристик вибропоглощающего материала на диссипативные свойства ВСМ, также исследовалось влияние относительной толщины слоя вибропоглощающего материала H/t на жесткостные характеристики муфты при фиксированном значении $E = 3$ ГПа. Для анализа результатов исследования влияния H/t введены относительные величины жесткостей ВСМ: крутильной $\bar{C}_T = C_T / C_{T0}$, осевой $\bar{C}_L = C_L / C_{L0}$, сдвиговой $\bar{C}_R = C_R / C_{R0}$ и изгибной $\bar{C}_B = C_B / C_{B0}$, где C_{T0} , C_{L0} , C_{R0} , C_{B0} – значения крутильной, осевой, сдвиговой и изгибной жесткостей при $H = 0$. Результаты такого анализа (рис. 3) позволяют отметить двукратное увеличение крутильной жесткости в диапазоне изменения относительной толщины $(H/t) \in [0,0; 3,0]$. При этом значения осевой (C_L), сдвиговой (C_R) и изгибной (C_B) жесткостей изменяются незначительно. Это обусловлено тем, что указанные жесткости определяются деформативностью мембран, на которых отсутствует слой вибропоглощающего материала.

Очевидно, что нанесение слоя вибропоглощающего полимера на поверхность силового элемента промежуточного вала будет сопровождаться изменением диссипативных свойств ВСМ. Выполненные численные исследования, результаты которых представлены на рис. 4, позволяют заключить, что для рассматриваемой конструкции эффективная относительная

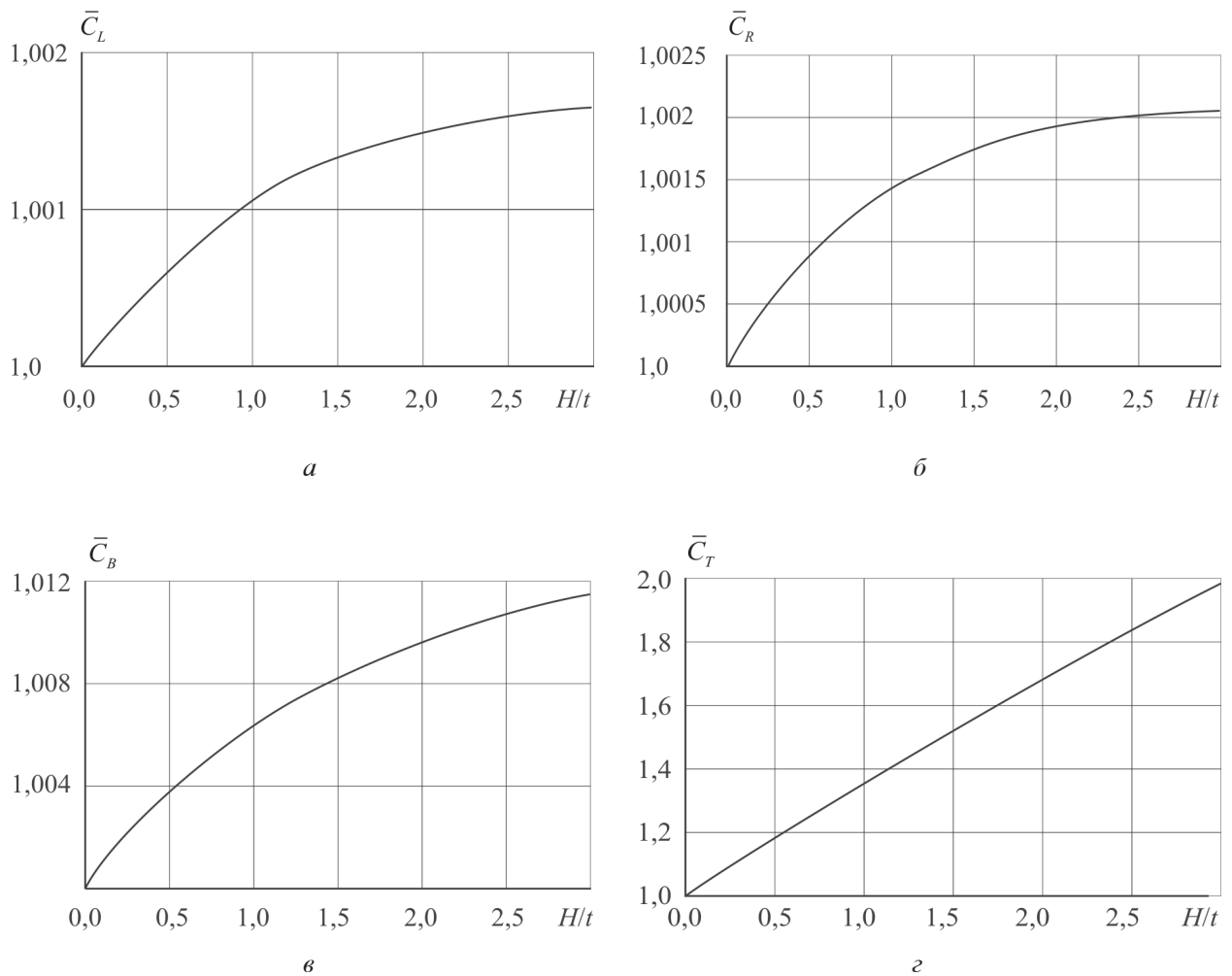


Рис. 3. Зависимости относительной осевой (а), изгибной (б), радиальной (сдвиговой) (в) и крутильной (г) жесткостей от относительной толщины слоя вибропоглощающего материала монолитной ВСМ

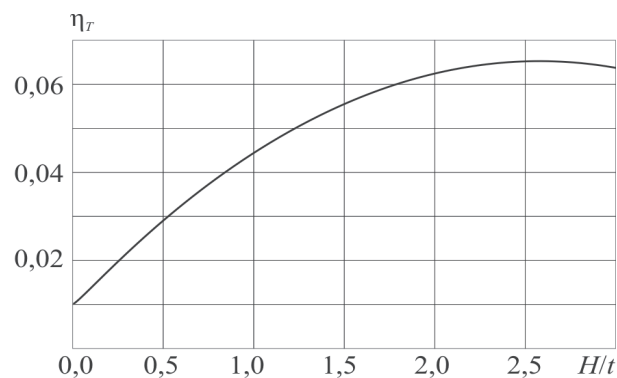


Рис. 4. Зависимость коэффициента механических потерь для первой моды крутильных колебаний ВСМ от относительной толщины слоя вибропоглощающего материала

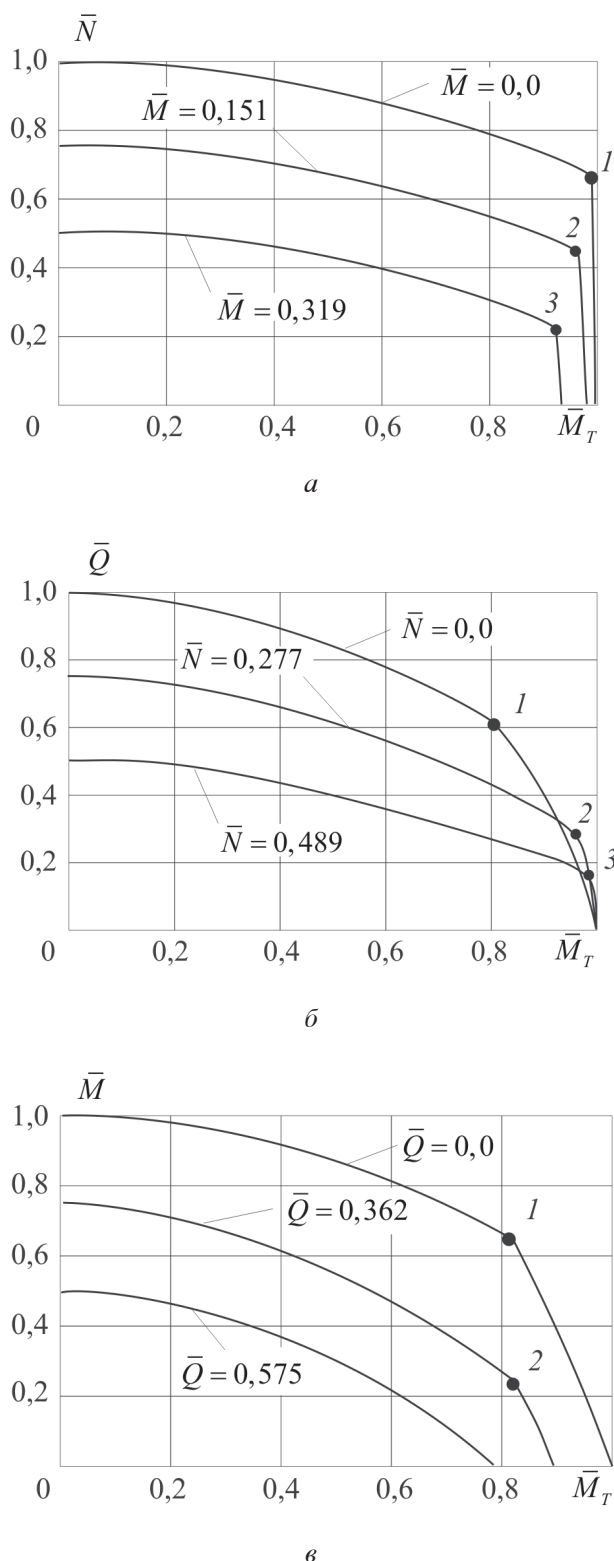


Рис. 5. Предельные нормированные зависимости для ВСМ:

а – $\bar{N}(\bar{M}_T)$ при фиксированных значениях изгибающего момента; б – $\bar{Q}(\bar{M}_T)$ при фиксированных значениях осевого усилия; в – $\bar{M}(\bar{M}_T)$ при фиксированных значениях поперечного усилия

толщина демпфирующего слоя составляет величину $H/t = 1,5$, так как дальнейшее ее повышение влечет за собой лишь незначительное увеличение значения коэффициента механических потерь η_r .

В эксплуатационных условиях муфта подвергается воздействию не только крутящего момента, но и более сложной комбинации нагрузок. Исследование влияния комбинированного приложения нагрузки на напряженно-деформированное состояние и прочность монолитной ВСМ проводилось путем численного решения задач для таких вариантов комбинированного нагружения конструкции: 1) крутящим M_T и изгибающим M моментами и осевым усилием N ; 2) крутящим моментом M_T , поперечным Q и осевым N усилиями; 3) крутящим M_T и изгибающим M моментами и поперечным усилием Q .

Результаты проведенного анализа (рис. 5) представлены для относительных величин действующих усилий и моментов:

$$\bar{N} = \frac{N}{N_{\text{пр}}}, \quad \bar{Q} = \frac{Q}{Q_{\text{пр}}},$$

$$\bar{M} = \frac{M}{M_{\text{пр}}}, \quad \bar{M}_T = \frac{M_T}{M_{T,\text{пр}}},$$

где $N_{\text{пр}}$, $Q_{\text{пр}}$, $M_{\text{пр}}$, $M_{T,\text{пр}}$ – предельные значения осевого и поперечного усилий, а также изгибающего и крутящего моментов соответственно, которые являются разрушающими для конструкции ВСМ.

Предельные усилия и моменты получены на основе критерия прочности Цая-Ву, в который подставлялись значения пределов прочности стеклопластика (учитывались различные пределы прочности материала на растяжение и сжатие).

Результаты приведены в виде предельных нормированных зависимостей: $\bar{N}(\bar{M}_T)$ при фиксированных величинах $\bar{M} = [0; 0,151; 0,319]$ (рис. 5, а); $\bar{Q}(\bar{M}_T)$ при фиксированных величинах $\bar{N} = [0; 0,277; 0,489]$ (рис. 5, б); $\bar{M}(\bar{M}_T)$ при фиксированных величинах $\bar{Q} = [0; 0,362; 0,575]$ (рис. 5, в).

Приведенные результаты численных исследований формируют поверхности предельных состояний для каждого случая комбинированного нагружения.

Анализ представленных на рис. 5 результатов показывает на существование смены

механизмов разрушения ВСМ. Об этом свидетельствуют разрывы второго рода на кривых $\bar{N}(\bar{M}_T)$, $\bar{Q}(\bar{M}_T)$, $\bar{M}(\bar{M}_T)$, помеченные точками 1, 2, 3. При нагружении ВСМ крутящим и изгибающим моментами и поперечным усилием, зависимость $\bar{M} = \bar{M}(\bar{M}_T)$ при величине $\bar{Q} = 0,575$ (см. рис. 5, в) представляет собой гладкую функцию, т.е. смены механизмов разрушения не происходит.

Заключение

Полученные кривые, описывающие поверхности предельного состояния виброизолирующей муфты, позволяют учесть характер влияния комбинированного нагружения на напряженно-деформированное состояние муфты. Анализ результатов численного исследования влияния вибропоглощающего материала на упруго-диссипативные характеристики конструкции муфты позволяет указать на область, в которой его величина дает наиболее эффективный прирост коэффициента механических потерь.

Следует отметить, что выполненные численные исследования диссипативно-жесткостных характеристик и прочности позволяют обоснованно подойти к выбору составов и структур армирования элементов конструкций виброизолирующих соединительных муфт из полимерных композиционных материалов, отличающихся от существующих прототипов повышенными диссипативными свойствами. Новизна предложенных технических решений подтверждена патентом Российской Федерации [7].

Список литературы

1. Федонюк Н.Н. Применение полимерных композиционных материалов в зарубежном кораблестроении // Обзор по материалам прессы 1990–2006 гг. СПб: Издательство

ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2009. – 114 с.

2. Тисленко И.Н., Федонюк Н.Н., Ярцев Б.А. Влияние формы мембран на устойчивость при кручении упругой муфты из полимерных композиционных материалов // Прочность и конструкция надводных судов из полимерных композиционных материалов // Сборник трудов ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова». 2006. № 27 (311). С. 126–135.
3. Тисленко И.Н., Федонюк Н.Н., Ярцев Б.А. Расчетно-экспериментальное исследование виброакустических характеристик упругой соединительной муфты из полимерных композиционных материалов // Корабельные средства акустической и радиолокационной защиты // Сборник трудов ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова». 2006. № 30 (314). С. 58–71.
4. Лысенко А.П., Ярцев Б.А. Упругие вибропоглощающие соединительные муфты из полимерных композиционных материалов. 1. Конструкции, нагрузки, материалы // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. Вып. 75 (359). С. 51–60.
5. Lee D.G., Suh N.P. Axiomatic design and fabrication of composite structures: applications in robots, machine tools, and automobiles. Oxford University Press. 2006. – 709 p.
6. Лысенко А.П., Ярцев Б.А. Упругие вибропоглощающие соединительные муфты из полимерных композиционных материалов. 2. Алгоритмы расчета упруго-диссипативных характеристик и прочности // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. Вып. 76 (360). С. 71–78.
7. Патент № 2530915 Российская Федерация. Композитная виброизолирующая соединительная муфта / Звиздун А.М., Лысенко А.П., Ярцев Б.А.; опубл. 20.08.2014 г.

Материал поступил в редакцию 13.02.15

ЛЫСЕНКО
Александр Петрович

E-mail: megovatt@yandex.ru
Тел.: 8-931-257-46-98

Инженер II категории отделения прочности и надежности конструкций Крыловского государственного научного центра г. Санкт-Петербург. Сфера научных интересов: диссипация в полимерных композиционных материалах. Автор 6 научных статей и двух изобретений.