

К вопросу проектирования балочного элемента на основе полимерных композиционных материалов с учетом ударных воздействий

© М.В. Астахов, Е.В. Славкина

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Калуга, 248000, Россия

Применение изделий из полимерных композиционных материалов — широко распространенный способ снижения массы конструкции и уменьшения опасности ее коррозионного разрушения. Одним из основных недостатков таких изделий является низкая стойкость к ударным нагрузкам. Рассмотрены преимущества и недостатки известных методов компенсации динамических нагрузжений деталей и узлов из полимерных композиционных материалов. Предложена конструкция многослойного адаптивного балочного элемента, содержащего внутренний слой упруговязкопластичной дилатантной жидкости — полисиликона в качестве прослойки переменной жесткости, повышающей стойкость к ударам. На основании проведенного лабораторного тестирования со статистической обработкой результатов определены механические характеристики полисиликона во время ударного нагружения (плотность, коэффициент Пуассона, модуль Юнга, модуль сдвига), построен график зависимости нормального напряжения от относительной продольной деформации. Предложена методика расчета на прочность адаптивного балочного элемента с внутренней прослойкой из полисиликона при ударных воздействиях.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, ударная стойкость, дилатантная жидкость, адаптивный балочный элемент

Введение. Широкое распространение изделий на основе полимерных композиционных материалов (ПКМ) в области машиностроения обусловлено возможностью модернизации, замены ими стальных деталей, подверженных интенсивному износу, а также большей номенклатурой вновь изготавливаемых элементов. К основным преимуществам ПКМ относятся отсутствие коррозионного разрушения и значительное снижение массы изделия, что позволяет повысить надежность машины в целом.

В работах [1–3] рассмотрены узлы с внедренными в матрицу ПКМ стальными деталями, слоями армирующих тканей и нитей, порошковыми наполнителями, которые выступают в роли усиливающих элементов, повышающих прочность конструкции при действии статически приложенных нагрузок. Однако недостаточно изученным остается вопрос о применении изделий из ПКМ при кратковременных динамических нагрузках — ударах, вызывающих местную потерю устойчивости материала, которая характеризуется образованием белых «заломов» и полос на внешней части детали. Они свидетель-

ствуют о возникновении внутренних трещин и разрушении матрицы. Кроме того, описанные методы повышения прочности деталей не позволяют компенсировать последствия ударов и не обеспечивают самовосстановление формы после удара, а металлические элементы, вводимые в матрицу, минимизируют одно из главных преимуществ ПКМ — коррозионную стойкость материала. Введение ультрадисперсных порошков бемита $Al(OOH)$ и корунда Al_2O_3 в покрытие внешнего слоя и матрицу на стадии изготовления композита, наряду с повышением поверхностной твердости, нередко вызывает снижение прочности. При деформировании матрицы микрочастицы введенных порошков играют роль концентраторов напряжений и становятся местом начала роста усталостных трещин [4].

В [5] предлагается использование «самовосстанавливающихся» композитов, способных при повреждении узла действующей нагрузкой или от внезапного кратковременного удара к «лечению» путем заполнения повреждений специальными веществами — восстановителями, находящимися в капсульных и сосудистых сетях, внедренных в слои конструкции. В настоящее время данный метод не получил широкого распространения ввиду сложности и высокой стоимости его реализации.

Одним из перспективных направлений в проектировании является разработка SMART-конструкций, способных адаптироваться к действующим нагрузкам различного типа [6, 7]. В таких конструкциях часто применяют элементы, выполненные из ПКМ.

Так, в [8] авторами разработан универсальный SMART-элемент плоской стержневой системы, выполненный из ПКМ со стальными усиливающими деталями, закрепленными трансверсальными крепежными элементами (КЭ) в матрице. Элемент с помощью адаптеров реагирует на достаточно плавное изменение статически приложенных сил в состояниях растяжения, сжатия и изгиба, в результате чего в зонах перегрузки начинает выполняться неравенство $\sigma_p \leq \sigma_{adm}$ (σ_p — наблюдаемое максимальное рабочее напряжение, σ_{adm} — допускаемое напряжение). Компенсации ударных воздействий в предлагаемой конструкции SMART-элемента не рассматривалось.

Одним из перспективных решений проблемы снижения последствий ударов может стать использование дилатантных (упруговязкопластичных) неньютоновских жидкостей. Характерная особенность этих веществ — повышение кажущейся вязкости с возрастанием скорости сдвига, что позволяет им поглощать энергию динамических воздействий без изменения своего объема. В ненагруженном состоянии рассматриваемое вещество проявляет свойства густой жидкости, растекается и заполняет весь предоставленный объем.

Опыт применения неньютоновских жидкостей как слоя конструкции, способной поглощать удар, известен в военной промышленности для изготовления бронежилетов. Сочетание слоев таких жидкостей с кевларовыми пластинами не только позволяет эффективно поглощать энергию пули, но и не препятствует движению человека благодаря снижению средней толщины и веса жилета до 45 % по сравнению с классическими моделями [9, 10].

Цель исследования — разработка конструкции и методов расчета адаптивного балочного элемента, содержащего внутренний слой неньютоновской упруговязкопластичной жидкости, жесткость которой изменяется во времени при динамических нагрузениях в виде ударов.

Задачи: определение механических характеристик полисиликона в момент удара; разработка методов расчета описанного элемента.

Проектирование адаптивной конструкции. В продолжение работы [8] авторами разработана модель комбинированной многослойной адаптивной конструкции балочного элемента на основе ПКМ. Модель содержит внутренний слой — неньютоновскую упруговязкопластичную жидкость, которая повышает стойкость к кратковременным динамическим нагрузкам в виде ударов со стороны, имеющей большую площадь (рис. 1).

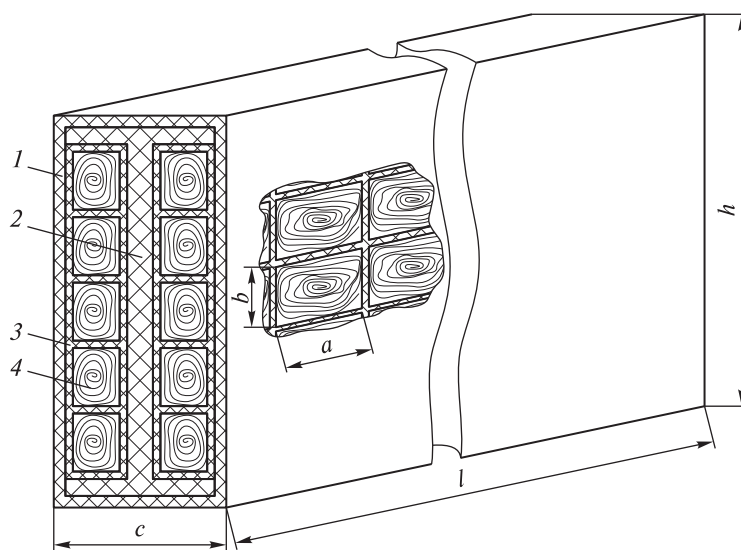


Рис. 1. Адаптивный балочный элемент:

1 — оболочка из ПКМ; 2 — двутавр на основе ПКМ; 3 — ячейка из ПКМ для заполнения неньютоновской жидкостью; 4 — неньютоновская жидкость — полисиликон

Рассматриваемый балочный элемент, у которого $l \gg c, h$, способен воспринимать наряду с изгибом, растяжением и сжатием ударные воздействия, ожидаемые в зонах боковин площадью $A = lh$.

Согласно результатам анализа литературы [9–12], в качестве противоударного слоя в конструкции может быть выбрана неньютоновская упруговязкопластичная жидкость — полисиликон, известная под коммерческим названием Silly Putty (SP). Она состоит из 65 % полидиметилсилоксана (PDMS), 17 % диоксида кремния (кристаллический кварц), 9 % тиксатрола ST (производное касторового масла), 4 % диметилсилоксана (гидрокси-концевой полимер с борной кислотой), 1 % глицерина и 1 % диоксида титана.

При исследовании поведения полисиликона под воздействием интенсивных кратковременных динамических нагрузок (ударов) было выявлено следующее:

- 1) в момент удара он превращается в твердое вещество;
- 2) при заключении в крупные прямоугольные ячейки достигается его большая стойкость к ударам по сравнению с результатами испытаний при наполнении этим веществом мелких сотовых элементов. Предположительно, это можно объяснить распрямлением при ударе длинных молекул полисиликона SP (чем больше объем вещества, тем длиннее молекулы), которые взаимодействуют друг с другом, как балки на упругом основании.

Для количественной оценки влияния прослойки полисиликона SP на эффективность работы конструкции SMART-элемента необходимо определить некоторые механические характеристики полисиликона SP в твердом состоянии, которые в известной литературе не встречались.

Исследование механических характеристик полисиликона SP. При эксплуатации SMART-элемент, представляющий собой комбинированную многослойную конструкцию на основе ПКМ, может подвергаться не только механическим, но и температурным воздействиям. Необходимым условием заполнения полостей полисиликоном SP является постоянство его объема и плотности вне зависимости от условий работы.

Плотность определяли пикнометрическим методом. Образец полисиликона SP помещали в пикнометр, наполненный жидкостью до заданной отметки, после чего лишняя жидкость выливалась до достижения той же отметки на шкале пикнометра. Проводили взвешивание пикнометра с жидкостью и пикнометра с жидкостью и образцом внутри. Температуру образца изменяли в пределах $+40...-25$ °С, что обусловлено применением конструкции для работы вне помещения.

На основании полученных данных и выполненной статистической обработки плотность полисиликона SP составила $1195,27$ кг/м³. Изменения объема при испытаниях в указанном диапазоне температур практически не наблюдалось.

При ударном воздействии полисиликон SP проявляет свойства твердого упругого вещества. В ненагруженном состоянии или при

действию постоянных нагрузок он растекается, как жидкость, что практически не влияет на способность конструкции воспринимать статически приложенные силы. Основной функцией упругой прослойки на основе полисиликона SP, возникающей в момент удара, является перераспределение энергии деформирования конструкции на соседние элементы. Поэтому необходимо знать механические характеристики полисиликона SP в момент удара.

Для их определения проведены серии испытаний со стальными шарами, свободно падающими с платформы высотой $h_1 = 0,15$ м на плоскую поверхность цилиндрического образца полисиликона. Масса m стальных шаров составляла 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1100 г.

Измерение поглощаемой энергии удара проводили с помощью пьезодатчика ЗП-3, подложенного под образец полисиликона и подключенного к осциллографу OWON sds6062.

В момент падения шара его кинетическая энергия mgh_1 передавалась с образца полисиликона на пьезодатчик, и на дисплее осциллографа отображалась кривая зависимости напряжения U от времени t . Энергию электрического поля можно определить по формуле

$$W_э = \frac{cU^2}{2}, \quad (1)$$

где c — емкость цепи пьезодатчик – осциллограф, Ф; U — напряжение цепи, В.

При ударе шаром о пьезодатчик без прослойки полисиликона измеряли напряжение электрического поля U' . Тогда разность напряжений $\Delta U = U' - U$ показывает приращение напряжения за счет изменения емкости пьезодатчика $c_{п}$ при условии, что емкость оставшейся части электрической цепи не меняется.

В результате формулу (1) можно представить в виде

$$W_э = \frac{c_{п}\Delta U^2}{2}. \quad (2)$$

Рассчитать работу внешних сил при ударе, равную энергии $W_{м}$ упругого деформирования цилиндра из полисиликона (без учета волнообразования), можно на основании известной формулы Клайперона без коэффициента 0,5, так как работа осуществляется за небольшой промежуток времени, т. е. она не является работой статически приложенных сил:

$$W_{м} = \int \frac{N^2 dl}{EA_{п}}, \quad (3)$$

где N — внутренняя продольная сила сжатия цилиндра из полисиликона SP, Н; l — длина цилиндра, м; E — модуль продольной

упругости (модуль Юнга) полисиликона во время удара, Па; $A_{\text{п}}$ — площадь поперечного сечения цилиндра из полисиликона, м^2 , $A_{\text{п}} = \frac{\pi d^2}{4}$ (здесь d — диаметр цилиндра).

Решив интеграл (3) как определенный или методом Симпсона, получим

$$W_{\text{м}} = \frac{l}{6EA_{\text{п}}} (N^2 + 4N^2 + N^2) = \frac{N^2 l}{EA_{\text{п}}}. \quad (4)$$

Приравняв механическую и электрическую составляющие энергии, получим модуль продольной упругости

$$E = \frac{N^2 l}{W_{\text{э}} A_{\text{п}}}. \quad (5)$$

При проведении испытаний в момент удара использовали замедленную съемку, в результате было измерено изменение диаметра и высоты цилиндрического образца полисиликона SP.

На основании (5) и известных формул теории упругости вычислены: модуль продольной упругости (модуль Юнга), относительная продольная и относительная поперечная деформации, коэффициент Пуассона, модуль сдвига, нормальное напряжение. Результаты представлены в таблице.

Выборочные результаты экспериментальных исследований образцов полисиликона SP

Масса груза m , г	Модуль продольной упругости E , МПа	$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$	$\varepsilon' = \frac{\Delta d}{d}$	Коэффициент Пуассона $\nu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}$	Модуль сдвига $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, МПа	Нормальное напряжение $\sigma = E\varepsilon$, МПа
5	0,9	0	0	0	0	0
10	0,4	0	0	0	0	0
20	1,3	0,016	0,015	0,938	0,34	0,02
50	4,8	0,026	0,025	0,962	1,22	0,12
100	9	0,035	0,040	1,143	2,09	0,32
200	13	0,042	0,050	1,190	2,97	0,55
500	14	0,052	0,060	1,154	3,25	0,73
1100	15	0,098	0,115	1,173	3,45	1,47

По данным таблицы построен график зависимости нормального напряжения от относительной продольной деформации в момент удара по формуле $\sigma = E\varepsilon$ (рис. 2). Начиная со значения $\varepsilon = 0,042$ зависимость $\sigma = f(\varepsilon)$ приобретает линейный характер. При массе падающего шара 1,1 кг модуль продольной упругости полисиликона (15 МПа) двукратно превышает значение для каучука и приблизительно равен модулю Юнга плотной резины с наполнителем из сажи.

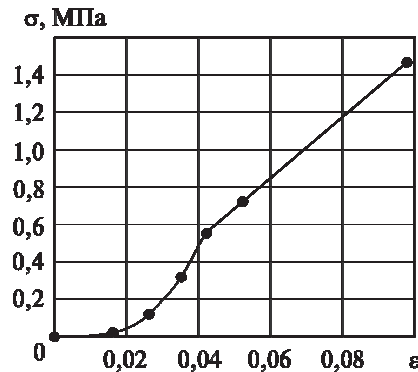


Рис. 2. График зависимости $\sigma = f(\varepsilon)$

Учет ударных воздействий при расчете SMART-элемента на прочность. Адаптивный балочный элемент (см. рис. 1) при статической нагрузке рассчитывается на прочность по известным формулам теории упругости.

При ударных воздействиях, направленных перпендикулярно боковой поверхности элемента площадью $A = lh$, можно рассмотреть два варианта расчетно-силовых схем (с учетом того, что в прямоугольной ячейке при ударе возникает упругая пластина полисиликона SP).

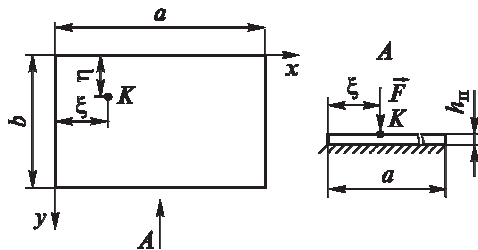


Рис. 3. Пластина полисиликона SP

на SP).

Первый вариант: пластина толщиной h_p имеет шарнирную опору по всему контуру, нагружена сосредоточенной силой F , приложенной в некоторой точке K с координатами ξ, η (точка приложения удара) (рис. 3).

Сила F вначале рассматривается как статически приложенная. Тогда, согласно [13], прогиб пластины

$$\omega = \frac{4F}{ab} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{m\pi\xi}{a} \sin \frac{n\pi\eta}{b}}{\pi^4 D \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) + k} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}, \quad (6)$$

где D — цилиндрическая жесткость, $D = \frac{Eh_p^3}{12(1-\nu^2)}$; k — коэффициент постели; h_p — толщина пластины.

Зная прогиб, достаточно просто определить напряжения, действующие в районе приложения силы F .

Второй вариант: на неограниченную пластину на упругом основании действует сосредоточенная сила F . Отсутствие граничных условий в данном случае можно объяснить тем, что при ударе полисиликон SP становится упругим, но в зоне контакта с композитной стенкой ячейки граничные условия не определены, более того, у него могут преобладать свойства жидкости.

Тогда максимальный прогиб в зоне удара

$$\omega_{\max} = \frac{F\lambda^2}{8k}, \quad (7)$$

где коэффициент $\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{D}}$.

Максимальное давление на упругое основание

$$p_{\max} = \frac{F}{8} \sqrt{\frac{k}{D}}. \quad (8)$$

На нижней поверхности пластины под точкой K (см. рис. 3) действует максимальное растягивающее напряжение. Если r — радиус круга, по площади которого равномерно распределена сила F , то

$$\sigma_{\max} = 0,275(1+\nu) \frac{F}{h_{\text{п}}^2} \lg \frac{Eh_{\text{п}}^3}{kf^4}, \quad (9)$$

где f — коэффициент,

$$f = \sqrt{1,6r^2 + h_{\text{п}}^2} - 0,675h_{\text{п}} \text{ при } r < 1,724h_{\text{п}},$$

$$f = r \text{ при } r > 1,724h_{\text{п}},$$

при $r = 0$ получим выражение для сосредоточенной силы.

Коэффициент постели k [14] вычисляется по моделям слоистого полупространства, причем для каждого слоя с номером необходимо рассчитать приведенный модуль продольной упругости:

$$E_{\text{пр}} = E \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}. \quad (10)$$

Коэффициент постели

$$k = \sum_{i=1}^n \frac{E_i(1-\nu_i)\gamma_i B_i^2}{2(1+\nu_i)(1-2\nu_i)} (1 - e^{-2\gamma_i k_i}), \quad (11)$$

где i — количество слоев; γ_i — коэффициент, $\gamma_i = \frac{4(1-2\nu_i)}{\sqrt{\pi A_p (1-\nu_i)^2}}$;

B_i — коэффициент, $B_i = \text{const}$ при $i=1$, $B_i = 1$ при $i > 1$,
 $B_i = B_{i-1} \exp[-(\gamma_i k_{i-1})]$; A_p — площадь опирания пластины, $A_p = ab$.

Найденные при статическом нагружении силой F прогибы ω и напряжения σ преобразуются при ударе, с учетом коэффициента динамичности k_d , в прогибы ω_d и напряжения σ_d :

$$w_d = k_d \omega; \sigma_d = k_d \sigma.$$

При падении груза с высоты h_1 на поверхность балочного элемента площадью $A = lh$ (см. рис. 1) сила F будет направлена перпендикулярно этой поверхности. Тогда

$$k_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h_1}{\omega}}.$$

В случае ударов, направленных под углом к поверхности $A = lh$, коэффициент динамичности k_d можно рассчитать через изменение кинетической энергии ударяющегося груза и пластины из полисиликона SP.

Заключение. Предложена конструкция адаптивного балочного элемента на основе полимерных композиционных материалов, содержащая в качестве внутренней прослойки упруговязкопластичную неньютоновскую жидкость — полисиликон SP. Такая конструкция способна выдерживать наряду со статически приложенными кратковременные динамические нагрузки в виде ударов.

Наибольшая стойкость элемента к ударам достигнута при расположении полисиликона SP в крупных прямоугольных ячейках. Внутри конструкции полисиликон SP необходимо располагать вплотную к упругому основанию, которым является каркас из ПКМ. Это условие обеспечит практически полный перевод кинетической энергии удара в энергию упругого деформирования слоя полисиликона SP.

Полученные механические характеристики полисиликона SP — плотность, коэффициент Пуассона, модуль Юнга, модуль сдвига — справедливы только в его упругом состоянии во время удара, в ненагруженном состоянии жидкость SP растекается по ячейке, и практически не влияет на сопротивление воздействию статически приложенных сил.

Проектирование адаптивного балочного элемента (см. рис. 1) следует проводить на основе расчета на боковые ударные воздействия путем включения в известные формулы теории упругости механических характеристик полисиликона SP, определенных выше.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Nesrin S.K., Yekta K., Huseyin O., Gokce O. Textile Reinforced Structural Composites for Advanced Applications. *Textiles for Advanced Applications. Chapter 4*. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.68245>
- [2] Pengfei L., Qilin Z., Jinchun L., Haosen C. Research on the mechanical properties of a glass fiber reinforced polymer-steel combined truss structure. *Scientific World Journal*, vol. 2014, 13 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/309872>
- [3] Valasek P., Kejval J., Muller M. Epoxy resin filled with primary and secondary raw material — useable in agriculture. *Research in Agricultural Engineering*, 2014, vol. 60 (4), pp. 165–171. <https://doi.org/10.17221/23/2013-RAE>
- [4] Сорокина И.И., Астахов М.В. Перспективы применения полимерных композитных материалов с добавлением нанокристаллических порошков оксида алюминия в конструировании и ремонте сельскохозяйственной техники. *Технология металлов*, 2012, № 12, с. 18–20.
- [5] Yongjing W., Duc Truong P., Chunqian J. Self-healing composites: A review. Wang et al. *Cogent Engineering*, 2015, no. 2. <http://dx.doi.org/10.1080/23311916.2015.1075686>
- [6] Wadhawan V.K. *Smart structures: blurring the distinction between the living and the nonliving*. Oxford, Oxford University Press, 2007, 368 p.
- [7] Chopra I., Sirohi J. *Smart Structures Theory*. United Kingdom, Cambridge University Press Publ., 2013, 920 p.
- [8] Астахов М.В., Грачева Е.В. Применение управляемых затяжек в адаптивных конструкциях. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-2-1727>
- [9] *The revolutionary liquid armour suit that is made from bullet-proof custard*. URL: <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-1294074/The-evolutionary-liquid-armour-suit-bullet-proof-custard.html/> (дата обращения 20.01.2020).
- [10] *Liquid Armor: Nano Particle Technology*. URL: https://scienceaid.net/Liquid_Armor:_Nano_Particle_Technology/ (дата обращения 21.01.2020).
- [11] Ferreira M., Möbius M., Boland C.J.N., Khan Um, Ryan G., Barwich S., Charifou R., Harvey A.N., Backes C., Li Z. Sensitive electromechanical sensors using viscoelastic graphene-polymer nanocomposites. *Science*, 2016, vol. 354 (6317), pp. 1257–1260. <http://dx.doi.org/10.1126/science.aag2879>
- [12] Cross R. Elastic and viscous properties of Silly Putty. *American Journal of Physics*, 2012, vol. 80 (10), pp. 870–875. <https://doi.org/10.1119/1.4732086>
- [13] Вольмир А.С. *Расчет пластинок. Справочник машиностроителя*. Т. 3. Москва, Машгиз, 1955, 380 с.
- [14] Пастернак П.Л. *Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели*. Москва, Госстройиздат, 1954, 56 с.

Статья поступила в редакцию 18.02.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Астахов М.В., Славкина Е.В. К вопросу проектирования балочного элемента на основе полимерных композиционных материалов с учетом ударных воздействий. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-4-1969>

Астахов Михаил Владимирович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Колесные машины и прикладная механика» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: mvastahov@gmail.com

Славкина Екатерина Викторовна — ассистент кафедры «Колесные машины и прикладная механика» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: gracheva.e@rambler.ru

On the issue of designing a beam element of polymer composite materials, considering shock effects

© M.V. Astakhov, E.V. Slavkina

Bauman Moscow State Technical University,
Kaluga Branch, Kaluga, 248000, Russia

The use of articles of polymer composite materials is a widespread way to reduce the weight of the structure and increase its corrosion resistance. One of the main disadvantages of such articles is low resistance to shock loads. The advantages and disadvantages of known methods of increasing the resistance to dynamic loading of parts and assemblies of polymer composite materials are considered. The design of a multilayer adaptive beam element containing an inner layer of elasticviscoplastic dilatant liquid — polysilicon as a layer of variable stiffness increasing the resistance to impact is proposed. Based on laboratory testing followed by statistical processing the results, the mechanical characteristics of polysilicon under shock loading (density, Poisson's ratio, Young's modulus, shear modulus) were determined, and dependence of normal stress on relative longitudinal strain is plotted. A method for calculating the strength of an adaptive beam element with an inner layer of polysilicon under impact is proposed.

Keywords: polymer composite material, impact resistance, dilatant fluid, adaptive beam element

REFERENCES

- [1] Nesrin S.K., Yekta K., Huseyin O., Gokce O. Chapter 4. Textile Reinforced Structural Composites for Advanced Applications. In: *Textiles for Advanced Applications*. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.68245>
- [2] Pengfei L., Qilin Z., Jinchun L., Haosen C. *Scientific World Journal*, 2014, vol. Aug. 2014, 13 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/309872>
- [3] Valasek P., Kejval J., Muller M. *Research in Agricultural Engineering*, 2014, vol. 60, no. 4, pp. 165–171. <https://doi.org/10.17221/23/2013-RAE>
- [4] Sorokina I.I., Astakhov M.V. *Technologiya Metallov — Metal Technology*, 2012, no. 12, pp. 18–20.
- [5] Yongjing W., Duc Truong P., Chunqian J. *Cogent Engineering*, 2015, no. 2. <http://dx.doi.org/10.1080/23311916.2015.1075686>
- [6] Wadhawan V.K. *Smart structures: blurring the distinction between the living and the nonliving*. Oxford, Oxford University Press Publ., 2007, 368 p.
- [7] Chopra I., Sirohi J. *Smart Structures Theory*. United Kingdom, Cambridge University Press Publ., 2013, 920 p.
- [8] Astakhov M.V., Gracheva E.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-2-1727>
- [9] *The revolutionary liquid armor suit that is made from bullet-proof custard*. Available at: <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-1294074/The-revolutionary-liquid-armor-suit-bullet-proof-custard.html> (accessed January 20, 2020).
- [10] *Liquid Armor: Nano Particle Technology*. Available at: https://scienceaid.net/Liquid_Armor:_Nano_Particle_Technology (accessed January 21, 2020).

- [11] Ferreira M., Möbius M., Boland C.J.N., Khan Um, Ryan G., Barwich S., Charifou R., Harvey A.N., Backes C., Li Z. *Science*, 2016, vol. 354, no. 6317, pp. 1257–1260. <http://dx.doi.org/10.1126/science.aag2879>
- [12] Cross R. *American Journal of Physics*, 2012, vol. 80, no. 10, pp. 870–875. <https://doi.org/10.1119/1.4732086>
- [13] Volmir A.S. *Raschet platinok. Spravochnik mashinostroitel'ya* [Calculating of plates. Machine engineer's handbook]. Vol. 3. Moscow, Mashgiz Publ., 1955, 380 p.
- [14] Pasternak P.L. *Osnovy novogo metoda rascheta fundamentov na uprugom osnovanii pri pomoshchi dvukh koeffitsientov posteli* [The principals of a new method for calculating foundations on an elastic base using two bed coefficients]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1954, 56 p.

Astakhov M.V., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Wheel Machines and Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch.
e-mail: mvastahov@gmail.com

Slavkina E.V., Assist. Lecturer, Department Wheel Machines and Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch.
e-mail: gracheva.e@rambler.ru