



Повышение стойкости к ударным воздействиям композитных узлов сельхозмашин применением упруговязкопластичных жидкостей

М. В. Астахов, Е. В. Славкина*

Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана»

(г. Калуга, Россия)

**e.v.slavkina@gmail.com*

Введение. Применение композитных материалов в сельскохозяйственном машиностроении известно как один из зарекомендованных способов снижения массы конструкции и защиты от коррозии. К основным недостаткам таких изделий можно отнести их низкую стойкость к ударным нагрузкам, возникающим во время эксплуатации. Целью данной работы является разработка стеклокомпозитной многослойной конструкции борта прицепа, способной выдерживать наряду со статически приложенными силами ударные нагрузки без включения дополнительных армирующих металлических элементов в зоны предполагаемых ударов.

Материалы и методы. Для повышения ударопрочности изделия после проведенного анализа современных конструкторских решений предложено применение упруговязкопластичной неньютоновской жидкости на основе полисиликона путем введения в силовой элемент в качестве дополнительного слоя с целью компенсации ударных воздействий.

Результаты исследования. На основании проведенного лабораторного тестирования с применением статистической обработки полученных данных определены основные механические характеристики неньютоновской жидкости (полисиликона) при испытаниях на удар (плотность, коэффициент Пуассона, модуль Юнга, модуль сдвига), построены графики полученных зависимостей. Температура исследуемых образцов полисиликона не оказывала значительного влияния на их механические свойства. Установлено: начиная со значения относительной деформации 0,042, за время удара полисиликон проявляет линейно-упругие свойства.

Обсуждение и заключение. На основании полученных механических характеристик сделаны выводы о стойкости к ударным нагрузкам полисиликона как составной части элемента борта прицепа. Предложен вариант компоновки конструктивного решения борта прицепа как многослойного сэндвич-элемента с внешними частями из полимерного композитного материала с внутренним наполнением стеклопластиковыми сотами и полисиликоном, помещенным в крупные ячейки.

Ключевые слова: ударная нагрузка, испытания на ударный изгиб, сэндвичевая композитная конструкция, полисиликон, дилатантная жидкость, полимерный композитный материал, ударная вязкость

Для цитирования: Астахов, М. В. Повышение стойкости к ударным воздействиям композитных узлов сельхозмашин применением упруговязкопластичных жидкостей / М. В. Астахов, Е. В. Славкина. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202002.268-286 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 2. – С. 268–286.

© Астахов М. В., Славкина Е. В., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Improving the Shock Resistance of Agricultural Composite Units Using Visco-Elastic Fluids

M. V. Astakhov, E. V. Slavkina*

*Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University
(Kaluga, Russia)*

*e.v.slavkina@gmail.com

Introduction. The use of composite materials in agricultural engineering is known as one of the recommended ways to reduce the weight of the structure and protect against corrosion. The main disadvantages of such products are their low resistance to shock loads that occur during operation. The aim of this study is to develop a glass composite multi-layer structure of the trailer side, capable of withstanding shock loads along with statically applied forces, without including additional reinforcing metal elements in the zones of the possible impacts.

Materials and Methods. To increase the impact resistance of the product (after an analysis of modern design solutions) the use of visco-elastic non-Newtonian fluids based on polysilicon by introducing an additional layer into the power element to compensate for impact effects is proposed.

Results. On the basis of laboratory testing using statistical processing of the obtained data, the basic mechanical characteristics of non-Newtonian fluid (polysilicon) during impact tests (density, Poisson's ratio, Young's modulus, shear modulus) are determined, and graphs of the obtained dependencies are constructed. The temperature of the tested polysilicon samples did not significantly affect their mechanical properties. It is established that starting from the value of relative deformation 0.042, during the impact polysilicon shows linearly elastic properties.

Discussion and Conclusion. Based on the received mechanical characteristics, the conclusions about resistance to shock loads of polysilicon as a component of a trailer board element are made. The variant of arrangement of the trailer board structural solution as a multilayer sandwich element with external parts made of polymer composite material with internal filling with fiberglass cells and polysilicon placed in large cells is offered.

Keywords: shock loading, impact bending tests, sandwich composite construction, polysilicon, dilatant fluid, polymer composite material, impact viscosity

For citation: Astakhov M.V., Slavkina E.V. Improving the Shock Resistance of Agricultural Composite Units Using Visco-Elastic Fluids. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(2):268-286. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.268-286>

Введение

Для уменьшения массы и увеличения коррозионной стойкости деталей и узлов машин, используемых в сельскохозяйственном производстве, в частности в кормопроизводстве, все чаще применяются полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе различного вида нитей, тканей, рогож с пропиткой синтетическими смолами.

Одним из основных недостатков подобного типа конструкций является небольшая стойкость к ударным воздействиям, сосредоточенным на малой

площади. Наиболее широко распространенным вариантом компенсации таких нагрузок в настоящее время является применение комбинированных технологических решений, где наряду с основной композитной частью узла используются детали, в которых при помощи клеевых, неразборных или разборных дискретных соединений крепятся усиливающие металлические элементы в зонах предполагаемых ударов.

Этот способ приводит не только к увеличению массы композитного узла, но и усложняет технологию из-

готовления, эксплуатацию машины, а также снижает эффективность ПКМ как коррозионностойкого материала.

В качестве примера рассмотрим боковой борт кузова прицепа, применяемого в кормопроизводстве для перевозки полужидких и сыпучих грузов, конструкцию которого было предложено модернизировать [1].

Композитная сэндвич-оболочка борта (рис. 1), изготовленная из нескольких слоев стеклоткани с наполнителем в виде стеклокомпозитных сот, была предназначена к использованию, согласно техническим условиям по эксплуатации (ТУ), только для сыпучих и полужидких грузов. Во время полевых испытаний ТУ были нарушены (погрузка твердых предметов с задачей им ускорения), возникли удары о борт, которые привели к местной потере устойчивости борта и расплющиванию стекловолокна в зоне контакта с твердой частью груза.

Предложение усилить борт металлическими листами является деградирующим и приводит к ухудшению многих параметров. Было необходимо применить более прогрессивное конструктивное решение.

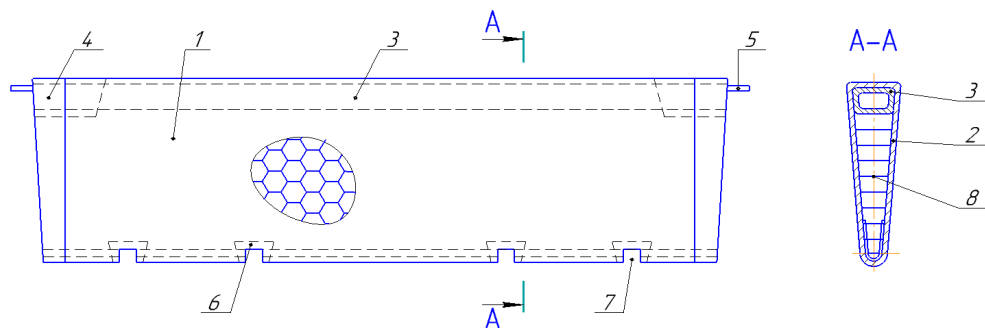
Поэтому целью данного исследования является разработка метода усиления сэндвичевой композитной конструкции, состоящей из листов ПКМ, соединенных сотовым наполнителем, без металлического листового подкрепления для компенсации ударных нагрузок.

Обзор литературы

С целью улучшения способности эффективно сопротивляться ударным воздействиям в композитных конструкциях узлов и деталей сельскохозяйственной техники в настоящее время применяют несколько методов.

Так, для повышения ударопрочности элементов узлов и деталей машин, выполненных из полимерных композиционных материалов, наряду с двумерным (листовым) наполнителем, применяют наполнители на основе трехмерного расположения нитей, что ведет к частичному увеличению массы изделия, но полностью не обеспечивает местной прочности материала при сосредоточенной на малой площади большой ударной нагрузке [2].

Предлагается, в частности для сельскохозяйственного машиностроения, применять алюминиевые компози-



Р и с. 1. Борт прицепной тележки для тяжелых тракторов: 1, 2 – оболочки борта, выполненные из стеклоткани с пропиткой из синтетической смолы; 3 – композитный силовой профиль; 4, 5 – стальные концевые обоймы с пальцами для фиксации с торцевыми бортами; 6, 7 – петли крепления борта к платформе; 8 – сотовый наполнитель

F i g. 1. Trailer bogie board for heavy tractors: 1, 2 – side casing made of fiberglass with impregnation of synthetic resin; 3 – composite power profile; 4, 5 – steel end clips with fingers for fixation with end sides; 6, 7 – hinges for fastening the side to the platform; 8 – cell core

ты с металлической матрицей (АММС) с высокой ударной жесткостью и прочностью, но не учитывается стоимость данного материала при больших объемах производства [3].

Подбираются оптимальные сочетания типов матриц и наполнителей для изготовления капота трактора на основе экспериментальных работ, в частности и на ударные воздействия. Исследования, проведенные для узла машины, который не испытывает экстремальных силовых внешних воздействий, корректны, но не решают вопрос о проектировании на основе композиционных материалов высоконагруженных элементов сельскохозяйственной техники, испытывающих сильные удары (типа бортов прицепов тяжелых тракторов) [4; 5].

Результаты ряда работ основаны на предположении о повышении ударопрочности при применении корунда в качестве наполнителя для ПКМ, выполненного из стеклопластика [6; 7]. Были представлены материалы о проведении статических испытаний подобного композита и стало известно, что предел его прочности падает приблизительно на 30 % при добавлении порошка корунда. Было предположено, что микрочастица корунда при достижении материалом матрицы определенной деформации играет роль концентратора напряжений и становится местом начала роста трещины [7]. Поэтому повышение ударопрочности методом, предложенным П. Валашеком и коллегами, представляется сомнительным [6].

В монографии У. Вайды подробно рассматриваются способы конструирования композитных узлов транспортных машин, где в основном упор делается на совершенствование армирования наполнителя по трем измере-

ниям. Потеря устойчивости волокна при ударе, расплющивание, появление квазитрещин и изменение формы не ставятся во главу угла [8].

Испытаниям на стойкость к расслоению полимерно-матричных композитов посвящена работа Т. Фиглуса и соавторов, где основное внимание уделено разработке методов испытаний, но не представлены технологические и конструкционные решения предотвращения разрушающих деформаций при сосредоточенных ударах по поверхности ПКМ [9].

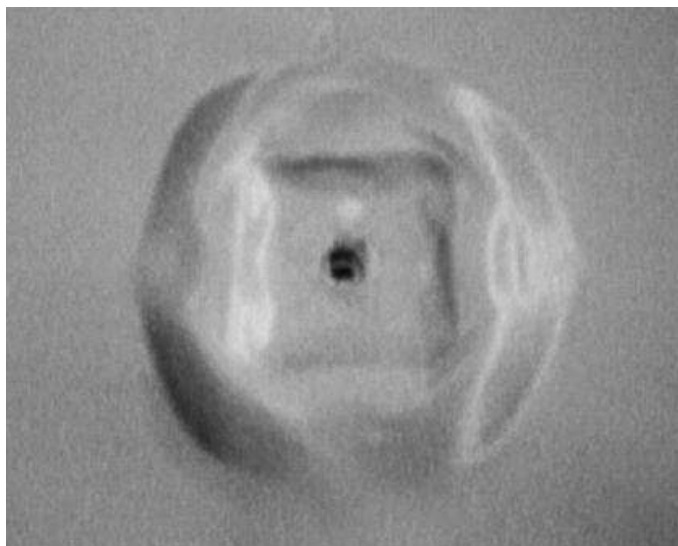
В совершенно другой области, в военном деле, рассматривается стойкость композитных бронежилетов с прослойкой из неньютоновской жидкости при ударе пули, выпущенной из пистолета¹.

Применяются останавливающие пулю комбинации кевларовых пластин и слоев неньютоновской жидкости, химический состав которой не раскрывается. Подчеркивается, что при ударе пули о такую конструкцию жидкость в месте удара затвердевает, а остальная часть, будучи вязкопластической, передает часть энергии удара на кевлар, и деформация бронежилета становится, в отличие от обычных жестких бронежилетов, большей по площади, но меньшей по глубине (в сторону тела человека) (рис. 2).

Идея поглощать энергию удара с помощью ее перераспределения слоем неньютоновской жидкости в машиностроительных конструкциях, в частности в узлах сельскохозяйственных машин, представляется актуальной, так как плотность таких жидкостей гораздо меньше плотности как усиленных композитов, так и стальных листов, подкрепляющих место ударов, а стоимость вполне соизмерима с последними².

¹ Неньютоновская жидкость в качестве брони [Электронный ресурс]. URL: <https://top-war.ru/73725-nenyutonovskaya-zhidkost-v-kachestve-broni.html> (дата обращения: 14.04.2020); «Жидкому» бронежилету быть! [Электронный ресурс]. URL: <https://warspot.ru/9049-zhidkomu-bronezhiletu-byt> (дата обращения: 14.04.2020).

² Пульс цен: полидиметилсилоксан [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pulscen.ru/price/040451-dimetilsiloksan> (дата обращения: 14.04.2020).



Р и с. 2. Место удара пули о кевларовый бронежилет со слоем неньютоновской жидкости: квадрат – кевларовая пластина, первой принимающая удар; овальное пятно – зона затвердевания неньютоновской жидкости

F i g. 2. Point of impact of a bullet against a Kevlar vest with a layer of non-Newtonian fluid: square – Kevlar plate, the first receiving impact; oval spot – zone of hardening of non-Newtonian fluid

Материалы и методы

Для компенсации ударных воздействий на сэндвичевый композитный борт транспортного средства выбрано композиционное вещество – упруговязкопластическая неньютоновская жидкость на основе полисиликона, которая в момент ударного на нее воздействия в месте приложения динамических сил приобретает упругие свойства, а в состоянии покоя является вязкопластической. К подобному типу жидкостей относится дилатантная жидкость, имеющая коммерческое название Silly Putty (SP), – материал, созданный компанией Corning Incorporated на основе силиконовых полимеров, который состоит из 65 % полидиметилсилоксана (PDMS), 17 % диоксида кремния (кристаллический кварц), 9 % тиксотрола ST (про-

изводное касторового масла), 4 % диметилсилоксана (гидрокси-концевой полимер с борной кислотой), 1 % глицерина и 1 % диоксида титана.

В ряде работ рассмотрены некоторые характеристики дилатантных жидкостей, созданных на основе полисиликонов: вязкость, магнитные свойства и проводимость при добавлении различных частиц, а также их влияние на поведение дилатанта в целом³ [10; 11]. Однако большинство физических и механических свойств являются неизученными, как и возможность взаимодействия полисиликона с различными материалами [12; 13].

Для их исследования необходимо провести экспериментальное лабораторное тестирование: пикнометрическим, пьезоэлектрическим, силовым

³ Астарита Дж., Марруччи Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей. М.: Мир, 1978. 312 с.

методами; испытаниями образцов композитных сэндвичевых параллелепипедов, пустотелых и наполненных неньютоновской жидкостью SP, до разрушения с помощью маятникового копра; статистическими методами обработки полученных результатов.

Результаты исследования

Сельскохозяйственные машины, применяемые в кормопроизводстве, особенно предназначенные для эксплуатации вне помещения, подвержены воздействию температуры, которая, предположительно, может меняться от -25°C до $+40^{\circ}\text{C}$.

При этом исследуемое вещество, заполняющее внутреннюю полость конструкционного элемента, не должно резко менять свой объем (разбухать или усыхать). Поэтому очень важно изучить изменение плотности SP в зависимости от температуры.

Для нахождения плотности полисиликона SP были проведены экспериментальные исследования пикнометрическим методом при изменении температуры SP от $+40^{\circ}\text{C}$ до -25°C .

На основании статистической обработки результатов экспериментов сделаны следующие выводы:

1. Плотность SP не зависит от температуры и равна $\rho = 1\,195,27\text{ кг/м}^3$.

2. При воздействии температуры в пределах от $+40^{\circ}\text{C}$ до -25°C изменение объема образцов SP практически соответствовало изменению объема стеклопластикового сосуда, в котором находился полисиликон.

Как отмечалось в работах исследователей, в момент удара жидкость SP принимала упругое состояние, то есть ее деформация в месте удара в течение ограниченного промежутка времени начинала линейно зависеть от внешних сил, иными словами, за время поглощения энергии удара полисиликон SP, предположительно, подчинялся закону Гука, а после удара приобретал вязкопластическое состояние [10; 11].

Компенсация энергии удара путем ее аккумуляции в объеме полисиликона в виде энергии упругой деформации происходила за время удара, что в дальнейшем проектировочных расчетах не позволяет применить гипотезу о том, что модуль Юнга материала, испытывающего удар, постоянен как до удара, так и после него.

Таким образом, для решения прикладной задачи создания компенсатора ударов в композитных конструкциях сельхозмашин важно исследовать механические свойства полисиликона SP, возникающие только в момент удара, когда рассматриваемая дилатантная жидкость превращается в твердое упругое вещество, поведение которого в данный момент времени можно оценить на основе понятий теории упругости и определить: предел прочности, модули продольной и поперечной упругости, коэффициент Пуассона.

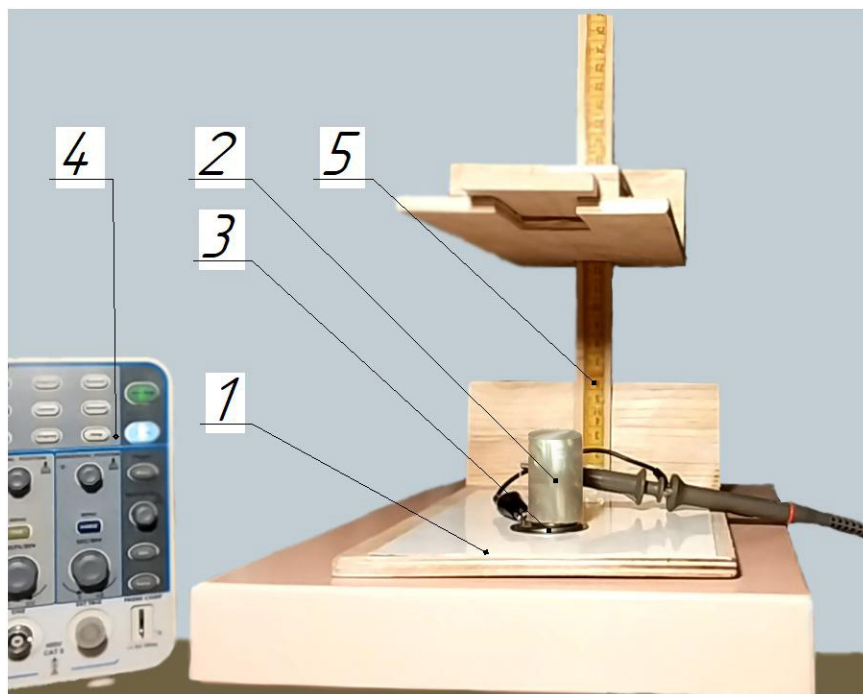
Для нахождения некоторых из вышеперечисленных механических характеристик и величины потенциальной энергии деформации дилатантной жидкости SP при ударе проведены экспериментальные исследования на удар свободно падающим стальным шаром о плоскую поверхность цилиндрического образца из полисиликона SP (рис. 3).

Образцы полисиликона SP имели следующие характеристики: масса – $0,02\text{ кг}$; форма – цилиндр с диаметром основания $0,02\text{ м}$ и высотой $0,035\text{ м}$.

Падение шара осуществлялось с высоты $h = 0,15\text{ м}$. Шары стальные полированные имели массу m : 5 ; 10 ; 20 ; 50 ; 100 ; 200 ; 500 ; $1\,100\text{ г}$.

С заданной высоты шары падали на предварительно сформованный цилиндр полисиликона SP, опирающийся своим основанием на пьезодатчик ЗП-3, подключенный к осциллографу OWON SDS6062. Температура полисиликона была постоянной и равнялась $+25^{\circ}\text{C}$.

В момент удара полисиликон SP принимал упругое состояние, шар от-



Р и с. 3. Установка для испытания образца полисиликона SP на удар стальным шаром: 1 – платформа для установки шара на нужную высоту; 2 – цилиндрический образец из полисиликона SP; 3 – пьезодатчик; 4 – осциллограф; 5 – миллиметровая шкала

F i g. 3. Installation for testing a specimen of SP polysilicon on impact with a steel ball: 1 – platform for installation of a ball at the necessary height; 2 – cylindrical sample from SP polysilicon; 3 – piezo sensor; 4 – oscillograph; 5 – millimeter scale

скакивал от него, на осциллограф передавался сигнал удара (кривая зависимости напряжения U , В, от времени t , с).

В процессе экспериментальных исследований велась видеосъемка, при которой осуществлялся замер изменений геометрической формы образцов полисиликона SP. Результаты замеров частично представлены в таблице 1.

Энергия удара шара mgh (где g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; h – высота падения шара, м) передавалась деформирующимся полисиликоном на пьезодатчик, который воспринимал эту энергию в виде энергии электрического поля.

$$W_3 = \frac{c \cdot \Delta U^2}{2}, \quad (1)$$

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

При ударе шаром о пьезодатчик без полисиликона замерялось напряжение электрического поля U' . Тогда $\Delta U = U' - U$ будет показывать приращение напряжения за счет изменения емкости пьезодатчика c_n при условии, что емкость оставшейся части электрической цепи не меняется.

В результате формулу (1) можно представить в виде:

$$W_3 = \frac{c_n \cdot \Delta U^2}{2}. \quad (2)$$

Работу внешних сил при ударе, равном энергии W_3 упругого деформирования

Процессы и машины агроинженерных систем

Механические и электрические характеристики исследования деформации полисиликона SP при ударе

Mechanical and electrical characteristics of the study of deformation of SP polysilicon upon impact

Масса груза m , г / Weight of the cargo m , g	Среднее значение напряжения при ударе на полисиликон U , В / Average impact stress on polysilicon U , V	Среднее значение напряжения при ударе на пьезодатчик без полисиликона U' , В / Average impact stress on a piezo sensor without polysilicon U' , V	Разница напряжений $\Delta U = U' - U$, В / Voltage difference $\Delta U = U' - U$, V	Энергия электрического поля, Дж $W_э = \frac{c_n \cdot \Delta U^2}{2}$ / Electric field energy, J $W_э = \frac{c_n \cdot \Delta U^2}{2}$	Изменение диаметра цилиндра после удара Δd , мм / Change of cylinder diameter after impact Δd , mm	Изменение высоты цилиндра после удара Δl , мм / Change of cylinder height after impact Δl , mm
5	7,87	61,4	53,53	$2,44 \cdot 10^{-6}$	0	0
10	13,48	64,0	50,52	$2,17 \cdot 10^{-6}$	0	0
20	18,04	76,0	57,60	$2,82 \cdot 10^{-6}$	0,3	0,5
50	24,40	98,4	74,00	$4,66 \cdot 10^{-6}$	0,5	0,8
100	32,40	140,6	108,20	$9,95 \cdot 10^{-6}$	0,8	1,1
200	43,60	224,0	180,40	$27,54 \cdot 10^{-6}$	1,0	1,3
500	44,68	474,0	429,32	$156,44 \cdot 10^{-6}$	1,2	1,6
1 100	48,20	974,0	925,72	$728,85 \cdot 10^{-6}$	1,7	2,7

ния цилиндра из полисиликона, можно вывести на основании известной формулы Клайперона без коэффициента 0,5, так как работа осуществляется за небольшой промежуток времени, то есть она не является работой статистически приложенных сил (3).

$$W_M = \int \frac{N^2 dl}{EA}, \quad (3).$$

где N – внутренняя продольная сила сжатия цилиндра из полисиликона SP; H ; l – длина цилиндра, м; E – модуль Юнга (модуль продольной упругости) полисиликона во время удара, Па; $A = 025 \cdot \pi \cdot d^2$ – площадь поперечного сечения цилиндра из полисиликона, м²; d – диаметр цилиндра.

Решив интеграл (3) как определенный на отрезке от 0 l или способом Симпсона, получим:

$$W_M = \frac{N^2 l}{EA}, \quad (4)$$

откуда, подставив в (4) выражение (2), будем иметь:

$$W_M = W_э \Rightarrow E = \frac{N^2 l}{W_M A}. \quad (5)$$

По данным таблицы 1 и результатам, подсчитанным по формулам (2), (5), построены графики $\Delta l = f(N)$, $\Delta U = f(m)$, на основе которых можно получить ксическую зависимость $\sigma = E\varepsilon$ для полисиликона SP в момент удара (рис. 4–6), где: $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ – относи-

тельная деформация полисиликона; σ – нормальное напряжение в поперечном сечении относительно вертикальной оси образца SP.

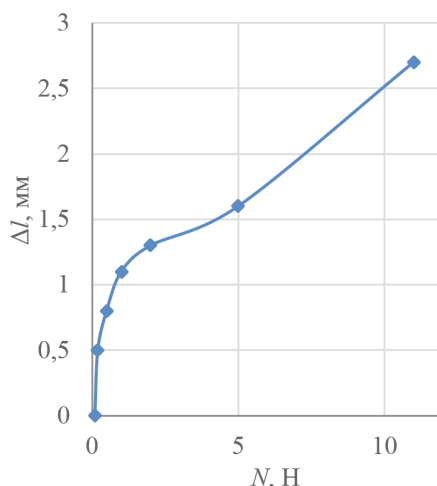
Из графика на рисунке 6 видно, что, начиная со значения $\varepsilon = 0,042$, модуль Юнга не изменяется, а состояние полисиликона SP является линейно-упругим.

Так, например, при падении шара массой $m = 1,1$ кг, падающего с высоты $h = 0,15$ м на полисиликон SP с указан-

ными выше размерами, модуль Юнга последнего вычисляется по формулам (2), (5) при условии, что замеренная емкость пьезодатчика $c_{\pi} = 1,7 \cdot 10^{-9}$ Ф.

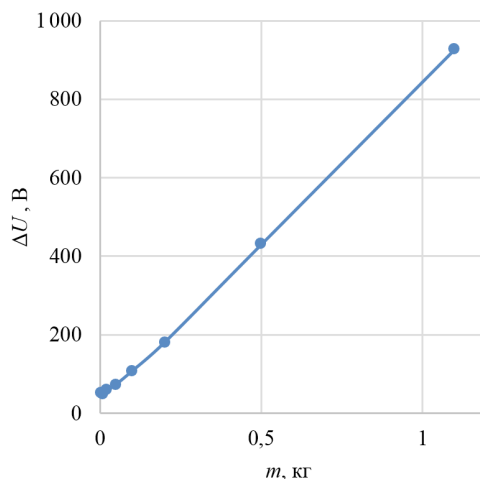
$$E = \frac{11^2 \cdot 0,031}{728854 \cdot 10^{-9} \cdot 0,00346} = 15 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

что в два раза выше модуля Юнга каучука и приблизительно равно модулю



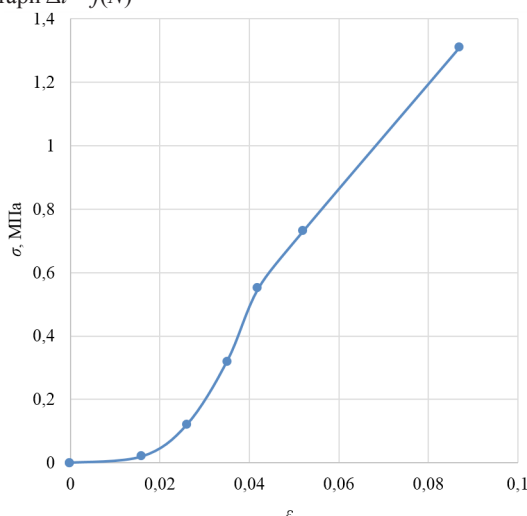
Р и с. 4. График $\Delta l = f(N)$

F i g. 4. Graph $\Delta l = f(N)$



Р и с. 5. График $\Delta U = f(m)$

F i g. 5. Graph $\Delta U = f(m)$



Р и с. 6. График $\sigma = f(\varepsilon)$

F i g. 6. Graph $\sigma = f(\varepsilon)$

Юнга плотной резины с наполнителем из сажи.

Для упругого состояния полисиликона SP на основании данных таблицы 1 построен график изменения коэффициента Пуассона ν в зависимости от массы падающего груза (рис. 7) при условии, что $\nu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}$, где $\varepsilon' = \frac{\Delta d}{d}$, $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$.

В случае сдвига полисиликона модуль поперечной упругости G определяется по формуле:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (6)$$

а его зависимость от массы шара $G = f(m)$ представлена на рисунке 8

Для рассмотренной выше деформации полисиликона SP при массе шара $m = 1,1$ кг и $\nu = 0,977$ (рис. 7), $G = 3,79 \cdot 10^6$ Па.

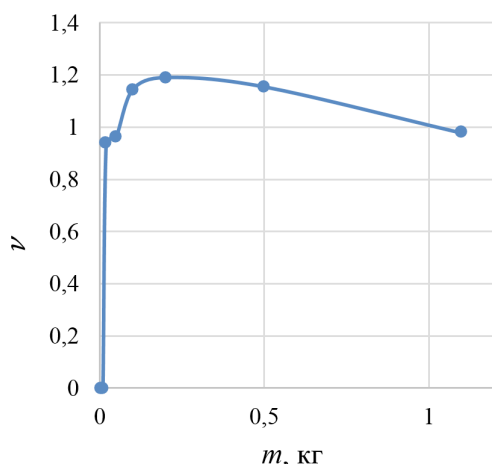
Следует заметить, что рассмотренные механические характеристики полисиликона SP справедливы только в упругом его состоянии, то есть за время деформации при ударе твердого тела о поверхность образца.

Очевидно, что слой полисиликона SP должен плотно прилегать к вну-

треннему слою стеклокомпозитного борта и принимать внешнюю нагрузку от ударов твердых частиц перевозимого груза. При этом очень важно располагать слой полисиликона так, чтобы его затвердевшая при ударе часть опиралась на упругое основание конструкции, которое можно создать в виде трехслойной сэндвич-плиты, представляющей внутреннюю перегородку борта. Конструктивное решение его поперечного сечения исходит из технологических возможностей сборки борта и должно учитывать, что в ненагруженном состоянии полисиликон SP является дилатантной жидкостью, обладающей вязкопластическими свойствами и способностью принимать форму сосуда, в который она помещена.

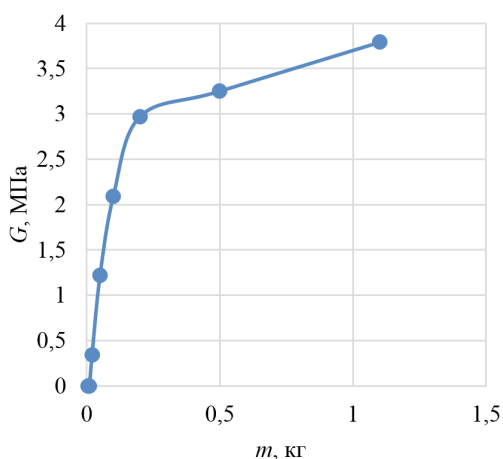
Для уточнения конструктивно-технологических решений было проведено лабораторное тестирование на удар модели композитного борта с полисиликоновым наполнителем и без наполнителя.

Ударные нагрузки, испытываемые композитным бортом транспортного средства во время его эксплуатации, согласно ТУ, направлены обычно по нормали к внутренней поверхности борта. Поэтому его моделью во время



Р и с. 7. График $\nu = f(m)$

F i g. 7. Graph $\nu = f(m)$



Р и с. 8. График $G = f(m)$

F i g. 8. Graph $G = f(m)$

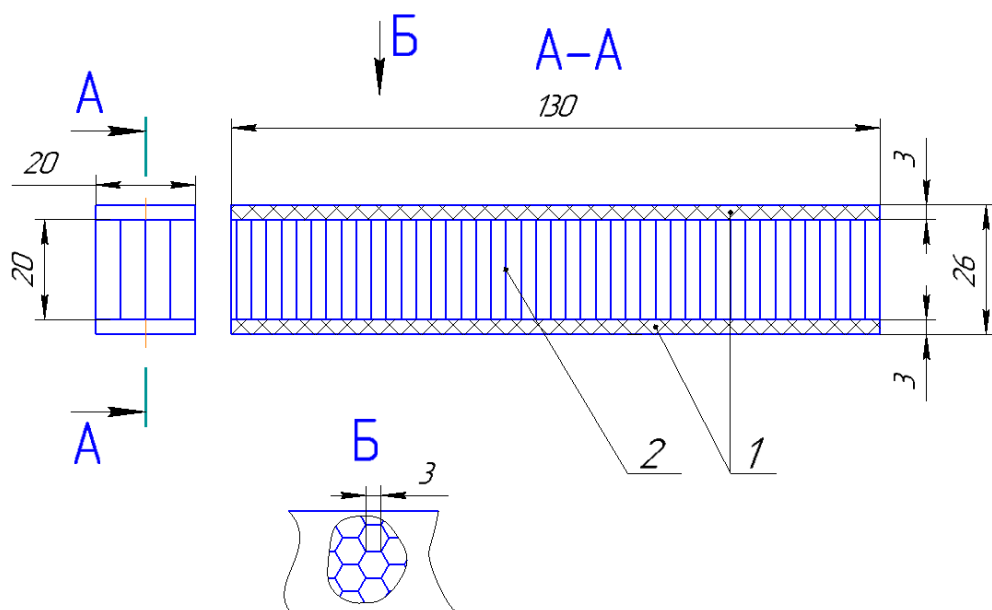
лабораторного тестирования может служить композитный сэндвич-параллелепипед, состоящий из внешней и внутренней пластин ПКМ на основе стеклоткани, соединенных сотовым заполнителем (рис. 9).

В качестве испытательного стенда для лабораторного тестирования образцов был выбран маятниковый копер МК-300 с пневмоподъемом молота. Максимальная энергия маятника 450 Дж. Результаты испытаний фиксировались на аналоговой шкале и микропроцессорном блоке ПО-4Т, с помощью которого автоматически определялась работа удара.

Лабораторное тестирование проводилось согласно ГОСТам для десяти групп образцов⁴. Первые две группы (1 и 2) представляли собой: пустоте-

лый параллелепипед из папиросной бумаги, служащий формой для полисилоконового параллелепипеда, и такой же бумажный параллелепипед, но заполненный полисилоконом SP; вторые две группы (3, 4) (рис. 10) изготавливались на основе стеклопластиковых сот, пропитанных эпоксидной смолой, смешанной с дибутилфталатом и полиэтиленполиамином, причем образцы группы 4 имели четыре продольных сквозных отверстия в стенках сот.

Третьи две группы (5, 6) представляли соты, заполненные полисилоконом SP, причем группа 6, как и группа 4, имела продольные отверстия, которые необходимо было ввести, учитывая то, что, согласно работе К. С. Боланда и коллег, длинные молекулы полисилокона SP до удара запутаны и имеют слабые водо-

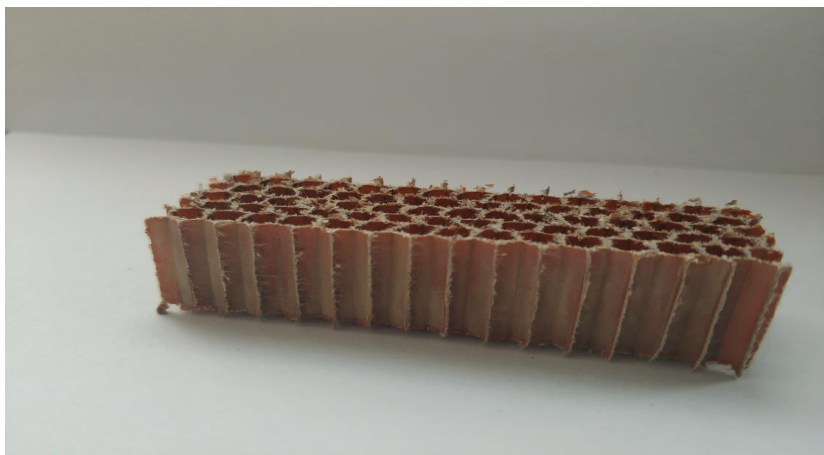


Р и с. 9. Композитный сэндвич-параллелепипед для сравнительных испытаний борта:

1 – пластины из ПКМ на основе стеклоткани; 2 – соты из стеклотканевого препрега (размеры в мм)

F i g. 9. Composite sandwich parallelepiped for comparative tests of the side: 1 – PCM plates based on fiberglass; 2 – cells made of fiberglass prepreg (dimensions in mm)

⁴ ГОСТ 10708-82. Копры маятниковые. Технические условия (с Изменениями N 1, 2); ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах (с Изменениями N 1, 2).



Р и с. 10. Стеклопластиковые соты с пропиткой эпоксидной смолой (образец группы 3)

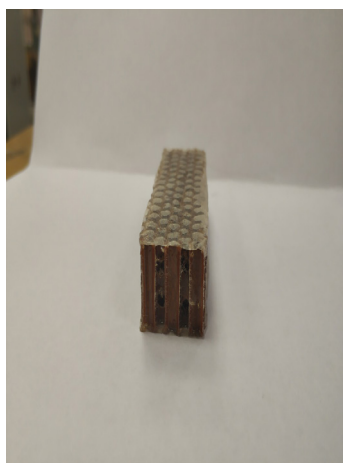
F i g. 10. Fiberglass cells with impregnated with epoxy resin (group sample 3)

родные связи, а во время удара распрямляются [13]. Можно предположить, что такие распрямленные длинные молекулы ведут себя во время удара, как балки на упругом основании, поэтому расположение полисиликона SP по длине образца в продольных отверстиях может привести к большому поглощению энергии удара. Соты верхней и нижней частей образцов были заклеены папи-

росной бумагой (рис. 11) во избежание утечек полисиликона SP.

Группы 7, 8 моделировали варианты борта прицепа без полисиликона. Группа 7 представляла собой пустотелые стеклопластиковые параллелепипеды, группа 8 – параллелепипеды, заполненные стеклопластиковыми сотами.

Последняя группа образцов (9, 10) повторяла конструкцию образцов 7, 8



a)



b)

Р и с. 11. Стеклопластиковые соты, заполненные полисиликоном SP, с продольными отверстиями

F i g. 11. Fiberglass cells filled with SP polysilicone with longitudinal holes

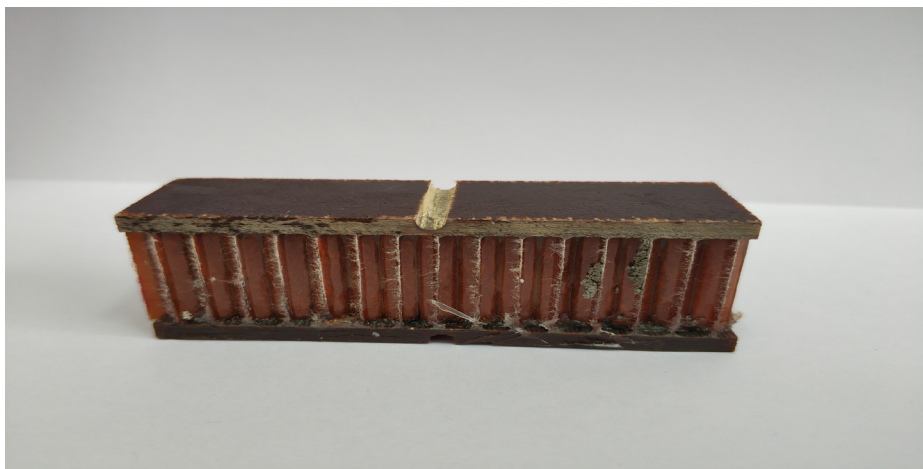
соответственно, но заполненных поли-
силиконом SP (рис. 12).

На рисунке 12 верхняя пластина
стеклопластика подпилена для умень-
шения работы маятника копра при уда-
ре. Разрушение образца из группы 10
показано на рисунке 13.

Способность материала сопротив-
ляться ударным нагрузкам характе-
ризуется ударной вязкостью, которая

определяется отношением величины
работы, затраченной на разрушение
образца, к площади его поперечного
сечения в месте излома.

Все испытанные образцы имели
одинаковые размеры внешнего контура
поперечного сечения, поэтому о стой-
кости к удару можно судить по вели-
чине работы маятникового копра при
их разрушении. Результаты испытаний



Р и с. 12. Образцы для испытаний на удар сэндвичевой сотовой конструкции с заполнением полисиликоном SP

F i g. 12. Impact test specimens of sandwich cells structure filled with SP polysilicon



Р и с. 13. Разрушение образца из группы 8 при ударе маятником копра

F i g. 13. Destruction of a sample from group 8 upon impact by a copra pendulum

десяти групп образцов после соответствующей статистической обработки представлены в таблице 2.

Обсуждение и заключение

На основе анализа результатов испытаний на ударную вязкость композитных конструкций с полисиликоном SP и без него можно сделать следующие выводы:

1. Полисиликон SP в месте удара приобретает механические характери-

стики плотной резины, то есть играет роль упругой прокладки между прилегающими частями конструкции, а после удара становится вязкопластической жидкостью с малой жесткостью.

2. Появление распрямленных длинных молекул в полисиликоне SP во время удара предполагает возникновение упругого слоя SP достаточно большой площади, который перераспределяет

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Результаты испытаний на удар

The results of the impact tests

Номер группы / Group number	Описание групп / Description of groups	Математическое ожидание работы по разрушению образца на копке, Дж / Mathematical expectation of sample destruction work with piling machine, J
	Пустой копер без образца / Empty piling machine without sample	0,59
1	Параллелепипед из папиросной бумаги без заполнения полисиликоном SP / Parallelepiped of cigarette paper without SP polysilicon filling	0,67
2	Параллелепипед из папиросной бумаги, заполненный полисиликоном SP / Parallelepiped of cigarette paper filled with SP polysilicon	2,53
3	Соты без продольных отверстий, не заполненные полисиликоном SP / Cells without longitudinal holes not filled with SP polysilicon	3,62
4	Соты с продольными отверстиями, не заполненные полисиликоном SP / Cells with longitudinal holes not filled with SP polysilicon	3,62
5	Соты без продольных отверстий, заполненные полисиликоном SP / Cells without longitudinal holes filled with SP polysilicone	4,73
6	Соты с продольными отверстиями, заполненные полисиликоном SP / Cells with longitudinal holes filled with SP polysilicone	6,77
7	Стеклопластиковый параллелепипед пустотелый / Fiberglass hollow parallelepiped	74,17
8	Стеклопластиковый параллелепипед, заполненный сотами / Fiberglass parallelepiped filled with cells	97,95
9	Стеклопластиковый параллелепипед, заполненный полисиликоном SP / Glass fiberglass parallelepiped filled with SP polysilicon	118,31
10	Стеклопластиковый параллелепипед, заполненный стеклопластиковыми сотами и полисиликоном SP / Fiberglass parallelepiped filled with fiberglass cells and SP polysilicon	106,28

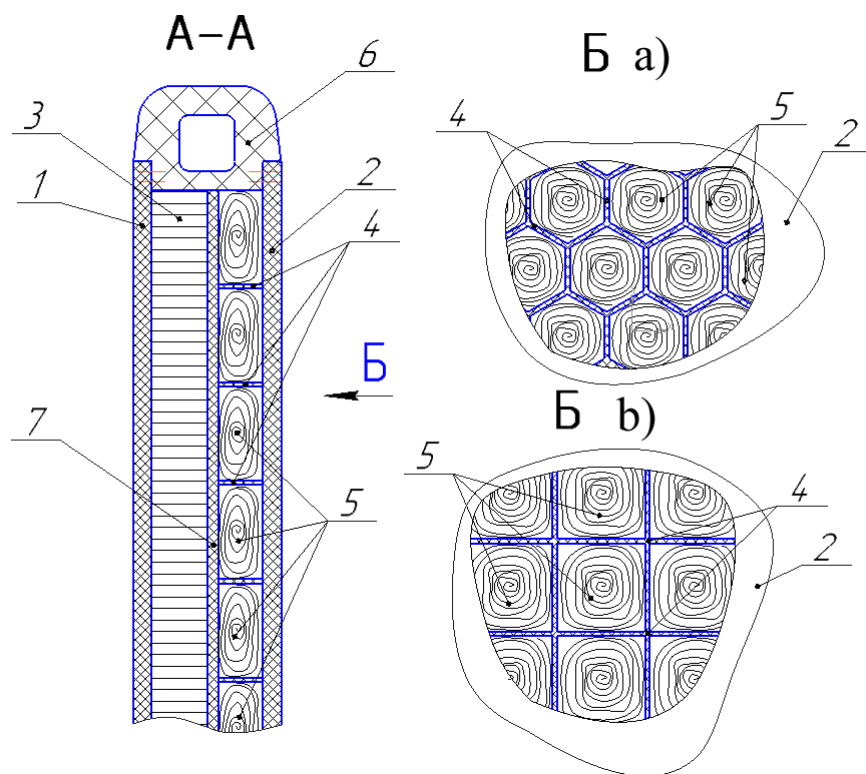
энергию упругой деформации на несущее основание, а значит необходимо конструирование поддерживающей опоры для слоя полисиликона.

3. Для эффективного «затвердевания» полисиликона SP при ударе следует расположить его слой между упругими конструктивными элементами, которые кроме передачи нагрузок должны выполнять функции стенок сосудов, для ограничения течения дилатантной жидкости (полисиликона SP)

в случае отсутствия ударных нагрузок.

Основываясь на этих выводах и на материалах, имеющихся в работах М. В. Астахова, можно рекомендовать следующую конструкцию поперечного сечения А-А борта транспортного средства (рис. 14), вид спереди для которого представлен на рисунке 1 [14; 15].

Так как в ненагруженном состоянии полисиликон SP обладает текучестью, его необходимо заключить в контейнеры, изготовленные из полиэтиленовой или



Р и с. 14. Конструктивное решение сечения А-А борта прицепа, представленного на рисунке 1:
а) расположение полисиликона в больших шестигранных ячейках; б) расположение полисиликона в прямоугольных (квадратных) ячейках; 1 – пластина из ПКМ внешней части борта; 2 – пластина из ПКМ внутренней части борта; 3 – мелкие стеклопластиковые соты; 4 – крупные шестигранные или квадратные соты; 5 – полисиликон SP; 6 – верхний силовой профиль из ПКМ; 7 – внутренняя перегородка из ПКМ

F i g. 14. Constructive solution of the section A-A of the side of the trailer shown in Figure 1:
а) location of polysilicon in large hexagonal cells; б) location of polysilicon in rectangular (square) cells; 1 – PCM plate on the outer side of the board; 2 – PCM plate on the inside of the side; 3 – small fiberglass cells; 4 – large hexagonal or square cells; 5 – polysilicon SP; 6 – upper power profile from RMB; 7 – internal partition from PCM

полистирольной пленки, повторяющие форму либо большой шестигранной, либо прямоугольной ячейки. Размеры ячеек (длина и ширина) ориентировочно не должны быть меньше длины продольного отверстия в образце (рис. 9), так как распрямление длинных молекул полисиликона SP повышает его ударную вязкость (табл. 2), а мелкие соты ограничивают такое распрямление.

Стальные концевые обоймы и петли присоединения борта к грузовой платформе прицепа следует закрепить в пластинах 1 и 2 (рис. 14) крепежными элементами [16].

Из-за того, что боковые удары твердыми телами о композитный борт при загрузке прицепа полужидким или сыпучим грузом сообщают конструкции энергию меньшую, чем при ударе сво-

бодно падающим вниз телом, коэффициент динамичности k_d , найденный по

известной формуле $k_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{f_{ст}}}$,

где $f_{ст}$ – статический изгиб борта в месте удара, будет определять динамическое напряжение «в запас».

Так как при статическом приложении внешних сил полисиликон SP не влияет на изгибную жесткость борта, последний можно рассчитать на прочность как многослойную анизотропную прямоугольную пластинку с дискретным шарнирным опиранием в местах крепления к платформе и торцевым бортам, нагруженную линейно переменной по высоте борта и постоянной по его длине нормально распределенной нагрузкой.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Патент № 1745600 СССР, МПК B62D 33/027, B62D 29/04. Откидной борт платформы грузового транспортного средства : заявл. 28.02.1990 : опубл. 07.07.1992 / Астахов М. В., Дикарев В. В., Русый Е. В. ; патентообладатель Украинский институт инженеров водного хозяйства. – 4 с.
2. Karaduman, N. S. Textile Reinforced Structural Composites for Advanced Applications / N. S. Karaduman, Y. Karaduman, H. Ozdemir [et al.] // Textiles for Advanced Applications. – 2017. – URL: <https://www.intechopen.com/books/textiles-for-advanced-applications/textile-reinforced-structural-composites-for-advanced-applications> (дата обращения: 14.04.2020).
3. Mavhungu, S. T. Aluminum Matrix Composites for Industrial Use: Advances and Trends / S. T. Mavhungu, E. T. Akinlabi, M. A. Onitiri [et al.]. – DOI 10.1016/j.promfg.2016.12.045 // International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing, SMPM. – 2017. – Vol. 7. – Pp. 178–182. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978916302086?via%3Dihub> (дата обращения: 14.04.2020).
4. Becenen, N. Mechanical Properties of Plastic Matrix Composite Materials Used in Tractor Bonnets / N. Becenen, B. Eker, M. Sahin. – DOI: 10.1177/0731684410386990 // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2010. – Vol. 29, Issue 24. – Pp. 3637–3644. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0731684410386990> (дата обращения: 14.04.2020).
5. Misirli, C. An Investigation on Plastic Matrix Composite Materials / C. Misirli, N. Becenen, M. Sahin. – DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.555.406 // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 555. – Pp. 406–412. – URL: <https://www.scientific.net/AMM.555.406> (дата обращения: 14.04.2020).
6. Valasek, P. Epoxy Resin Filled with Primary and Secondary Raw Material – Useable in Agriculture // P. Valasek, J. Kejval, M. Muller. – DOI 10.17221/23/2013-RAE // Research in Agricultural Engineering. – 2014. – Vol. 60, Issue 4. – Pp. 165–171. – URL: <https://www.agriculturejournals.cz/web/rae.htm?volume=60&firstPage=165&type=publishedArticle> (дата обращения: 14.04.2020).

7. **Сорокина, И. И.** Перспективы применения полимерных композитных материалов с добавлением нанокристаллических порошков оксида алюминия в конструировании и ремонте сельскохозяйственной техники / И. И. Сорокина, М. В. Астахов // Труды ГОСНИТИ. – 2012. – Т. 109, № 1. – С. 9–13.

8. **Vaidya, U.** Composites for Automotive, Truck and Mass Transit / U. Vaidya. – Lancaster : DEStech Publications, 2011. – 419 p. – ISBN 978-1-932078-79-4. – URL: https://www.researchgate.net/publication/288004403_Composites_for_Automotive_Truck_and_Mass_Transit (дата обращения: 14.04.2020).

9. **Figlus, T.** Impact of Application of Selected Composite Materials on the Weight and Vibroactivity of the Upper Gearbox Housing / T. Figlus, M. Koziol, L. Kuczynski. – DOI 10.3390/ma12162517 // Materials. – 2019. – Vol. 12, Issue 16. – Pp. 2517. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/16/2517> (дата обращения: 14.04.2020).

10. **Cross, R.** Elastic and Viscous Properties of Silly Putty // R. Cross. – DOI 10.1119/1.4732086 // American Journal of Physics. – 2012. – Vol. 80, Issue 10. – Pp. 870–875. – URL: <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.4732086> (дата обращения: 14.04.2020).

11. **Cross, R.** Elastic Properties of Plasticine, Silly Putty, and Tennis Strings / R. Cross. – DOI 10.1119/1.4767481 // The Physics Teacher. – 2012. – Vol. 50, Issue 9. – Pp. 527–529. – URL: <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.4767481> (дата обращения: 14.04.2020).

12. **Golinelli, N.** Mechanical Behavior of Magnetic Silly Putty: Viscoelastic and Magnetorheological Properties / N. Golinelli, A. Spaggiari, E. Dragoni. – DOI 10.1177/1045389X15591655 // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. – 2017. – Vol. 28, Issue 8. – Pp. 953–960. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1045389X15591655> (дата обращения: 14.04.2020).

13. **Boland, C. S.** Sensitive Electromechanical Sensors Using Viscoelastic Graphene-Polymer Nanocomposites / C. S. Boland, U. Khan, G. Ryan [et al.]. – DOI 10.1126/science.aag2879 // Science. – 2016. – Vol. 354, Issue 6317. – Pp. 1257–1260. – URL: <https://science.sciencemag.org/content/354/6317/1257> (дата обращения: 14.04.2020).

14. **Астахов, М. В.** Применение тонкостенных конструкций в сельскохозяйственном машиностроении / М. В. Астахов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2003. – № 7. – С. 25–27.

15. **Астахов, М. В.** Композиционные материалы в сельскохозяйственном машиностроении / М. В. Астахов, Т. В. Таганцев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2004. – № 9. – С. 42–44.

16. **Патент № 182601 Российская Федерация, МПК F16B.** Крепежный элемент для соединения деталей из слоистых полимерных композиционных материалов на основе стеклотканей и матриц из синтетических смол с металлическими частями конструкции : заявл. 11.05.17 : опубл. 23.08.18 / Астахов М. В. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Астахов М. В., Сорокина И. И., Грачева Е. В. – 6 с.

Поступила 13.11.2019; принята к публикации 16.12.2019; опубликована онлайн 30.06.2020

Об авторах:

Астахов Михаил Владимирович, профессор кафедры колесных машин и прикладной механики Калужского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана» (248600, Россия, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2), доктор технических наук, Publons ID: <https://publons.com/researcher/3506719/mikhail-astakhov/>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8675-1611>, mvastahov@gmail.com

Славкина Екатерина Викторовна, ассистент кафедры колесных машин и прикладной механики Калужского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана» (248600, Россия, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2), Publons ID: <https://publons.com/researcher/3500176/ekaterina-slavkina>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5889-5957>, e.v.slavkina@gmail.com



Заявленный вклад соавторов:

М. В. Астахов – постановка задачи, научное руководство, обсуждение результатов, анализ литературных источников; Е. В. Славкина – изготовление образцов, проведение лабораторных испытаний, статистическая обработка данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Folding Board of the Truck Platform. Patent 1745600 USSR. Appl. 28.02.1990; publ. 07.07.1992. Bulletin No. 25. 4 p. (In Russ.)
2. Karaduman N.S., Karaduman Y., Ozdemir H., et al. Textile Reinforced Structural Composites for Advanced Applications. *Textiles for Advanced Applications*. 2017. Available at: <https://www.intechopen.com/books/textiles-for-advanced-applications/textile-reinforced-structural-composites-for-advanced-applications> (accessed 14.04.2020). (In Eng.)
3. Mavhungu S.T., Akinlabi E.T., Onitiri M.A., et al. Aluminum Matrix Composites for Industrial Use: Advances and Trends. In: International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing, SMPM. 2017; 7:178-182. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.045>
4. Becenen N., Eker B., Sahin M. Mechanical Properties of Plastic Matrix Composite Materials Used in Tractor Bonnets. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2010; 29(24):3637-3644. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/0731684410386990>
5. Misirli C., Becenen N., Sahin M. An Investigation on Plastic Matrix Composite Materials. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 555:406-412. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.555.406>
6. Valasek P., Kejval J., Muller M. Epoxy Resin Filled with Primary and Secondary Raw Material – Useable in Agriculture. *Research in Agricultural Engineering*. 2014; 60(4):165-171. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17221/23/2013-RAE>
7. Sorokina I.I., Astakhov M.V. Prospects of Application of Polymer Composite Materials with Addition of Nanocrystalline Powders of Aluminium Oxide in Design and Repair of Agricultural Machinery. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2012; 109(1):9-13. (In Russ.)
8. Vaidya U. Composites for Automotive, Truck and Mass Transit. Lancaster: DEStech Publications; 2011. 419 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/288004403_Composites_for_Automotive_Truck_and_Mass_Transit (accessed 14.04.2020). (In Eng.)
9. Figlus T., Koziol M., Kuczynski L. Impact of Application of Selected Composite Materials on the Weight and Vibroactivity of the Upper Gearbox Housing. *Materials*. 2019; 12(16):2517. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12162517>
10. Cross R. Elastic and Viscous Properties of Silly Putty. *American Journal of Physics*. 2012; 80(10):870-875. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1119/1.4732086>
11. Cross R. Elastic Properties of Plasticine, Silly Putty, and Tennis Strings. *The Physics Teacher*. 2012; 50(9):527-529. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1119/1.4767481>
12. Golinelli N., Spaggiari A., Dragoni E. Mechanical Behavior of Magnetic Silly Putty: Viscoelastic and Magnetorheological Properties. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2017; 28(8):953-960. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389X15591655>
13. Boland C.S., Khan U., Ryan G., et al. Sensitive Electromechanical Sensors Using Viscoelastic Graphene-Polymer Nanocomposites. *Science*. 2016; 354:1257-1260. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aag2879>
14. Astakhov M.V. Application of Thin-Walled Structures in Agricultural Engineering. *Traktory i selkhozmachiny = Tractors and Agricultural Machinery*. 2003; (7):25-27. (In Russ.)

15. Astakhov M.V., Tagantsev T.V. Composite Materials in Agricultural Engineering. *Traktory i sel'hoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2004; (9):42-44. (In Russ.)
16. Fixing Element for Joining Parts Made of Laminated Polymer Composite Materials Based on Glass Fabrics and Synthetic Resin Matrixes with Metal Parts of Construction: Patent 182601 Russian Federation. Appl. 11.05.17; publ. 23.08.18. Bulletin No. 24. 6 p.

Received 13.11.2019; revised 16.12.2019; published online 30.06.2020

About the authors:

Mikhail V. Astakhov, Professor of Chair of Wheeled Machines and Applied Mechanics, Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University (2 Bazhenov St., Kaluga 248600, Russia), D.Sc. (Engineering), Publons ID: <https://publons.com/researcher/3506719/mikhail-astakhov/>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8675-1611>, mvastahov@gmail.com

Ekaterina V. Slavkina, Assistant of Chair of Wheeled Machines and Applied Mechanics, Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University (2 Bazhenov St., Kaluga 248600, Russia), Publons ID: <https://publons.com/researcher/3500176/ekaterina-slavkina>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5889-5957>, e.v.slavkina@gmail.com

Contribution of the authors:

M. V. Astakhov – task definition, scientific guidance, discussion of results, analysis of scientific literature; E. V. Slavkina – sample production, laboratory testing, statistical data processing.

All authors have read and approved the final manuscript.