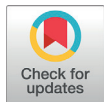


## МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.183-203>

EDN: <https://elibrary.ru/dwpcqc>

УДК / UDK 631.3-049.7


*Оригинальная статья / Original article*

### Управление жесткостью конструкции сельскохозяйственной техники в процессе ее эксплуатации

**М. В. Астахов, Е. В. Славкина** 

*Московский государственный технический  
университет имени Н. Э. Баумана,*

*г. Москва, Российская Федерация, <https://ror.org/00pb8h375>*

 *[slavkina@bmstu.ru](mailto:slavkina@bmstu.ru)*

#### *Аннотация*

**Введение.** Одним из перспективных подходов в проектировании конструкций машин является разработка адаптивных конструкций, компенсирующих внешние воздействия путем изменения напряженно-деформированного состояния своих элементов. Однако в сельскохозяйственной технике такие конструкции пока не получили широкого применения, что связано с характером нагружения и спецификой перевозимых грузов, вызывающих интенсивную коррозию и абразивный износ.

**Цель исследования.** Анализ способов изменения прочностных характеристик конструкций деталей и узлов сельскохозяйственных машин в процессе их эксплуатации и разработка методов определения их напряженно-деформированного состояния для использования в алгоритме управления проектированием.

**Материалы и методы.** Рассмотрен борт кузова транспортного средства, в котором несущая силовая часть выполнена в виде многослойной прямоугольной пластинки из полимерного композитного материала. Внутренние слои пластинки представляют собой соты, заполненные неньютоновской дилатантной жидкостью. Применены методы математического моделирования на основе построения краевых задач статики многослойных тонких пластинок, а также пластинок на упругом основании и исследования их напряженно-деформированного состояния путем аналитического решения дифференциальных уравнений, выраженных в перемещениях.

**Результаты исследования.** Разработан алгоритм определения напряженно-деформированного состояния многослойной прямоугольной пластинки из композитного материала с дискретным опиранием, находящейся под действием нормальной распределенной нагрузки, с учетом ударных возмущающих факторов. Найдены максимальные изгибные напряжения, а также напряжения, возникающие от торможения внутренней частью борта твердого тела, двигающегося с ускорением.

**Обсуждение и заключение.** Проведенное исследование позволило проанализировать существующие конструкционные материалы, технологии и технические средства, используемые для компенсации управляющих воздействий, возникающих при работе машин. Разработана методология перехода от традиционных конструкций к перспективным моделям, имеющим адаптивные элементы, способные менять свое

© Астахов М. В., Славкина Е. В., 2026



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

напряженно-деформированное состояние в зависимости от изменения внешней нагрузки. Теоретически обоснованная многослойная композитная конструкция борта кузова транспортного средства способна выдерживать не только распределенные силы, но и удары, при этом ее материалоемкость значительно снижена (в несколько раз) по сравнению со стальной, а ресурс увеличен в связи с химической стойкостью материалов, применяемых при ее изготовлении. Подобный подход в проектировании позволяет использовать предлагаемую методологию для реализации широкого круга задач по выпуску новой техники сельскохозяйственной отрасли.

*Ключевые слова:* борт прицепа транспортного средства, полимерный композитный материал, многослойная композитная пластинка, адаптивная конструкция, алгоритм управления


*Конфликт интересов:* авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Для цитирования:* Астахов М.В., Славкина Е.В. Управление жесткостью конструкции сельскохозяйственной техники в процессе ее эксплуатации. *Инженерные технологии и системы.* 2026;36(1):183–203. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.183-203>

## Control of the Structural Rigidity of Agricultural Machinery During its Operation

M. V. Astakhov, E. V. Slavkina 

*Bauman Moscow State Technical University,  
Moscow, Russian Federation, <https://ror.org/00pb8h375>*

 *slavkina@bmtu.ru*

### *Abstract*

**Introduction.** A promising approach to the machine design is the development of adaptive design structures compensating for external influences by changing the stress-strain state of their elements. However, these structures have not been widely used in agricultural machinery design because of the type of loading and the specific of transported loads that cause intense corrosion and abrasive damage.

**Aim of the study.** The study is aimed at analyzing the methods for changing the strength characteristics of the structures of parts and assembly units of agricultural machinery during their operation and at developing methods for determining their stress-strain state to use in the design control algorithm.

**Materials and methods.** As an example, we have examined the side of a vehicle body. Based on the principles of automatic control theory, the load-carrying structure is designed as a multilayer rectangular plate made of a polymer composite material. The inner layers are honeycomb filled with a non-Newtonian dilatant fluid. The filler performs the function of a compensator for external impacts. There were used the methods of mathematical modeling based on the constructing boundary value problems of the statics of multilayer thin plates, and plates on an elastic foundation, and studying their stress-strain state by solving analytically differential equations expressed in displacements.

**Results.** There was developed an algorithm for determining the stress-strain state of a multilayer rectangular composite plate with discrete support under a normal distributed load taking into account impact disturbances. There were determined maximum bending stresses and the stresses arising from the braking of a rigid body moving with acceleration by the inner part of the plate.

**Discussion and Conclusion.** In the study, there have been analyzed existing structural materials, technologies and technical means used to compensate for control action arising from the machine operation. There has been developed the methodology for transitioning from traditional designs to advanced models featuring adaptive elements, which change their stress-strain state depending on changes in external load. There has been theoretically substantiated a multilayer composite vehicle body side structure, which can

withstand not only distributed forces but also impacts. Its material consumption is significantly reduced (several times) compared to steel, and its service life is increased due to the chemical resistance of the materials used in its manufacture. This design approach allows the proposed methodology to be used for a wide range of applications in the production of new agricultural equipment.

*Keywords:* vehicle trailer side, polymer composite material, multilayer composite plate, adaptive design, control algorithm

*Conflict of interest:* The authors declare that there is no conflict of interest.

*For citation:* Astakhov M.V., Slavkina E.V. Control of the Structural Rigidity of Agricultural Machinery During its Operation. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(1):183–203. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.183-203>

## ВВЕДЕНИЕ

Адаптивные конструкции представляют собой передовое решение в инженерии, которое находит применение в различных сферах, включая машиностроение, строительство, а также другие промышленные отрасли.

Одним из главных преимуществ таких конструкций является возможность получения качественно новых характеристик: такие конструкции могут обеспечивать более высокую прочность, жесткость и устойчивость к внешним воздействиям по сравнению с традиционными. Кроме того, адаптивные конструкции позволяют снизить материалоемкость за счет рационального распределения нагрузки и оптимизации формы изделий.

В настоящее время активно обсуждаются вопросы использования адаптивных конструкций в качестве некоторых агрегатов и узлов машин, способных изменять свои свойства в ответ на внешние воздействия, в том числе аварийные или экстремальные. Разработка таких систем способствует достижению качественно новых параметров путем рационального изменения напряженно-деформированного состояния входящих деталей. При этом снижается материалоемкость конструкции при сохранении уровня рабочих параметров. Достигается повышение надежности и эффективности за счет продления срока службы машины.

Адаптивность узлов и агрегатов машин можно рассматривать как способность автоматического управления жесткостью или физико-механическими свойствами материала входящих деталей в зависимости от изменения внешних возмущающих факторов: внешних сил, температуры окружающей среды и др. Во многих случаях такое управление осуществляется с помощью управляющих устройств, встроенных дополнительными звеньями в основные механизмы машины.

Различного вида механические управляющие устройства достаточно часто используются в технических решениях, но малоприменимы для аграрной техники. Специфика нагрузок, возникающих при эксплуатации сельскохозяйственных машин, характеризуется малоцикловыми воздействиями с высокой амплитудой или случайными локальными нагружениями (например, ударами). Это также объясняется некоторой задержкой реакции адаптивных устройств на внешние воздействия. Кроме того, такие системы, включенные в структуру сельскохозяйственной машины, приводят к усложнению ее конструкции, что уменьшает уровень надежности.

Регулярный рост цен на стальные полуфабрикаты является серьезной проблемой, поскольку увеличивает стоимость машин и, как следствие, продуктов сельского хозяйства, что стимулирует расширение ассортимента используемых конструкционных материалов в отрасли. Наиболее четко это может проявляться при производстве транспортирующих машин, где особенности воздействия перевозимых сельскохозяйственных грузов вызывают значительный коррозионный и абразивный износ, приводящий к сокращению срока службы оборудования.

Поэтому целью данного исследования является анализ возможных способов управления физико-механическими свойствами материалов, из которых изготавливаются детали, узлы и агрегаты сельскохозяйственных машин по перевозке грузов (на примере борта прицепа транспортного средства), и разработка методов определения напряженно-деформированного состояния для их включения в алгоритм управления проектированием, на основе чего должен выдерживаться алгоритм функционирования рассматриваемой системы во время эксплуатации.

## ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Процесс проектирования конструкции машины, как и любой другой процесс изменения некоторых параметров во времени, можно описать на основе понятий теории автоматического управления<sup>1</sup>.

В этом случае создание проекта, а затем объекта (машины) следует представить в виде информационно-математической модели (системы), алгоритм функционирования которой должен подчиняться известным принципам теории автоматического управления: принципу разомкнутого управления, принципу обратной связи или принципу компенсации (управлению по возмущению).

Применение первых двух принципов в неявном виде при проектировании машин широко распространено. Так, принцип разомкнутого управления используется всегда (часто в расчетах первого приближения), когда нужно получить оценочный результат при известных ограничениях. Принцип обратной связи применяется при создании сложных конструкций, для которых необходимо изготовление моделей или опытных изделий с целью проведения соответствующих испытаний с дальнейшей корректировкой управляющих воздействий.

Принцип компенсации, также известный как управление по возмущению, основывается на том, что изменения регулируемой величины, например внутренних сил, определяются как управляющими факторами (физические и геометрические характеристики системы), так и внешними воздействиями (внешние силы), т. е. предполагает корректировку параметров управляющих и возмущающих воздействий с целью получения управляемых координат процесса проектирования. При создании машин и сооружений принцип компенсации применяется не часто, так как предполагает работу не только с информационно-математической моделью (в виде проекта и конструкторской документации), но и с вновь изготовленной и эксплуатирующейся конструкцией.

<sup>1</sup> Астахов М.В. Управление проектированием. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2011. 360 с.

Этот принцип использован при проектировании машин<sup>2</sup> с так называемыми следящими или управляемыми затяжками, которые автоматически изменяют напряженно-деформированное состояние создаваемой модели в зависимости от переменной во времени внешней нагрузки, т. е. изменение управляющих и возмущающих воздействий происходит только за счет построения новой структурной формулы машины<sup>3</sup>, что косвенно влияет на жесткость ее элементов.

Статические затяжки корректируют поле внутренних сил конструкции<sup>4</sup> и при циклическом нагружении не меняют амплитуду цикла напряжений, вследствие чего увеличивают надежность в малой степени. Управляемые затяжки значительно уменьшают амплитуду цикла напряжений, но имеют свой недостаток – сложную конструкцию, что также сказывается на надежности системы.

Так, например, управляющее устройство автоматической компенсации окружных напряжений в емкости автотормовоза АСП-25 имеет 22 новые детали, а устройство компенсации меридиональных напряжений – 48. Автоматическое устройство компенсации сжимающих напряжений лонжерона рамы прицепа ПСЕ-20 состоит из 16 деталей<sup>5</sup>.

Если ввести в процесс компенсации управляющие воздействия, изменяющиеся во времени, в частности переменные во времени, физико-механические характеристики материала конструкции машины, функционально связанные с параметрами внешних сил, то можно отказаться от конструктивно сложных управляемых затяжек и проектировать системы, имеющие переменную во времени жесткость. Это открывает перспективы резкого снижения массы изделия, так как управление жесткостью предполагает управление не геометрическими, а физико-механическими параметрами материала входящих деталей проектируемой конструкции [1; 2].

Наличие механической или электронной подсистемы, следящей за изменением возмущающих факторов в конструкции, приводит к усложнению последней. Поэтому за счет управления физико-механическими параметрами материала следует так компенсировать воздействие переменных внешних сил, чтобы в алгоритме функционирования их можно было представить в виде некоторой постоянной величины.

В изделиях из изотропных материалов реализация данного подхода может быть затруднена. Чтобы уменьшить массу таких конструкций следует заменить традиционные металлические элементы на узлы и детали, сделанные из полимерных композитных материалов (ПКМ) [3; 4], в некоторых из которых могут быть предусмотрены элементы, меняющие свои физико-механические характеристики в зависимости от изменения внешних сил.

Одним из таких элементов может служить слой дилатантной жидкости, в частности, полисиликона. При воздействии на него твердым телом, движущимся с ускорением (удар), жидкий слой полисиликона становится упругим. В настоящее

<sup>2</sup> Астахов М.В. Управление проектированием.

<sup>3</sup> Тимофеев Г.А. Теория механизмов и машин: учебник и практикум для вузов. М.: Юрайт; 2024. 432 с.

<sup>4</sup> Беленя Е.И., Стрелецкий Н.С., Ведеников Г.С. Металлические конструкции. Специальный курс: учеб. пособие для вузов. М: Стройиздат; 1982. 472 с.

<sup>5</sup> Астахов М.В. Управление проектированием.

время рассмотрена прямоугольная многослойная пластинка, одним из слоев которой являлся полисиликон [1]. В ходе экспериментов, на основе известных методик, были выявлены определенные механические свойства твердого полисиликона, проявляющиеся при ударе: модуль упругости первого рода, модуль сдвига, коэффициент Пуассона, плотность, изменение объема при изменении температуры окружающей среды [3; 5]. Также было исследовано поведение трехслойной пластинки из ПКМ при линейном увеличении значения загрузки и в течение ударного воздействия.

В результате изучения научных работ по применению полимерных композитных материалов в технических решениях, в частности исследований зарубежных ученых, были разработаны рекомендации для изготовления борта транспортного средства (ТС) из многослойных стеклокомпозитов, включающих в себя дилатантную жидкость [6–8].

Отечественными учеными исследована экономическая эффективность изготовления и эксплуатации композитного борта путем экспертных оценок технологии его изготовления, эксплуатации и утилизации. Сделан вывод о предпочтительности композитного борта перед стальным [9]. Подробно рассмотрены вопросы технологии ремонта аналогичных композитных изделий<sup>6</sup>, изучены процессы и установки, предназначенные для утилизации трехслойных композитных бортов<sup>7</sup>.

Необходимость снижения массы деталей и узлов сельскохозяйственных машин при одновременном увеличении их ресурса неоспорима. На основе анализа литературы можно определить направление исследований в виде построения методологии замены прототипа, стального узла машины, на узел, выполненный из композитных материалов на основе стекловолокна и полимерных смол с включением элементов, меняющих свои физико-механические характеристики в зависимости от изменения внешней нагрузки.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### *Объекты исследования*

В качестве объекта исследования рассматривается процедура замены металлических (в частности, стальных) конструкций машин (на примере борта кузова ТС) композитными, выполненными на основе полимерных смол и различного вида волокон, тканей, рогож и другого вида наполнителей с элементами, меняющими свои физико-механические характеристики при резком изменении внешней нагрузки.

### *Материалы, методы, оборудование и процедура исследования*

Рассматривая проблему замены борта ТС, выполненного из стальных деталей, на композитный борт, металлические детали в котором занимают не более 5 % объема изделия, разделили ее на ряд задач, без решения которых эффективной замены стали на композит невозможно [10].

Изготовление трехслойной или многослойной прямоугольной пластинки из полимерного композитного материала, внутренние слои которой представляют

<sup>6</sup> Серегин Д.В. Повышение долговечности и эффективности использования дорожно-строительных машин за счет применения полимерных композиционных материалов: дис. ... канд. техн. наук. М.; 2020. 149 с.

<sup>7</sup> Славкина Е.В. Конструирование силовых корпусных элементов транспортного средства сельскохозяйственного назначения из композитных материалов: дисс. ... канд. тех. наук. Курск; 2023. 179 с.

собой соты, гофр, армированный или неармированный пенопласт, не представляет технологической сложности (начиная с мокрой выкладки и заканчивая автоматической намоткой препрега на оправку)<sup>8</sup> [11].

Металлические, чаще всего стальные, детали, предназначенные для компенсации или перераспределения сосредоточенных внешних сил, могут быть соединены с композитной частью конструкции различными известными разъемными или неразъемными соединениями. Одними из наилучших являются трансверсальные металло-композитные соединения, крепежный элемент которых имеет вид наконечника копья<sup>9</sup>. С помощью таких соединений можно изготавливать входящие стальные детали для борта, в частности петли крепления борта к платформе ТС и кронштейны его крепления к соседним бортам.

Такая замена серийного борта, изготовленного из рифтованного стального листа с рамным подкреплением на основе гнутых профилей, подробно рассмотрена на примере прицепа ПСЕ-20<sup>10</sup>. Стальной борт имел массу 120 кг. Опытный борт, выполненный в виде трехслойной пластинки – сэндвича с внутренним слоем из полистирольного пенопласта и наружными слоями из композита, изготовленного на основе полимеризации стеклоткани, предварительно пропитанной эпоксидной смолой с отвердителями и пластификаторами, имел массу 35 кг. Статические и полевые испытания показали – борт из ПКМ равнопрочен стальному, но имеет меньшую жесткость, что не повлияло на его эксплуатационные характеристики.

Единственным недостатком такого борта являлась низкая стойкость к ударным воздействиям при загрузке и перевозке твердокускового груза, хотя для ПСЕ-20 в технических условиях по эксплуатации характеристики груза были четко ограничены перевозкой только сыпучего и полужидкого груза.

Одним из вариантов увеличения стойкости борта к ударным воздействиям может служить его покрытие стальным листом, что является арьергардным решением.

Предложено в многослойном борте из ПКМ один слой выполнить из неньютоновской дилатантной жидкости (полисиликона), которая во время удара о борт твердым телом приобретает в месте удара упругие свойства [8] (рис. 1, 2).

Разъемные резьбовые соединения показаны условно на рисунке 1 (деталь 1) в форме четырех шестигранных головок, закрепленных на теле шпилек, внедренных в тело препрега при мокрой выкладке без перерезания нитей основы. На серийном экземпляре борта вместо гаек должны быть установлены чечевицеобразные головки, утопленные в тело стального кронштейна А.

Исходя из полученных механических характеристик полисиликона в упругом состоянии [3] и методик расчета многослойных пластинок, выполненных из ПКМ<sup>11</sup> [12], был составлен алгоритм управления проектированием борта транспортного средства<sup>12</sup> [13], на основе чего должен выдерживаться алгоритм

<sup>8</sup> Справочник по композиционным материалам: под ред. Любина Дж. М.: Машиностроение; 1988. 448 с.

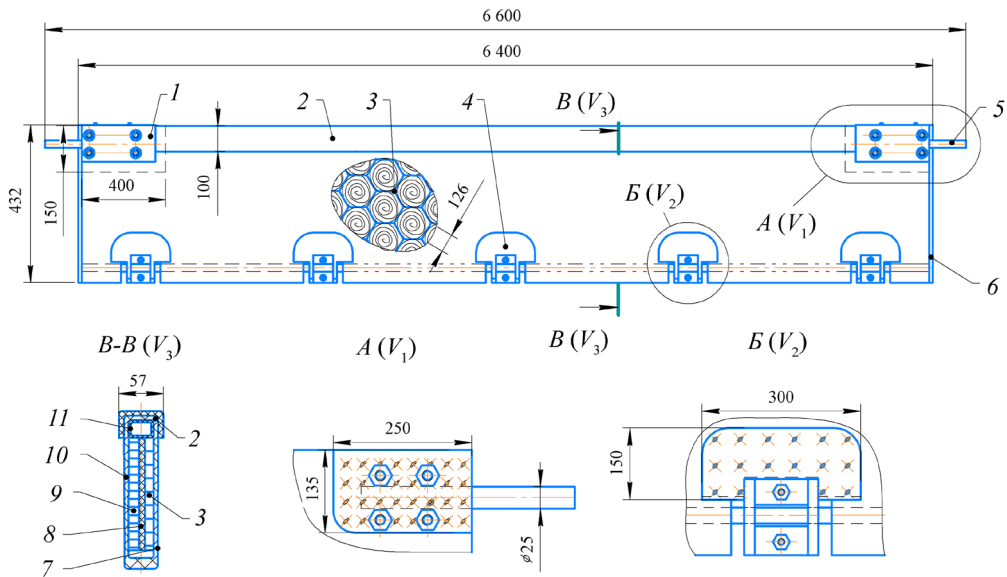
<sup>9</sup> Астахов М.В., Сорокина И.И. Проектирование трансверсальных металло-композитных соединений. Маврикий: LAP LAMBERT Academic Publishing; 2017. 233 с.

<sup>10</sup> Астахов М.В. Управление проектированием.

<sup>11</sup> Александров А.Я., Брюккер Л.Э., Куршин Л.М., Прусаков А.П. Расчет трехслойных панелей. М.: Оборонгиз; 1960. 271 с.

<sup>12</sup> Славкина Е.В. Конструирование силовых корпусных элементов транспортного средства сельскохозяйственного назначения из композитных материалов.

функционирования системы во время эксплуатации, опирающийся на третий принцип теории автоматического управления – принцип компенсации. В процессе эксплуатации борта ТС при ударе его управляющие воздействия (физико-механические характеристики материала) изменяются, на «затвердевание» дилатантной жидкости затрачивается часть энергии удара, т. е. внутренние силы в этой зоне уменьшаются. В результате возникновения длинных молекул в полисиликоне [14] создается упругая пластинка, опирающаяся на упругое основание композитной перегородки борта 4 (рис. 2), что меняет структурную формулу системы. Это, в свою очередь, приводит к дальнейшему перераспределению внутренних сил и уменьшению их концентрации в месте удара.



Р и с. 1. Борт ТС из ПКМ:

- 1, 5 – стальные кронштейны, примыкающие к торцевым бортам платформы ТС;  
 2 – продольный силовой профиль из ПКМ; 3 – соты, предназначенные для создания замкнутого объема, в котором происходит затвердевание полисиликона при ударе; 4 – стальные петли для открытия борта; 6 – левая и правая торцевые крышки борта; 7 – внутренняя пластина борта, контактирующая с перевозимым грузом; 8 – внутренняя силовая пластина из ПКМ;  
 9 – соты из ПКМ; 10 – наружная пластина борта, выполненная из ПКМ;  
 11 – внутренний, круглой или овальной формы, стальной профиль усиления верхней части борта

F i g. 1. Vehicle side made of polymer composite materials:

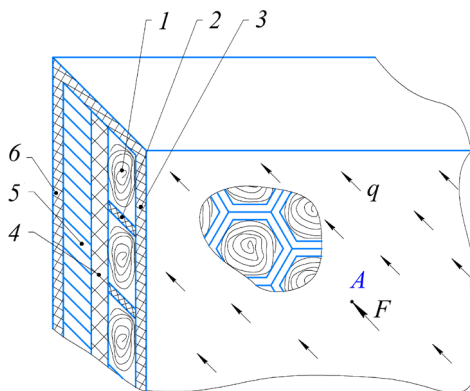
- 1, 5 – steel brackets adjacent to the end sides of the vehicle platform; 2 – longitudinal power profile made of PCM; 3 – honeycombs designed to create a closed volume in which the polysilicon hardens upon impact; 4 – steel hinges for opening the side; 6 – left and right end covers of the side; 7 – inner side plate in contact with the transported cargo; 8 – inner power plate made of PCM;  
 9 – PCM honeycombs; 10 – outer side plate made of PCM;  
 11 – internal, round or oval, steel profile for reinforcing the upper part of the side

Примечание: А – узел; В – узел; В-В – сечение.

Note:  $V_1$  – assembly unit;  $V_2$  – assembly unit;  $V_3$  – section.

Источник: рисунки 1–5 составлены авторами статьи.

Source: the figures 1–5 are compiled by the authors of the article.



Р и с. 2. Левый угол борта ТС (входящие детали 1, 9, 11 борта на рис. 1 здесь не показаны):  
 1 – полисиликон, заключенный в пленку из полиэтилена;  
 2 – соты из ПКМ для полисиликона; 3 – внутренняя пластина; 4 – внутренняя силовая пластина;  
 5 – силовые соты из ПКМ; 6 – наружная пластина  
 F i g. 2. Left vehicle side corner (inputs 1, 9, 11 not shown):  
 1 – polysilicone enclosed in a polyethylene film; 2 – polyethylene composite honeycomb  
 for polysilicone; 3 – inner plate; 4 – inner force plate;  
 5 – polyethylene composite force honeycomb; 6 – outer plate

*Примечание:*  $q$  – распределенная сила от перевозимого груза;  $F$  – ударная нагрузка.  
*Note:*  $q$  – distributed force from the transported load;  $F$  – shock load.

Было выяснено, что механические характеристики твердого полисиликона близки к механическим характеристикам резины с наполнителем – сажей [3]. Однако необходимо учитывать, что любой элемент системы «Борт транспортного средства» может воспринимать внешние нагрузки и перераспределять внутренние силы, будучи замкнут на соседние элементы путем опирания, либо свободного, либо в виде шарнира или защемления [9].

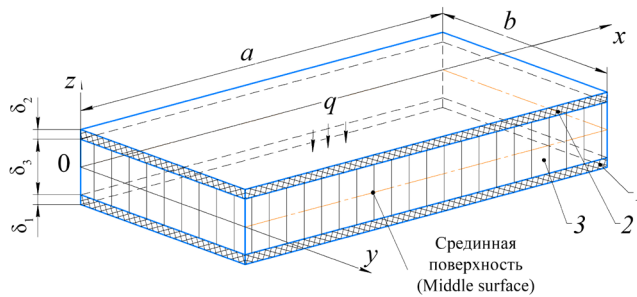
Возникновение упругой пластинки из полисиликона в крупных шестигранных сотах при ударе предполагало аппроксимацию опирания вдоль шестигранного контура сот из ПКМ в виде квазицилиндрического шарнира. В результате, изгибающий момент по контуру упругой пластинки был равен нулю, а распределенная продольная реактивная сила, параллельная срединной поверхности внутреннего листа борта, передавалась через стенки сот в соседние ячейки, заполненные полисиликоном, который частично «затвердевал» и поглощал остаточную энергию удара.

В случае резиновой прокладки на ее краях необходимо создание реального шарнирного опирания (из какого-либо металла), что значительно утяжелило бы и усложнило конструкцию, и одна из целей – снижение массы борта – не была бы достигнута.

Следует заметить, что воспринимающими основную часть внешней нагрузки, являются слои 4, 5, 6 (рис. 2). Слой 6 контактировал с перевозимым грузом, поэтому во избежание абразивного изнашивания его необходимо было покрыть эпоксидным гелькоутом с упрочняющей добавкой в виде наполнителя – нанокристаллического порошка корунда ( $Al_2O_3$ ) [15; 16]. Это, согласно проведенным

исследованиям [15; 17–19], позволило повысить микротвердость и износостойкость, а также препятствовать отслаиванию стеклоткани, рассеиванию ее в воздухе и попаданию в перевозимые ТС продукты. Слой *b*, а также торцевые крышки, верхние и нижние части борта покрывались цветным эпоксидным гелькоутом без добавок нанопорошка корунда, так как не испытывали трения перевозимого груза.

Входящие детали позиции 1–3 (рис. 2) имели малую жесткость. Таким образом, основой для построения алгоритма функционирования выбрана трехслойная пластинка из ПКМ. Для нее главным элементом построенного алгоритма управления использованы три уравнения общего изгиба трехслойной пластинки<sup>13</sup> (рис. 3), где увеличенная толщина внутреннего, контактирующего с грузом слоя, состоящего из слоев 1–4 (рис. 2), учитывалась в их решении путем введения в коэффициенты уравнений необходимой жесткости [20]. Слои 4 и 6 состояли из нескольких листов стеклоткани с поворотом нити основы на 30°. Данный прием позволил считать в первом приближении материал слоев 4 и 6 изотропным.



Р и с. 3. Трехслойная пластинка:  
1 – внешний слой; 2 – внутренний, прилегающий к грузу слой;  
3 – средний слой (шестигранные соты)

F i g. 3. Three-layer plate:  
1 – outer layer; 2 – inner layer adjacent to the load; 3 – middle layer (hexagonal honeycomb)

*Примечание:*  $q$  – нормальная, распределенная по всей поверхности внутреннего слоя, нагрузка;  $a$  – длина пластинки;  $b$  – ширина пластинки;  $0$  – начало координат;  $x, y, z$  – оси координат;  $\delta_1$  – толщина внешнего слоя пластинки;  $\delta_2$  – толщина внутреннего слоя пластинки;  $\delta_3$  – толщина среднего слоя.

*Note:*  $q$  – normal load distributed over the entire surface of the inner layer;  $a$  – plate length;  $b$  – plate width;  $0$  – origin;  $x, y, z$  – coordinate axes;  $\delta_1$  – thickness of the outer layer of the plate;  $\delta_2$  – thickness of the inner layer of the plate;  $\delta_3$  – thickness of the middle layer.

Уравнения равновесия трехслойной пластинки, находящейся под действием поперечной нагрузки  $q$  и распределенных изгибающих моментов  $X_M$  и  $Y_M$  при условии  $\delta_1 = \delta_2 = \delta$  имеют вид<sup>14</sup>:

$$L_{11}w + L_{12}u + L_{13}v = \frac{1 - \mu^2}{2E\delta} q; \quad (1)$$

<sup>13</sup> Hoff N.J. Bending and Buckling of Rectangular Sandwich Plates. Washington: NASA TN 2225; 1950. URL: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3956467> (дата обращения: 17.04.2025).

<sup>14</sup> Там же.

$$L_{21}w + L_{22}u + L_{23}v = \frac{1-\mu^2}{E\delta} n_x; \quad (2)$$

$$L_{31}w + L_{32}u + L_{33}v = \frac{1-\mu^2}{E\delta} n_y, \quad (3)$$

где  $L_{11}, L_{12}, L_{13}, L_{21}, L_{22}, L_{23}, L_{31}, L_{32}, L_{33}$  – дифференциальные операторы;  $w$  – нормальное перемещение (вдоль оси  $z$ ), одинаковое для всех слоев, м;  $u$  – перемещение в слое 2 относительно срединной поверхности по оси  $x$ , м;  $v$  – перемещение в слое 2 относительно срединной поверхности по оси  $y$ , м;  $E$  – модуль продольной упругости, Па;  $\delta$  – толщина внешних и внутренних слоев, м;  $q$  – нормальная распределенная нагрузка на борт, Па;  $n_x, n_y$  – нормальные антисимметричные усилия, Н;  $\mu$  – коэффициент поперечной деформации (Пуассона) для слоев 1 и 2 (рис. 3).

Здесь дифференциальные операторы  $L_{ij}$  определяли следующим образом:

$$L_{11} = \frac{D(1-\mu^2)}{E\delta} \Delta^2 - \frac{G_c(2h+\delta)^2(1-\mu^2)}{4E\delta h} \Delta, \quad (4)$$

$$L_{12} = L_{21} = -\frac{G_c(2h+\delta)(1-\mu^2)}{2E\delta h} \cdot \frac{\partial}{\partial x}, \quad (5)$$

$$L_{13} = L_{31} = -\frac{G_c(2h+\delta)(1-\mu^2)}{2E\delta h} \cdot \frac{\partial}{\partial y}, \quad (6)$$

$$L_{22} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1-\mu}{2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{G_c(1-\mu^2)}{E\delta h}, \quad (7)$$

$$L_{23} = L_{33} = \frac{1+\mu}{2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}, \quad (8)$$

$$L_{33} = \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{1-\mu}{2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{G_c(1-\mu^2)}{E\delta h}, \quad (9)$$

где  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  – двумерный оператор Лапласа,  $\Delta^2 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}$ ,

$G_c$  – модуль сдвига слоя 3, Па;  $h$  – общая толщина пластинки, м;  $x, y$  – соответствующие координаты, м;  $D = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)}$  – жесткость наружных слоев, Нм.

Нормальные антисимметричные усилия  $n_x$  и  $n_y$ , равномерно распределенные по толщине слоев 1 и 2 пластинки (рис. 3), соответствовали действию относительно осей  $x$  и  $y$  изгибающих моментов  $X_M$  и  $Y_M$ :

$$X_M = 2n_x \left( h + \frac{\delta}{2} \right), \quad Y_M = 2n_y \left( h + \frac{\delta}{2} \right).$$

Спецификой напряженно-деформированного состояния трехслойных или многослойных пластинок, находящихся под нормальной внешней нагрузкой, является то, что в зонах их прилегания к опорам усилия со всех элементов конструкции передаются на один слой<sup>15</sup>. Учитывая это и то, что слои 2, 4, 5, 6 (рис. 2) представлены на рисунке 3 одним слоем 2 с суммарной жесткостью, которая считалась жесткостью силовой пластины  $\delta$  (рис. 1), расчет на общий изгиб трехслойных симметричных по толщине пластинок в большинстве случаев приводил к решению тех же уравнений, что и расчет трехслойных пластинок с несимметричным по толщине расположением слоев.

С учетом того, что пластинка (рис. 3) нагружена только нормальной распределенной нагрузкой  $q$ , уравнения равновесия (1)–(3) свели к одному, используя функцию перемещений  $U$ :

$$D_z \left[ 1 - \frac{1-\mu}{2} \chi_c \Delta \right] \left[ 1 - \chi_c \frac{2D_2}{D_z} \Delta \right] \Delta \Delta U = q; \quad (10)$$

$$w = (1 - \chi_c \Delta) \left[ 1 - \frac{1-\mu}{2} \chi_c \Delta \right] U; \quad (11)$$

$$u = -\frac{\delta_3 + \delta_2}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left[ 1 - \frac{1-\mu}{2} \chi_c \Delta \right] U; \quad (12)$$

$$v = -\frac{\delta_3 + \delta_2}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left[ 1 - \frac{1-\mu}{2} \chi_c \Delta \right] U, \quad (13)$$

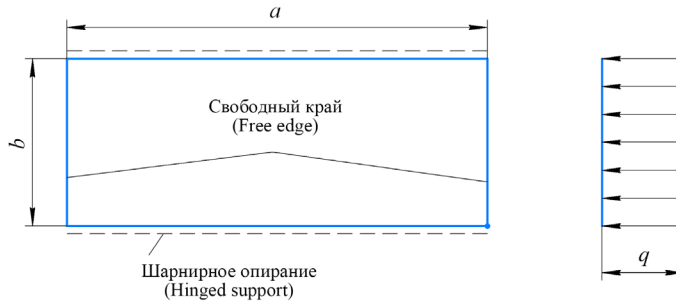
где  $D_z = \frac{E_2 \delta_2 (\delta_3 + \delta_2)^2}{2(1 - \mu_2^2)} + 2D_2$  – жесткость трехслойной пластинки;

$\chi_c = \frac{E_2 \delta_3 \delta_2 (1 - \mu_2^2)}{2G_c}$  – гибкость среднего слоя 3;  $E_2$  – модуль упругости внутреннего слоя 2, Па;  $\mu_2$  – коэффициент Пуассона внутреннего слоя 2;

$D_2 = \frac{E_2 \delta_2^3}{12(1 - \mu_2^2)}$  – цилиндрическая жесткость внутреннего слоя 2, Нм.

Учитывая большую жесткость деталей 9, 11 (рис. 1), а также возможность установки надставных бортов, построена расчетно-силовая схема загрузки борта внешними силами (рис. 4). Постоянная внешняя нагрузка в решении задачи искривления пластинки-борта задавалась по максимальному значению у нижней части борта, примыкающей к платформе прицепа ТС.

<sup>15</sup> Кобелев В.Н., Коварский Л.М., Тимофеев С.И. Расчет трехслойных конструкций. М.: Машиностроение; 1984. 30 с.



Р и с. 4. Расчетная схема

F i g 4. Calculation scheme

*Примечание:*  $q$  – нормальная, распределенная по всей поверхности внутреннего слоя, нагрузка;  $a$  – длина пластинки;  $b$  – ширина пластинки.

*Note:*  $q$  – normal load distributed over the entire surface of the inner layer;  $a$  – plate length;  $b$  – plate width.

Шарнирное опирание по верхней части борта можно объяснить влиянием стального профиля *II* (рис. 1), который свободно проходил через внутреннюю часть композитной детали *2* и закреплен шпильками к кронштейнам *1*, *5*. Профиль *II* выступал в роли шарнирной опоры, вокруг которой при изгибе от нагрузки  $q$  осуществлялся поворот сечений борта.

Граничные условия заданы с учетом принципа Сен-Венана и стесненности деформации свободных краев пластинки из-за большой жесткости деталей *2*, *6*, *II* (рис. 1).

Шарнирное опирание:

$$w = 0, \text{ при } y = 0, b; \quad \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0, \text{ при } y = 0, b; \quad u = 0 \text{ при } y = 0, b; \quad v = 0 \text{ при } y = 0, b. \quad (14)$$

Свободный край:

$$-D_z \left( \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2 - \mu_2) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right) = 0, \text{ при } x = 0, a; \quad (15)$$

$$-D_z \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu_2 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = 0, \text{ при } x = 0, a; \quad (16)$$

$$\begin{aligned} u &= 0 \text{ при } y = 0, a; \\ v &= 0 \text{ при } y = 0, a. \end{aligned} \quad (17)$$

Краевая задача (10)–(17) решается в замкнутом виде, либо одним из численных методов, в частности методом конечных разностей, где очень точно можно задать необходимые граничные условия в каждом узле сетки (шарнирные – в опорах борта, свободный край – между опорами)<sup>16</sup>. В результате этого получены величины внутренних сил и напряжений в элементах рассматриваемой пластины в случае статической нагрузки.

<sup>16</sup> Александров А.Я., Брюккер Л.Э., Куршин Л.М., Прусаков А.П. Расчет трехслойных панелей.

При столкновении с внутренним листом из ПКМ 3 (рис. 2) твердого тела (часть перевозимого груза), движущегося с ускорением, полисиликон 1, находящийся в одной из ячеек сот 2, перешел в упругое состояние.

Образовавшийся упругий объем полисиликона в ячейке сот 2 представили в виде круглой пластинки радиуса  $r$ , вписанной в шестигранник.

При опирании на деталь 1 (рис. 2) полученной пластинки рассматривали последнюю как пластинку на упругом основании.

Напряженно-деформированное состояние такой пластинки исследовали на основе решения дифференциального уравнения<sup>17</sup>:

$$\frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left( r \cdot \frac{dw_n}{dr} \right) \right] = \frac{q_n - k_c w_n}{D_n}, \quad (18)$$

где  $q_n$  – статически приложенная распределенная внешняя нагрузка, возникающая от удара грузом, движущимся с ускорением;  $k_c w_n$  – реакция основания 2 (рис. 2);  $k_c$  – коэффициент пропорциональности. Все остальные величины обозначаются идентично выражениям (1–9), но имеют индекс  $n$ , говорящий об их принадлежности к пластинке на упругом основании<sup>18</sup>.

Заменив  $q_n$  на сосредоточенную силу  $F$ , приложенную в центре пластинки, на основе решения уравнения (18) с граничными условиями на контуре:

$$w_n = 0; \quad -D_n \left( \frac{d^2 w_n}{dr^2} + \frac{\mu_n}{r} \cdot \frac{dw_n}{dr} \right) = 0, \quad (19)$$

получили

$$w_{n\max} = \frac{Fl^2}{8D_n}, \quad (20)$$

$$\text{где } l = 4 \sqrt{\frac{D_n}{k_c}}, \quad D_n = \frac{E_n h_n^3}{12(1-\mu_n^2)}.$$

Зная  $w_{n\max}$ , нашли максимальные напряжения от силы  $F$ <sup>19</sup>:

$$\sigma_{n\max} = 0,275(1-\mu_n) \frac{F}{h_n^2} \lg \frac{E_n h_n^3}{k_c f^4}. \quad (21)$$

Здесь: при  $r_n < 1,724h_n$ ,  $f = \sqrt{1,6r_n^2 + h_n^2} - 0,675h_n$ ; при  $r_n > 1,724h_n$ ,  $f = z_n$ ; сосредоточенная сила соответствует  $r_n = 0$ .

<sup>17</sup> Александров А.Я., Брюккер Л.Э., Куршин Л.М., Прусаков А.П. Расчет трехслойных панелей.

<sup>18</sup> Пастернак П.Л. Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели. М.: Госстройиздат; 1954. 56 с.

<sup>19</sup> Westergaard H.M. Theory of Concrete Pavement Design. In: Proceedings of the 7<sup>th</sup> Annual Meeting of the Highway Research Board. Washington: National Research Council; 1927. 175.

Для нахождения коэффициента пропорциональности  $k_c^{20}$ , воспользовались моделью слоистого полупространства и рассчитали модуль упругости для каждого слоя с номером  $i = 1/p$ .

$$E_n' = E_n \frac{(1 - \mu_n)}{(1 + \mu_n)(1 - 2\mu_n)}. \quad (22)$$

Тогда, коэффициент пропорциональности  $k_c$  равен:

$$k_c = \sum_{i=1}^p \frac{E_{ni}' (1 - \mu_{ni}) \gamma_i B_i^2}{2(1 + \mu_{ni})(1 - 2\mu_{ni})} \left(1 - e^{-2\gamma_i h_{ni}}\right), \quad (23)$$

где  $\gamma_i = \frac{4(1 - 2\mu_{ni})}{\sqrt{\pi A_n (1 - \mu_{ni})^2}}$ ,  $A_n = \pi r^2$  – площадь контакта пластинки с опорой 2 (рис. 2), м<sup>2</sup>; постоянная  $B_i = 1$  при  $i = 1$ ; при  $i > 1$ ,  $B_i = B_{i-1} \cdot e^{-(\gamma_{i-1} h_{n(i-1)})}$ .

Учитывая движение перевозимого груза, ввели коэффициент динамичности  $K_d$ . Тогда максимальное напряжение в центре упругой пластинки стало:

$$\sigma_{d\max} = K_d \sigma_{n\max}, \quad (24)$$

$K_d$  определили по формуле<sup>21</sup>:

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{w_{n\max}}}, \quad (25)$$

где  $H$  – высота падения твердого тела,двигающегося с ускорением, м.

Некоторую трудность в реализации алгоритма управления представляло собой отсутствие экспериментальных или нормативных данных о величине  $\sigma_{adm}$  упругого полисиликона. «В запас» ориентировались на величину  $\sigma_{adm}$  для природного каучука. Кроме того, не изучено изменение величины адгезии между упругим полисиликоном и поверхностью пластины 4 (рис. 2), выполненной из стеклокомпозита. Чтобы увеличить адгезию, прилегающий к полисиликону лист стеклоткани должен иметь более крупную нить.

Для упрощения алгоритма управления проектированием борта транспортного средства с учетом специфики загрузки кузова, а также экспериментальных данных<sup>22</sup> приняли, что под действием внешней нагрузки  $q$  начал «работать» только внутренний слой 2 (рис. 3).

Тогда воспользовались формулами<sup>23</sup> для определения максимальных нормальных и касательных напряжений в пластинке (рис. 3, 4).

<sup>20</sup> Славкина Е.В. Конструирование силовых корпусных элементов транспортного средства сельскохозяйственного назначения из композитных материалов.

<sup>21</sup> Там же.

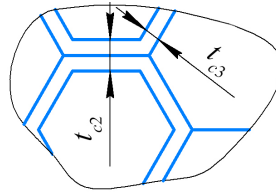
<sup>22</sup> Александров А.Я., Брюккер Л.Э., Куршин Л.М., Прусаков А.П. Расчет трехслойных панелей.

<sup>23</sup> Там же.

Максимальные нормальные напряжения  $\sigma_{12\max}$  во внутреннем 2 (верхнем) несущем слое находилось в сечении  $y = b/2^{24}$ , индекс 1 – плоскость анизотропии, параллельная плоскости  $xOy$ , индекс 2 – номер слоя:

$$\sigma_{12\max} = \frac{q\bar{B}_2}{2B_{\text{мп}}(h_2 - h_1)^2} \left( \frac{\delta_3 B_{\text{мп}}}{G_{233}} + \frac{b^2}{8} \right) - \frac{q}{h_2 - h_1} \cdot \frac{\delta_3 B_{\text{мп}}}{\delta_2 G_{233}}, \quad (26)$$

где:  $\bar{B}_2 = \frac{2B_{\text{мп}}(h_2 - h_1) + \delta_2 B_2}{\delta_2}$ ;  $B_{\text{мп}} = \frac{B_1 \cdot B_2}{B_1 + B_2}$ ;  $B_1 = \frac{E_1 \delta_1}{1 - \mu_1^2}$ ;  $B_2 = \frac{E_2 \delta_2}{1 - \mu_2^2}$ ;  $h_1 = \frac{\delta_1(1 + \xi_1)}{2}$ ;  
 $h_2 = -\frac{\delta_2(1 + \xi_2)}{2}$ ;  $\xi_1 = \frac{\delta_3}{\delta_1}$ ;  $\xi_2 = \frac{\delta_3}{\delta_2}$ ;  $G_{233}$  – приведенный модуль сдвига в плоскости  $yOz$  для сотового шестигранного заполнителя:  $G_{233} = \frac{1,2G_{M3}t_c}{a\sqrt{3}}$ ;  
 $t_c$  – средняя толщина стенки сот;  $G_{M3}$  – модуль сдвига материала заполнителя;  
 $a = \frac{G_{Mc2}t_{c2}}{G_{Mc3}t_{c3}}$ ;  $t_{c2}$ ,  $t_{c3}$  – толщины стенок сот (рис. 5);  $G_{Mc2}$ ,  $G_{Mc3}$  – модули сдвига материала стенок с толщиной  $t_{c2}$  и  $t_{c3}$  соответственно;  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  – коэффициенты Пуассона для стенок, имеющие номера 1 и 2.



Р и с. 5. Размеры сотового заполнителя  
 F i g. 5. Dimensions of honeycomb filler

*Примечание:*  $t_{c2}$ ,  $t_{c3}$  – толщины стенок сот.

*Note:*  $t_{c2}$ ,  $t_{c3}$  – thickness of the honeycomb walls.

Касательное напряжение в заполнителе при  $y = b$ :

$$\tau_{133} = \pm \frac{qb}{2(h_2 - h_1)}, \quad (27)$$

где индексы напряжения: 1 – плоскость анизотропии; 3 – плоскость сдвига и последняя 3 – номер слоя.

Далее, в предположении деформирования пластинки в пределах закона Гука, определили максимальные нормальные напряжения в зоне контакта упругой пластинки из полисиликона и внутреннего несущего слоя 2 (рис. 3).

Для этого рассмотрели такую же задачу изгиба пластинки, как на рисунке 3, но при воздействии на пластинку нагрузки  $q_{nd}$ , приложенной в месте удара.

$$q_{nd} = \frac{K_d F}{A_n} = \frac{K_d F}{\pi r^2}. \quad (28)$$

<sup>24</sup> Александров А.Я., Брюккер Л.Э., Куршин Л.М., Прусаков А.П. Расчет трехслойных панелей.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наихудшим местом удара является геометрический центр площади прямоугольника внутреннего несущего слоя 2 со сторонами длиной  $a$  и шириной  $b$ .

Через тонкую пластинку – лист 3 (рис. 2), внешняя нагрузка (удар) передавалась по площади  $A_{nk}$  квадрата, вписанного в окружность пластинки из полисиликона радиуса  $r$ .

Такая аппроксимация может быть объяснена неравномерностью распределения упругих свойств полисиликона по днищу шестигранной ячейки. В месте удара механические характеристики полисиликона соответствуют характеристикам, полученным при исследовании повышения стойкости к ударным воздействиям композитных узлов сельхозмашин применением упруговязкопластичных жидкостей [1]. У границ ячейки последние предположительно меняются, что не способствует полной передаче внешней нагрузки на упругое основание.

Согласно методике решения подобных задач для прямоугольных трехслойных пластинок<sup>25</sup>  $\sigma'_{12\max}$  находится от действия  $q_{nd}$ , приложенной на ограниченной площади прямоугольника  $A_n$ , в центре пластинки. При условии  $A_n = A_{nk}$  максимальное нормальное напряжение, действующее в центре верхней плоскости внутреннего несущего слоя 2 (рис. 3) при  $x = \frac{a}{2}$  и  $y = \frac{b}{2}$  рассчитано, согласно принципу независимости действия сил,

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{12\max} + \sigma'_{12\max}. \quad (29)$$

Решая задачу прочности  $\sigma_{\Sigma} \leq \sigma_{adm}$  для слоя 2 с учетом касательных напряжений  $\tau_{\Sigma}$  в среднем слое, можно осуществить выбор геометрических параметров пластинки и включить данную процедуру в алгоритм управления, а затем и функционирования системы.

Задача проектирования рациональной конструкции композитного борта с учетом всех компонентов его эксплуатации достаточно сложна.

Так, весьма важны вопросы ремонтпригодности изделия, его экономической эффективности и экологичности как в процессе работы ТС в агропромышленном комплексе, так и при его утилизации.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

На основе проведенного анализа существующих технических решений при создании машин в сельскохозяйственной отрасли было предложено использование полимерных композитов как основы для создания конструкций, материал которых имеет управляемые механические характеристики, функционально связанные с величинами внешних возмущающих факторов.

Предлагается процедура определения напряженно-деформированного состояния композитной многослойной пластинки, предназначенная для построения алгоритма управления проектированием композитного борта кузова транспортного средства (прототипом которого является стальной борт ПСЕ-20). При этом

<sup>25</sup> Александров А.Я., Брюккер Л.Э., Куршин Л.М., Прусаков А.П. Расчет трехслойных панелей.

учитывается, что материал некоторых элементов рассматриваемой пластинки меняет свои механические характеристики в зависимости от изменения внешней нагрузки, что соответствует цели данного исследования.

Известный эффект «затвердевания» дилатантной жидкости при ее резком ускорении впервые использован здесь в качестве способа изменения механических характеристик элемента борта в виде полисилоконовой пластинки на упругом основании, поглощающей энергию удара при загрузке кузова крупнокузовым грузом.

К недостаткам предлагаемой конструкции можно отнести низкую износостойчивость внутренней, прилегающей к перевозимому грузу, поверхности композитного борта. Решение данной проблемы видится в разработке упругого гелькоута с наполнителем из нанокристаллического порошка корунда, которым следует покрыть внутреннюю поверхность борта.

Разработанная методология перехода от традиционных конструкций к перспективным моделям, имеющим адаптивные элементы или устройства, способные автоматически управлять напряженно-деформированным состоянием путем изменения либо структурной формулы входящих механизмов, либо физико-механических характеристик материала некоторых звеньев, позволяет одновременно значительно снизить материалоемкость и увеличить ресурс входящих деталей и узлов, что дает возможность использовать ее для реализации широкого круга задач рационального проектирования машин сельскохозяйственной отрасли.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астахов М.В., Славкина Е.В. Повышение стойкости к ударным воздействиям композитных узлов сельхозмашин применением упруговязкопластичных жидкостей. *Инженерные технологии и системы*. 2020;30(2):268–286. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.268-286>
2. Бочкарева С.А., Гришаева Н.Ю., Люкшин Б.А., Панов И.Л., Панин С.В. Получение композиций с заданным набором физико-механических свойств с использованием трех управляющих параметров. *Физическая мезомеханика*. 2020;23(4):43–50. <https://www.elibrary.ru/mlnarx>
3. 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;(4):1. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-4-1969>
4. Полилов А.Н., Власов Д.Д., Татусь Н.А. Уточненный критерий расслоения при изгибе композитной балки. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2023;89(10):63–73. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-10-63-73>
5. Власов Д.Д., Склемина О.Ю., Поляков А.Э. Об упрощенных методах определения упругих постоянных слоистых полимерных композитов. *Пластические массы*. 2023;(11–12):17–20. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2023-11-12-17-20>
6. Lebedev D., Okunev A., Aleshin M., Ivanov K., Klyavin O., Nikulina S. и др. Applicability of Polymer Composite Materials in the Development of Tractor Falling-Object Protective Structures (FOPS). *Materials Physics and Mechanics*. 2017;34(1):90–96. [https://doi.org/10.18720/MPM.3412017\\_11](https://doi.org/10.18720/MPM.3412017_11)
7. Leontev A., Aleshin M., Klyavin O., Borovkov A. Optimal Design of Power Frames for Special Purpose Vehicles' Cockpits with Regard to their Eigenfrequencies and Shock Resistance. In: *Matec Web of Conferences*. Sofia: EDP Sciences; 2017. p. 02003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814802003>
8. Астахов М.В., Славкина Е.В., Сорокина И.И. К повышению надежности сельскохозяйственных прицепов. *Наука в центральной России*. 2023;61(1):66–76. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-1-66-76>

9. Kozlov M.V., Sheshenin S.V. Modeling the Progressive Failure of Laminated Composites. *Mechanics of Composite Materials*. 2016;(51):695–706. <https://doi.org/10.1007/s11029-016-9540-0>
10. Дзоценидзе Т.Д., Козловская М.А. Использование полимерных материалов при создании малогабаритных транспортных средств для агропромышленного комплекса. *Конструкции из композиционных материалов*. 2009;(2):35–44. <https://www.elibrary.ru/kapuuj>
11. Димитриенко Ю.И., Федонюк Н.Н., Губарева Е.А., Сборщиков С.В., Прозоровский А.А., Ерасов В.С. и др. Моделирование и разработка трехслойных композиционных материалов с сотовым наполнителем. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Естественные науки»*. 2014;(5):66–81. URL: <https://vestniken.bmstu.ru/catalog/mathsim/hidden/527.html> (дата обращения: 04.02.2026).
12. Гавва Л.М., Фирсанов В.В. Математические модели и методы расчета напряженно-деформированного состояния панелей летательных аппаратов из композиционных материалов с учетом технологии изготовления. *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*. 2020;(3):122–133. <https://doi.org/10.31857/S057232992003006X>
13. Mayes J.S., Hansen A.C. A Comparison of Multicontinuum Theory Based Failure Simulation with Experimental Results. *Composites Science and Technology*. 2004;64(3–4):517–527. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00221-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00221-5)
14. Cross R. Elastic and Viscous Properties of Silly Putty. *American Journal of Physics*. 2012;80(10):870–875. <https://doi.org/10.1119/1.4732086>
15. Мазалов Ю.А., Берш А.В., Витязь П.А., Судник Л.В. Аллюмооксидные порошковые наноматериалы конструкционного и функционального назначения. *Труды ГОСНИТИ*. 2014;(115):42–47. <https://www.elibrary.ru/sjldpn>
16. Черноиванов В.И. Перспективы применения нанотехнологии как прорывного фактора повышения качества обслуживания и ремонта машин. *Труды ГОСНИТИ*. 2010;(105):4–12. URL: <http://www.gosniti.com/publish1.html> (дата обращения: 12.04.2025).
17. Емельянов М.Д. Ремонт осмотических повреждений наружной обшивки из стеклопластика. *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. 2018;(50–51):14–21. <https://www.elibrary.ru/uyidue>
18. Сивцов В.Н., Котин А.В. Восстановление корпусных деталей комбинированными покрытиями. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2007;(8):51–53. <https://www.elibrary.ru/hfxolv>
19. Сенин П.В., Чаткин М.Н., Кильмяшкин Е.А. Техничко-экономическое обоснование применения аддитивных технологий при восстановлении сельскохозяйственной техники. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(4):770–785. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.770-785>
20. Астахов М.В. Управление полями внутренних сил тонкостенных оболочечных систем сельхозмашин. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Машиностроение*. 2000;(4):47–58. URL: <https://vestnikmach.bmstu.ru/catalog/design/hidden/689.html> (дата обращения: 14.04.2025).

## REFERENCES

1. Astakhov M.V., Slavkina E.V. Improving the Shock Resistance of Agricultural Composite Units Using Visco-Elastic Fluids. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(2):268–286. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.268-286>
2. Bochkareva S.A., Grishaeva N.Yu., Lyukshin B.A., Panov I.L., Panin S.V. Synthesis of Composites with a Given Set of Physical and Mechanical Properties Using Three Control Parameters. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2020;23(4):43–50. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/mlnarx>
3. Astakhov M.V., Slavkina E.V. On the Issue of Designing A Beam Element of Polymer Composite Materials, Considering Shock Effects. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2020;(4):1. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-4-1969>

4. Polilov A.N., Vlasov D.D., Tatus' N.A. Specified Criterion for Delamination Upon Bending of a Composite Beam. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2023;89(10):63–73. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-10-63-73>
5. Vlasov D.D., Sklemina O.Y., Polyakov A.E. On Simplified Methods for Determining the Elastic Constants of Layered Polymer Composites. *Plasticheskie Massy*. 2023;(11–12):17–20. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2023-11-12-17-20>
6. Lebedev D., Okunev A., Aleshin M., Ivanov K., Klyavin O., Nikulina S., et al. Applicability of Polymer Composite Materials in the Development of Tractor Falling-Object Protective Structures (FOPS). *Materials Physics and Mechanics*. 2017;34(1):90–96. [https://doi.org/10.18720/MPM.3412017\\_11](https://doi.org/10.18720/MPM.3412017_11)
7. Leontev A., Aleshin M., Klyavin O., Borovkov A. Optimal Design of Power Frames for Special Purpose Vehicles' Cockpits with Regard to their Eigenfrequencies and Shock Resistance. In: *Matec Web of Conferences*. Sofia: EDP Sciences; 2017. p. 02003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814802003>
8. Astakhov M.V., Slavkina E.V., Sorokina I.I. To Increase the Reliability of Agricultural Trailers. *Science in the Central Russia*. 2023;61(1):66–76. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-1-66-76>
9. Kozlov M.V., Sheshenin S.V. Modeling the Progressive Failure of Laminated Composites. *Mechanics of Composite Materials*. 2016;(51):695–706. <https://doi.org/10.1007/s11029-016-9540-0>
10. Dzotsenidze T.D., Kozlovskaya M.A. Use of Polymer Materials by Creating of Small-Size Transport Vehicles for an Agricultural Sector. *Composite Materials Constructions*. 2009;(2):35–44. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/kapuuj>
11. Dimitrienko Yu.I., Fedonyuk N.N., Gubareva E.A., Sborshchikov S.V., Prozorovskiy A.A., Erasov V.S., et al. Modeling and Development of Three-Layer Sandwich Composite Materials with Honeycomb Core. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*. 2014;(5):66–81. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://vestniken.bmstu.ru/catalog/mathsim/hidden/527.html> (accessed 04.02.2026).
12. Gavva L.M., Firsanov V.V. Mathematical Models and Methods for Calculating the Stress-Strain State of Aircraft Panels From Composite Materials Taking Into Account the Production Technology. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. mekhanika tverdogo tela*. 2020;(3):122–133. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/S057232992003006X>
13. Mayes J.S., Hansen A.C. A Comparison of Multicontinuum Theory Based Failure Simulation with Experimental Results. *Composites Science and Technology*. 2004;64(3–4):517–527. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00221-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00221-5)
14. Cross R. Elastic and Viscous Properties of Silly Putty. *American Journal of Physics*. 2012;80(10):870–875. <https://doi.org/10.1119/1.4732086>
15. Mazalov Y.A., Bersh A.V., Knight P.A., Sudnik L.V. Alumina Powder Nanomaterials Structural and Functional Purposes. *Trudy GOSNITI*. 2014;(115):42–47. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/sjldpn>
16. Chernoiyanov V.I. Use Nanotechnology as Proryvnogo Factor of Quality Service and Repair Machines. *Trudy GOSNITI*. 2010;(105):4–12. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://www.gosniti.com/publish1.html> (accessed 12.04.2025).
17. Emelyanov M.D. Repair of Osmotic Damage to the Fiberglass Outer Shell Plating. *Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva*. 2018;(50–51):14–21. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/uyidue>
18. Sivtsov V.N., Kotin A.V. Restoration of Body Parts with Combined Coatings. *Traktory i sel'skohozyajstvennyye mashiny*. 2007;(8):51–53. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/hfxolv>
19. Senin P.V., Chatkin M.N., Kil'myashkin E.A. Feasibility Study of Additive Technologies Application in Restoring Agricultural Machinery. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(4):770–785. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.770-785>

20. Astahov M.V. Manipulation by Fields of Internal Forces of Agricultural Machine Thin-Wall Shell Systems. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2000;(4):47–58. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://vestnikmach.bmstu.ru/catalog/design/hidden/689.html> (accessed 14.04.2025).

*Об авторах:*

**Астахов Михаил Владимирович**, доктор технических наук; профессор, профессор кафедры МК6 колесные машины и прикладная механика Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, (105005, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бауманская 2-я, д. 5, стр. 1.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8675-1611>, Researcher ID: ACU-1195-2022, mvastahov@gmail.com

**Славкина Екатерина Викторовна**, кандидат технических наук, доцент кафедры МК9 подъемно-транспортные системы Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, (105005, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бауманская 2-я, д. 5, стр. 1.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5889-5957>, Researcher ID: ADB-9323-2022, slavkina@bmstu.ru

*Вклад авторов:*

М. В. Астахов – постановка задачи, разработка математической модели и ее реализация, формирование основной концепции исследования.

Е. В. Славкина – анализ литературных источников, разработка алгоритма проектирования пластинки из полисиликона на упругом основании при ударе, подготовка текста и графических материалов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 21.05.2025; поступила после рецензирования 06.10.2025;  
принята к публикации 30.10.2025*

*About the authors:*

**Mikhail V. Astakhov**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Department of the Wheel Machines and Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University (5, 2-nd Baumanskaya St., Moscow 105005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8675-1611>, Researcher ID: ACU-1195-2022, mvastahov@gmail.com

**Ekaterina V. Slavkina**, Cand.Sci. (Eng.), Department of the Lifting and transport systems, Bauman Moscow State Technical University (5, 2-nd Baumanskaya St., Moscow 105005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5889-5957>, Researcher ID: ADB-9323-2022, slavkina@bmstu.ru

*Authors contribution:*

M. V. Astakhov – problem statement, development of the mathematical model and its implementation, and formulation of the main study concept.

E. V. Slavkina – literature review, development of an algorithm for designing a polysilicon plate on an elastic base on impact, preparation of the manuscript text and graphic materials.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 21.05.2025; revised 06.10.2025; accepted 30.10.2025*