

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-108818>

Оригинальное исследование



Исследование влияния скорости деформации и толщины клеевого слоя при ударном нагружении на параметры соединения в автомобиле

И Лю, Р.Б. Гончаров, В.Н. Зузов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В настоящее время в отечественных и зарубежных автомобилях наряду с точечной сваркой все шире используются новые технологии соединений – клеевые. Исследование прочности соединения, а также влияния скорости деформации и толщины клеевого слоя при ударном нагружении на параметры соединения в автомобиле является актуальной технической задачей.

Цель работы – исследование при ударном нагружении влияния скорости деформации и толщины клеевого слоя на параметры клеевого соединения (прочность, деформации и др.), а также оценка эффективности предлагаемого модифицированного метода калибровки для модели клеевого слоя на примере трубчатой конструкции, часто применяемой в силовых элементах автомобиля.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования выполнены при ударном нагружении со скоростью удара 6,66 м/с (при осевом ударе) и 6,87 м/с (при боковом ударе) грузом массой 22,3 кг. Моделирование условий работы осуществлено в программе *LS-Dyna*, что позволило исследовать напряжено-деформированные состояния (НДС) склеенных трубчатых конструкций и оценить погрешность моделирования.

Результаты. На базе проведенных экспериментальных и расчетных исследований длина разрушения клеевого слоя при ударной нагрузке в стальных конструкциях, соединенных клеем *Henkel EP 5055*, короче в соединениях с толщиной клеевого слоя 0,5 мм, чем в соединениях с толщиной клеевого слоя 1 мм. Общая деформация склеенной конструкции при боковой ударной нагрузке с толщиной клеевого слоя 1 мм меньше, чем с толщиной слоя 0,5 мм, т. к. клеевой слой поглощает часть энергии. При осевой ударной нагрузке отличия незначительны. Погрешности моделирования клеевого соединения при ударном нагружении были существенно снижены за счет применения предложенного модифицированного метода калибровки свойств клеевого слоя с учетом влияния скорости деформации и толщины клеевого слоя в конечно-элементной модели (на 15%).

Заключение. Практическая ценность исследования заключается в предложенной модифицированной модели, учитывающей влияние скорости деформации и толщины клеевого слоя при ударном нагружении на параметры соединения и позволяющей повысить точность расчетов, а также в рекомендациях по наилучшему значению толщины клеевого слоя в склеенных конструкциях автомобилей.

Ключевые слова: *LS-Dyna; конечно-элементная модель; напряжено-деформированное состояние; клеевое соединение; калибровка свойств материала.*

Для цитирования:

Лю И, Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Исследование влияния скорости деформации и толщины клеевого слоя при ударном нагружении на параметры соединения в автомобиле // Известия МГТУ «МАМИ». 2022. Т. 16, № 3 С. 251–263. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-108818>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-108818>

Original study article

Study of the effects of deformation rate and adhesive layer thickness under impact loading on parameters of adhesive joints in a vehicle

Yi Liu, Roman B. Goncharov, Valery N. Zuzov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: At the present time, new technologies of joints – adhesive joints – are used more and more widely along with spot welding in domestic and foreign vehicles. Study of the joint strength and the influence of deformation rate and the adhesive layer thickness under impact loading on the parameters of the joint in a vehicle is a relevant technical task.

AIMS: Study of the influence of deformation rate and the adhesive layer thickness on the adhesive joint parameters (strength, deformation, etc.) under impact loading as well as evaluation of the efficiency of the proposed modified calibration method for the adhesive layer model on the example of tubular structure, which is often used in the strength elements of a vehicle.

METHODS: Experimental studies were carried out with impact loading at the speed of 6.66 m/s (the axial impact) and 6.87 m/s (the side impact) with the mass of 22.3 kg. Simulation of operating conditions was performed in the LS-Dyna software that made possible to study the stress-strain states (SSS) of adhesive-bonded tubular structures and to estimate the simulation error.

RESULTS: Based on experimental and calculated results, the length of the adhesive layer failure under the impact loading in the steel structures bonded with the Henkel EP 5055 adhesive is shorter in the joints with the 0.5 mm thick adhesive layer than in the joints with the 1 mm thick adhesive layer. The total deformation of the bonded structure at the side impact loading for the 1 mm thick adhesive layer is less than for the 0.5 mm thick layer, as the adhesive layer absorbs some of the energy. For the axial impact loading, the differences are insignificant. Errors of adhesive joint simulation under impact loading have been reduced significantly (by 15%) with using the proposed modified method of calibrating the adhesive layer properties considering the influence of the deformation rate and the adhesive layer thickness in the finite element model.

CONCLUSIONS: The practical value of the study lies in the proposed modified model, considering the influence of the deformation rate and the adhesive layer thickness under impact loading on the joint parameters and making possible to improve simulation accuracy, as well as in recommendations for the best value of adhesive joint properties in adhesive-bonded vehicle structures.

Keywords: *LS-Dyna; finite-element model (FEM); stress-strain state; adhesive bonding; calibration of material properties.*

Cite as:

Liu Yi, Goncharov RB, Zuzov VN. Study of the effects of deformation rate and adhesive layer thickness under impact loading on parameters of adhesive joints in a vehicle. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2022;16(3): 251–263. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-108818>

Received: 20.06.2022

Accepted: 12.08.2022

Published online: 12.09.2022

ВВЕДЕНИЕ

В случае аварийного столкновения в автомобиле часто возникают большие деформации, в том числе из-за разрушений в местах его соединений, что ставит под угрозу безопасность пассажиров. В настоящее время в отечественных и зарубежных автомобилях наряду с точечной сваркой все шире используются новые технологии соединений – клеевые [1, 2].

Известно, что свойства клеевых соединений зависят от толщин клеевого слоя и от скорости деформаций. Например, в исследовании [3], после проведения испытания при квазистатической нагрузке на растяжение соединенных деталей (пластин) внахлест с различными толщинами клеевого слоя был сделан вывод, что прочность структуры снижается при более толстых клеевых слоях (рис. 1).

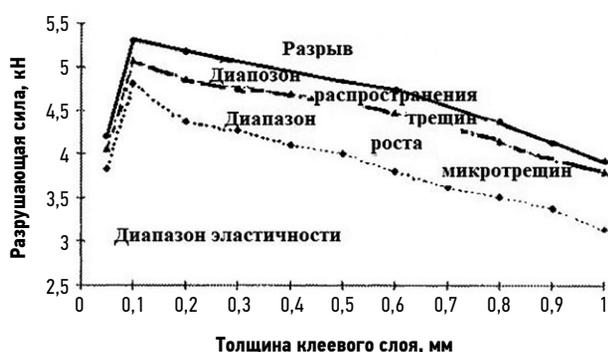


Рис. 1. График зависимости разрушающей силы от толщины клеевого слоя при квазистатическом нагружении.

Fig. 1. The graph of destructive force vs. adhesive layer thickness under quasi-static loading.

В работе [4] для режима нагружения вертикальной ударной нагрузкой соответствующие уравнения для моделирования разрушения конструкции сначала были проанализированы аналитически и далее были подготовлены данные для расчета в программе *LS-DYNA* с коррекцией некоторых значений на основе анализа результатов экспериментальных исследований, что позволило получить в итоге неплохую точность.

Однако, как показывают исследования пассивной безопасности транспортных средств, характер нагружения значительно более сложный и многообразный, чем только квазистатические нагрузки, и направлены они не только перпендикулярно направлению толщины клеевого слоя [5]. Поэтому существует необходимость в дальнейших исследованиях структурной прочности, жесткости и аварийной пригодности клеевых соединений в транспортных средствах с учетом этих особенностей.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является исследование влияния скорости деформации и толщины клеевого слоя на параметры клеевого соединения (прочность,

деформации и др.) при ударном нагружении, а также оценка эффективности предлагаемого модифицированного метода калибровки для модели клеевого слоя на примере трубчатой конструкции, часто применяемой в силовых элементах автомобиля.

Задачи этой работы заключаются в следующем:

- 1) проведении экспериментальных исследований для получения данных об общей деформации склеенных конструкций и НДС в клеевом слое при ударных нагрузках, соответствующих аварийным для автомобилей, и верификации расчетного моделирования;
- 2) уточнении влияния толщины клеевого слоя, а также влияния скорости деформации на прочность конструкции на базе анализа результатов экспериментальных измерений;
- 3) оценке разных способов калибровки при моделировании клеевых соединений по погрешности результатов расчетов при ударных нагрузках по трубчатой конструкции в поперечном и продольном направлениях.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Одной из предпочтительных зон в автомобиле для использования клеевого соединения может быть соединение между панелями и элементами каркасного типа (наружные и внутренние панели капотов, дверей, крышек багажника и др.). При фронтальных столкновениях автомобилей деформация таких элементов может иметь преимущественный характер в виде смятия, осевого сжатия и изгиба.

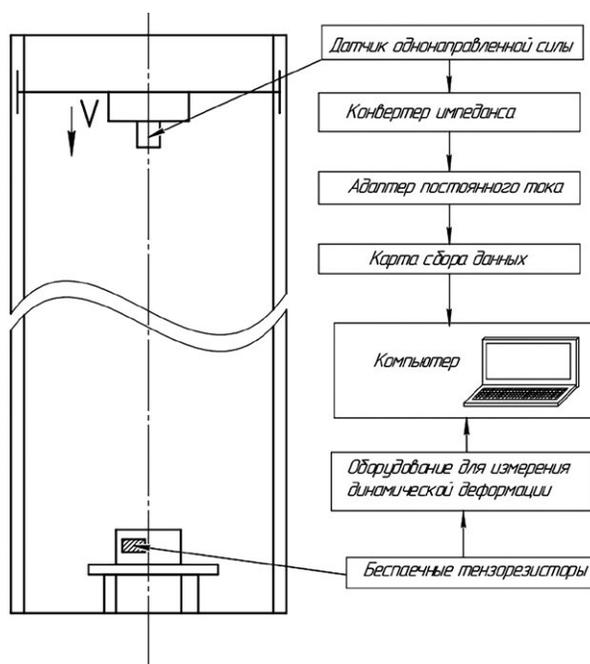


Рис. 2. Принципиальная схема эксперимента.
Fig. 2. Schematic diagram of the experiment.

Эксперимент проводился при ударном нагружении в соответствии с поставленными задачами. Схема эксперимента и экспериментальной установки показаны на рис. 2.

Образец получен склеиванием прямоугольного открытого профиля омега-образной формы с листом, как показано на рис. 3. Толщина всех элементов составляет 1 мм. Такие конструкции широко используются в кабинах и кузовах колесных машин.

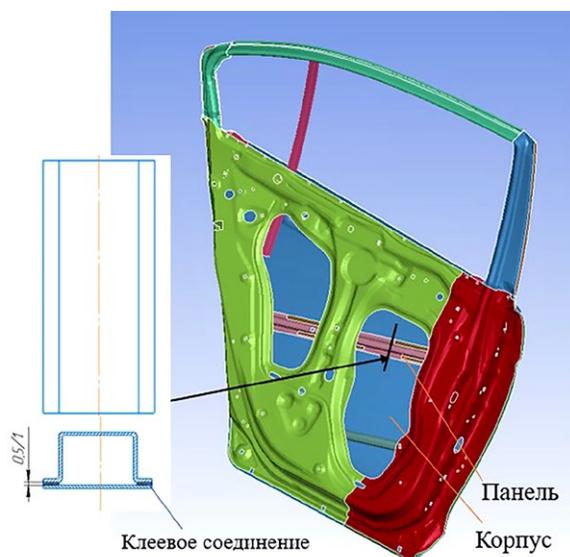


Рис. 3. Форма образца для экспериментов.
Fig. 3. Shape of the specimen for experiments.

Толщина клеевого слоя задавалась в двух вариантах – 0,5 мм и 1 мм – которые являются обычной толщиной клеевого слоя, используемого в автомобилестроении.

В качестве клеевого материала был выбран *Henkel EP 5055*. Это высокопрочный конструкционный клей, который можно использовать для склеивания конструкций автомобилей как из стали, так и из алюминиевых сплавов или композитов. Основные параметры представлены в табл. 1.

Для испытаний был выбран груз массой 22,3 кг, который свободно падает с высоты 2,26 метра. Энергия удара равна 495 Дж. В итоге скорость удара по образцу в момент касания составляет 6,66 м/с. При этом ставилась задача согласования с режимами испытаний на пассивную безопасность.

Испытания проводились для двух режимов: осевой удар и поперечный (боковой). При осевом ударе нижняя часть детали жестко фиксируется, удар приходится в верхнюю часть трубы. При боковом ударе противоположные концы трубы вдоль длинной стороны закрепляются, а удар приходится в центральную область.

Образцы после испытаний на осевую ударную нагрузку показаны на рис. 4. Толщина слоя клея в образцах: *a* – 0,5 мм, *b* – 1,0 мм.

Из этих фотографий видно, что склеенная конструкция подвержена разрушению клеевого слоя в верхней части. Длины разрушения клеевого слоя, которые определялись визуально, приведены в табл. 2.

Таблица 1. Механические свойства клеевого материала Henkel EP 5055

Table 1. Mechanical properties of the Henkel EP 5055 adhesive material

Марка	<i>Henkel EP 5055</i>
Плотность	0,9 г/см ³
Прочность на разрыв (<i>DIN 1465</i>)	18–22 МПа
Низкотемпературное отверждение	>20 МПа
Высокотемпературное отверждение	>1 Н/мм
Испытание на отслаивание (<i>DIN EN ISO 11339</i> максимальная нагрузка на единицу ширины, приложенной при разделении)	>15 Н/мм
Испытание на ударное отслаивание (<i>ISO 11343</i> максимальная нагрузка на единицу ширины, приложенной при разделении)	1500 МПа
Модуль упругости	

Таблица 2. Зоны разрушения и изменения длин образцов при осевой ударной нагрузке

Table 2. Failure zones and specimen length changes after axial impact loading

Испытуемый образец	Длина зоны разрушения, мм				Длина образца, мм	
	В левой части образца		В правой части образца		перед ударом	после удара
	от	до	от	до		
Толщина слоя клея 0,5 мм	0	260	0	230	500	488
Толщина слоя клея 1 мм	0	290	0	400	500	485

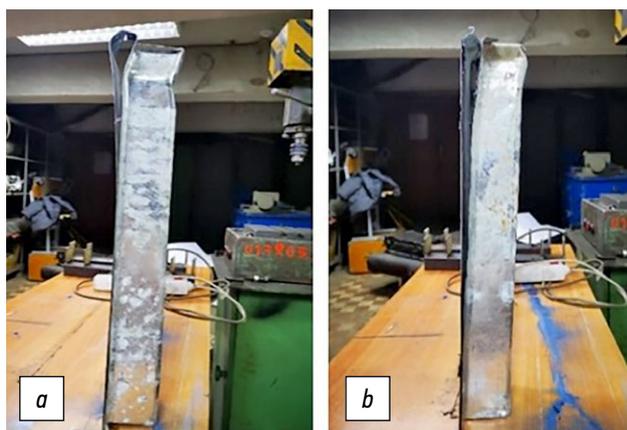


Рис. 4. Образцы после испытаний на осевую ударную нагрузку.

Fig. 4. The specimens after the axial impact loading tests.

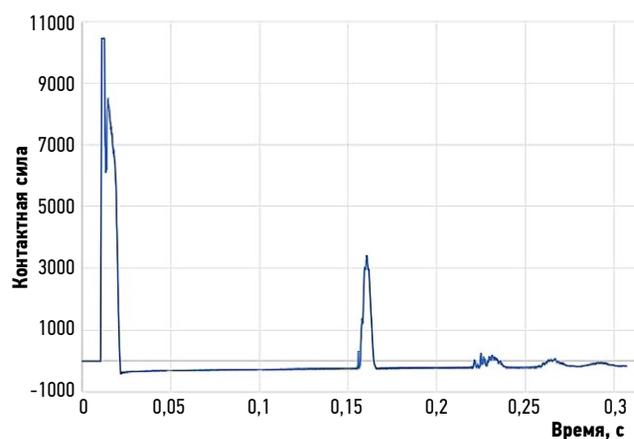


Рис. 5. Изменения контактной силы при осевой ударной нагрузке.

Fig. 5. Contact force time-domain changes during axial shock loading.

Контактная сила при ударе измерялась датчиками, и ее изменение показано на рис. 5.

Максимальное значение контактной силы составляет 10 643 Н. Причина появления двух пиков заключается в том, что молоток после удара подпрыгивает вверх, а затем снова падает под действием силы тяжести.

Для измерения деформации конструкции были выбраны три точки на конструкции. Расположение точек показано на рис. 6.

С помощью тензометров, приклеенных к поверхности конструкции, были получены деформации для каждой из трех точек (рис. 7).

Как видно из приведенных выше данных, область разрушения клеевого слоя конструкции с толщиной клеевого слоя 1 мм больше, чем у конструкции с толщиной клеевого слоя 0,5 мм, а деформация в области максимальных значений у конструкции с толщиной клеевого слоя 1 мм существенно выше, чем у других конструкций. Общая деформация конструкции при осевой ударной нагрузке с толщиной клеевого слоя 1 мм не отличается от деформации с толщиной клеевого слоя 0,5 мм.

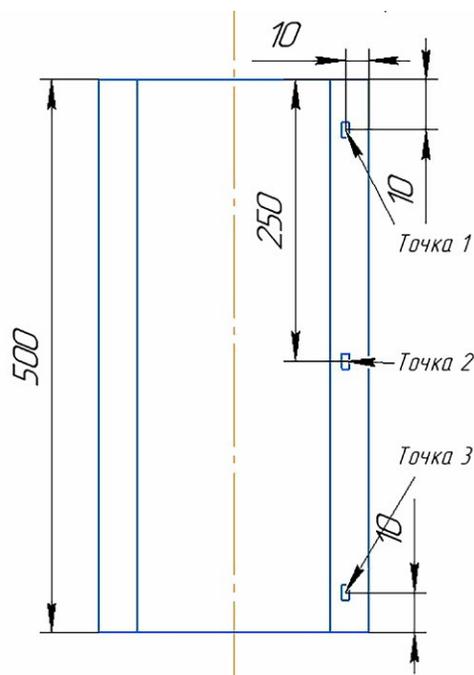


Рис. 6. Расположение точек для измерения деформации конструкции.

Fig. 6. Location of points for measuring the structure deformation.

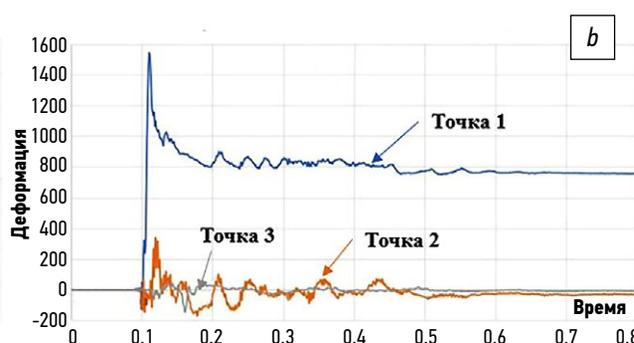
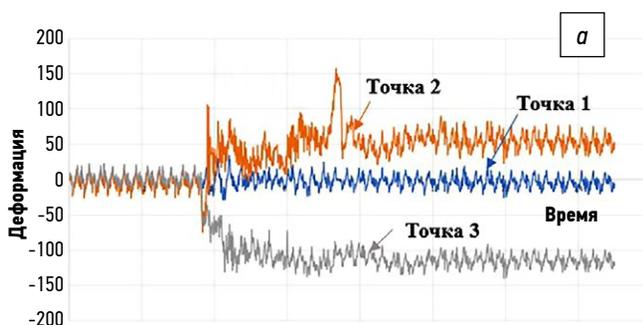


Рис. 7. Деформация точек при осевой ударной нагрузке в конструкции с толщиной клеевого слоя: *a* – 0,5 мм; *b* – 1 мм.

Fig. 7. Point deformation under axial impact loading in the structure with the adhesive layer thickness of :*a* – 0.5 mm; *b* – 1 mm.

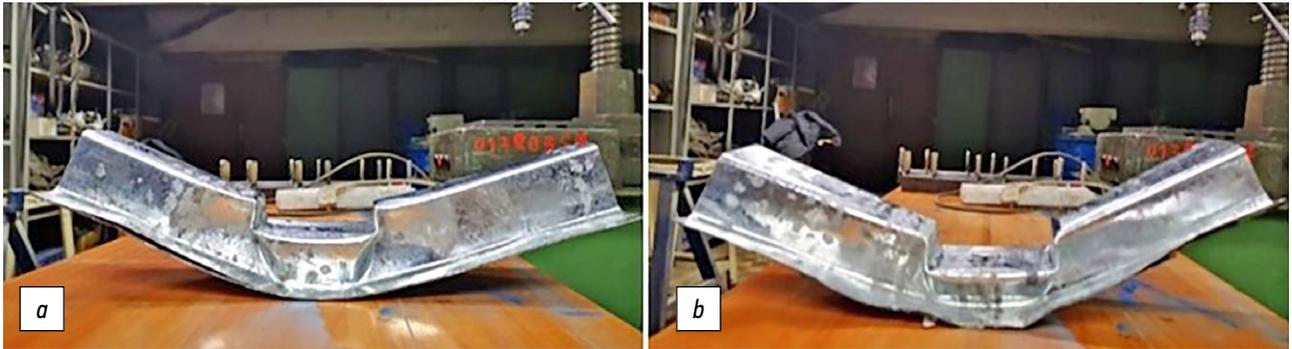


Рис. 8. Образцы после испытаний на боковую ударную нагрузку: *a* – толщина клеевого слоя 0,5 мм; *b* – толщина клеевого слоя 1,0 мм.

Fig. 8. The specimens after the side impact loading tests : *a* – the adhesive layer thickness is 0.5 mm; *b* – the adhesive layer thickness is 1.0 mm.

Таблица 3. Места разрушения и изменения длин образцов при боковой ударной нагрузке

Table 3. Failure locations and specimen length changes after side impact loading

Испытуемый образец	Длина зоны разрушения, мм				Длина образца, мм	
	В левой части образца		В правой части образца		перед ударом	после удара
	от	до	от	до		
Толщина клеевого слоя 0,5 мм	90	150	40	190	500	435
Толщина клеевого слоя 1,0 мм	0	300	180	420	500	453

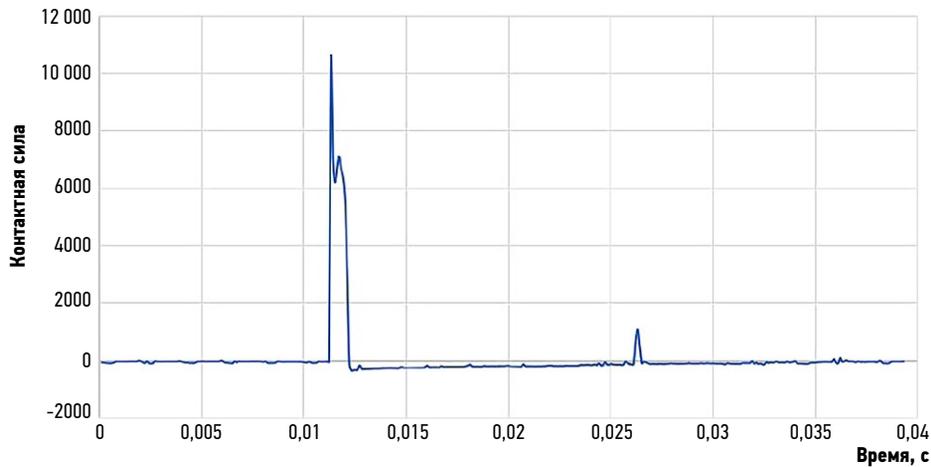


Рис. 9. Изменение контактной силы при боковом ударе.

Fig. 9. Contact force time-domain changes during side impact.

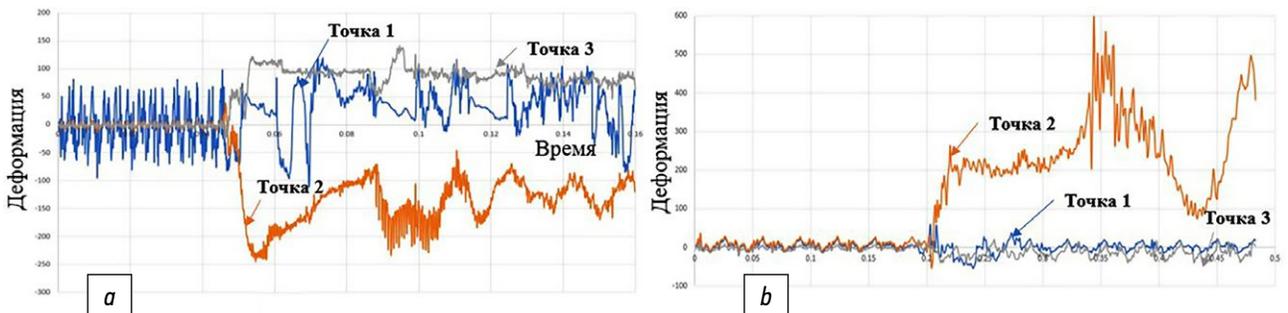


Рис. 10. Деформации образцов при боковом ударе: *a* – толщина клеевого слоя в образце 0,5 мм; *b* – толщина клеевого слоя 1,0 мм.

Fig. 10. Deformations of specimens during side impact: *a* – the adhesive layer thickness of the specimen is 0.5 mm; *b* – the adhesive layer thickness of the specimen is 1.0 mm.

Балки после бокового удара показаны на рис. 8.

Длины зон разрушения клеевого соединения у клеевых конструкций приведены в табл. 3.

Как видно из приведенных выше данных, разрушение клеевого соединения в конструкции с толщиной клеевого слоя 1 мм более серьезное, чем с толщиной 0,5 мм. Конструкции с более толстым клеевым слоем более подвержены разрушению клеевого слоя (или его полному растрескиванию). Однако деформация изгиба склеенной конструкции с толщиной 1,0 мм меньше, чем с толщиной 0,5 мм.

Контактная сила при ударе также измерялась датчиками (рис. 9).

На рис. 10 показаны графики изменений деформаций, замеренных с помощью тензометрических датчиков, наклеенных в трех точках образцов при испытаниях при боковой ударной нагрузке.

Как видно из приведенных выше экспериментальных результатов, пиковая контактная сила остается практически постоянной и составляет 10 925 Н. Основная область деформации находится в центре, т. е. в месте удара. На двух концах образцов (в зонах опирания) не возникает значительных деформаций.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕТОДОМ КОРРЕКЦИИ СВОЙСТВ КЛЕЯ В ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ LS-DYNA

Важнейшей задачей исследования клеевых автомобильных конструкций при ударе является такое моделирование этих соединений, которое позволит проводить длительные по времени расчеты, тем не менее как многовариантные и с получением требуемой точности.

Одним из наиболее подходящих с этих позиций является метод коррекции свойств клея в модели [6].

Влияние скорости деформации на характеристики адгезионного слоя описано в исследовании [7]. После учета влияния скорости деформации на свойства клеевого материала, соответствующие ключевые параметры полученного адгезионного слоя необходимо варьировать следующим образом:

$$\begin{cases} J = J_0 \frac{\lg(\varepsilon)}{\lg(\varepsilon_0)} \\ \sigma = \sigma_0 \frac{\lg(\varepsilon)}{\lg(\varepsilon_0)} \end{cases},$$

где J – фактическая энергия разрушения; J_0 – стандартная энергия разрушения; ε – фактическая скорость

деформации; ε_0 – скорость деформации, при которой определяются свойства материала; σ – фактический предел текучести при скорости деформации ε ; σ_0 – предел текучести при измерении по стандартам [8–10].

В работах [11, 12] было исследовано влияние толщины клеевого слоя на его прочность. В частности выявлено, что при моделировании клеевых слоев, где разница между фактической и моделируемой толщиной клеевого слоя существенная, что может сильно повлиять на точность моделирования. Метод корректировки предполагает следующее:

$$\begin{cases} E_a = E_b \cdot H/h \\ \sigma_{0a} = \sigma_{0b} \\ E_{ta} = E_{tb} \cdot H/h \end{cases},$$

где E_a, E_b – модуль Юнга клея с моделированной (a) и фактической (b) толщинами; H, h – моделированная и фактическая толщина клеевого слоя; σ_{0a}, σ_{0b} – пределы текучести элемента с моделированной и фактической толщинами; E_{ta}, E_{tb} – модули затвердения элемента с моделированной и фактической толщинами.

Предлагаем объединить эти два метода калибровки следующим образом:

$$\begin{cases} E_a = E_b \cdot H/h \\ \sigma_{0a} = \sigma_{0b} \frac{\lg(\varepsilon)}{\lg(\varepsilon_0)} \\ E_{ta} = E_{tb} \cdot H/h \end{cases}.$$

Метод будем использовать как при моделировании осевых, так и поперечных ударов для конструкции, используемой в эксперименте, с целью оценки погрешностей моделирования как с калибровкой, так и без нее.

Моделирование проводили в программном комплексе *LS-Dyna*. Результаты представлены на рис. 11. Зоны разрушения клеевого соединения при осевом ударе в эксперименте показаны на рис. 11, *a*. Для расчетного определения мест разрушения соединения было выполнено моделирование с предлагаемой калибровкой (рис. 11, *b*) и без калибровки (рис. 11, *c*). Для оценки влияния толщины клеевого слоя и скорости деформации было проведено также моделирование только с учетом одного фактора: скорости деформации (рис. 11, *d*) и толщины клеевого соединения (рис. 11, *e*).

Из рис. 11 видно, что результаты моделирования КЭМ с предлагаемой калибровкой параметров материала с учетом влияния скорости деформации и толщины клеевого слоя наиболее близки к экспериментальным результатам. Модель без калибровки имеет большую разницу по сравнению с экспериментальным результатом. Если учитывать только влияние скорости деформации или толщины клеевого слоя, то длина разрушения

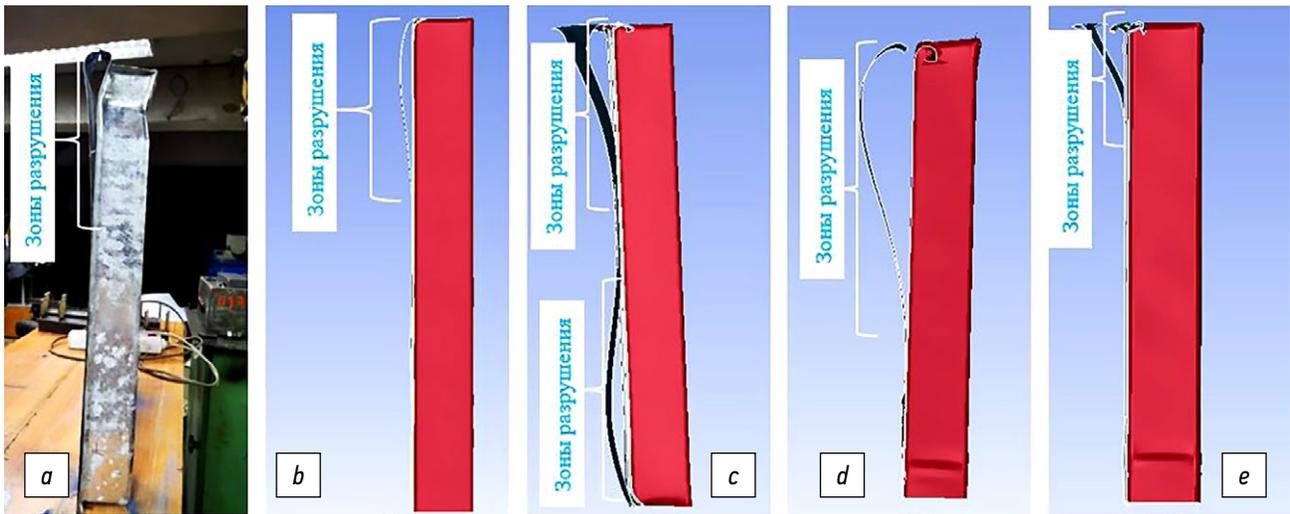


Рис. 11. Зоны разрушения клевого соединения: *a* – в эксперименте; *b* – при моделировании с предлагаемой калибровкой; *c* – при моделировании без калибровки; *d* – при моделировании с учетом влияния только скорости деформации; *e* – при моделировании с учетом влияния только толщины клевого соединения.

Fig. 11. Failure zones of the adhesive joint: *a* – in the experiment; *b* – in the simulation with the proposed calibration; *c* – in the simulation without the calibration; *d* – in the simulation with considering the deformation rate influence only; *e* – when simulating with considering the adhesive joint thickness influence only.

клевого слоя либо больше, либо меньше, чем фактическая длина.

Сопоставить НДС этих КЭМ, оценить распределение напряжений и деформаций в них можно по рис. 12 и 13, соответственно. На рис. 12 и 13 также для сравнения представлены результаты моделирования только с учетом одного влияющего фактора: скорости деформации (рис. 12, *c*, рис. 13, *c*) и толщины клевого соединения (рис. 12, *c*, рис. 13 *d*).

Как видно из рис. 12, напряжения сосредоточены в основном в зоне контакта с ударником и в зоне нижней опоры. Кроме того, значения максимального напряжения одинаковы (оба 278 МПа).

На рис. 13 для каждого результата показаны распределения деформаций трубчатой конструкции: (1) – в фронтальном направлении; (2) – в области контакта с ударником; (3) – в области контакта с опорой.

Как видно из рис. 13, максимальная деформация в некалиброванной КЭМ составляет 1.82, а максимальная деформация в калиброванной КЭМ – 1.26. Для модели с учетом влияния только толщины клевого слоя максимальная деформация равна 0.32, а с учетом влияния только скорости деформации – 1.48. Основные деформации сосредоточены в области контакта с ударником или опорой.

Длины областей с разрушенным клевым слоем, полученные расчетным путем с помощью разных методов

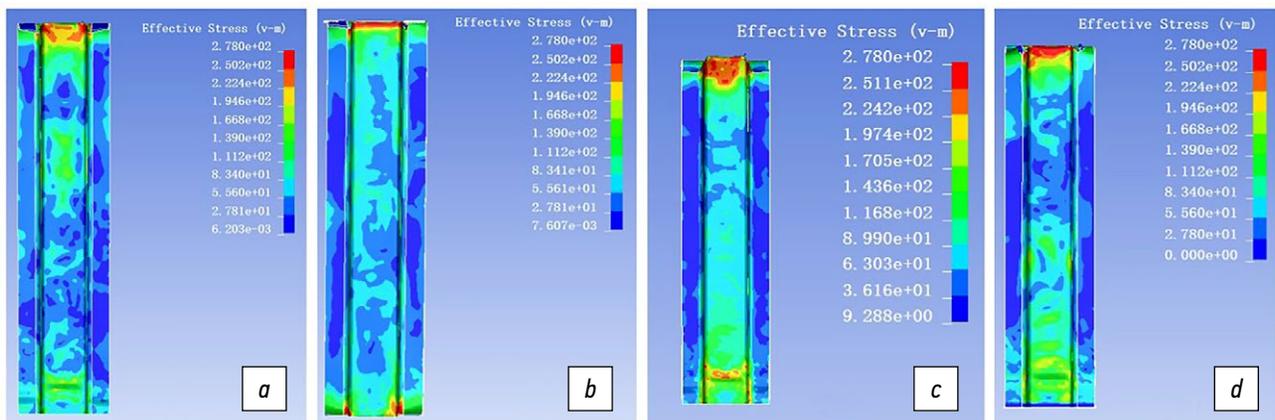


Рис. 12. Распределение напряжений трубной конструкции с толщиной клевого соединения 0,5 мм при осевом ударном нагружении КЭМ: *a* – с предлагаемой калибровкой; *b* – без калибровки свойств клевого материала; *c* – с учетом влияния только скорости деформации; *d* – с учетом влияния только толщины клевого соединения.

Fig. 12. Stress distribution of the tubular structure with the adhesive joint thickness of 0.5 mm under axial impact loading of the FE model: *a* – with the proposed calibration; *b* – without the calibration of adhesive properties; *c* – with considering the deformation rate influence only; *d* – with considering the adhesive joint thickness influence only.

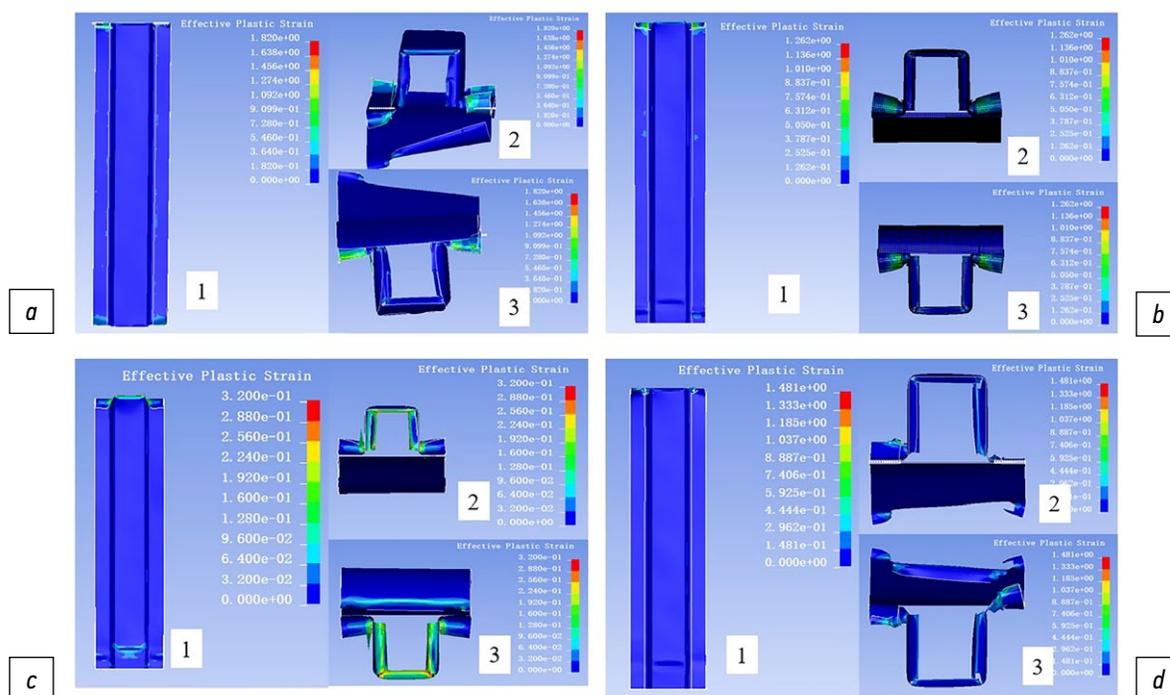


Рис. 13. Результаты распределений деформации трубчатой конструкций с толщиной клеевого соединения 0,5 мм при ударном нагружении КЭМ: *a* – без калибровки; *b* – с предлагаемой калибровкой свойств клеевого материала; *c* – с учетом влияния только скорости деформации; *d* – с учетом влияния только толщины клеевого соединения.

Fig. 13. Results of strain distributions of the tubular structure with the adhesive joint thickness of 0.5 mm under impact loading of the FE model: *a* – without the calibration; *b* – with the proposed calibration of adhesive properties; *c* – with considering the deformation rate influence only; *d* – with considering the adhesive joint thickness influence only.

Таблица 4. Зоны разрушения и деформаций образцов с толщиной клеевого слоя 0,5 мм при моделировании с калибровкой при осевой ударной нагрузке

Table 4. Failure zones and deformations of components in axial impact loading simulation with the calibration

Условия получения результатов	Длина зоны разрушения, мм				Длина образца после удара, мм
	В левой части образца		В правой части образца		
	от	до	от	до	
Эксперимент	0	260	0	230	488
Моделирование с калибровкой	0	248	0	234	482
Моделирование без калибровки: – первая зона	0	230	0	254	473
– вторая зона	264	500	290	500	
Моделирование с калибровкой с учетом влияния только скорости деформации	0	386	0	386	474
Моделирование с калибровкой с учетом влияния только толщины клеевого слоя	0	204	0	210	481

калибровки и без калибровки свойств клея и экспериментально, были измерены и сведены в табл. 4.

Сравнение этих результатов показывает, что при осевом ударном нагружении погрешность результатов моделирования с использованием калибровки свойств материала с учетом толщины клеевого слоя и скорости деформации составляет 3,5%, при моделировании без калибровки – 70%. Если корректировать свойства материала с учетом влияния только скорости

деформации, погрешность моделирования равна 58,7%, а если учитывать только влияние толщины клеевого соединения – 15,5%. С точки зрения изменения длины деталей, погрешность результатов моделирования составляет: с использованием калибровки – 1,23%, без калибровки – 3,1%. Для КЭМ с калибровкой с учетом влияния только скорости деформации погрешность – 2,87%, а для КЭМ с калибровкой с учетом влияния только толщины клеевого слоя – 1,43%.

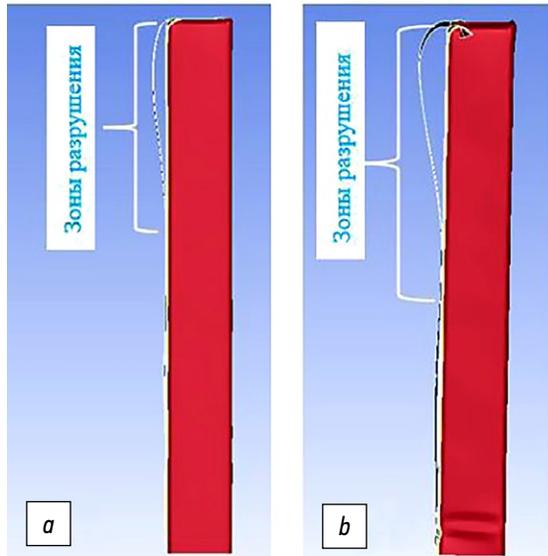


Рис. 14. Результаты моделирования при осевой ударной нагрузке для конструкции с толщиной клеевого слоя: *a* – 0,5 мм; *b* – 1 мм.

Fig. 14. Results of the axial impact loading simulation for the structure with the adhesive layer thickness of: *a* – 0.5 mm; *b* – 1 mm.

Из приведенных выше результатов видно, что использование методов калибровки свойств материала с учетом влияния толщины клеевого слоя и скорости деформации в КЭМ может повысить точность моделирования.

Далее было проведено исследование погрешностей моделирования с использованием методов калибровки для конструкций с разной толщиной клеевого слоя по сравнению с экспериментом. Результаты моделирования для клеевых конструкций с различной толщиной клеевого слоя при осевом ударном нагружении показаны на рис. 14.

Длина разрушения клеевых слоев, общая деформация конструкций и энергия поглощения клеевого слоя, полученные по результатам расчета в программном комплексе *LS-Dyna*, приведены в табл. 5.

Анализ показывает, что средняя погрешность длины разрушения клеевого соединения при осевом ударе составляет 3,5% для объекта с толщиной клеевого слоя 0,5 мм и 7,9% для толщины 1 мм. Погрешность в общей деформации клеевой структуры составляет 1,23% для слоя толщиной 0,5 мм и 0,2% для слоя толщиной

Таблица 5. Зоны разрушения, перемещения и энергия поглощения при моделировании при осевой ударной нагрузке

Table 5. Failure zones, displacement, and absorption energy after axial impact loading

Склеенная конструкция	Зоны разрушения клеевого слоя, мм				Длина детали, мм		Энергия поглощения клеевого слоя 10^{-3} Дж
	В левой части образца		В правой части образца		перед ударом	после удара	
	от	до	от	до			
Толщина клеевого слоя 0,5 мм	0	248	0	234	500	482	248
Толщина клеевого слоя 1 мм	0	325	0	385	500	486	325

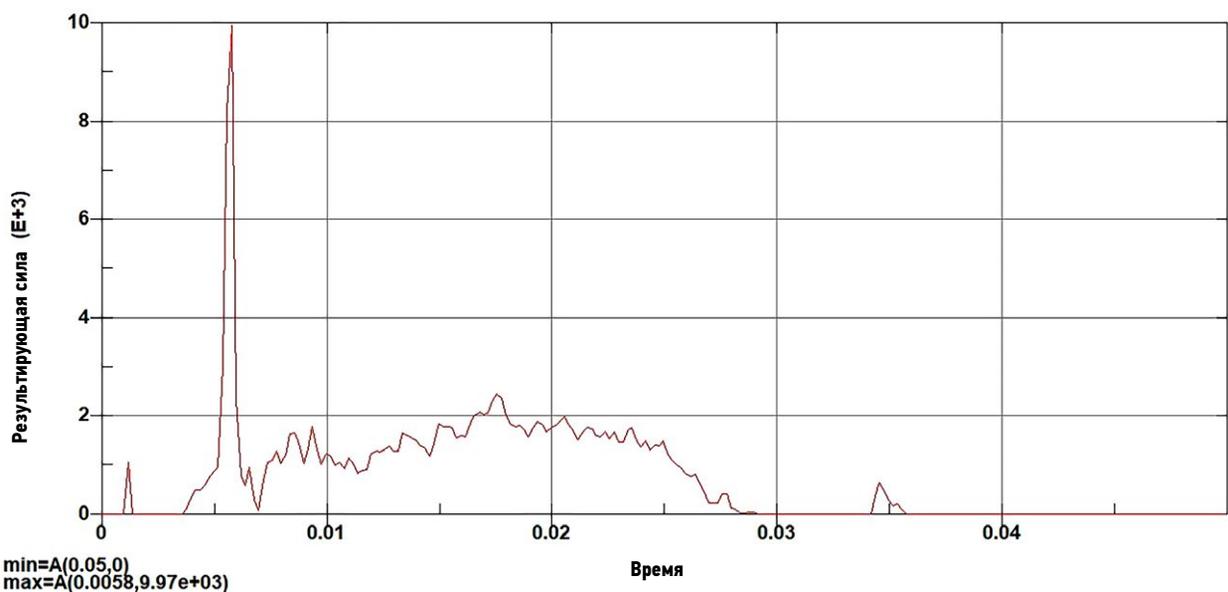


Рис. 15. Картина изменений контактной силы между ударником и конструкцией при осевом ударном нагружении.

Fig. 15. The time-domain changes in the contact force between the striker and the structure during axial impact loading.

1 мм. Поглощенная энергия клеевым слоем при его толщине 1 мм при осевом ударном нагружении на 23,69% выше, чем при толщине 0,5 мм.

Изменение контактной силы между ударником и конструкцией во время осевого удара, полученное в результате расчетов, показано на рис. 15. Погрешность результатов моделирования составляет 6,32% по сравнению с экспериментом.

Картинки расчетных деформированных состояний образцов при боковом ударе показаны на рис. 16.

Изменение контактной силы между ударником и конструкцией во время бокового удара, полученное в результате расчетов, показано на рис. 17. Погрешность результатов моделирования составляет 6,69% по сравнению с экспериментом.

Длина разрушения клеевых слоев, общая деформация конструкций и энергия поглощения клеевого слоя, полученные по результатам расчета в программном комплексе *LS-Dyna*, приведены в таблице 6.

Анализ показывает, что средняя погрешность длины разрушения клеевого соединения при боковом ударе

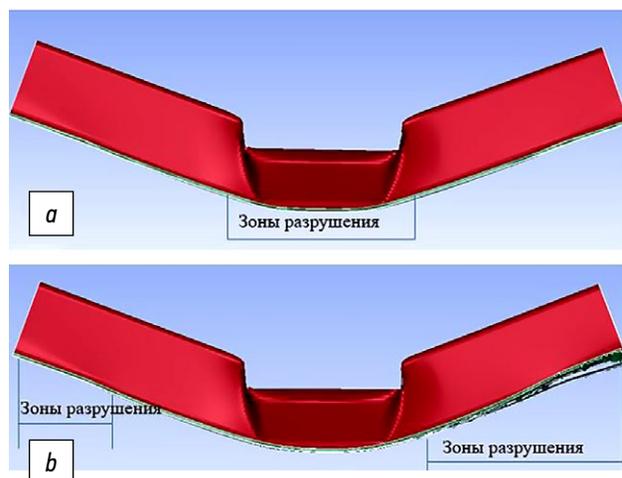


Рис. 16. Картинки расчетных деформированных состояний образцов при боковом ударе при толщине клеевого слоя: *a* – 0,5 мм; *b* – 1 мм.

Fig. 16. Images of simulated deformed states of specimens after side impact with the adhesive layer thickness of : *a* – 0.5 mm; *b* – 1 mm.

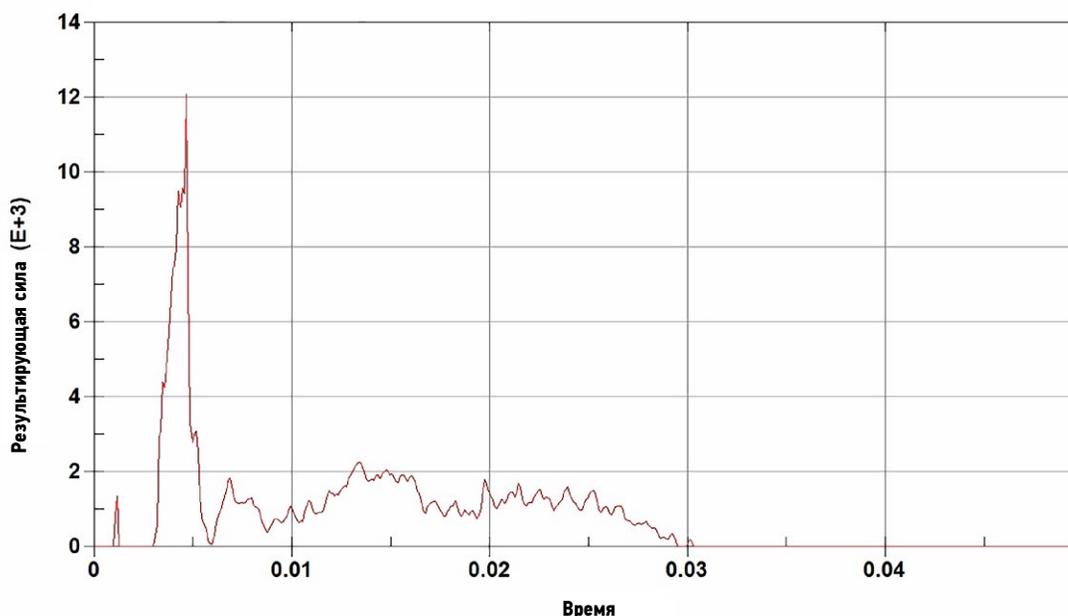


Рис. 17. Картина изменений контактной силы между ударником и конструкцией при боковом ударном нагружении.

Fig. 17. The time-domain changes in the contact force between the striker and the structure during lateral impact loading.

Таблица 6. Зоны разрушения, перемещения и энергия поглощения при боковой ударной нагрузке

Table 6. Failure zones, displacement, and absorption energy after side impact loading

Склеенная конструкция	Зоны разрушения клеевого слоя, мм				Длина детали, мм		Энергия поглощения 10^{-3} Дж	
	В левой части образца		В правой части образца		перед ударом	после удара		
	от	до	от	до				
Толщина клеевого слоя 0,5 мм	225	282	225	282	500	442	258	
Толщина клеевого слоя 1 мм:	– первая зона	0	165	0	165	500	455	278
	– вторая зона	358	500	388	500			

составляет 9,5% для объекта с толщиной клеевого слоя 0,5 мм и 8,85% для толщины 1 мм. Погрешность общей деформации клеевой структуры составляет 1,61% для слоя толщиной 0,5 мм и 0,044% для слоя толщиной 1 мм. Поглощенная энергия клеевым слоем при его толщине 1 мм при боковом ударном нагружении на 7,19% выше, чем при толщине 0,5 мм.

ВЫВОДЫ

1. Прочность склеенной конструкции при ударном нагружении зависит от свойств клея, толщины клеевого соединения и скорости деформации.
2. Комбинированный учет влияния толщины клеевого соединения и скорости деформации при калибровке дает наилучший результат по точности моделирования (с учетом одного фактора погрешности моделирования больше на 15%). Использование калибровки материала клеевого соединения с учетом двух факторов позволяет с хорошей точностью (1–10%) моделировать разрушение клеевого слоя и деформацию конструкции при ударной нагрузке.
3. Длина разрушения клеевого слоя при ударной нагрузке в стальных конструкциях, соединенных клеем *Henkel EP 5055*, короче в соединениях с толщиной клеевого слоя 0,5 мм, чем в соединениях с толщиной клеевого слоя 1 мм. При этом длина разрушения клеевого слоя в соединениях с толщиной клеевого слоя 0,5 мм при осевой нагрузке уменьшилась на 28,99%, а длина разрушения клеевого слоя при боковой ударной нагрузке уменьшилась на 61,11% по сравнению с толщиной клеевого слоя 1 мм. Это может быть связано с тем, что внутреннее разрушение более вероятно в более толстых слоях.
4. Общая деформация склеенной конструкции при боковой ударной нагрузке с толщиной клеевого слоя 1 мм меньше, чем с толщиной слоя 0,5 мм, т. к. клеевой слой поглощает часть энергии. При осевой

ударной нагрузке отличия незначительны. Клеевое соединение с толщиной 1 мм в трубчатой конструкции разрушается быстрее, чем с толщиной 0,5 мм. Существует также положительная корреляция между толщиной адгезивного слоя и поглощаемой им энергией удара.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. *И Лю* — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; *В.Н. Зузов* — редактирование текста рукописи; *Р.Б. Гончаров* — редактирование текста рукописи, создание изображений. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. *Yi Liu* — search for publications, writing the text of the manuscript; *V.N. Zuzov* — editing the text of the manuscript; *R.B. Goncharov* — editing the text of the manuscript, creating images. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work.

Competing interests. The authors declare no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнова М.И. Сборник технических условий на клеящие материалы / под ред. Д.А. Кардашова. Ленинград: Химия, 1975. 463 с.
2. Fays S. Adhesive bonding technology in the automotive industry // *Adhesion and Interface*. 2003. Vol. 4, N 2. P. 37–48.
3. Da Silva L.F., Rodrigues T.N., De Figueiredo M.A., De Moura M.F. Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength // *The Journal of Adhesion*. 2006. Vol. 82, N 11. P. 1091–1115. doi: 10.1080/00218460600948511
4. Makhecha D.P., Kapania R.K., Johnson E.R., Dillard D.A. Dynamic fracture analysis of adhesively bonded joints using explicit methods // *AIAA Journal*. 2007. Vol. 45, N 11. P. 2778–2784. doi: 10.2514/1.26088
5. Xin Y. Study of modeling techniques of weld-bonded joints under impact loading [dissertation]. Tsinghua University, 2010.
6. Carlberger T., Biel A., Stigh U. Influence of temperature and strain rate on cohesive properties of a structural epoxy adhesive // *International Journal of Fracture*. 2009. Vol. 155, N 2. P. 155–166. doi: 10.1007/s10704-009-9337-4
7. ГОСТ Р ИСО 11003-2-2017. Национальный стандарт Российской Федерации. Клеи. Определение свойств конструкционных клеев при сдвиге. Часть 2. Метод испытания на растяжение металлических образцов, склеенных внахлестку. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/556309663> Дата обращения: 15.12.2022.
8. ГОСТ 9550-81. Межгосударственный стандарт. Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200020731> Дата обращения: 15.12.2022.

9. DIN EN ISO 11343-2019. Международный (зарубежный) стандарт. Клеи. Определение динамической устойчивости к расщеплению высокопрочных клеевых связей в условиях ударного клина. Метод клинообразного удара (ISO 11343:2019); немецкая версия EN ISO 11343:2019. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/563882968> Дата обращения: 15.12.2022.
10. Лю И., Зузов В.Н. Численное моделирование клеевого соединения в автомобильных конструкциях при квазистатическом нагружении с использованием усовершенствованной моде-

- ли его свойств // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2022. № 3. С. 84–97. doi: 10.46960/1816-210X_2022_3_84
11. Лю И., Зузов В.Н. Моделирование клеевого соединения в автомобильных конструкциях при динамическом и ударном нагружении с использованием модифицирования свойств материала // Будущее машиностроения России: сборник докладов Четырнадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов, 21–24 сентября 2021 г. В 2 т. Т. 2. Москва, 2022. С. 117–127.

REFERENCES

1. Smirnova Ml. Collection of technical specifications for adhesive materials. Ed. by D.A. Kardashov. Leningrad: Khimiya; 1975. 463 p. (In Russ).
2. Fays S. Adhesive bonding technology in the automotive industry. *Adhesion and Interface*. 2003;4(2):37–48.
3. Da Silva LF, Rodrigues TN, De Figueiredo MA, De Moura MF. Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength. *The Journal of Adhesion*. 2006;82(11):1091–1115. doi: 10.1080/00218460600948511
4. Makhecha DP, Kapania RK, Johnson ER, Dillard DA. Dynamic fracture analysis of adhesively bonded joints using explicit methods. *AIAA Journal*. 2007;45(11):2778–2784. doi: 10.2514/1.26088
5. Xin Y. Study of modeling techniques of weld-bonded joints under impact loading [dissertation]. Tsinghua University; 2010.
6. Carlberger T, Biel A, Stigh U. Influence of temperature and strain rate on cohesive properties of a structural epoxy adhesive. *International Journal of Fracture*. 2009;155(2):155–166. doi: 10.1007/s10704-009-9337-4
7. GOST R ISO 11003-2-2017. National Standard of the Russian Federation. Adhesives. Determination of shear behaviour of structural adhesives. Part 2. Tensile test method for metallic standards with the use of thick adherends. (In Russ). Available from: <https://docs.cntd.ru/document/556309663> Accessed: 15.12.2022.
8. GOST 9550-81. Interstate standard. Plastics. Methods for determination of elasticity modulus at strength, compression and bending. (In Russ). Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200020731> Accessed: 15.12.2022.
9. DIN EN ISO 11343-2019. International (foreign) standard. Adhesives. Determination of dynamic resistance to cleavage of high-strength adhesive bonds under impact wedge conditions. Wedge impact method (ISO 11343:2019); German version EN ISO 11343:2019. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/563882968> Accessed: 15.12.2022.
10. Liu I, Zuzov VN. Numerical modeling of an adhesive joint in automotive structures under quasi-static loading using an improved model of its properties. *Transactions of Nizhni Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev*. 2022;(3):84–97. doi: 10.46960/1816-210X_2022_3_84
11. Liu I, Zuzov VN. Modeling of adhesive bonding in automotive structures under dynamic and shock loading using modification of material properties. In: The Future of mechanical Engineering of Russia: Collection of reports of the Fourteenth All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists, September 21–24, 2021. Vol. 2. Moscow; 2022. P. 117–127.

ОБ АВТОРАХ

*Зузов Валерий Николаевич, д.т.н., профессор кафедры «Колесные машины»; адрес: Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1512-9299>; eLibrary SPIN: 1419-7851; e-mail: zuzvalery@rambler.ru

Лю И, аспирант кафедры «Колесные машины»; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2615-6826>; eLibrary SPIN: 3301-3941; e-mail: liuyi941003@gmail.com

Гончаров Роман Борисович, доцент кафедры «Колесные машины»; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4805-967X>; eLibrary SPIN: 1180-9530; e-mail: goncharov.roman@bmstu.ru

*Автор, ответственный за переписку

AUTHORS' INFO

*Valery N. Zuzov, Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Wheeled Vehicles Department; address: 5 2nd Baumanskaya avenue, 105005 Moscow, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1512-9299>; eLibrary SPIN: 1419-7851; e-mail: zuzvalery@rambler.ru

Yi Liu, graduate student of the Wheeled Vehicles Department; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2615-6826>; eLibrary SPIN: 3301-3941; e-mail: liuyi941003@gmail.com

Roman B. Goncharov, Associate Professor of the Wheeled Vehicles Department; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4805-967X>; eLibrary SPIN: 1180-9530; e-mail: goncharov.roman@bmstu.ru

*Corresponding author