

## СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМАЦИОННЫХ СОСТОЯНИЙ СКЛЕЕННЫХ И СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АВТОМОБИЛЯ ПРИ УДАРНЫХ НАГРУЗКАХ

**И Лю, Р.Б. Гончаров, В.Н. Зузов**

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

В данной статье проведено сравнительное исследование свойств клевого и сварного соединения в конструкциях автомобиля при ударных нагрузках. Оценено влияние толщины клевого соединения на прочность в трубчатых конструкциях автомобиля при ударном нагружении со скоростью удара 6,66 м/с (при осевом ударе) и 6,87 м/с (при боковом ударе) по результатам проведенных экспериментов с разными толщинами клевого слоя. Для склеивания образцов был выбран клей Henkel EP 5055, который широко применяется для склеивания конструкций автомобилей. В проведенных исследованиях были измерены и исследованы зоны разрушений соединений, общая и локальная деформация образцов при боковых и осевых ударных нагружениях. Моделирование и расчет напряженно-деформированных состояний (НДС) моделей трубчатых конструкций и клевого соединения осуществлялись в программном комплексе LS-Dyna. В моделях клея учитывалось влияние толщины клевого соединения и скорости деформации на прочность соединения при ударных нагружениях. Для оценки точности расчетов на базе созданных конечно-элементных моделей (КЭМ) клевого соединения конструкции автомобиля проведена верификация по результатам экспериментов. Согласно результатам экспериментов и моделирования, прочность соединения сварных конструкций при ударной нагрузке выше, чем у конструкций с применением клея Henkel EP 5055, но по результатам моделирования склеенная конструкция поглощает больше энергии удара, чем сварная конструкция. На основе исследований результатов расчетов, проведенных с использованием предлагаемой модифицированной модели, обосновано рекомендуемое значение толщины клевого слоя для склеивания навесных деталей автомобиля.

*Ключевые слова: LS-Dyna, конечно-элементная модель, напряженно-деформированное состояние, клевое соединение, сварное соединение, калибровка свойств материала.*

### Введение

В случаях столкновения при ДТП часто возникают большие деформации, в том числе из-за разрушений в местах соединений, что ставит под угрозу безопасность пассажиров автомобиля. Технология сварки наиболее часто используется в автомобилях, но с ростом потребности облегчения автомобилей во многих его частях используются нетрадиционные материалы, такие как композитные или алюминиевые сплавы. В этом случае технология сварки не может быть использована, и в настоящее время все чаще используются относительно новые технологии соединения – клеевые.

Клеевое соединение достаточно широко применяется в современных отечественных и зарубежных автомобилях. В советский период на автомобилях «Москвич» применялся клей ВС-10Т для фрикционных накладок, а также клей ИПК-КС-1П для соединения дверей, листового металла на кузове автомобиля и др. [1]. В зарубежном автомобилестроении ударопрочные конструкционные клеи ВЕТАМАТЕ на эпоксидной основе были использованы для полностью алюминиевого кузова Audi A8; в Chevrolet Cruz также используется склеивание, в том числе в ответственных соединениях [2–4].

В исследовании [5] было проанализировано влияние толщины клевого соединения на прочность конструкции «внахлест» по направлениям сдвига и разрыва при квазистатическом нагру-

жении. Показано, что прочность клеевого соединения уменьшается с увеличением толщины слоя как при сдвиге, так и при растяжении (рис. 1).

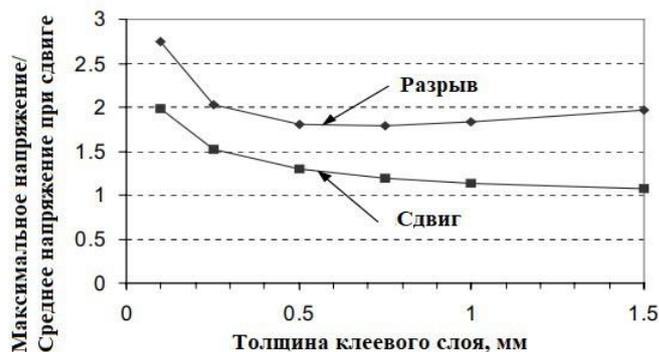


Рис. 1. Графики изменений относительных максимальных напряжений от толщины клеевого соединения «внахлест» по направлению сдвига и разрыва

Представляют интерес некоторые исследования по сравнению свойств клеевых соединений и сварки [6–7]. В работе [6] проведены исследования при квазистатическом растяжении деталей, соединенных «внахлест» клеем и сваркой. Результаты показаны на рис. 2.

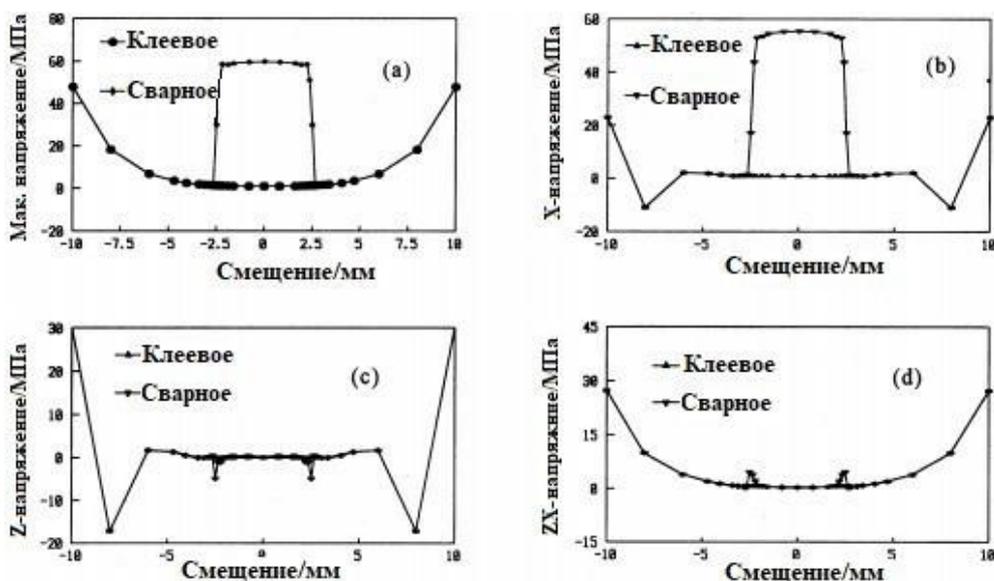


Рис. 2. Распределение напряжений по длине соединения: а) в сварном; б) в клеевом соединении

### Цель и работы

Целью данной работы является сравнительная оценка прочности трубчатых конструкций автомобиля со сварными и клеевыми соединениями при ударном нагружении на базе экспериментальных и расчетных исследований, а также изучение влияния толщины клеевого соединения на прочность конструкций для выработки рекомендаций по использованию клеевых соединений и заданию наилучшей толщины клеевого слоя.

Задачи этой работы заключаются в следующем:

- 1) выполнение экспериментов для получения данных об общей деформации конструкций и НДС клеенных и сварных конструкций при разнонаправленных ударных нагрузках;
- 2) анализ результатов экспериментальных исследований. Сравнительная оценка поведения клеевых и сварных соединений конструкции;

## Контроль и испытания

- 3) проведение расчета НДС на базе разработанных моделей в программном комплексе LS-Dyna;
- 4) верификация моделей по результатам экспериментов;
- 5) оценка влияния толщины клеевого соединения на прочность конструкции и рекомендация по заданию реальной толщины клеевого слоя для склеивания в кузове автомобиля.

### 1. Экспериментальные исследования

Конструктивные клеи широко применяются для соединения конструкций автомобиля, особенно для соединения деталей из алюминиевых сплавов, композиционных материалов и др. [8–10]. Примером может служить соединение между наружной и внутренней панелями в капоте (рис. 3).

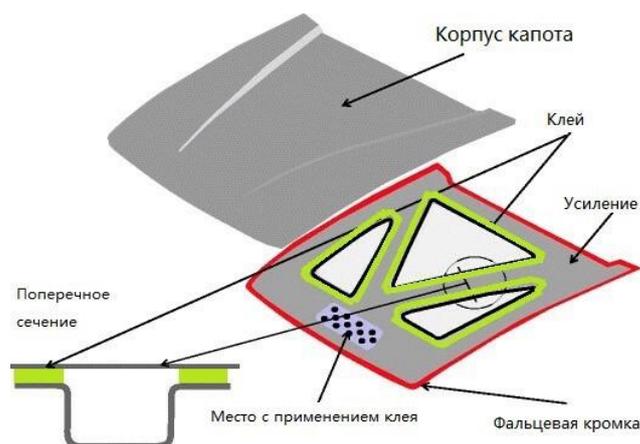


Рис. 3. Расположение клеевого соединения в капоте автомобиля

Чтобы сравнить прочность конструкций с клеевым и сварным соединением, нами были поставлены и проведены эксперименты.

Образцы для испытаний представляют собой прямоугольные трубы омега-образной формы, закрытые листом (рис. 4). Толщина трубы 1 мм, что соответствует толщинам листов, используемых для изготовления кабин и кузовов колесных машин. Соединение листов в одном случае осуществлено точечной сваркой, во втором – с помощью клея. Расстояние между соседними точками сварки составляет 60 мм. Применялись клеевые соединения в двух вариантах: с толщиной клеевого слоя 0,5 мм и 1 мм. Такие толщины реализуются в автомобилестроении.

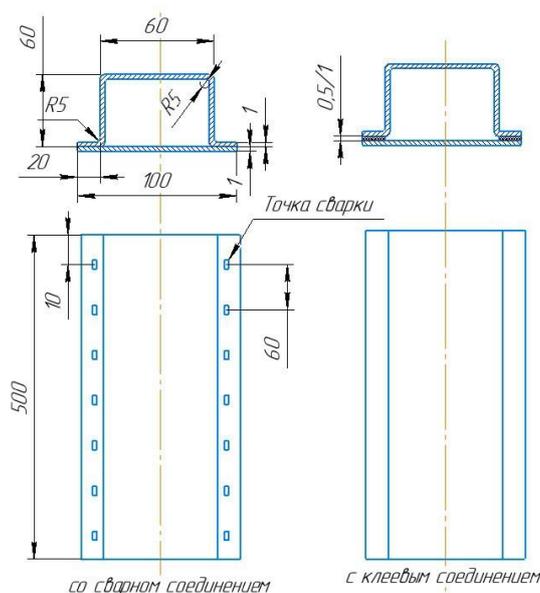


Рис. 4. Форма и размеры экспериментального образца

В качестве клея был выбран высокопрочный конструкционный клей Henkel EP 5055. Он часто применяется для склеивания конструкций автомобилей [11]. Основные параметры его перечислены в табл. 1.

Таблица 1

Механические свойства клея Henkel EP 5055

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

Для того чтобы энергия удара в эксперименте была сопоставима с энергией при натуральных испытаниях автомобилей, был выбран груз массой 22,3 кг, который свободно падает с высоты 2,26 метра. При этом энергия удара равна 494,4J, а скорость ударника в момент касания – 6,66 м/с [12].

При осевом ударе нижняя часть детали крепится к основанию, ударник воздействует на верхнюю часть трубы. При боковом ударе противоположные концы трубы, расположенной горизонтально, лежат на опорах, а ударник падает в центр трубы.

Образцы после осевого удара представлены на рис. 5. На рис. 5(а) показана склеенная конструкция с толщиной клея 0,5 мм, на рис. 5(б) – с толщиной клея 1 мм, а на рис. 5(в) – сварная конструкция.

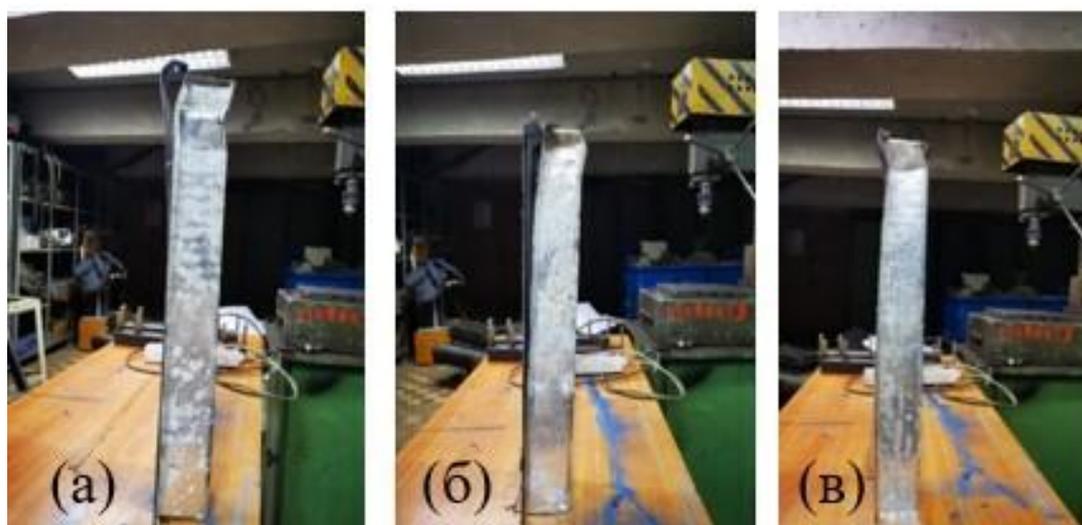


Рис. 5. Образцы после испытаний на осевую ударную нагрузку

Из приведенных фотографий видно, что склеенная конструкция подвержена разрушению клеевого слоя при данной ударной нагрузке, а сварная конструкция более прочная по сравнению с ней. Длины зон разрушения клеевых и сварных конструкций приведены в табл. 2.

Зоны разрушения и деформации образцов при осевой ударной нагрузке

Вид конструкции	Зона разрушения				Длина детали	
	В левой части образца		В правой части образца		перед ударом/мм	после удара/мм
	от/мм	до/мм	от/мм	до/мм		
Склеенная конструкция с толщиной клея 0,5 мм	0	260	0	230	500	488
Склеенная конструкция с толщиной клея 1 мм	0	290	0	400	500	485
Сварная конструкция	0	50	0	50	500	490

Для измерения деформации конструкции выбраны три точки на конструкции. Их расположение показано на рис. 6.

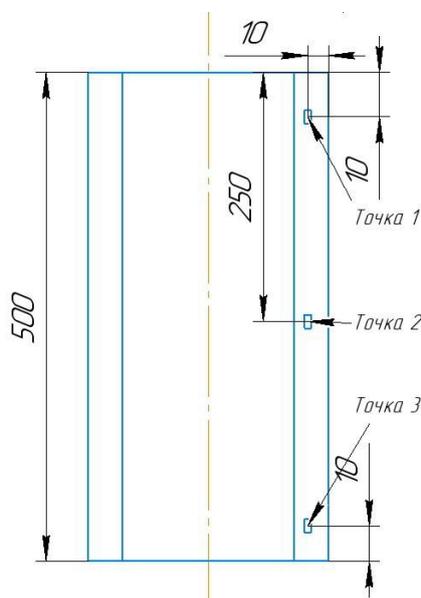


Рис. 6. Расположение точек для измерения деформации конструкции

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

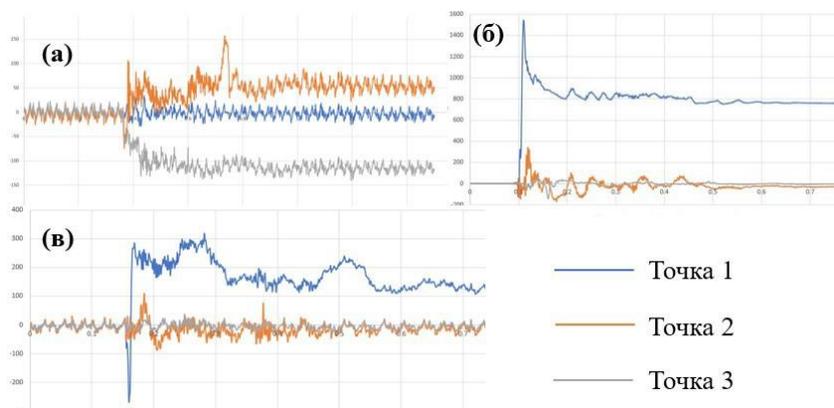


Рис. 7. Деформации в точках конструкции при осевой ударной нагрузке в: а) склеенной конструкции с толщиной клея 0,5 мм; б) склеенной конструкции с толщиной клея 1 мм; в) сварной конструкции

Как видно из приведенных выше данных, при одинаковой осевой ударной нагрузке деформация сварных конструкций значительно меньше, чем клееных. 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 точке 1 значительно выше, чем у других точек.

Образцы после бокового удара показаны на рис. 8. на рис. 8(а) показана склеенная конструкция с толщиной клеевого слоя 0,5 мм, на рис. 9(б) – склеенная конструкция с толщиной клеевого слоя 1 мм, а на рис. 8(в) – сварная конструкция.

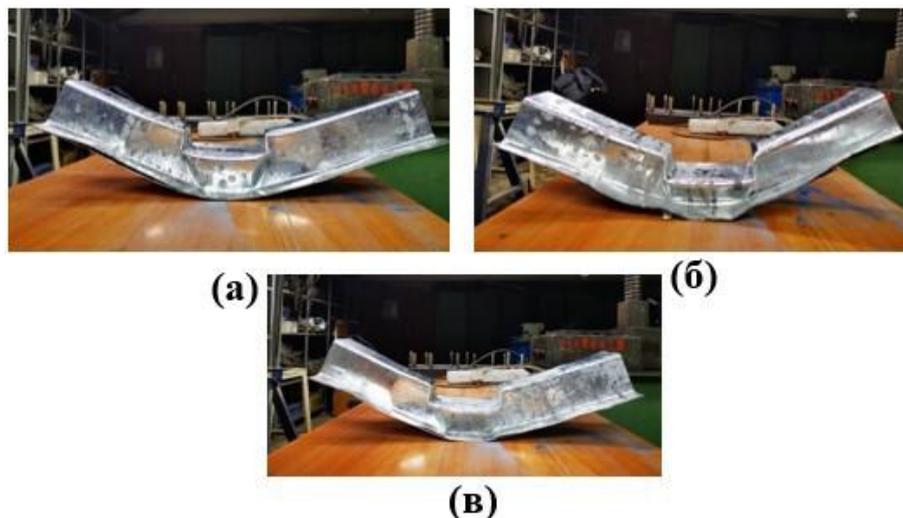


Рис. 8. Образцы после испытаний при боковой ударной нагрузке:  
а) склеенная конструкция с толщиной клеевого слоя 0,5 мм;  
б) склеенная конструкция с толщиной клеевого слоя 1 мм; в) сварная конструкция

Длины зон разрушения клееных и сварных конструкций приведены в табл. 3.

Таблица 3

Зоны разрушения и деформации образцов при боковой ударной нагрузке

Вид конструкции	Зона разрушения				Длина детали	
	В левой части образца		В правой части образца		перед ударом/мм	после удара/мм
	от/мм	до/мм	от/мм	до/мм		
Склеенная конструкция с толщиной клеевого слоя 0,5 мм	9	150	4	190	500	435
Склеенная конструкция с толщиной клеевого слоя 1 мм	0	300	18	420	500	453
Сварная конструкция	0	10	0	10	500	428

Как видно из приведенных выше данных, при одинаковой ударной нагрузке деформация конструкций с использованием клеевых соединений меньше, чем деформация сварных конструкций, но разрушение клеевых соединений более серьезное, чем при сварке. Конструкции с более толстым клеевым слоем сильнее подвержены разрушению клеевого слоя (возможно даже полное растрескивание).

Контактная сила при ударе также измерялась датчиками, пиковая контактная сила остается практически постоянной и составляет 10 925 Н. Причина наличия двух пиков заключается в том, что ударник после удара подпрыгивает вверх, а затем снова падает под действием силы тяжести.

С помощью тензометров, приклеенных к поверхности конструкции, были получены деформации для каждой из трех точек (рис. 9).

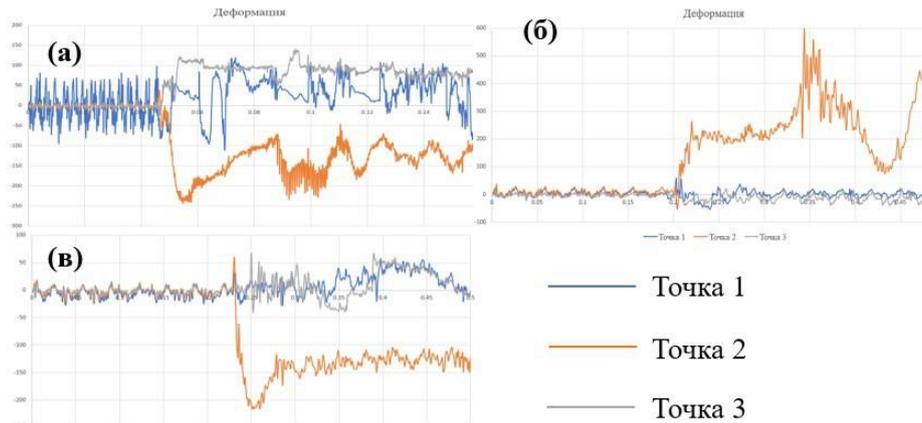


Рис. 9. Деформации в точках конструкции при боковой ударной нагрузке в: а) склеенной конструкции с толщиной клея 0,5 мм; б) склеенной конструкции с толщиной клея 1 мм; в) сварной конструкции

Высота падения равна 2,26 м и скорость удара равна 6,87 м/с. Основная область деформации находится в центре, т. е. в месте контакта с ударником. На концах конструкции не возникает значительной деформации.

**2. Моделирование соединения с разной толщиной клеевого слоя в программном комплексе LS-Dyna**

На практике, особенно в автомобилестроении, все шире используется моделирование ударов с помощью метода конечных элементов. Однако при этом остро стоит вопрос достижения требуемой точности результатов моделирования при обеспечении возможности проведения многовариантных исследований.

Свойства клеевого соединения определяются не только свойствами клея, но и многими другими факторами, такими как толщина клеевого слоя, скорость деформации, температура и гладкость поверхности склеиваемого материала [8, 13–18]. Таким образом, эти факторы необходимо учитывать при моделировании свойств склеивания для достижения более точных результатов моделирования.

Согласно [14], характеристики склеивания не сильно изменяются при температурах [–20 – +40] °С, а гладкость поверхности стального листа контролируется процессом обработки. Поэтому в основном исследуется влияние скорости деформации и толщины клеевого слоя на прочность клеевого соединения [9, 10].

Влияние скорости деформации на эффективность склеивания в исследовании [19] может быть выражено уравнением (1)

$$\begin{cases} J = J_0 * \frac{\lg(\varepsilon)}{\lg(\varepsilon_0)} \\ \sigma = \sigma_0 * \frac{\lg(\varepsilon)}{\lg(\varepsilon_0)} \end{cases}, \tag{1}$$

где  $J$  – фактическая энергия разрушения,  $J_0$  – стандартная энергия разрушения,  $\varepsilon$  – фактическая скорость деформации,  $\varepsilon_0$  – скорость деформации, при которой определяются свойства материала,  $\sigma$  – фактический предел текучести при скорости деформации  $\varepsilon$ ,  $\sigma_0$  – предел текучести при измерении по стандартам.

Ранее было исследовано влияние толщины клеевого слоя на его прочность [9]. Метод корректировки используется следующий:

$$\begin{cases} E_a = E_b * H/h \\ \sigma_{0a} = \sigma_{0b} \\ E_{ta} = E_{tb} * H/h \end{cases}, \tag{2}$$

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

Для повышения точности моделирования клеевого соединения предлагаем доработать метод калибровки [20], который за счет добавления учета влияния скорости деформации и толщины слоя становится более эффективным:

$$\begin{cases} E_a = E_b * H/h \\ \sigma_{0a} = \sigma_{0b} \lg(\varepsilon) / \lg(\varepsilon_0) \\ E_{ta} = E_{tb} * H/h \end{cases} \quad (3)$$

Для оценки влияния толщины клеевого слоя было смоделировано несколько вариантов с использованием метода калибровки. Результаты моделирования для склеенных и сварных конструкций при осевом ударном нагружении со скоростью удара 6,66 м/с показаны на рис. 10.

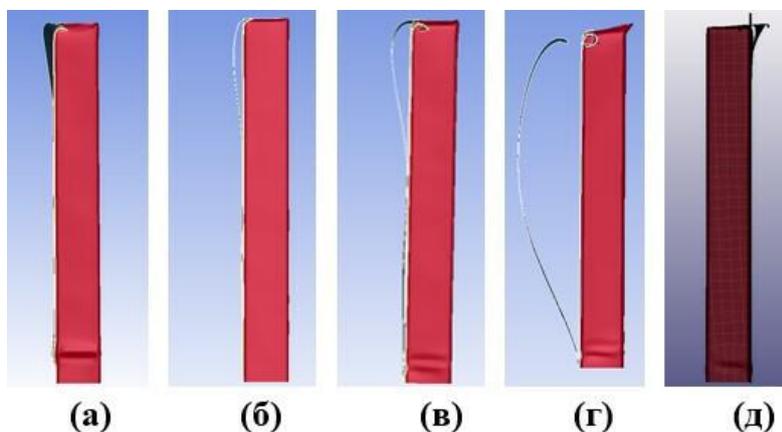


Рис. 10. Деформации балок при осевой ударной нагрузке:  
а) с толщиной клеевого слоя 0,2 мм; б) с толщиной 0,5 мм; в) с толщиной 1 мм;  
г) с толщиной 2 мм; д) соединенных точечной сваркой

Место разрушения и длина разрушения клеевых слоев, полученные расчетным путем, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Зоны разрушения и деформации деталей при осевой ударной нагрузке

Вид конструкции	Зона разрушения				Длина детали	
	В левой части образца		В правой части образца		перед ударом/мм	после удара/мм
	от/мм	до/мм	от/мм	до/мм		
Конструкция с толщиной клеевого слоя 0,2 мм	0	154	0	148	500	487
Конструкция с толщиной клеевого слоя 0,5 мм	0	248	0	234	500	482
Конструкция с толщиной клеевого слоя 1 мм	0	325	0	385	500	486
Конструкция с толщиной клеевого слоя 2 мм	0	500	0	500	500	487
Сварная конструкция	0	10	0	10	500	487

## Контроль и испытания

Как видно из табл. 4, разрушение сварных конструкций значительно меньше, чем клееных. Длина разрушения клеевого слоя увеличивается по мере увеличения толщины слоя. При использовании клеевых соединений в транспортных средствах необходимо также учитывать энергопоглощение конструкцией и клеевым слоем. Взаимосвязь между энергией удара, поглощаемой клеевым слоем, и его толщиной показана на рис. 11.

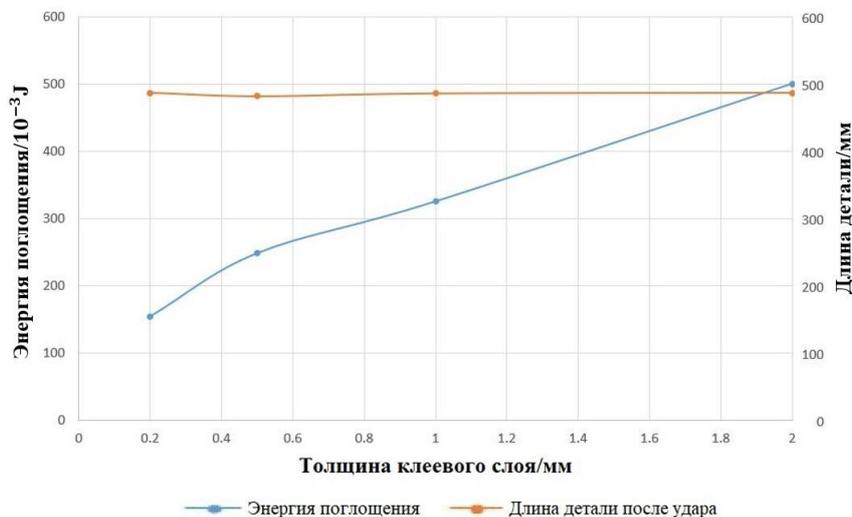


Рис. 11. Зависимость энергопоглощения и длины детали от толщины клеевого слоя после осевого удара

Анализ результатов показывает, что при повышении толщины клеевого слоя его энергоемкость тоже повышается. Из графика следует, что поглощение энергии клеевого соединения наиболее интенсивное в диапазоне толщин 0,2–0,5 мм.

Для сварной конструкции энергия поглощения равна  $22,8 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$ , которая на 85,2 % меньше, чем в склеенной конструкции с толщиной клеевого слоя 0,2 мм, а по сравнению с другими толщинами разница ещё больше. Принимая во внимание эти факторы, рекомендуется при осевых ударных нагрузках использовать толщину слоя клея 0,5 мм.

При боковом ударе со скоростью удара 6,87 м/с результаты моделирования показаны на рис. 12.

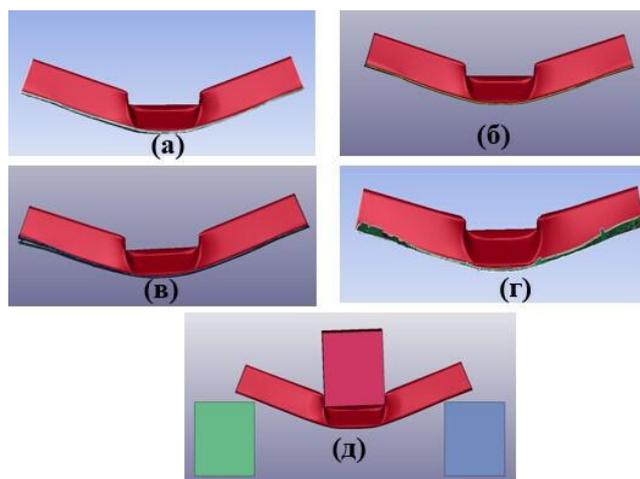


Рис. 12. Деформации балок при боковой ударной нагрузке: а) с толщиной клеевого слоя 0,2 мм; б) с толщиной 0,5 мм; в) с толщиной 1 мм; г) с толщиной 2 мм; д) соединенных точечной сваркой

Зоны разрушения и длина разрушения клеевых слоев, полученные расчетным путем, приведены в табл. 5.

Таблица 5

Зоны разрушения и деформации деталей при боковой ударной нагрузке

Вид конструкции	Зона разрушения				Длина детали	
	В левой части образца		В правой части образца		перед ударом/мм	после удара/мм
	от/мм	до/мм	от/мм	до/мм		
Конструкция с толщиной клеевого слоя 0,2 мм	0	0	0	0	500	434
Конструкция с толщиной клеевого слоя 0,5 мм	225	282	225	282	500	442
Конструкция с толщиной клеевого слоя 1 мм	0 358	165 500	0 388	16,5 500	500	455
Конструкция с толщиной клеевого слоя 2 мм	0 288	212 500	0 393	199 500	500	462
Сварная конструкция	0	0	0	0	500	428,3

Из табл. 5 видно, что сварное соединение при боковом ударном нагружении прочнее, чем клеевое. При увеличении толщины клеевого слоя (толщина стальной пластины везде одинаковая) изменение свойств склеиваемого материала приводит к увеличению длины разрушения клеевого слоя. Однако общая деформация конструкции при ударной нагрузке меньше, чем у сварной конструкции. В целом деформация конструкции становится меньше по мере увеличения толщины клеевого слоя. Это следует учитывать при использовании клеевых соединений (например, в таких компонентах автомобиля, как двери).

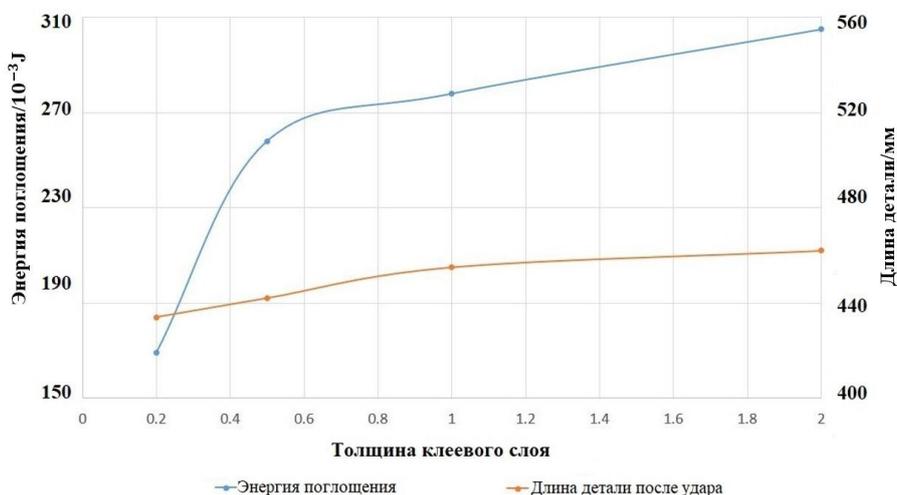


Рис. 13. Зависимость слоя энергопоглощения и длины от толщины клеевого детали после бокового удара

Из анализа графиков следует, что при боковом ударе поглощение энергии клеевого соединения наиболее интенсивное в диапазоне толщин 0,2–0,5 мм, а при толщинах 0,2–1 мм существенно снижается структурная деформация.

Для сварной конструкции энергия поглощения равна  $62,7 \cdot 10^{-3} \text{J}$ , которая на 62,9 % меньше, чем в склеенной конструкции с толщиной клеевого слоя 0,2 мм. Деформация сварной конструкции после бокового удара на 1,3 % больше, чем у склеенной конструкции с толщиной клеевого

## Контроль и испытания

слоя 0,2 мм. В склеенной конструкции её наибольшая общая деформация наблюдается при толщине клеевого слоя 0,2–1 мм.

### Выводы

1. Клеевое соединение на базе клея, применяемого в автомобилестроении, при ударных нагрузках со скоростью 6,66 м/с (при осевом ударе) и 6,87 м/с (при боковом ударе) подвержено расстрескиванию и разрушению, при этом в аналогичном сварном соединении не происходит разрушения точек сварки.

2. При осевом ударе энергия поглощения сварных точек на 85,2 % меньше, чем в склеенной конструкции с толщиной клеевого слоя 0,2 мм, а при боковом ударе на 62,9 % меньше. При большей толщине клеевого слоя разница ещё выше.

3. Общая деформация при боковой ударной нагрузке клееной конструкции с толщиной клеевого слоя 1 мм на 5,5 % меньше, чем деформация сварной конструкции, так как клеевой слой поглощает часть энергии.

4. Рекомендуемая толщина клеевого соединения в конструкциях автомобилей – 0,5 мм, поскольку в этом случае имеет место наименьшая деформация и максимальная энергоёмкость конструкции.

5. Клей может быть рекомендован для соединений в навесных деталях кузова автомобиля (капот, двери, крышки багажника и др.). Однако требуется тщательный подбор клея по его основным свойствам (модуль упругости, предел текучести, модуль отвердевания и др.).

### Литература

1. Смирнов, М.И. Сборник технических условий на клеющие материалы / М.И. Смирнов. – Л.: Химия, 1975. – 465 с.

2. Fays, S. *Adhesive Bonding Technology In the Automotive Industry* / Samuel Fays / S. Fays // *Adhesion and Interface*. – 2003. – Vol. 4. – No. 2. – P. 37–48.

3. Tan, W. *Research on testing method for mechanical properties of Body Adhesion* / W. Tan. – M.: Jilin University, 2018. – 117 p.

4. Carlberger, T. *Adhesive Joining for Crashworthiness. Thesis for the degree of doctor of philosophy Department of Applied Mechanics Chalmers University of Technology* / T. Carlberger. – 2008. – 124 p.

5. Dan, G. *Stress Analysis of Structural Bonded Joints. Master in Aeronautical Engineering, Imperial College* / G. Dan. – 2002. – 132 p.

6. Baohua, C. *Comparative studies on stresses in weld-bonded, spot-welded and adhesive-bonded joints* / C. Baohua, S. Yaowu, D. Shijie // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1999. – Vol. 87. – P. 230–236.

7. Williams, N. *The mechanism of weld bonding and the properties of weld bonded joints* / N. Williams, T. Jones. – M.: European Commission. – 1990. – 170 p.

8. Carlberger, T. *Influence of temperature and strain rate on cohesive properties of a structural epoxy adhesive* / T. Carlberger, A. Biel, U. Stigh // *Int J Fract.* – 2009. – Vol. 155. – P. 155–166. DOI:10.1007/S10704-009-9337-4

9. Лю, И. *Моделирование клеевого соединения в автомобильных конструкциях при динамическом и ударном нагружении с использованием модифицирования свойств материала* / И Лю, В.Н. Зузов // *Будущее машиностроения России*. – 2021. – С. 36–44.

10. *Numerical study of impact behaviour of mixed adhesive single lap joints for the automotive industry* / J.J.M. Machado, E.A.S. Marques, M.R.G. Silva et al. // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. – 2018. – Vol. 84. – P. 92–100. doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.02.036

11. *Development of a light-weight seat structure using a hybrid material approach* / C. Creighton, M. de Souza, R.J. Varley et al. // *Technologies for economical and functional lightweight design*. – 2019. – P. 61–67.

12. Сулегин, Д.А. *Исследование влияния усиливающих элементов двери автомобиля на пассивную безопасность при боковом ударе* / Д.А. Сулегин, В.Н. Зузов // *ТРУДЫ НГТУ ИМ. П.Е. АЛЕКСЕЕВА*. – 2021. – № 1. – С. 86–97.

13. Biel, A. Influence of temperature on cohesive parameters for adhesives / A. Biel, T. Carlberger // *The 28th Ris international symposium on materials science*. – 2007. – P. 17–24.
14. Herzl, C. The effects of bond thickness, rate and temperature on the deformation and fracture of structural adhesives under shear loading / C. Herzl // *International Journal of Fracture*. – 2004. – No. 130. – P. 497–515.
15. Rate dependent behavior of crash-optimized adhesives – Experimental characterization, model development, and simulation / M. May, O. Hesebeck, S. Marzi et al. // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2015. – No. 133. – P. 112–137.
16. Finite element analysis of adhesively bonded composite joints subjected to impact loadings / R. Hazimeh, G. Challita, K. Khalil et al. // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. – 2015. – Vol. 56. – P. 24–31.
17. Experimental and numerical study of the dynamic response of an adhesively bonded automotive structure / N.D.D. Silva, J.J.M. Machado, E.A.S. Marques et al. // *J Automobile Engineering*. – 2020. – Vol. 234, iss. 14. – P. 1–13. DOI: 10.1177/0954407020931699
18. Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints / G. Ji, Zh. Ouyang, G. Li, S. Ibekwe et al. // *International Journal of Solids and Structures*. – 2010. – Vol. 47. – P. 2445–2458.
19. Effect of temperature and strain rate on single lap joints with dissimilar lightweight adherends bonded with an acrylic adhesive / R. Avendaño, R.J.C. Carbas, E.A.S. Marques et al. // *Composite Structures*. – 2016. – Vol. 152. – P. 34–44.
20. Лю, И. Исследование влияния применения клеевого соединения в двери на пассивную безопасность автомобиля при боковом ударе / И Лю, В.Н. Зузов // *Сборник статей XV Международной научно-практической конференции*. – 2021. – С. 38–45.

Лю И, аспирант, кафедра «Колесные машины», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, liuyi941003@gmail.com.

Гончаров Роман Борисович, доцент, кафедра «Колесные машины», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, rbgoncharic@gmail.com.

Зузов Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Колесные машины», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, zuzvalery@rambler.ru.

Поступила в редакцию 10 июня 2022 г.

DOI: 10.14529/engin220306

## STUDY OF STRESS-STRAIN STATES OF BONDED AND WELDED VEHICLE STRUCTURES UNDER IMPACT LOADS

Yi Liu, liuyi941003@gmail.com

R.B. Goncharov, rbgoncharic@gmail.com

V.N. Zuzov, zuzvalery@rambler.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

In this article a comparative study of the properties of adhesive-bonded and welded joints in automobile structures under impact loads has been studied. The influence of the thickness of the adhesive-bonded joint on the stiffness of tubular car structures under the impact loading with the velocity of 6.66 m/s (under the axial impact) and 6.87 m/s (under the side impact) according to the results of the experiments with different thickness of the adhesive layer was estimated. For bonding samples was selected adhesive Henkel EP 5055, which is widely used for bonding structures of automobiles. In the conducted research measured and investigated zones of joint damage, total deformation of specimens and strain in them under lateral and axial impact loads. Modeling

and calculation of the stress-strain states of models and the failure zone of adhesive bonds were performed using the LS-Dyna. The models took into account the influence of the thickness of the adhesive bond and the strain rate on the bond strength in tubular car structures under impact loads. To estimate the accuracy of calculations on the basis of created finite-element models of the adhesive-bonded connection of the vehicles structure, verification according to the results of the experiments was carried out. According to the results of the experiments and modeling the reliability of the connection of the welded structures under the impact load is higher than that of the structures with the adhesive-bonded, but the adhesive-bonded layer absorbs more impact energy than the weld spots according to the simulation results. On the basis of research results of calculations carried out using the proposed modified model, the recommended value of the adhesive-bonded layer thickness for bonding of car attachments was substantiated.

*Keywords:* LS-Dyna, finite-element model, stress-strain state, bonded joint, welded joint, calibration of material properties.

### References

1. Smirnov M.I. *Sbornik tekhnicheskikh usloviy na kleyashchiye materialy* [Collection of technical specifications for adhesive materials] Leningrad, Chemistry, 1975. 465 p.
2. Fays S. Adhesive Bonding Technology In the Automotive Industry. *Adhesion and Interface*, 2003, vol. 4, no. 2. pp. 37–48.
3. Tan W. Research on testing method for mechanical properties of Body Adhesion. *Moscow. Jilin University*, 2018. 117 p.
4. Carlberger T. Adhesive Joining for Crashworthiness. *Thesis for the degree of doctor of philosophy Department of Applied Mechanics Chalmers University of Technology*, 2008. 124 p.
5. Dan G. Stress Analysis of Structural Bonded Joints. *Master in Aeronautical Engineering, Imperial College*, 2002. 132 p.
6. Baohua C., Yaowu S., Shijie D. Comparative studies on stresses in weld-bonded, spot-welded and adhesive-bonded joints. *Journal of Materials Processing Technology*. 1999. vol. 87. pp. 230–236.
7. Williams N., Jones T. The mechanism of weld bonding and the properties of weld bonded joints. *Moscow: European Commission*, 1990. 170 p.
8. Carlberger T., Biel A., Stigh U. Influence of temperature and strain rate on cohesive properties of a structural epoxy adhesive. *Int J Fract*, 2009. pp. 155–166. DOI:10.1007/S10704-009-9337-4
9. Liu Yi, Zuzov V. [Modeling of Adhesive Bonding in Automotive Structures under Dynamic and Impact Loading Using Material Property Modification]. *Collection: The Future of Mechanical Engineering in Russia*. 2021. pp. 36–44. (in Russ).
10. Machado J.J.M., Marques E.A.S., Silva M.R.G., da Silva L.F.M. Numerical study of impact behaviour of mixed adhesive single lap joints for the automotive industry. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2018, vol. 84. pp. 92–100. doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.02.036
11. Creighton C., de Souza M., Varley R.J., Antony J. Development of a light-weight seat structure using a hybrid material approach. *Technologies for economical and functional lightweight design*. 2019. pp. 61–67.
12. Sulegin D., Zuzov V. [An Investigation of the Effect of a Car Door Reinforcements on Passive Safety in a Side Impact] *Proceedings NGTU R.E. Alekseev*, 2021, no. 1. pp. 81–88.
13. Biel A., Carlberger T. Influence of temperature on cohesive parameters for adhesives. *The 28th Ris international symposium on materials science*, 2007. pp. 17–24.
14. Herzl C. The effects of bond thickness, rate and temperature on the deformation and fracture of structural adhesives under shear loading. *International Journal of Fracture*, 2004, no. 130. pp. 497–515.
15. May M., Hesebeck O., Marzi S., Böhme W., Lienhard J., Kilchert S., Brede M., Hiermaier S. Rate dependent behavior of crash-optimized adhesives – Experimental characterization, model development, and simulation. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, no. 133. pp. 112–137.
16. Hazimeh R., Challita G., Khalil K., Othman R. Finite element analysis of adhesively bonded composite joints subjected to impact loadings. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2015, vol. 56. pp. 24–31.

17. Silva N.D.D., Machado J.J.M., Marques E.A.S., Moreira P.M.G.P., da Silva L.F.M. Experimental and numerical study of the dynamic response of an adhesively bonded automotive structure. *J Automobile Engineering*, 2020, vol. 234, iss. 14. pp. 1–13. DOI: 10.1177/0954407020931699

18. Ji G., Ouyang Zh., Li G., Ibeke S., Pang Su-Seng. Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints. *International Journal of Solids and Structures*, 2010, Vol. 47. pp. 2445–2458.

19. Avendaño R., Carbas R.J.C., Marques E.A.S., da Silva L.F.M., Fernandes A.A. Effect of temperature and strain rate on single lap joints with dissimilar lightweight adherends bonded with an acrylic adhesive. *Composite Structures*, 2016, vol. 152. pp. 34–44.

20. Liu Yi, Zuzov V. [Study of the Effect of Adhesive Bonding in the Door on the Automobile Passive Safety in Side Impact] *Digest of articles of the XV International Scientific-Practical Conference*, 2021. pp. 38–45 (in Russ).

Received 10 June 2022

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Лю, И. Сравнительное исследование напряженно-деформационных состояний склеенных и сварных конструкций автомобиля при ударных нагрузках / И Лю, Р.Б. Гончаров, В.Н. Зузов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2022. – Т. 22, № 3. – С. 64–77. DOI: 10.14529/engin220306

#### FOR CITATION

Liu Yi, Goncharov R.B., Zuzov V.N. Study of stress-strain states of bonded and welded vehicle structures under impact loads. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 64–77. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin220306

---