

УДК 629.113.001-585

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_3_84

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ В АВТОМОБИЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МОДЕЛИ ЕГО СВОЙСТВ

Лю И

ORCID: 0000-0002-2615-6826 e-mail: liuyi941003@gmail.com

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

ORCID: 0000-0003-1512-9299 e-mail: valeryzuz@yandex.ru

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

Разработан метод усовершенствования конечно-элементных моделей клеевого соединения в автомобильных конструкциях при квазистатической нагрузке за счет целенаправленной коррекции свойств модели клеевого материала с использованием программного комплекса LS-DYNA. Моделирование осуществлялось для наиболее тяжелого квазистатического нагружения для клеевых соединений «встык» и «внахлест». Описаны механические характеристики клеевого материала DOW1482, полученные из эксперимента при использовании гидропресса со скоростью раздвижки 0,125 мм/мин. Применение разработанного метода позволило существенно снизить погрешность моделирования по сравнению с результатами экспериментов, а также использовать рациональные конечно-элементные модели относительно небольшой размерности, что важно на этапе проектирования автомобиля, когда требуются многовариантные расчеты с целью получения конструкции с оптимальными параметрами.

Ключевые слова: метод конечных элементов, модель клеевого соединения, LS-DYNA, напряжено-деформированное состояние.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лю, И. Численное моделирование клеевого соединения в автомобильных конструкциях при квазистатическом нагружении с использованием усовершенствованной модели его свойств / Лю И, В.Н. Зузов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2022. № 3. С. 84-97. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_3_84

NUMERICAL SIMULATION OF ADHESIVE JOINT IN AUTOMOBILE DESIGNS UNDER QUASISTATIC LOADING USING AN IMPROVED MODEL OF ITS PROPERTIES

Liu Yi

ORCID: 0000-0002-2615-6826 e-mail: liuyi941003@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia**V.N. Zuzov**

ORCID: 0000-0003-1512-9299 e-mail: valeryzuz@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

Abstract. Method for improvement of finite element models of adhesive joint in automotive designs under quasi-static load due to object-oriented correction of the adhesive material model properties has been developed using the LS-DYNA software system. Simulation was carried out for the heaviest quasi-static loading for butt and lap adhesive joints. Mechanical characteristics of DOW1482 adhesive material obtained from experiment using a hydraulic

press with opening speed of 0.125 mm/min, are described. Application of the developed method made it possible to significantly reduce the modeling error in comparison with the experimental results, as well as to use rational finite element models of relatively small dimension which is important at the vehicle design stage when multivariate calculations are required in order to obtain a design with optimal parameters.

Key words: finite element method, adhesive joint model, LS-DYNA, stress-strain state.

FOR CITATION: Liu Yi., V.N. Zuzov. Numerical simulation of adhesive joint in automobile designs under quasi-static loading using an improved model of its properties. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 3. Pp. 84-97. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_3_84

Введение

Для снижения массы автомобилей при изготовлении деталей кузова внедряется все больше новых материалов, однако проблематичной является сама технология соединения изготавливаемых из них деталей. Применение клеевого соединения широко распространено, поскольку склеенная структура обладает высокой прочностью, она устойчива к трещинам, снижает вибрации, а также улучшает теплоизоляцию и звукоизоляцию. Использование клеевых соединений вместо клепаных может снизить вес на 25 %, повысить прочность на 30 % и снизить стоимость примерно на 10 %. Клеевой шов представляет собой зональное соединение, которое позволяет избегать концентрации напряжений в конструкции, и ее усталостные характеристики могут быть существенно увеличены (в некоторых случаях – более чем в 10 раз [1]), а также повышена коррозионная стойкость [1]. Толщина клеевого слоя зависит от многих факторов: (технологии соединения, формы деталей) и обычно находится в диапазоне 0,25-3 мм [1].

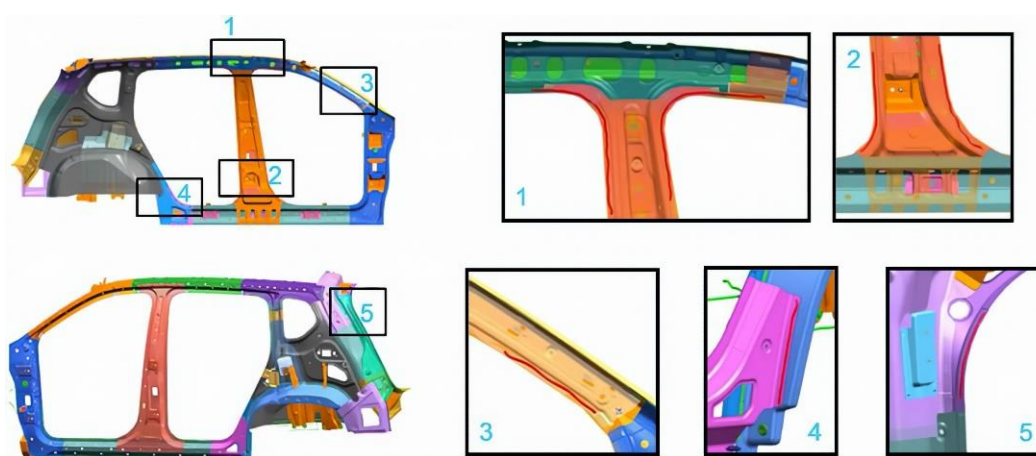


Рис. 1. Распределение конструкционного клея на боковой панели автомобиля

Fig. 1. Spread of structural adhesive on a vehicle side panel

Существует несколько моделей клеевого соединения, позволяющих получить аналитическое решение для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) [2-8].

В некоторых работах [6,7] для моделирования клеевого слоя используются балочные конечные элементы (КЭ), но они не позволяют смоделировать разрушение клеевого слоя. Используются также модели клеевых соединений на базе оболочечных КЭ [5,6], но с их помощью невозможно точно выразить анизотропию клея, поэтому предпочтение отдается применению объемных КЭ. В работе [8] для моделирования средней плоскости основного материала использовались оболочечные КЭ, а для представления связующего клеевого слоя – объемные КЭ (рис. 2). Для представления реакции упругопластического процесса клеевого материала применялся материал *Gurson*, однако он не моделирует повреждения материала.

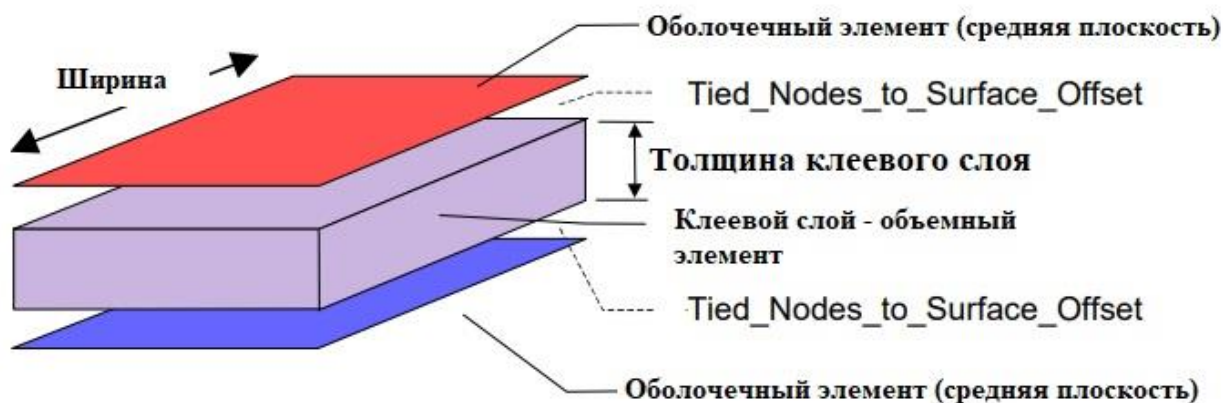


Рис. 2. Схема моделирования клеевого соединения с применением материала Gurson

Fig. 2. Simulation scheme of adhesive joint using Gurson material

В работах [6,7] кривые свойств клеевого материала были ближе к реальным значениям путем поправки модуля Юнга клея с учетом влияния толщины модели клеевого слоя.

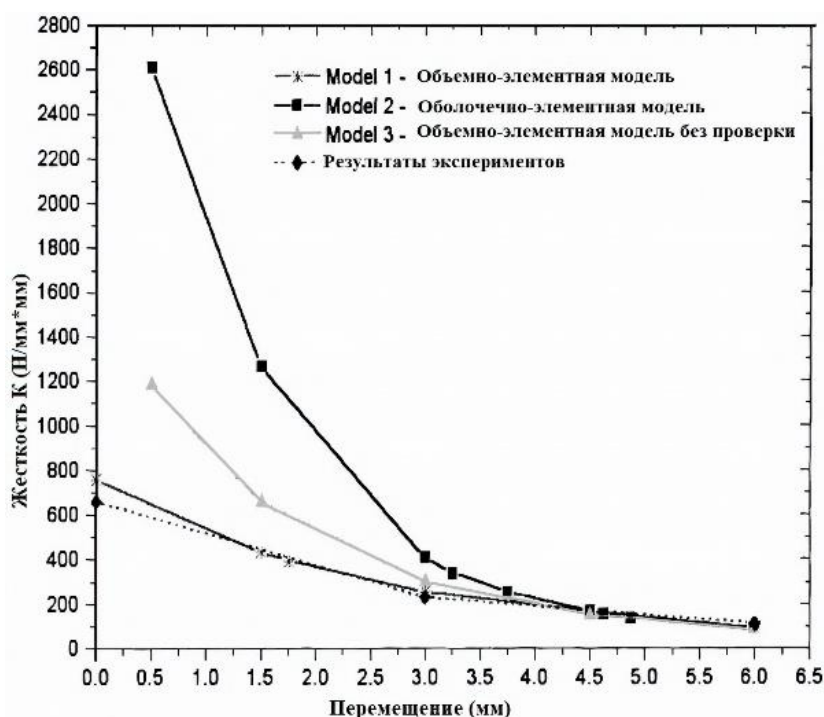


Рис. 3. Кривые «жесткость-перемещение» после коррекции модуля Юнга

Fig. 3. «Stiffness-displacement» curves after Young's modulus correction

В исследованиях [9,10] было установлено, что толщина листа и толщина клеевого слоя оказывают значительное влияние на механические свойства клеевого слоя. Чем больше толщина клеевого слоя и больше ширина листа, тем меньше напряжение сдвига в клеевом слое и тем меньше напряжение на краю зоны перекрытия при одинаковых условиях растяжения. Поэтому требуется более полное изучение влияния толщины клеевого слоя на свойства клеевого соединения.

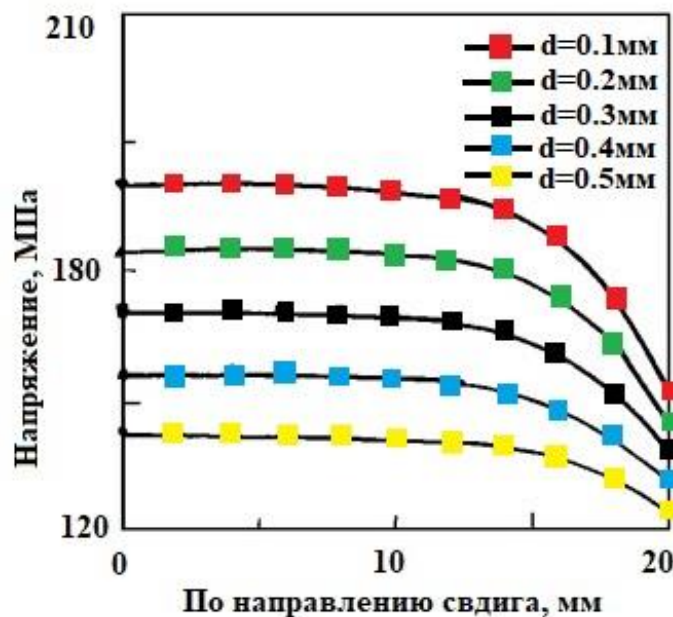


Рис. 4. Распределения напряжения по направлению сдвига с различными толщинами клея

Fig. 4. Stress distributions in the shear direction with different adhesive thicknesses

Цель и задачи работы

Целью работы является разработка модели клеевого соединения, которую можно применить в кузовах автомобилей. Модель разработана на базе метода конечных элементов; использована также оценка полученных результатов моделирования с позиций погрешности и эффективности с помощью программного комплекса LS-DYNA.

Задачи:

- разработка конечно-элементной модели (КЭМ) клеевого соединения и ее оценка с позиций погрешности расчета при различных квазистатических нагрузках;
- разработка метода моделирования клеевого соединения применительно к моделированию конструкций автомобиля с целью оценки основных параметров (прочность, жесткость и др.);
- экспериментальное определение механических характеристик и математического конститутивного уравнения клеевого соединения с учетом разрушения клеевого слоя;
- верификация КЭМ путем сравнения результатов численных и экспериментальных исследований.

Конститутивное уравнение восьмиузлового объемного конечного элемента клеевого материала

Для описания элементов клеевого соединения рассматриваем КЭ клеевого материала в виде объемного с восемью узлами. Распределение внутренних усилий в КЭ показано на рис. 5.

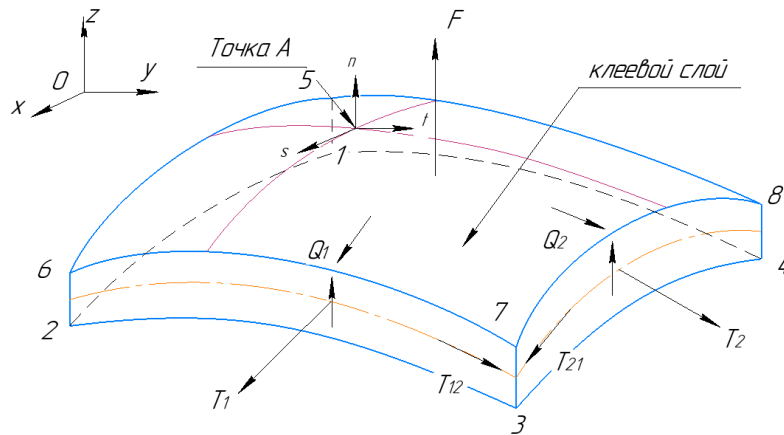


Рис. 5. Распределение внутренних усилий в КЭ клеевого материала

Fig. 5. Distribution of internal forces in the FE of adhesive material

Взаимосвязь между элементным относительным смещением и силой сцепления элементов клеевых материала показана ниже [11].

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta n}{t_n}, \varepsilon_s = \frac{\Delta s}{t_s}, \varepsilon_t = \frac{\Delta t}{t_t} \quad (1)$$

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{Bmatrix} = \mathbf{K} \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (2)$$

где K – матрица жесткости. В трехмерной задаче номинальное напряжение t связного элемента состоит из трех компонентов t_n , t_s и t_t , которые представляют собой нормальный (t направления) и тангенциальный (n и s направления) компоненты соответственно.

Общим критерием разрушения является критерий квадратичного напряжения, который составляет:

$$\left(\frac{\sigma_{rr}}{\sigma_{rr}^F}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau^F}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

Под действием внешней силы вектор смещения в направлении i в глобальной системе координат равен $\vec{\Delta}_i$, тогда можно получить:

$$\vec{\Delta}_i = \vec{u}_i^+ - \vec{u}_i^- = N_k \vec{u}_{ki}^+ - N_k \vec{u}_{ki}^- = N_k \vec{u}_{ki}, \quad (4)$$

где \vec{u}_{ki} – смещение точки k в направлении i ; N_k – стандартная функция Лагранжа.

Для любой точки также можно использовать локальную систему координат. Определим касательную плоскость с помощью \vec{v}_ξ и \vec{v}_η .

Можно определить тензор изменения из локальной системы координат в глобальную систему координат (от направления s локальной системы координат к направлению i глобальной системы координат) как θ_{si} .

Тогда относительное смещение в локальной системе координат равно

$$\delta_s = \theta_{si} \Delta_i = \theta_{si} N_k u_{ki} = B_{sik} u_{ki} \quad (5)$$

Также можно определить оператор D_{sr} , чтобы связать натяжение τ_s и деформацию Δ_i , где $\tau_s = D_{sr} \Delta_i$.

По принципу виртуальной работы для клеевого слоя можно записать следующее уравнение:

$$\int_S d \delta_s \tau_s dS - f_{ki} du_{ki} = 0 \quad (6)$$

Подставляя уравнение (4) и (5) в уравнение (6), получаем

$$\int_S B_{sik} D_{sr} N_k dS u_{ki} = f_{ki} \quad (7)$$

Поскольку $K_{ikvz} * u_{ki} = f_{ki}$, где K_{ikvz} - жесткость клеевого материала, то можно получить жесткость клеевого материала

$$K_{ikvz} = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} B_{sik} D_{sr} N_k \left| \vec{v}_\xi \times \vec{v}_\eta \right| d\xi d\eta \quad (8)$$

Экспериментальные определения механических характеристик клеевого материала

Силовые элементы кузова легкового автомобиля испытывают сложное напряженно-деформированное состояние [1]. Поэтому модель клеевого соединения должна позволять рассчитывать НДС при реальных нагрузках. Однако для такого соединения одними из наиболее опасных является работа на разрыв и сдвиг [6]. Поэтому для разработки модели использовались результаты испытаний на разрыв и сдвиг клеевого материала с целью определения и исследования механических свойств материалов при квазистатических нагрузках. Испытание на разрыв и сдвиг проводилось в соответствии со стандартами ASTM. Марка клеевого материала – DOW1482, марка стали – DP600.

Для промышленного измерения свойств клеевых материалов обычно придерживаются международного стандарта ISO 11003-2-2019 [10], но этот метод не применим для измерения свойств клеевого соединения в автомобильном корпусе поскольку не позволяет учесть анизотропию клеевого материала. Испытательная схема ISO 11003-2-2019 показана на рис. 6.

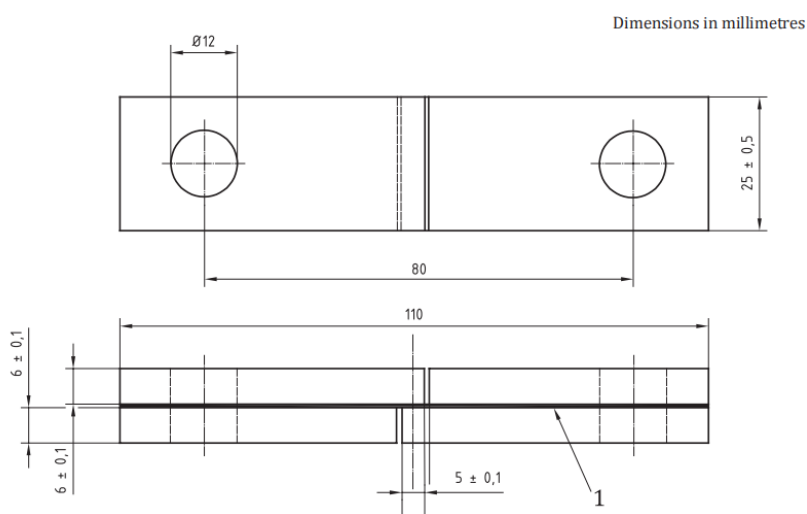


Рис. 6. Образец для измерения свойства клея по стандарту ISO 11003-2-2019

Fig. 6. Sample for measuring of adhesive properties as per ISO 11003-2-2019

Толщина клеевого соединения в автомобилестроении не является регламентированной, поэтому необходимо проводить измерение ее реального значения. Квазистатические испытания проводились на гидравлической машине с сервоприводом, используемой для испытания материалов, смещение образца измерялось экстензометром, а скорость нагружения при испытаниях составляла 0,125 мм/с.

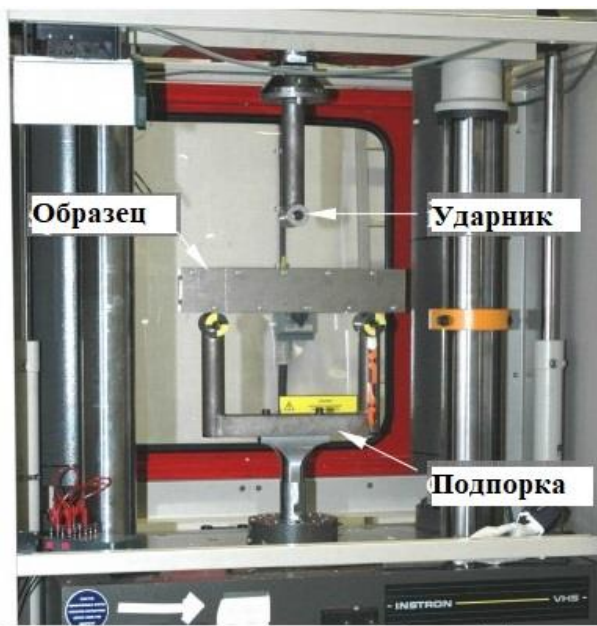


Рис. 7. Экспериментальная установка для измерений

Fig. 7. Pilot installation for measurements

С помощью указанных выше экспериментальных устройств были получены НДС клеевого материала (рис. 8).

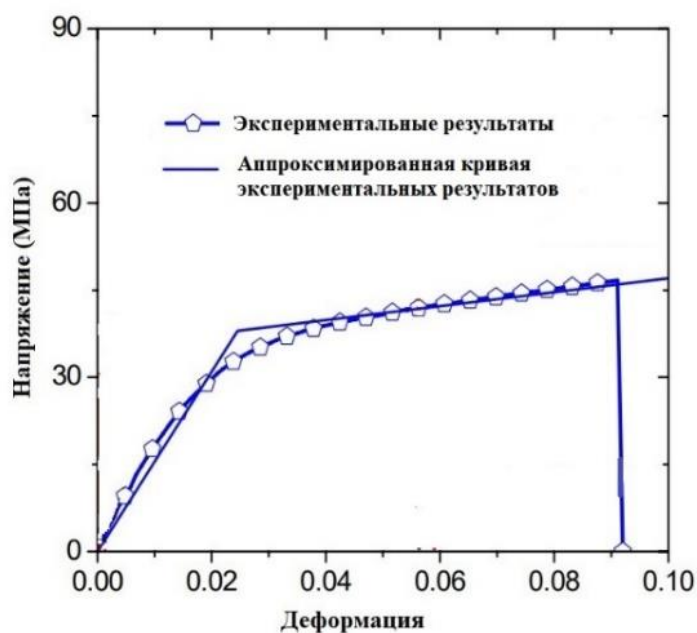


Рис. 8. Графики зависимости напряжения-деформации клея DOW1482 при растяжении

Fig. 8. Stress-strain dependence graphs for DOW1482 adhesive under tension

Из рис. 8 видно, что у аппроксимированной кривой результатов эксперимента есть две точки излома, и процесс деформации состоит из трех стадий: стадии упругой деформации, стадии пластической деформации и стадии разрушения.

Полученные механические характеристики клея показаны в табл. 1.

Таблица 1.

Механические характеристики клея при квазистатической нагрузке

Table 1.

Mechanical characteristics of the adhesive under quasistatic load

Модуль Юнга, ГПа	Предел текучести, МПа	Коэффициент Пуассона	Модуль упрочнения, ГПа
1,55	38	0,43	0,12

Из уравнения (3) следует, что характеристики разрушения клеевого соединения в основном определяются двумя значениями – максимальным нормальным напряжением σ_{rr}^F и максимальным напряжением сдвига τ^F . Экспериментально установлено, что при квазистатическом нагружении $\sigma_{rr}^F = 163$ МПа и $\tau^F = 38$ МПа для материала DOW1482 [11]; это означает, что для клеевых соединений разрушение более вероятно при растяжении, чем при сдвиге.

Для более полного определения параметров разрушения и других характеристик клеевого соединения проведено сравнение результатов четырех одинаковых испытаний на разрыв и сдвиг. Размеры испытательного образца показаны на рис. 9.

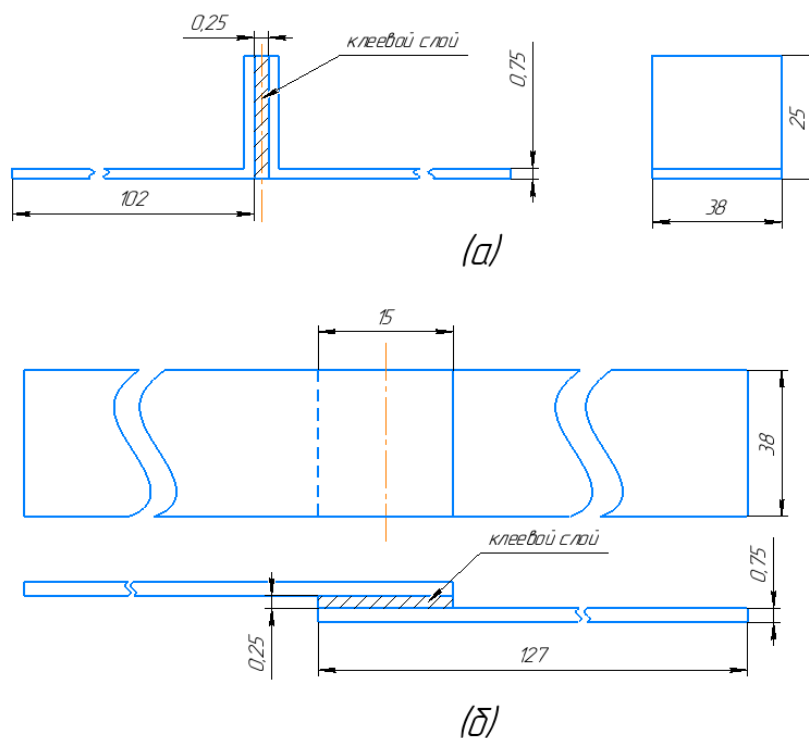


Рис. 9. Размер образца клеевого соединения «встык» (а) и «внахлест» (б)

Fig. 9. Adhesive joint sample size: «butt» (a) and «lap» (b)

Подобно испытанию материала на разрыв и сдвиг, испытание по определению характеристик клеевого соединения «встык» и «внахлест» при квазистатическом нагружении проводилось на гидравлической машине с сервоприводом. Результаты четырех экспериментов по направлениям «встык» и «внахлест» показаны на рис. 10.

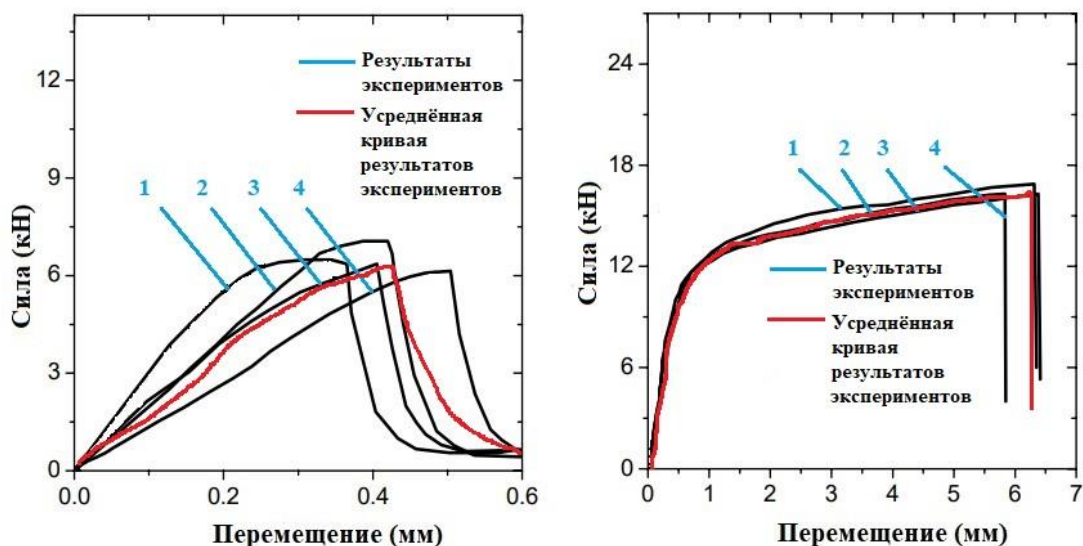


Рис. 10. Графики изменений сила-перемещение при квазистатических испытаниях для соединений «встык» (а) и «внахлест» (б)

Fig. 10. Graphs of force-displacement changes during quasistatic tests for «butt» joints (a) and «lap» joints (b)

Моделирование клеевого соединения в программном комплексе LS-DYNA

Как правило, для моделирования кузова легкового автомобиля используются оболочечные конечные элементы. Они обеспечивают получение необходимой точности результатов при приемлемом времени решения задач [6]. При этом их плоскость располагается в срединной поверхности основного материала. Слой клея моделируется объемными КЭ, а соединение между ними и элементами кузова реализуется посредством клеевого контакта (CONTACT_TIE) в программном комплексе LS-DYNA.

Для испытательного образца (рис. 9(б)) построена КЭМ для расчетов в программном комплексе LS-DYNA (рис. 11). Расчет проводился при скорости растяжения 0,125 мм/с в течение 50 с. Поскольку минимальный шаг по времени тесно связан с размером сетки КЭМ и скоростью звука внутри материала, расчет кузова будет весьма длительным. С целью экономии времени скорость растяжения увеличена до 1,25 мм/с, при этом общее время расчета составляет всего 5 с.

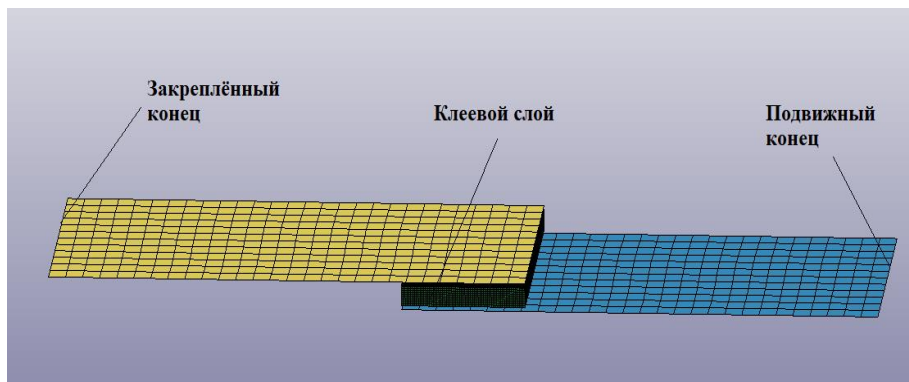


Рис. 11. КЭМ клеевого соединения «внахлест»

Fig. 11. FEM of «lap» adhesive joint

Расчетная характеристика изменений силы показана на рис. 12.

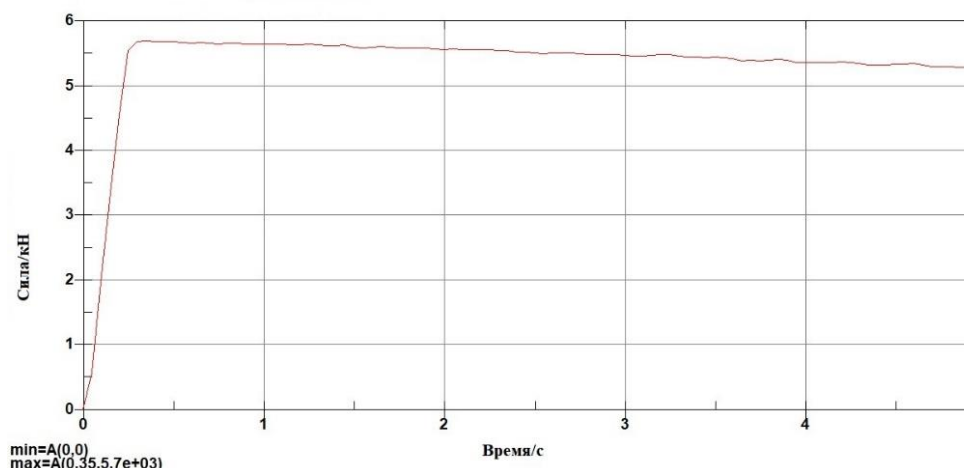


Рис. 12. Изменения силы в клеевом слое

Fig. 12. Changes of force in adhesive layer

Сравнение расчетных значений с экспериментальными данными (рис. 10(б)) показывает, что существует большая погрешность вычисленных значений максимальной силы растяжения: в результате моделирования максимальное усилие на растяжение составляет 5,7 кН, а в результате эксперимента усилие разрушения составляет около 13 кН. Большая погрешность связана, прежде всего, с неправильным представлением толщины клеевого слоя из-за приведения КЭ оболочечного типа к срединной поверхности в реальной конструкции при генерации сетки КЭ. Это указывает на то, что параметры модели материала нуждаются в корректировке.

Корректировка параметров модели клеевого материала

Как отмечалось, вышеуказанная модель использует оболочечные КЭ для представления срединной плоскости основного материала, а клеевой слой моделируется объемными КЭ, полностью заполняя зазор между двумя пластинами. Таким образом, как показано на рис. 13, при моделировании толщина слоя клея составляет 1 мм, а фактическая толщина слоя клея – всего 0,25 мм. Это одна из причин возникновения погрешности моделирования.



Рис. 13. Схема изменения толщины клеевого соединения в КЭМ

Fig. 13. Scheme of adhesive joint thickness change in FEM

Существует два метода решения этой проблемы. Один из них – метод коррекции геометрии, при котором объемные элементы получают реальную толщину клеевого слоя в модели, а между объемными и оболочечными элементами моделируемого основного материала оставляется необходимое расстояние. Castagnetti [12] использовал этот метод для моделирования клеевых соединений и получил более точные результаты моделирования. Метод коррекции на основе только геометрии трудно применить в модели клеевых соединений в автомобиле, поскольку этих соединений много, и толщина клеевого слоя имеет разброс в диапазоне 0,25-3 мм, а сетка КЭ генерируется автоматически. При этом также необходимо учитывать, что использование реальной толщины клеевого слоя оказывает большое влияние на точность моделирования. Другой метод основан на коррекции параметров материала, его применил Beevers [7]. Он скорректировал начальную жесткость клеевого соединения путем увеличения модуля Юнга в модели материала клея. Однако изменение модуля Юнга в модели материала будет влиять только на фазу упругой деформации материала. Для модели материала, которую используем мы, также необходимо модифицировать процесс пластической и смешанной деформации. Кроме того, надо учитывать, что важным критерием является также способность модифицированной модели эффективно работать при различных нагрузках.

Механическое поведение склеенного материала характеризуется тремя параметрами, а именно E , σ_0 и E_t . На рис. 14 представлена схема нагружения при однонаправленной растягивающей нагрузке, где элементы a и b представляют собой элементы с увеличенной и с фактической толщинами соответственно.

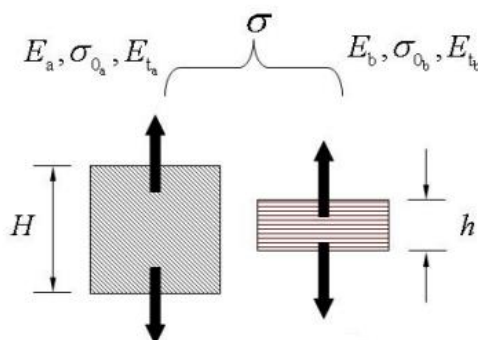


Рис. 14. Схема нагружения элементов с увеличенной и фактической толщинами

Fig. 14. Scheme of loading of elements with increased and actual thicknesses

Деформация по направлению толщины представлена в уравнении (9).

$$\begin{cases} \delta_e = \frac{\sigma}{E} t & (\sigma < \sigma_0) \\ \overline{\delta_e} = \frac{\sigma}{E} t = \frac{\sigma_0}{E} t & (\sigma = \sigma_0) \\ \delta_p = (\sigma - \sigma_0) \left(\frac{1}{E_t} - \frac{1}{E} \right) t & (\sigma > \sigma_0), \end{cases} \quad (9)$$

где δ_e , $\overline{\delta_e}$ и δ_p – упругая деформация, деформация по текущему моменту и пластическая деформация материала соответственно; σ – напряжение элемента клеевого материала; t – толщина элемента.

Для того, чтобы деформации элемента a по направлению толщины и элемента b были одинаковыми при одном и том же напряженном состоянии, необходимо скорректировать параметры материала. Все три вышеуказанные величины необходимо откалибровать. Для того, чтобы деформация толщины клеевого слоя соответствовала фактической, необходимо:

$$\begin{cases} \delta_{ea} = \delta_{eb} & (\sigma < \sigma_0) \\ \delta_{ea} = \delta_{eb} & (\sigma = \sigma_0) \\ \delta_{pa} = \delta_{pb} & (\sigma > \sigma_0) \end{cases} \quad (10)$$

С учетом уравнений (9) и (10):

$$\begin{cases} E_a = E_a * \frac{H}{h} \\ \sigma_{0a} = \sigma_{0b} \\ E_{ta} = E_{tb} * \frac{H}{h} \end{cases} \quad (11)$$

Уравнение деформации в направлении сдвига аналогично уравнению (11), т.е.

$$\begin{cases} G_a = G_a * \frac{H}{h} \\ \gamma_{0a} = \gamma_{0b} \\ G_{ta} = G_{tb} * \frac{H}{h} \end{cases} \quad (12)$$

Можно видеть, что модуль Юнга увеличивается пропорционально толщине, но предел текучести не изменяется независимо от направления (независимо от заданной толщины материала). Тем самым соответствующие параметры модифицируются. Результаты моделирования показаны на рис. 15.

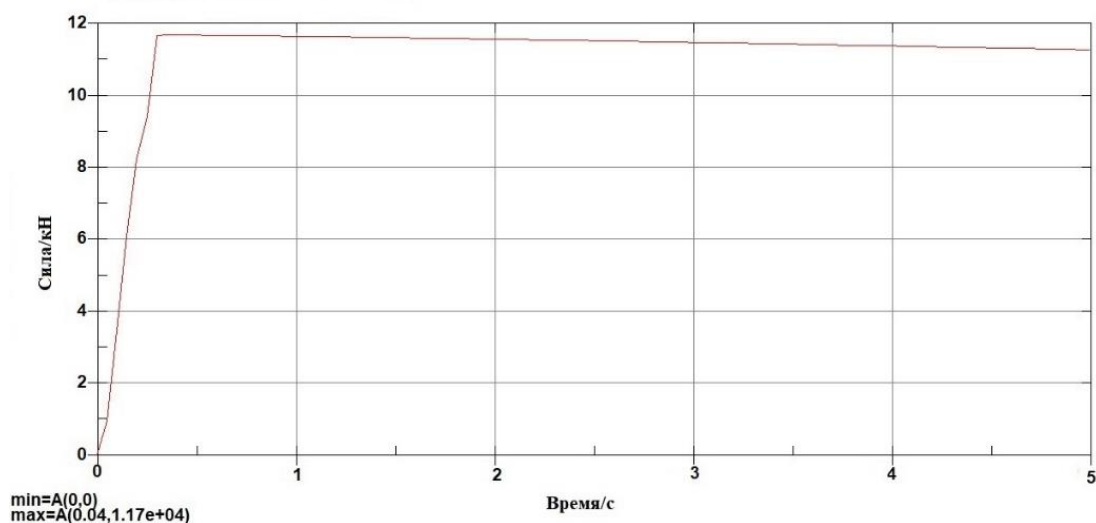


Рис. 15. Изменения напряжений в клеевом слое после коррекции свойств

Fig. 15. Changes of stresses in adhesive layer after correction of properties

Сравнивая рис. 15. и рис. 11(б), можно сделать вывод, что вычислительные ошибки обоих вариантов составляют 54 и 12 % соответственно. Из приведенных выше результатов моделирования можно предположить, что коррекция параметров модели, вероятно, будет также эффективна и при соединении «встык».

Расчет модели «встык» при квазистатическом нагружении

Для расчета составлена КЭМ (рис. 16), аналогичная применяемым ранее (рис. 9(а) и 10(а)).

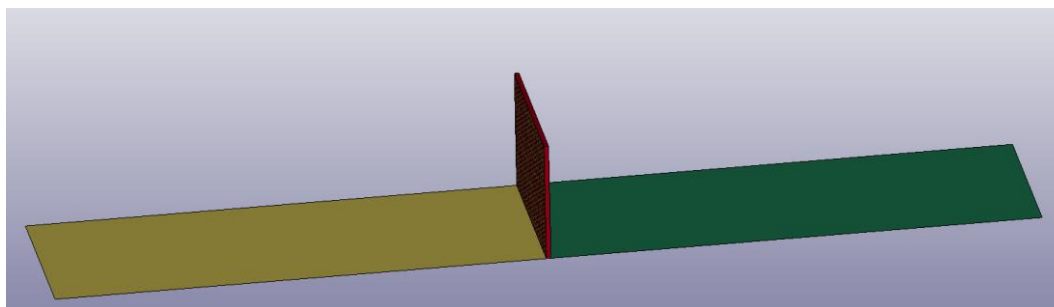


Рис. 16. Модель клеевого соединения «встык»

Fig. 16. «Butt» adhesive joint model

Расчет проводился с параметрами материала без корректировки и с корректировкой соответственно, расчетные значения растягивающей силы представлены на рис. 17.

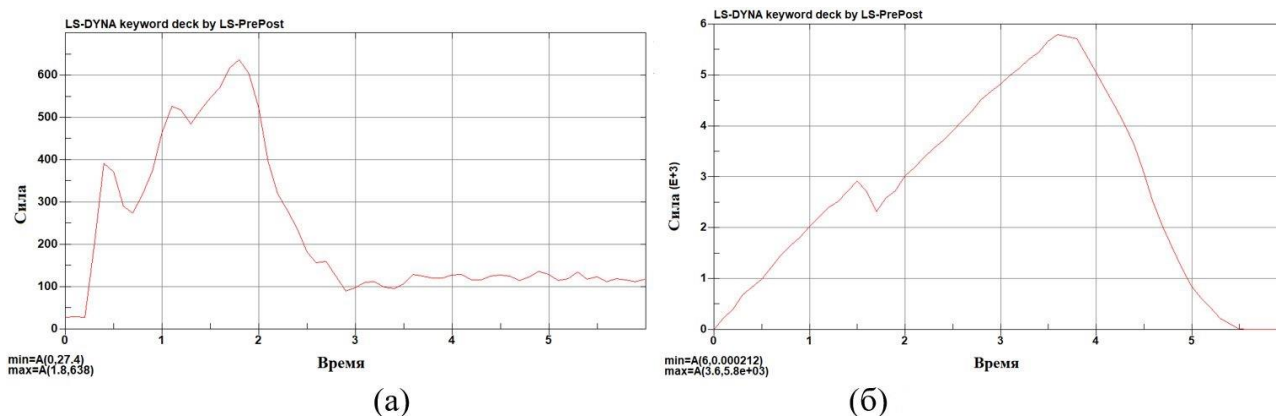


Рис. 17. Графики изменений силы в соединении конструкции «встык» без корректировки параметров материала (а) и с корректировкой их (б)

Fig. 17. Graphs of force changes in the structure «butt» joint without correction of the material parameters (a) and with their correction (b)

По сравнению с рис. 10 (а) видно, что погрешность расчета моделирования параметров с корректировкой составляет 12 %. Это значительное усовершенствованием по сравнению с точностью расчета без корректировки, которая составляла 84 %.

Заключение

1. Предложен метод коррекции модуля Юнга и модуля затвердевания материала применительно к расчету клеевых соединений «встык» и «внахлест» в автомобильных конструкциях, повышающий точность моделирования при многовариантных расчетах с помощью программного комплекса *LS-DYNA*;
2. При моделировании с коррекцией свойств клеевого материала для соединения «внахлест» погрешность расчета уменьшается с 54 до 12 %, для соединения «встык» – с 84 до 12 %.

Необходимо учитывать также влияние изменений характеристик материала в зависимости от толщины клеевого соединения при его моделировании применительно к конструкциям автомобилей при квазистатическом нагружении.

Библиографический список

1. **Зузов, В.Н.** Совершенствование конструкции корпуса кузова легкового автомобиля на стадии проектирования для обеспечения требований пассивной безопасности при кософронтальном ударе / В.Н. Зузов, И.В. Зузов // *Машиностроение*. 2013. № 1. С. 60-71.
2. **Xia Y** Johnson NL, Gayden XQ and Fickes JD. Development of high efficiency modeling technique for weld-bonded steel joints in vehicle structures, Part I: Static experiments and simulations. *Int J Adhesion Adhesives*, 2009. № 29. P. 414-426.
3. **Xia Y** Gayden XQ and Fickes JD. Development of high efficiency modeling technique for weld-bonded steel joints in vehicle structures, Part II: Dynamic experiments and simulations. *Int J Adhesion Adhesives*, 2009. № 29. P. 427-433.
4. **Carpenter W C** Two finite elements for modelling the adhesive in bonded configurations. *J Adhesion*, 1989. № 30. P. 25-46.
5. **Su C.** An elastic-plastic interface constitutive model: application to adhesive joints. *Int J Plast*, 2004. № 20. P. 2063-2081.
6. **Thomas C.** Adhesive Joining for Crashworthiness CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2008.
7. **Beevers A.** Analysis of stiffness of adhesive joints in car bodies. *J Mater Process Tech*, 2001. № 118. P. 96-101.
8. **Alexander.** Crash stable adhesives in application and simulation. LS-DYNA user conference, 2006.
9. **Shi Y.** Effect of Elastic Modulus and Thickness of Adhesives on the Stress Distribution in Weld-bonded Joints *Materials Engineering*, 1998. № 5. P. 19-13.
10. **Chang B.** Study on the Effect of Weld Spot Size on the Stress Distribution in Weld-bonded Joints. *Scientific achievements*, 1999. № 1. P.22-24.
11. **Xin Y.** Study of Modeling Techniques of Weld-Bonded Joints under Impact Loading. Tsinghua University for the degree of Doctor of Engineering, 2010.
12. **Castagnetti D.** Standard finite element techniques for efficient stress analysis of adhesive joints. *Int J Adhesion Adhesives*, 2009. № 29. P. 125-135.
13. **Wang R X.** Strength of adhesive joints with adherend yielding: II. Peel experiments and failure. *J Adhesion*, 2003. № 79. P. 49-66.
14. **Wang J.** Simulation Technology of Deformation of Rubber Welding Body Structure under Large Impact Load [MA]. *Automotive Engineering*, Tsinghua University, 2006.
15. **Guo Z.** Adhesive bonding applications for aluminum alloy structures Defense Industry Press, 1993.

*Дата поступления
в редакцию: 13.05.2022*