

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ТОЧНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ В АВТОМОБИЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Лю И, д.т.н. Зузов В.Н.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

liuyi941003@gmail.com

В данной статье изучено влияние размеров конечных элементов на точность моделирования клеевого соединения в автомобильных конструкциях с использованием программного комплекса LS-Dyna. Моделирование осуществлялось при квазистатическом нагружении для клеевого соединения «внахлест». Оценивались свойства и разрушение клеевого материала по направлению сдвига. Характеристики клеевого слоя получены из экспериментов при использовании гидропресса и других устройств по международным стандартам ASTM 638-03 и DIN 54451-11. 1978 с разными скоростями раздвижки и толщинами клеевого слоя. Из экспериментов выявлено, что свойства клеевого материала сильно зависят от скорости деформации и толщины клеевого слоя, поэтому это необходимо было учитывать при моделировании. Для решения поставленной задачи было решено и оценено 12 вариантов конечно-элементных моделей, в том числе путем сравнения с результатами экспериментов для клеевого соединения «внахлест». В результате анализа напряженно-деформированных состояний моделей клеевого соединения при квазистатическом нагружении в программном комплексе LS-Dyna получены рекомендуемый размер и число слоев конечных элементов для моделирования клеевого соединения в автомобильных конструкциях. Рациональный размер граней объемного конечного элемента принят равным 2×2 мм² с учетом погрешностей моделирования и затрат машинного времени для расчета применительно к многовариантным расчетам конструкций на стадии проектирования. Определено также рекомендуемое число слоев конечных элементов в конечно-элементной модели по толщине клеевого слоя, которые следует выбрать для высокоточного описания свойств склейки и обеспечения эффективности вычислений. При этом выявлено, что увеличение числа слоев конечных элементов незначительно повышает точность моделирования и существенно увеличивает требуемое машинное время для расчета.

Ключевые слова: LS-Dyna, конечно-элементная модель, напряженно-деформированное состояние, клеевое соединение, размер конечных элементов.

Для цитирования: Лю И, Зузов В.Н. Исследование влияния размеров конечных элементов на точность моделирования клеевого соединения в автомобильных конструкциях // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. № 3 (49). С. 31–41. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-49-3-31-41

Введение

Создание конструкций автомобилей с оптимальными параметрами в настоящее время является важной задачей, которую следует решать на этапе проектирования транспортного средства [1]. Необходимо при этом гарантировать прочность и жесткость конструкции автомобиля в условиях всех внешних воздействий (включая удары), поглощение энергии и обеспечение жизненного пространства при авариях для людей.

Для решения подобных задач на этапе проектирования используется метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий получать результаты с высокой точностью и в конечном

итоге снижать стоимость и сроки проектирования. Однако чем подробнее сетка конечных элементов (КЭ), тем выше точность результатов, но и выше требуемое машинное время. Поэтому одним из важнейших вопросов является создание рациональных конечно-элементных моделей (КЭМ) с разумным количеством КЭ и их размерами, обеспечивающими получение требуемой точности решения при минимальных затратах машинного времени особенно для многовариантных решений [2].

Для облегчения конструкций все шире применяются разные материалы (сталь, алюминиевые сплавы, композиты), которые все чаще соединяются путем склеивания. При ис-

пользовании МКЭ для моделирования клеевых соединений на этапе проектирования имеется немало проблем, требующих решения.

КЭМ клеевых соединений могут быть созданы на базе балочных или оболочечных КЭ, но в балочных элементах трудно представить разрушение склеиваемого слоя, а также ни оболочечные, ни балочные элементы не позволяют в достаточной степени исследовать влияние анизотропии клеевого материала [3–5]. Поэтому для представления клеевого слоя при моделировании автомобиля используются объемные КЭ [6]. На рис. 1 зеленым цветом показано применяемое распределение клея в кузове автомобиля.

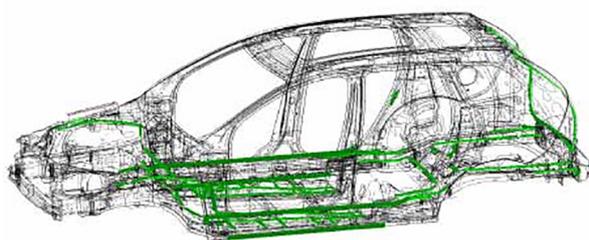


Рис. 1. Распределение конструкционного клея в кузове автомобиля

Fig. 1. Distribution of structural adhesive in the vehicle body

Цель и задачи статьи

Целью данной работы является исследование влияния размеров КЭ на точность расчетов при квазистатическом нагружении применительно к автомобильным конструкциям.

Задачи работы заключаются в следующем:

- в разработке КЭМ клеевого соединения и оценке модели с позиций погрешности расчета с разными размерами КЭ по сравнению с экспериментом;
- в определении влияния размеров КЭ клеевого соединения на точность моделирования и затрат машинного времени при квазистатической нагрузке;
- в определении рационального размера КЭ клеевого соединения и количества слоев КЭ

по толщине клея, которые целесообразно применять при моделировании конструкций кузовов автомобилей.

Определение свойств клеевого материала

Свойства клеевого материала DOW1482 определялись по стандарту ASTM 638-03.

В квазистатическом испытании для этого использовалась гидравлическая машина с сервоприводом, смещение образца измерялось экстензометром, при этом скорость нагружения составляла 0,125 мм/с. Образец для динамического эксперимента представляет собой стержень Гопкинсона. Устройство [9], на котором проводился эксперимент, показано на рис. 2.

Полученные из эксперимента механические характеристики клеевого материала при различных скоростях деформации [7] показаны в таблице 1.

Из анализа этих результатов видно, что свойства клеевого материала имеют значительную зависимость от скорости деформации. По мере увеличения скорости деформации кривая напряжения-деформации материала также возрастает.

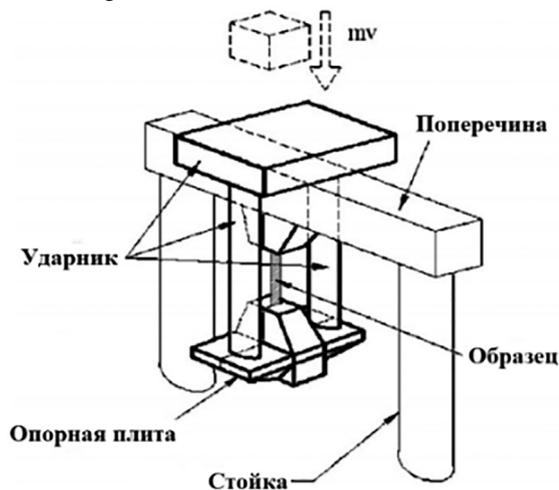


Рис. 2. Схема устройства для динамических экспериментов

Fig. 2. Diagram of a device for dynamic experiments

Таблица 1

Механические характеристики клеевого материала при различных скоростях деформации

Table 1. Mechanical characteristics of the adhesive material at various deformation rates

Скорость деформации, м/с	Модуль Юнга, ГПа	Предел текучести, МПа	Коэффициент Пуассона	Модуль затвердевания, ГПа
0,00125	1,55	38	0,43	0,12
0,667	2,41	47		
2	6,46	67		

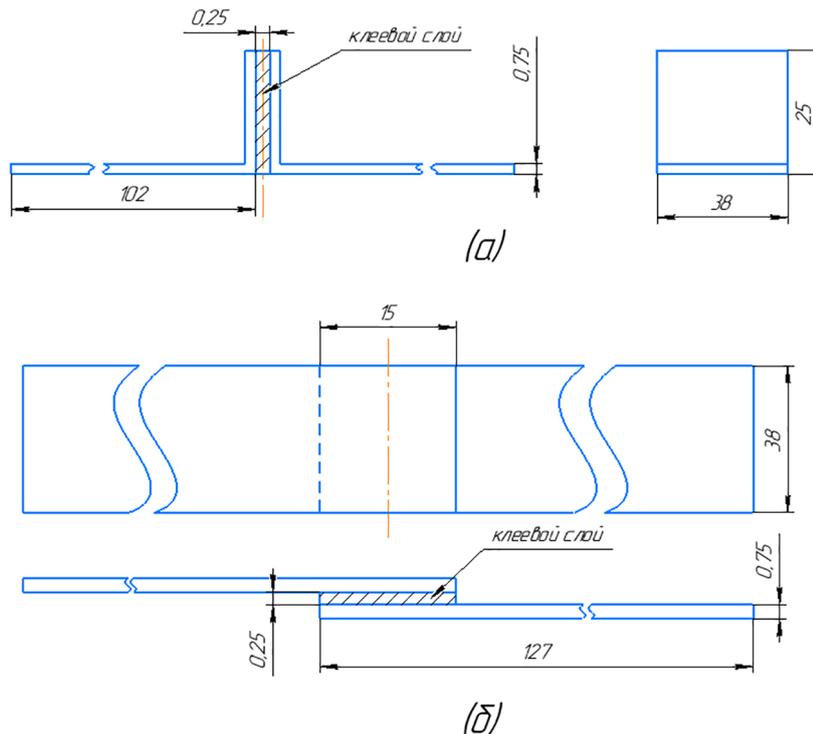


Рис. 3. Размер образца клеевого соединения

Fig. 3. Adhesive joint sample size

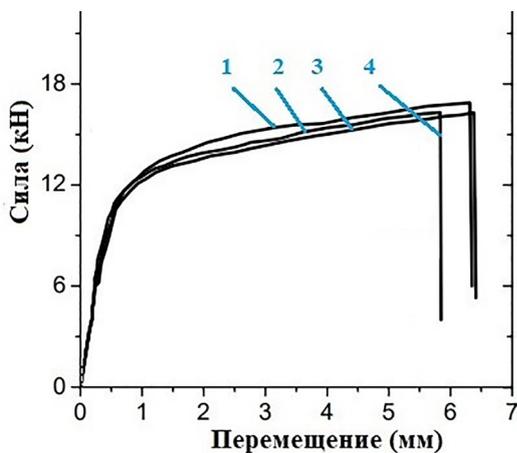


Рис. 4. Графики зависимости «сила–перемещение» для соединения «внахлест» при квазистатическом нагружении

Fig. 4. Force-displacement plots for an overlapped joint under quasi-static loading

Экспериментальное и расчетное исследование при квазистатической нагрузке

Толщины стальных листов, используемых в автомобиле, находится в диапазоне 0,7–3 мм, а клеевого слоя – в диапазоне 0,25–3 мм [10]. Поэтому размер образца для квазистатического испытания должен соответствовать этим особенностям.

Проведены эксперименты при сдвиге для исследования разрушения клеевого материала в соединении «внахлест». Размер образца клеевого соединения показан на рис. 3.

Для обеспечения достоверности эксперимента было проведено четыре испытания, результаты которых показаны на рис. 4 [7].

На основе этого экспериментального образца было разработано несколько КЭМ клеевого соединения с разными по степени дискретизации сетками КЭ: модель (а) с размерами стороны КЭ 0,5 мм, (б) – 1 мм, (в) – 2 мм, (г) – 5 мм. Построенные модели показаны на рис. 5. Скорость движущего конца равна 1 мм/с.

Напряженно-деформированное состояние (НДС) клеевого слоя было получено и оценено после расчета в программном комплексе LS-Dyna (рис. 6).

Поскольку скорость растягивания при моделировании постоянна и равна 1 мм/с, то величина абсциссы на рис. 6 идентична величине абсциссы на рис. 4. В таблице 2 представлены средние значения погрешностей расчетных значений по сравнению с экспериментальными, а также затраты машинного времени на расчет каждой модели.

По сравнению с экспериментальными результатами (рис. 6) видно, что при квазистати-

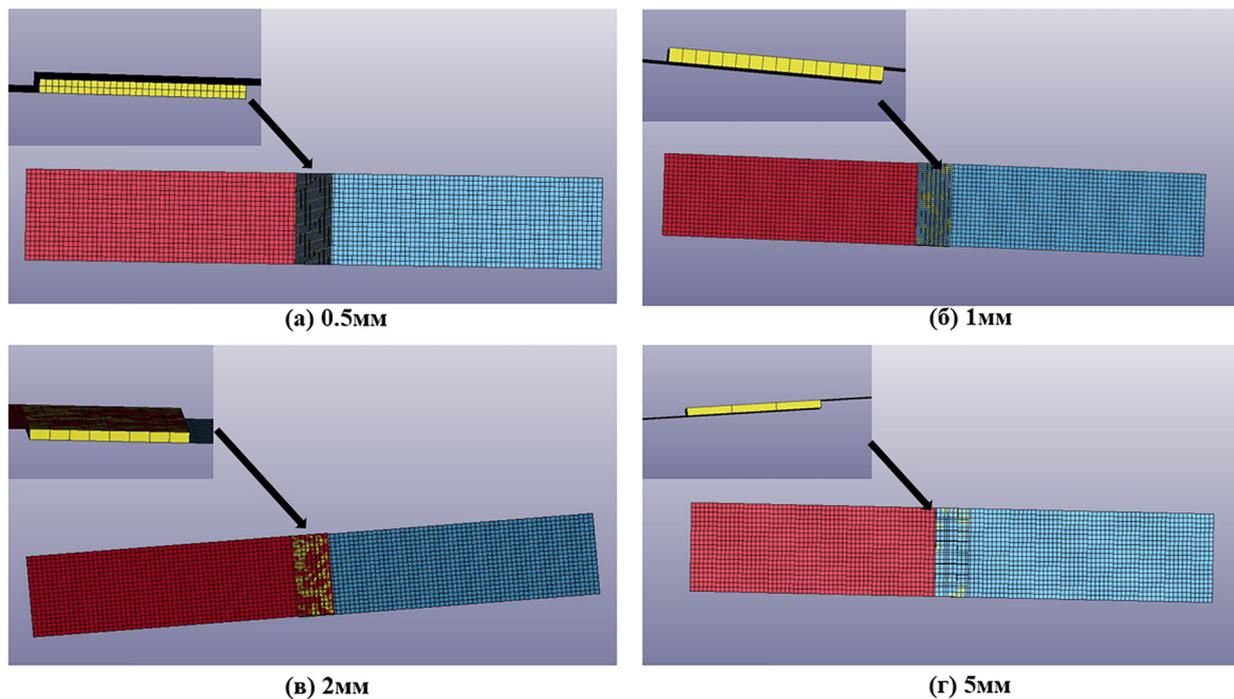


Рис. 5. Модели клеевого соединения с размерами стороны КЭ:
 (а) – 0,5 мм, (б) – 1 мм, (в) – 2 мм, (г) – 5 мм

Fig. 5. Models of the adhesive joint with the dimensions of the side of FE:
 (a) – 0,5 mm, (b) – 1 mm, (c) – 2 mm, (d) – 5 mm

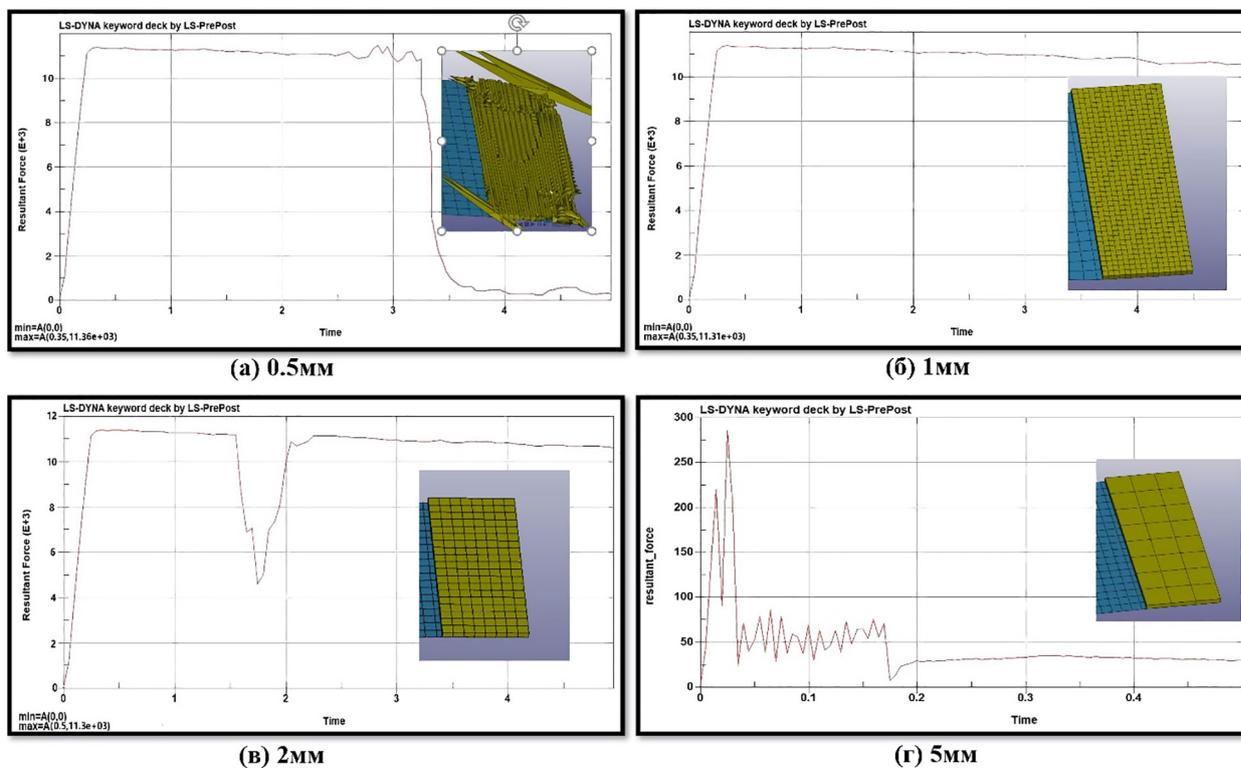


Рис. 6. Графики изменений силы сдвига по времени с размерами КЭ:
 (а) – 0,5 мм, (б) – 1 мм, (в) – 2 мм, (г) – 5 мм

Fig. 6. Graphs of shear force changes over time with dimensions of FE:
 (a) – 0,5 mm, (b) – 1 mm, (c) – 2 mm, (d) – 5 mm

Таблица 2

Средняя погрешность моделирования и машинное время

Table 2. Average simulation error and machine time

Размер КЭ, мм	Средняя погрешность, %	Время расчета, мин
0,5	11	195
1	11	38
2	18	25
5	95	12

ческой нагрузке поведение материала близко к экспериментальному, когда размер стороны КЭ, моделирующего клеевой слой, составляет 1 мм или меньше, но когда размер стороны КЭ клея составляет 2 мм, кривая «сила-время» имеет впадину в интервале времени от 1,5 с до 2 с, что вызвано погрешностями моделирования. При размере стороны КЭ клея 5 мм или больше величина погрешности расчета слишком велика. Следует также отметить, что при размере КЭ не более 0,5 мм (поскольку, как отмечалось, толщина клеевого слоя может быть 0,25–3,0 мм), то при применении КЭ близких к равносторонним (для повышения точности моделирования) необходимо использовать от одного слоя КЭ до трех в зависимости от толщины слоя соответственно.

Влияние толщины клеевого соединения на подбор числа слоев конечных элементов в модели

Толщина клеевого слоя оказывает значительное влияние на прочность клеевого соединения [6]. Для оценки точности моделирования прочности клеевого соединения при квазистатическом нагружении в МКЭ необходимо провести расчетное исследование соединений

с различной толщиной клеевого слоя. Нагрузка, приложенная к клеевому соединению, распределяется в соответствии со стандартом DIN 54451-11.1978 (рис. 7).

Эксперименты проводились для толщины слоя клея 0,5 мм, 1 мм и 2 мм, которые обычно используются в конструкциях кузова. Результаты представлены на рис. 8 [8].

Анализируя графики и представленные ранее результаты по моделированию, используем КЭМ с размерами сторон КЭ клеевого соединения не более 0,5 мм и не менее двух слоев КЭ по толщине слоя. Клееные соединения с разными толщинами клеевого слоя моделируются отдельно, как показано на рис 9. (т.е. размер стороны объемного КЭ клеевого материала составляет 0,25 мм, если толщина клеевого слоя составляет 0,5 мм; и 0,5 мм, если толщина клеевого слоя составляет 1 мм или 2 мм). Поскольку толщина соединяемого материала 20 мм (рис. 7), то необходимо использовать объемные КЭ, при этом размер стороны КЭ соединяемого материала выбираем равным 2 мм (для обеспечения точности расчета).

Скорость растягивания при моделировании постоянна и равна 5 мм/с. Результаты моделирования и расчета в программном комплексе

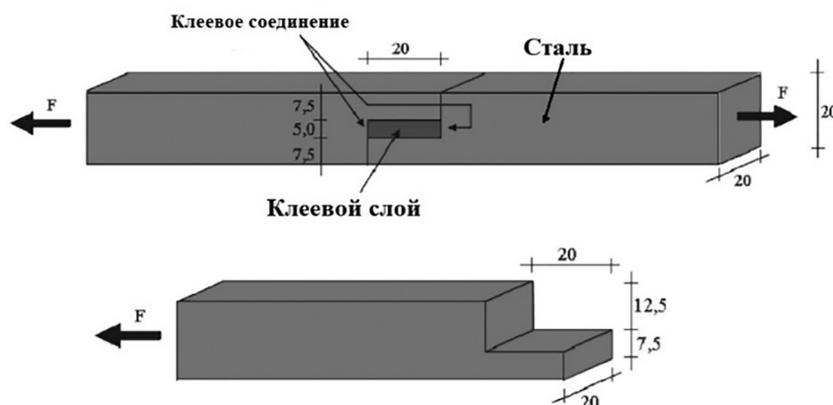


Рис. 7. Схема клеевого соединения по стандарту DIN 54451-11.1978

Fig. 7. Glue connection scheme according to DIN 54451-11.1978

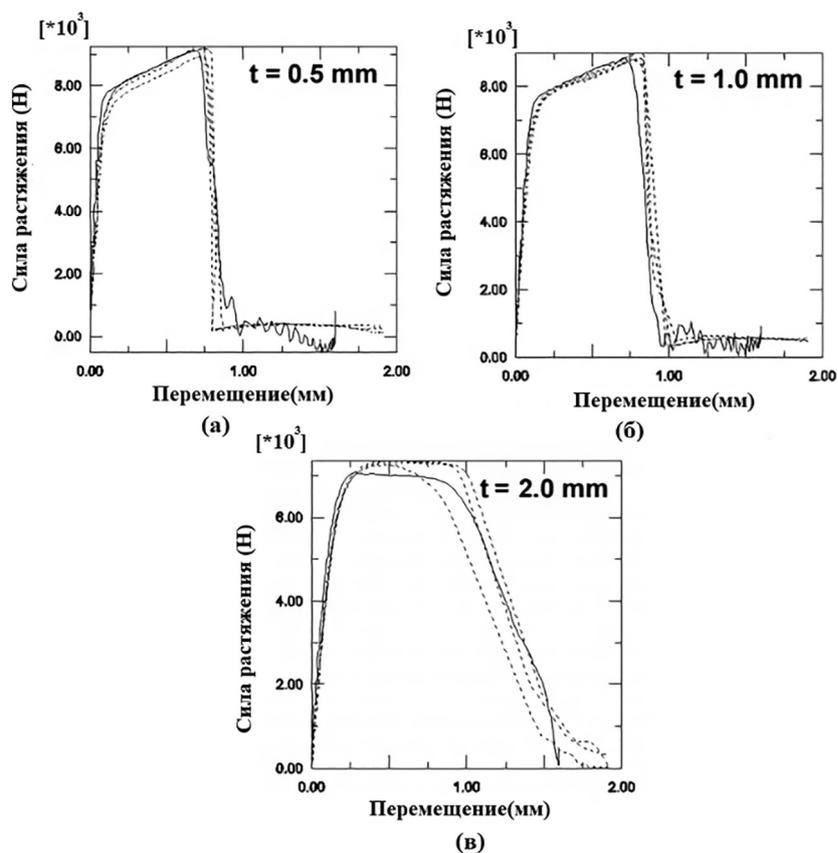


Рис. 8. Экспериментально полученные графики изменений «сила-перемещение» при квазистатическом нагружении для разных толщин клеевого слоя t

Fig. 8. Experimentally obtained graphs of changes in “force-displacement” under quasi-static loading for different thicknesses of the adhesive layer t

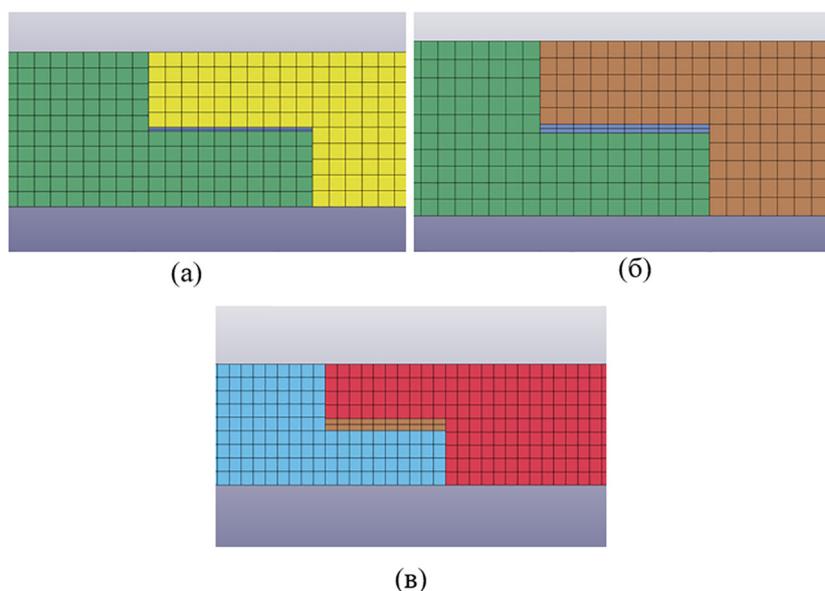


Рис. 9. Модели клеевого соединения с разными толщинами клеевого слоя:
(а) – 0,5 мм, (б) – 1 мм, (в) – 2 мм

Fig. 9. Adhesive models with different adhesive layer thicknesses: (a) – 0,5 mm, (b) – 1 mm, (c) – 2 mm

LS-Dyna при квазистатическом нагружении представлены на рис. 10.

Поскольку скорость растяжения при моделировании постоянна и равна 5 мм/с, величину абсциссы графиков можно умножить на 5, и тогда возможно сравнение с экспериментальными результатами (рис. 8). Из графиков видно, что в случае, когда толщина клеевого слоя в два раза больше размера КЭ клея, средняя

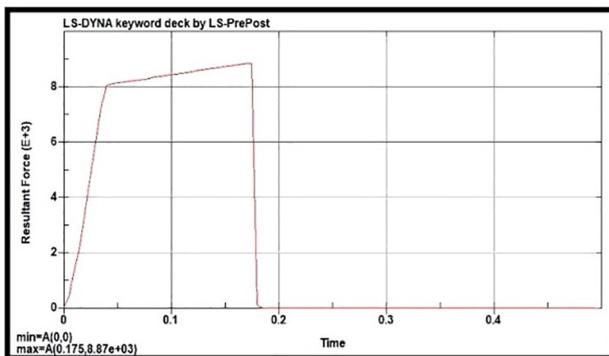
погрешность моделирования составляет: (а) – 3,5 % (для клеевого слоя толщиной 0,5 мм); (б) – 2,5 % (для клеевого слоя толщиной 1 мм); (в) – 4,2 % (для клеевого слоя толщиной 2 мм). Сравнение с экспериментальными результатами (рис. 10) позволяет заключить, что разрушение клеевого слоя может быть эффективно описано в случае представления слоя набором КЭ в два ряда по толщине клея. Погрешность

Таблица 3

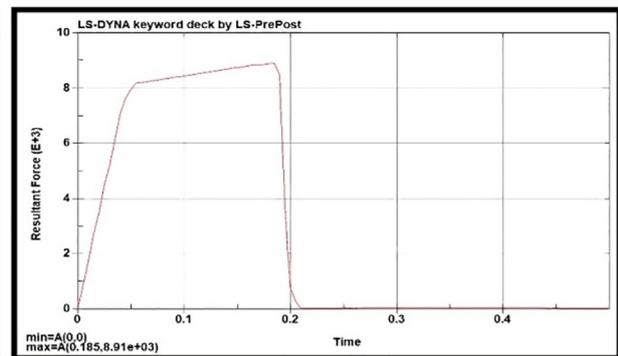
Погрешность моделирования и время расчета

Table 3. Modeling error and calculation time

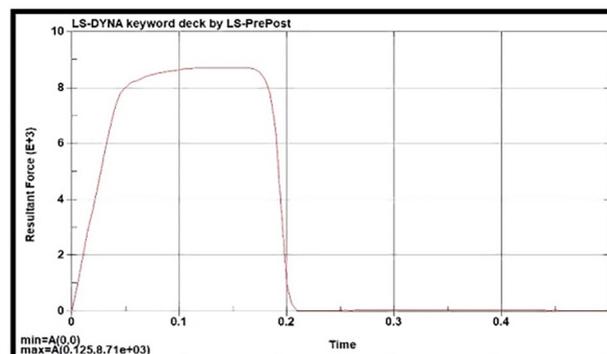
Толщина клеевого слоя, мм	Толщина КЭ клеевого слоя, мм	Размер грани КЭ клея, мм ²	Средняя погрешность моделирования, %	Время для расчета
0,5	0,1	2x2	2,5	44 ч 21 мин
		5x5	28	12 ч 33 мин
	0,25	2x2	3,5	8 ч 52 мин
		5x5	68	2 ч 23 мин
	0,5	2x2	16	5 ч 37 мин
		5x5	72	52 мин
1	0,25	2x2	2,8	35 ч 43 мин
		5x5	72	15 ч 16 мин
	0,5	2x2	2,5	9 ч 23 мин
		5x5	77	3 ч 21 мин
	1	2x2	15	5 ч 27 мин
		5x5	88	1 ч 18 мин



(а)



(б)



(в)

Рис. 10. Графики изменений «сила–время» при моделировании клеевого соединения с разными толщинами клеевого слоя:
(а) – 0,5 мм, (б) – 1 мм, (в) – 2 мм

Fig. 10. Graphs of “force-time” changes when simulating an adhesive bond with different thicknesses of the adhesive layer: (a) – 0,5 mm, (b) – 1 mm, (c) – 2 mm

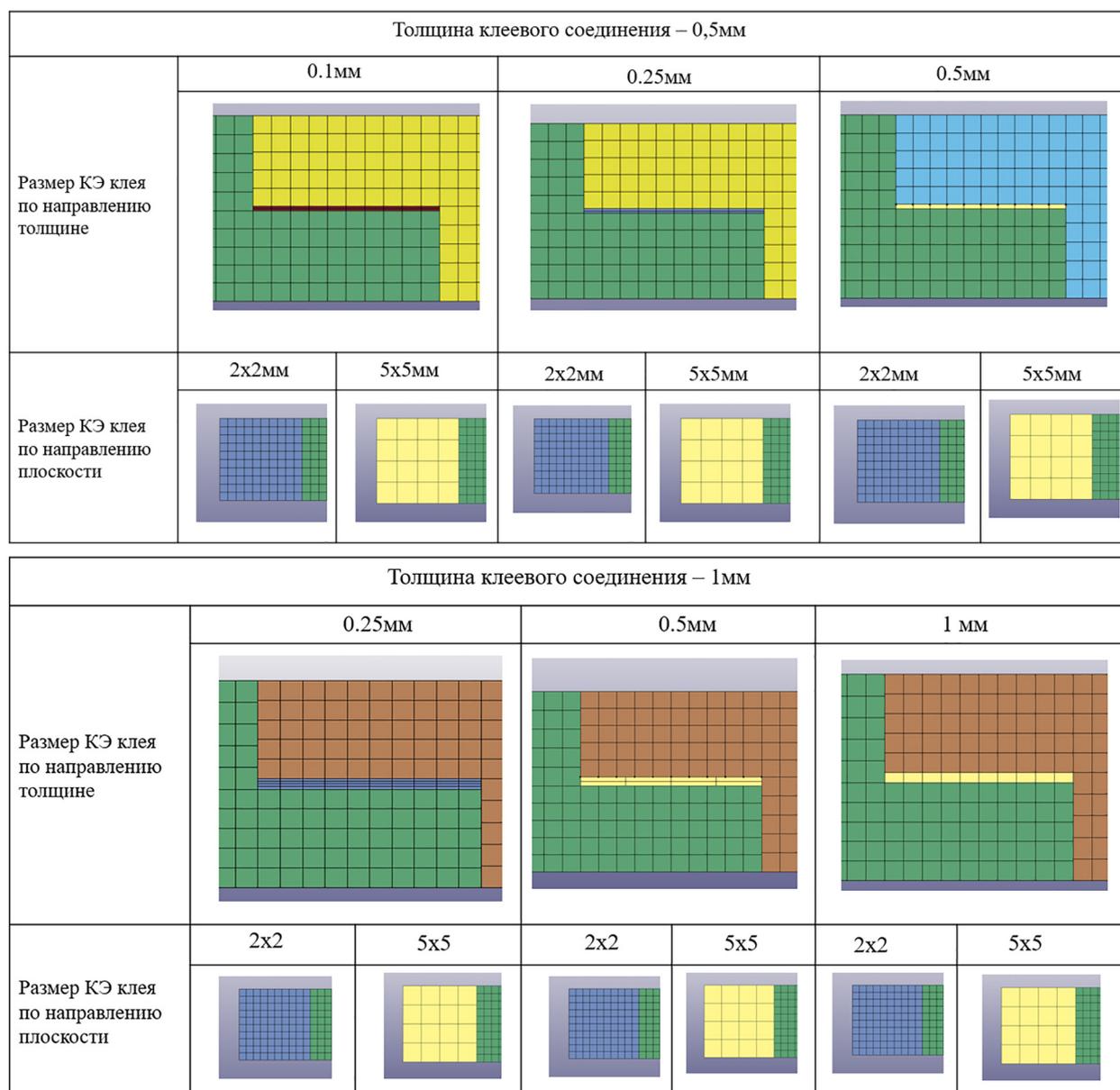


Рис. 11. Модели клеевого соединения с разными размерами КЭ при толщинах клеевого соединения 0,5 мм и 1 мм

Fig. 11. Models of adhesive joint with different sizes of FE with adhesive joint thicknesses of 0.5 mm and 1 mm

моделирования составляет менее 10 % при размерах грани КЭ в соединении 2x2 мм². Однако слишком маленький размер КЭ значительно увеличит время и продолжительность вычислений применительно к многовариантным расчетам кузова автомобиля, поэтому необходимо изучить влияние размера КЭ модели клея на точность вычислений и время вычислений. Для клеевого соединения с толщинами 0,5 мм и 1 мм нами было создано и исследовано 12 вариантов КЭМ (рис. 11).

Расчеты проводились при квазистатической нагрузке в виде силы натяжения, приложенной к одному концу при закрепленном другом

конце, при этом определялось изменение этой силы от времени, как показано на рис. 12.

Сравнивая экспериментальные результаты и расчетные (рис. 8, (а) и (б)), можно оценить погрешность моделирования и время решения.

Из приведенной выше таблицы видно, что КЭМ с двумя или более слоями в направлении толщины клея может хорошо представлять разрушение клеевого слоя. Однако, когда число слоев КЭ в модели клеевого соединения больше двух, точность расчета существенно не улучшается, а машинное время, требуемое для расчета, значительно увеличивается. При использовании КЭ с размером грани

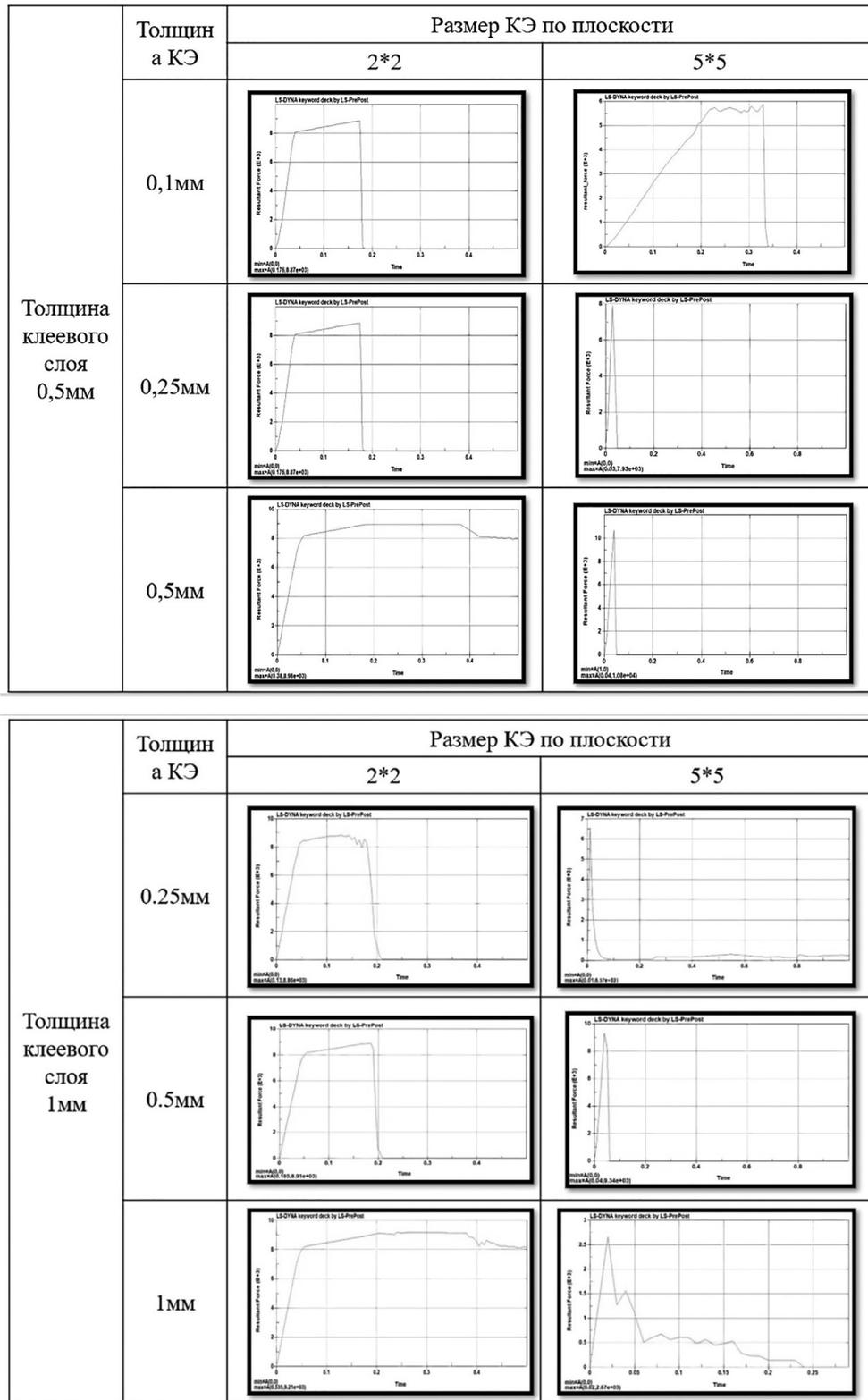


Рис. 12. Графики изменений «сила – время» в КЭМ с разными размерами КЭ при толщинах клеевого соединения 0,5 мм и 1 мм

Fig. 12. Graphs of changes “force – time” in FEM with different sizes of FE with adhesive bond thicknesses of 0,5 mm and 1 mm

2×2 мм² можно получить хорошую точность результатов моделирования, а когда размер КЭ составляет 5×5 мм², процесс расчета становится очень нестабильным, что приводит к большим ошибкам. Поэтому при анализе клеевых соединений в конструкциях автомобилей на этапе проектирования при квазистатической нагрузке рекомендуем использовать объемный КЭ с размером грани 2×2 мм², и в зависимости от толщины клеевого слоя – два или более рядов КЭ по толщине клея.

Заключение

На основе анализа проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) при моделировании конструкции кузова автомобиля с клеевым соединением рекомендуется использовать объемные КЭ для моделирования клеевого соединения с размером стороны 2 мм или меньше (погрешность расчета не более 5 %);

2) при использовании КЭ с размером грани 2×2 мм² и два слоя КЭ по толщине клея в КЭМ можно с достаточно высокой точностью вычислить силу и оценить разрушение клеевого слоя при квазистатическом нагружении (погрешность не более 5 %). Если применить количество слоев КЭ больше двух, то точность расчетов повысится незначительно, но при этом существенно увеличится требуемое машинное время для расчета.

Литература

1. Зузов В.Н., Зузов И.В. Совершенствование конструкции корпуса кузова легкового автомобиля на стадии проектирования для обеспечения требований пассивной безопасности при кософронтальном ударе. *Машиностроение*. 2013. № 1. С. 60–71.
2. Зузов В.Н. Гончаров Р.Б. Проблемы поиска оптимальных решений для обеспечения пассивной безопасности кабин грузовых автомобилей при минимальной массе. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*, 2018. № 3. С. 130–136.
3. 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, 29:414-426.
4. 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, 29:427-433.
5. Carpenter W.C. Two finite elements for modelling the adhesive in bonded configurations. *J Adhesion*, 1989, 30:25-46.
6. Alexander D. Crash stable adhesives in application and simulation. *LS-DYNA user conference*, 2006.
7. Xin Y. Study of Modeling Techniques of Weld-Bonded Joints under Impact Loading. *Tsinghua University for the degree of Doctor of Engineering*, 2010.
8. Alexander D. Crash stable adhesives in application and simulation. *Cjperight by DYNAmore GmbH*, 2006, C-I-1-10.
9. Thomas C. Adhesive Joining for Crashworthiness *CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY*, 2008.
10. Beevers A. Analysis of stiffness of adhesive joints in car bodies. *J Mater Process Tech*, 2001, 118:96–101.

Reference

1. Zuzov V.N., Zuzov I.V. Improvement of the structure of the body of the vehicle at the design stage to ensure the requirements of passive safety in the case of an oblique-frontal impact. *Mashinostroyeniye*. 2013. No 1, pp. 60–71 (in Russ.).
2. Zuzov V.N. Goncharov R.B. Problems of finding optimal solutions to ensure passive safety of truck cabins with a minimum weight. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseyeva*. 2018. No 3, pp. 130–136 (in Russ.).
3. 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, 29:414-426.
4. 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, 29:427-433.
5. Carpenter W.C. Two finite elements for modelling the adhesive in bonded configurations. *J Adhesion*, 1989, 30:25-46.
6. Alexander D. Crash stable adhesives in application and simulation. *LS-DYNA user conference*, 2006.
7. Xin Y. Study of Modeling Techniques of Weld-Bonded Joints under Impact Loading. *Tsinghua University for the degree of Doctor of Engineering*, 2010.
8. Alexander D. Crash stable adhesives in application and simulation. *Cjperight by DYNAmore GmbH*, 2006, pp. 1–10.
9. Thomas C. Adhesive Joining for Crashworthiness *CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY*, 2008.
10. Beevers A. Analysis of stiffness of adhesive joints in car bodies. *J Mater Process Tech*, 2001, 118:96–101.

STUDY OF THE EFFECT OF FINITE ELEMENT DIMENSIONS ON THE SIMULATION ACCURACY OF ADHESIVE BONDING IN AUTOMOTIVE STRUCTURES

Liu Yi, DSc in Engineering V.N. Zuzov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Liuyi941003@gmail.com

This article studies the effect of finite element dimensions on the accuracy of simulation of adhesive bond in automotive structures using the LS-Dyna software package. The simulation was carried out under quasi-static loading for an “overlapped” adhesive joint. The properties and destruction of the adhesive material in the direction of shear were evaluated. The characteristics of the adhesive layer were obtained from experiments using a hydraulic press and other devices according to international standards ASTM 638-03 and DIN 54451-11.1978 with different sliding speeds and adhesive layer thicknesses. It was revealed from experiments that the properties of the adhesive material strongly depend on the deformation rate and the thickness of the adhesive layer, so this had to be taken into account when modeling. To solve this problem, 12 variants of finite element models were solved and evaluated, including by comparing with the results of experiments for glued “overlapped” joints. As a result of the analysis of the stress-strain states of models of an adhesive joint under quasi-static loading in the LS-Dyna software package, the recommended size and number of layers of finite elements were obtained for modeling an adhesive joint in automotive structures. The rational size of the facets of a volumetric finite element is $2 \times 2 \text{ mm}^2$, taking into account the modeling errors and the cost of computer time for the calculation in relation to multivariate calculations of structures at the design stage. It was determined the recommended number of layers of finite elements in the finite element model by the thickness of the adhesive layer, that should be selected for a highly accurate description of the gluing properties and ensuring the efficiency of calculations. At the same time, it was revealed that an increase in the number of layers of finite elements insignificantly increases the accuracy of modeling and significantly increases the required computer time for the calculation.

Keywords: LS-DYNA, finite element model, stress-strain state, adhesive joint, size of finite elements.

Cite as: Liu Yi, Zuzov V.N. Study of the effect of finite element dimensions on the simulation accuracy of adhesive bonding in automotive structures. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2021. No 3 (49), pp. 31–41 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2021-49-3-31-41