

УДК 629.113

Улучшенная модель сварного соединения для многовариантных расчетов при ударных нагрузках

Ван Чжэньюй

wandercn@mail.ru

Зузов Валерий Николаевич

valeryzuz@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Проведен анализ существующих конечно-элементных моделей сварных и заклепочных соединений, применяемых в расчетах на ударное нагружение. Представлена разработанная усовершенствованная модель соединения на основе балочных элементов, учитывающая влияние скорости деформации на процесс разрушения. Определены и обоснованы параметры модели на основе комплекса экспериментальных данных, полученных при различных скоростях нагружения. Сравнены преимущества и недостатки предложенной модели с существующими аналогами. Моделирование осуществлялось с помощью программного комплекса LS-DYNA. Установлено, что новая модель обеспечивает высокую точность прогнозирования разрушения (погрешность менее 5 %) при значительном сокращении вычислительных затрат. По результатам верификации модель рекомендована для применения в оптимизационных расчетах кузовных структур транспортных средств с целью повышения пассивной безопасности. Для обеспечения требуемой точности необходимо учитывать зависимость прочностных характеристик соединений от скорости деформации и использовать упрощенный критерий разрушения на основе сил и моментов.

Ключевые слова: конечно-элементная модель, сварное точечное соединение, заклепочное соединение, оптимизация, ударная нагрузка, автомобиль

An improved welded joint model for multivariate impact calculations

Wang Zhenyu

wandercn@mail.ru

Zuzov Valery Nikolaevich

valeryzuz@yandex.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. An analysis of existing finite element models of welded and riveted joints used in impact loading calculations is conducted. An improved joint model based on beam elements, which takes into account the influence of strain rate on the failure process, is developed. Model parameters are determined and validated based on a set of experimental data obtained at various loading rates. The advantages and disadvantages of the proposed model are compared with existing analogs. Simulations were performed using the LS-DYNA software package. It was found that the new model provides high failure prediction accuracy (error less than 5 %) while significantly reducing computational costs. Based on verification results, the model is recommended for use in optimization calculations of vehicle body structures to improve passive safety. To ensure the required accuracy, it is necessary to consider the dependence of the strength characteristics of the joints on the strain rate and use a simplified failure criterion based on forces and moments.

Keywords: finite element model, spot weld, riveted joint, optimization, impact load, automobile

Введение. В настоящее время основным способом соединения тонкостенных металлических деталей в единый кузов автомобиля является контактная точечная сварка и самопроникающая заклепка. В процессе столкновения, когда на конструкцию автомобиля воздействует большая внешняя нагрузка, разрушение сварных точек или заклепки в местах соединения деталей напрямую повлияет на целостность конструкции автомобиля, в результате чего разрушаются энергопоглощающие свойства деталей и даже путь передачи энергии столкновения, что в конечном итоге приведет к травмам водителя и пассажиров. [1] Чтобы избежать подобной ситуации и повысить пассивную безопасность автомобилей, необходимо учитывать разрушение сварных и заклепочных соединений в процессе разработки пассивной безопасности автомобилей при столкновении. С быстрым развитием компьютерных технологий, на стадии исследования пассивной безопасности автомобилей все чаще используется метод конечных элементов (МКЭ) для анализа напряженно-деформированного состояния кузовов и оптимизации конструкции. По сравнению с экспериментальными методами, МКЭ может эффективно сэкономить стоимость разработки и сократить цикл исследования, поэтому прогноз разрушения сварных и заклепочных соединений с помощью компьютерного моделирования становится одним из основных направлений исследований в области безопасности ТС.

Существует ряд моделей сварных и заклепочных соединений для статического и динамического анализа, а также для анализа столкновений ТС. Самые простые подходы — использование общих узлов или элементов; прямое соединение узлов КЭ через жесткие или упругие балки. Но эти подходы при разделении КЭ требуют точного расположения узлов или элементов соединяемых фланцев друг над другом [2]. Модели одного стержня, стержня со спицей, нескольких стрижней могут использоваться для ударных нагрузок, но требуют сложного переразбиения КЭ вблизи сварных точек [3]. Наиболее распространенным подходом, используемым в настоящее время при моделировании столкновений автомобилей, являются соединение элемента сварки (заклепки) и фланцев с помощью контактов. В рассматриваемой модели сварные соединения (заклепки) представлены двумя типами элементов: балочными и объемными. Балочно-элементная модель характеризуется меньшими вычислительными, что является важным фактором при задаче оптимизации, тогда как объемно-элементная модель обеспечивает более высокую точность расчетов. Данная модель обеспечивает высокое соответствие между экспериментальными и имитационными результатами при квазистатическом нагружении. Однако при ударных нагрузках наблюдается определенное расхождение между экспериментальными данными и результатами моделирования. Это обусловлено тем, что механизм разрушения сварных соединений зависят от скорости деформации: прочностные характеристики сварных соединений, как правило, увеличиваются с ростом скорости нагружения.

В своей статье [4] Чжан Ф. предпринимает попытку решения данной проблемы. На основе объемно-элементной модели точечной сварки анализируется влияние скорости деформации на поведение сварного соединения при

ударных нагрузках. В его модели для определения разрушения сварного соединения используются полиномиальная формула, основанная на критических нормальных и сдвиговых напряжениях, предложенная в работе [5].

$$f = \left(\frac{\sigma_N(\dot{\varepsilon})}{s_N(\dot{\varepsilon})} \right)^{n_s} + \left(\frac{\sigma_B(\dot{\varepsilon})}{s_B(\dot{\varepsilon})} \right)^{n_B} + \left(\frac{\tau(\dot{\varepsilon})}{s_S(\dot{\varepsilon})} \right)^{n_N} \geq 1, \quad (1)$$

где σ_N — нормальное напряжение; σ_B — изгибающее напряжение; τ — сдвиговое напряжение; s_N — максимальное нормальное напряжение; s_B — максимальное изгибающее напряжение; s_S — максимальное сдвиговое напряжение; n_s — экспонента для нормального члена; n_B — экспонента для изгибающего члена; n_N — экспонента для сдвигового члена.

Для применения данного критерия необходимо установить и откалибровать шесть параметров, которые подвергаются итеративной калибровке на основе экспериментальных данных. Данный метод определения и настройки параметров требует значительных затрат времени и трудовых ресурсов. Более того, рассматриваемый критерий не пригоден для использования в балочно-элементной модели сварного соединения, что ограничивает его применение в оптимизационных расчетах.

Доктор Р.К.С. Wood также предложил метод решения данной проблемы, однако в его статье [6] режимы повреждений, связанные с кручением и изгибом, были исключены из рассмотрения. Кроме того, он провел испытания всего в двух случаях: образцы с точечной сваркой, испытываемые при скорости 1 мм/с, и образцы с точечной сваркой, испытываемые при скорости 2500 мм/с. Между тем, на самом деле существует существенная разница в характеристиках сварных соединений при различных условиях высокоскоростного удара. Поэтому необходимо разработать и усовершенствовать новую модель сварного и заклепочного соединения, которая подходит для оптимизационных расчетов, учитывает влияние скорости деформации и позволяет легче определять параметры разрушения.

Целью работы является усовершенствование и модификация упрощенной модели сварного точечного (или заклепочного) соединения, применяемой для расчета ТС. Модель должна удовлетворять следующим требованиям:

Универсальность. Модель может использоваться для квазистатических расчетов, динамических расчетов и ударных расчетов.

Точность. Погрешность от результатов эксперимента или моделирования с высокоточной моделью не должна превышает 5 %.

Независимость сетки. Модель КЭ сварки (заклепки) должна обеспечивать, чтобы разница между результатами моделирования при различных расположениях сварных точек (заклепок), ориентации сварных точек (заклепок) и размерах КЭ деталей составляла не более 5 %.

Простота. Способность создавать большое количество сварных (заклепочных) соединений простым путем.

Применимость для многовариантных (оптимизационных) расчетов. Затраты времени должны быть минимальными.

Описание усовершенствованной модели сварки. Как уже упоминалось выше, цель данного исследования заключается в разработке упрощенной модели сварного и заклепочного соединения. Особое внимание уделяется поведению сварного (заклепочного) соединения при разрушении. Модель будет разработана на основе MAT100 в программном комплексе LSDYNA, который допускается к применению для балочно-элементной модели сварных соединений [7]. Балочные элементы, основанные на формулировке балки Хьюза — Лиу, могут быть размещены между любыми двумя деформируемыми поверхностями оболочки и связаны с ограничением контакта, при этом не требуется наличие соседних узлов в местах точечных сварок. Модель имеет упругопластическую, билинейную зависимость упрочнения материала, основанную на напряжениях по фон Мизесу. В данной модели для определения разрушения сварного (заклепочного) соединения применяется критерий разрушения, основанный на силе и моменте [0]. Формула выглядит следующим образом:

$$f = \left(\frac{\max(N_{rr}, 0)}{N_{rrF}} \right)^2 + \left(\frac{N_{rs}}{N_{rsF}} \right)^2 + \left(\frac{N_{rt}}{N_{rtF}} \right)^2 + \left(\frac{M_{rr}}{M_{rrF}} \right)^2 + \left(\frac{M_{ss}}{M_{ssF}} \right)^2 + \left(\frac{M_{tt}}{M_{ttF}} \right)^2 \geq 1. \quad (2)$$

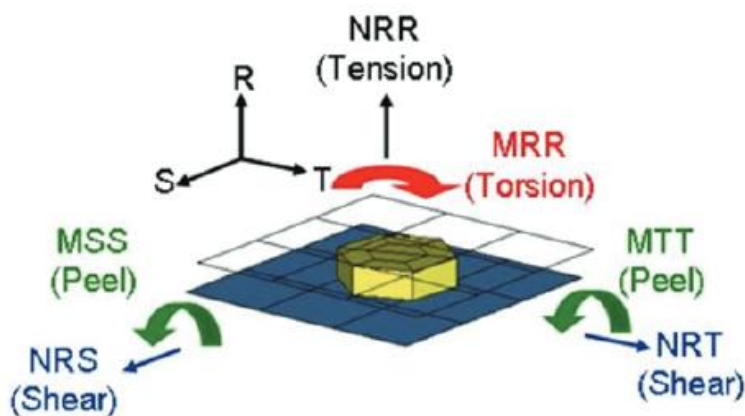


Рис. 1. Направления критериев разрушения:

N_{rr} — осевая сила; N_{rs}, N_{rt} — поперечные силы; M_{rr} — крутящий момент; M_{ss}, M_{tt} — изгибающие моменты; N_{rrF} — критическая осевая сила; N_{rsF}, N_{rtF} — критические поперечные силы; M_{rrF} — критический крутящий момент; M_{ssF}, M_{ttF} — критические изгибающие моменты

В отличие от параметров в уравнении (1), 6 параметров отказа сварного соединения в уравнении (2) имеют гораздо более четкий физический смысл и их легче определить без сложных итераций. Значение критической осевой силы разрушения сварного (заклепочного) соединения N_{rrF} определяется испытанием на поперечное растяжение; значение критических поперечных сил разрушения N_{rsF}, N_{rtF} определяется испытанием на сдвиг; значение критических изгибающих моментов разрушения M_{ssF}, M_{ttF} определяется испытанием на отслаивание; значение критического крутящего момента разрушения M_{rrF} определяется испытанием на кручение.

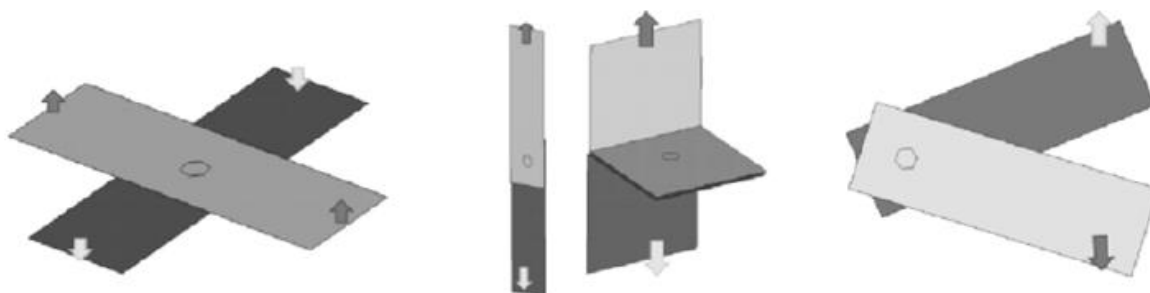


Рис. 2. Испытания на механические свойства сварного соединения для определения параметров разрушения

В общем случае для точечных сварных соединений и заклепочных соединений имеет

$$N_{rsF} = N_{rtF}; \quad (3)$$

$$M_{ssF} = M_{ttF}. \quad (4)$$

При столкновении ТС крутящий момент M_{rr} на сварных (заклепочных) соединениях иногда очень мал, можно его пренебречь [9]. Таким образом, чтобы использовать критерий разрушения сварного (заклепочного) соединения на основе МАТ100, требуется определить только 3 или 4 параметра. Значительно упрощается процесс определения и калибровки параметров разрушения модели сварки (заклепки).

Для обеспечения высокой точности моделирования как в квазистатических, так и в условиях высокоскоростных ударных воздействий, механические свойства элементов сварных соединений рассматриваются как функция скорости деформации. Критические параметры разрушения теперь также определяются экспериментально не только в квазистатических условиях, но и при различных скоростях нагружения. Поскольку предел текучести, предел прочности и другие механические характеристики сварных соединений зависят от скорости деформации, такое усовершенствование значительно повышает вычислительную точность модели сварного соединения при ударном нагружении.

Определение параметров усовершенствованной модели сварки. Определение параметров разрушения усовершенствованной модели сварного (заклепочного) соединения осуществляется с помощью экспериментальных данных, имеющих в другой статье [10]. Как упоминалось выше, для испытаний были подготовлены образцы трех типов: испытание на отрыв, испытание на сдвиг и испытание на отслаивание.

Образцы изготовлены из алюминиевого сплава 5182-О, толщина образца 2 мм, соединены заклепкой, диаметр головки заклепки — 7,5 мм. Физические и механические свойства алюминия 5182-О приведены ниже. Следует отметить, что при этом учитывается поведение самих образцов при различных скоростях деформации.

Плотность, тонна/мм ³	2,7e-9
Модуль Юнга, МПа	71000
Коэффициент Пуассона	0,33
Предел текучести, МПа	120

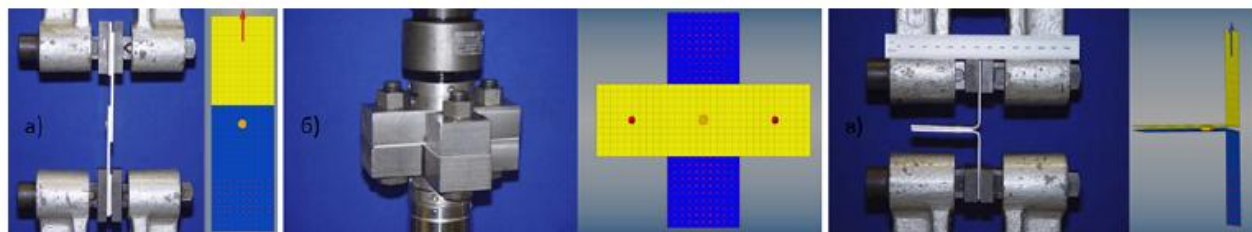


Рис. 3. Испытательные методы и соответствующие модели образцов:
а — испытание на сдвиг; *б* — испытание на отрыв; *в* — испытание на отслаивание

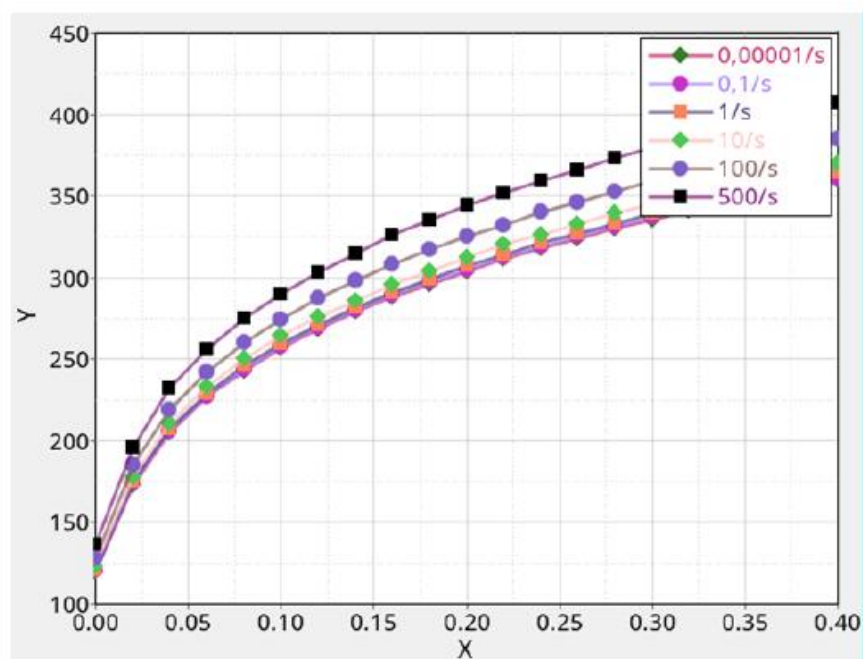


Рис. 4. Кривая зависимости эффективного напряжения от эффективной пластической деформации при разных скоростях деформации

Каждый набор испытаний проводился при трех скоростях нагружения: 0,1 (квазистатическое нагружение); 4,47 и 8,94 м/с (табл. 1). Значения скорости деформации в местах соединения образцов при различных скоростях нагружения получены путем предварительного расчета в программе LSDYNA. Таким образом, получены зависимости пределов разрушения соединений от трех разных скоростей деформации. Пределы разрушения при других скоростях деформации получены путем интерполяции.

Таблица 1

Параметр	Значение	N_{rrF} (Н)	N_{rsF} (Н)	M_{ssF} (Н · мм)
Скорость нагружения	0,1 мм/с (c^{-1})	5100	7440	294000
Средняя скорость деформации	4,47 м/с ($472 c^{-1}$)	5115	9855	36600
	8,94 м/с	5330	11010	36900

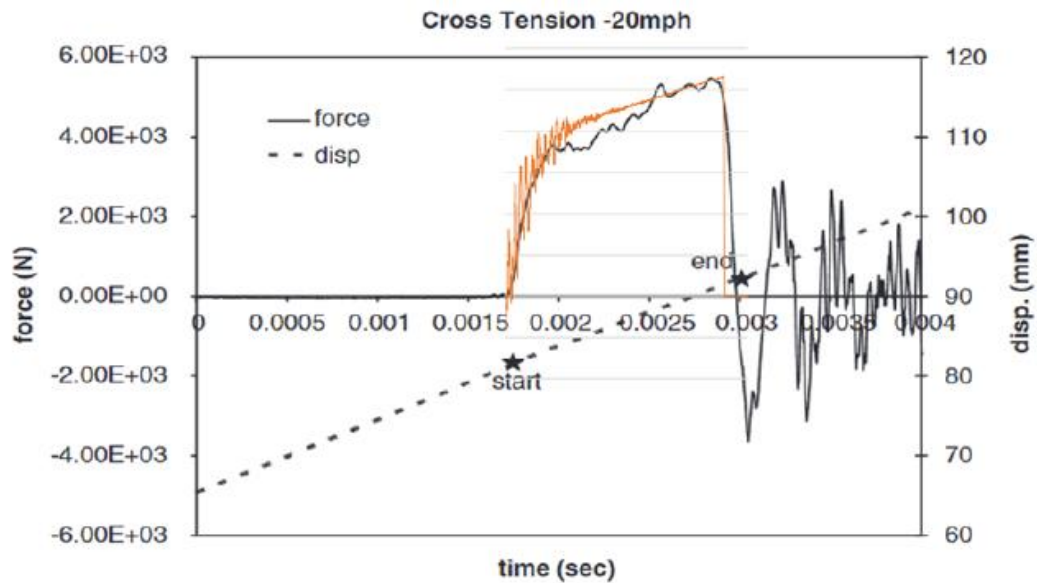


Рис. 5. График сравнения данных моделирования новой модели с экспериментальными данными

Полученные результаты были сравнены с экспериментальными данными, и было получено хорошее согласие. Для проверки точности и достоверности новой модели были использованы экспериментальные данные и результаты моделирования, представленные в статье [0]. В данной статье рассматривается не простая сварка, а заклепочная сварка, соединяющая стальные и алюминиевые пластины; структура заклепочных соединений представлена на рис. 6. Новая модель демонстрирует применимость не только к традиционной сварке, но и к соединениям, выполненным методом заклепочной сварки и аналогичным способам крепления.

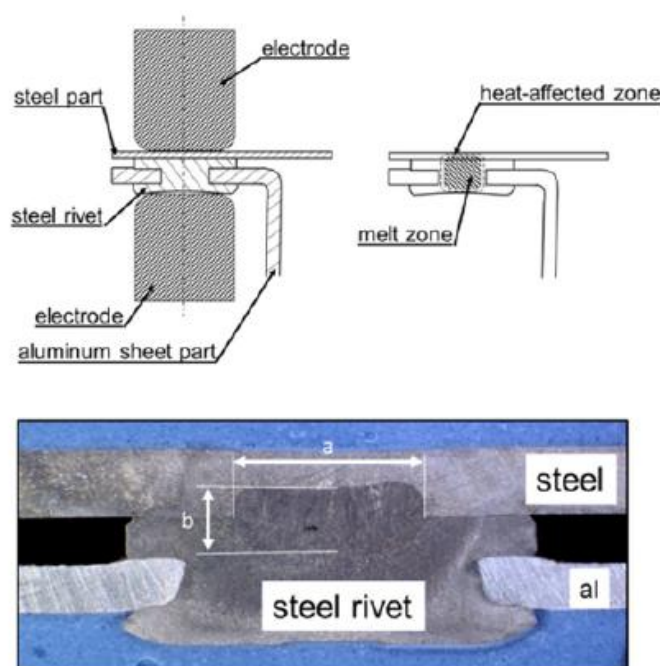


Рис. 6. Схема конструкции точек заклепочной сварки

Сравнительный анализ новой и старой моделей, а также экспериментальных данных был проведен при трех различных скоростях нагрузки: 2 мм/мин, 1 м/с и 5 м/с, и при трех различных типах испытаний: испытание на отрыв, испытание на сдвиг и испытание на отслаивание. Результаты представлены на рис. 7.

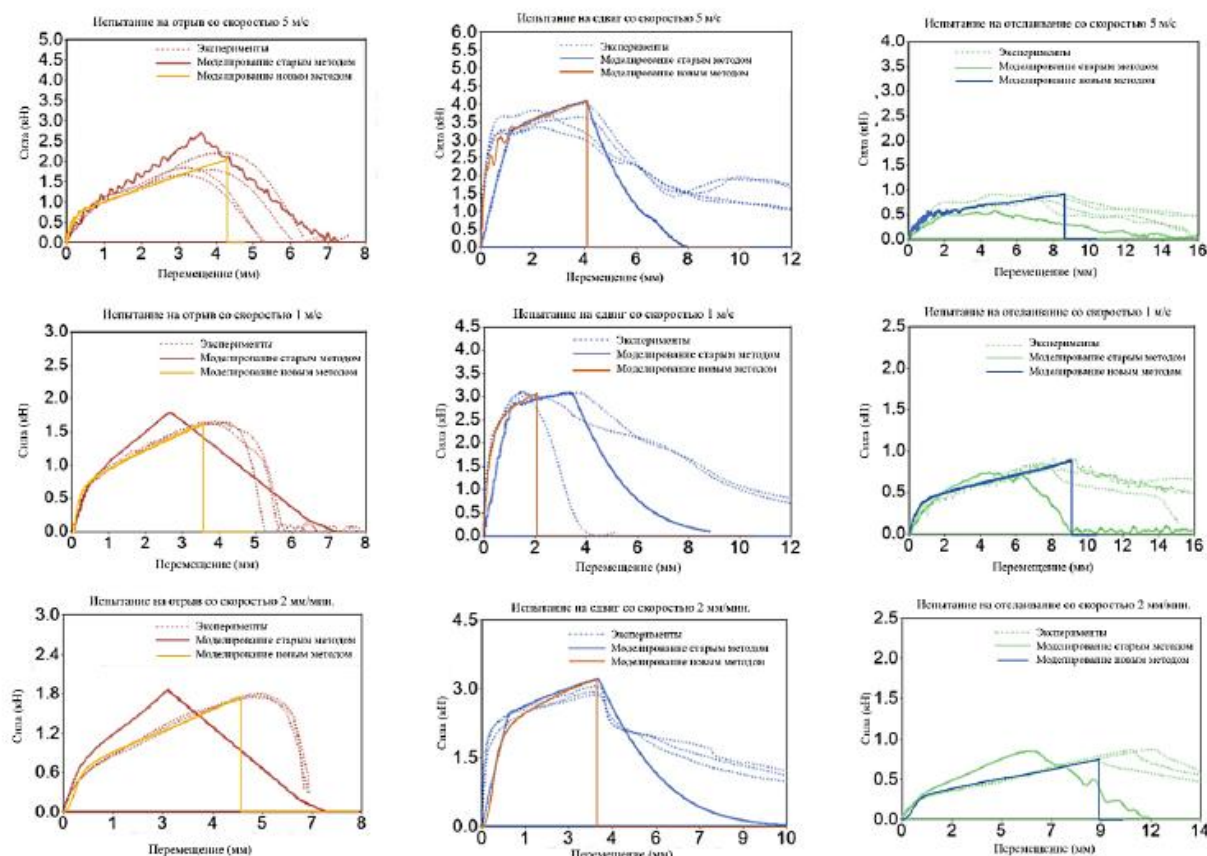


Рис. 7. График сравнения экспериментальных данных и результатов имитирования новой и старой моделей сварного соединения

Результаты моделирования показывают высокую степень согласованности с экспериментальными данными. В частности, в некоторых случаях, таких как испытания на отрыв, предложенная модель сварки характеризуется более точным воспроизведением экспериментальных результатов по сравнению со старой моделью, использованной в статье [0]. Следует отметить, что в нашей модели сварные соединения удаляются сразу после их отказа, поскольку в этот момент они практически перестают передавать нагрузку.

В приведенном выше сравнении для моделирования сварных соединений использовались объемные элементы типа 8hex, аналогичные примененным в статье [0]. В дальнейшем будет проведен анализ различий в точности между объемными и балочными элементами при моделировании среднеразмерной автомобильной модели. На основе проведенного анализа сравниваем точность и время вычислений балочно-элементной модели сварных соединений и различных объемно-элементных моделей сварных соединений. Испытания

проводились для различных размеров КЭ и различных моделей точечной сварки, как показаны в табл. 2.

Таблица 2

Размер КЭ	16 hex	8 hex	1 hex	beam
<i>Средняя погрешность времени разрушения сварки ($NRR = 7067\text{ Н}$)</i>				
1,25 мм	0,57 %	1,25 %	2,31 %	15,5 %
2,5 мм	1,25 %	1,31 %	3,05 %	11,9 %
5 мм	3,14 %	3,27 %	4,18 %	5,47 %
10 мм	4,18 %	5,58 %	6,98 %	5,89 %
15 мм	7,62 %	8,91 %	9,18 %	9,06 %
<i>Машинное время (с)</i>				
2,5 мм	299	205	117	96
5 мм	149	113	94	78
10 мм	47	35	18	14
15 мм	20	19	11	8

Анализ показывает, что модель точечных сварных (заклепочных) соединений на основе балочно-элементного подхода не подходит к применению в высокоточных моделях кузовов автомобилей при ударных нагружениях. Данная модель часто приводит к локальным искажениям сетки, что существенно сказывается на результатах моделирования. Однако такая модель подходит для использования в моделях автомобилей средней точности, где размеры оболочечных элементов кузова превышают диаметр точечных сварок. В таких моделях точность сварных соединений, смоделированных с помощью балочных элементов, сопоставима с точностью, достигаемой при использовании объемных элементов, при этом время вычислений значительно меньше, чем при использовании объемных элементов.

Закключение. В целом усовершенствованная модель, основанная на материале MAT100, является наиболее подходящей моделью точечных сварных соединений для расчета столкновений автомобилей и для оптимизационной задачи в настоящее время. Причина заключается в том, что она обладает высокой точностью моделирования при разных скоростях нагружения; ее результат расчета не зависит от своего местоположения и ориентации; она хорошо отражает разрушение точечных сварных соединений при ударе; ее легко создавать и определять параметры; требуется сравнительно небольшое время расчета.

По сравнению с предыдущим методом Zhang, предложенный метод обладает более высокой точностью, особенно в испытаниях на отрыв и отслаивание (средняя погрешность на 8 % ниже старого); наша модель имеет меньшее количество параметров критерий отказа (3 или 4, а не 6) и легче определяется без утомительных итераций; усовершенствованная модель тео-

ретически применима как к балочно-элементным, так и к объемно-элементным моделям точечных сварных соединений.

В процессе оптимизации (итерационных вычислений) часто применяются модели средней точности, размер сетки которых составляет около 15 мм, что в три раза превышает диаметр обычных сварных точек. В таких условиях точность балочно-элементной модели сварки сопоставима с точностью объемно-элементной модели (погрешность не превышает 5 %), однако время, необходимое для вычислений, обычно составляет лишь половину от времени, затрачиваемого на объемно-элементную модель.

Список источников

- [1] Kumagai K., Hayashi S., Ohno T. Rupture Modeling of Spot Welds under Dynamic Loading for Car Crash FE Analysis. *Transactions-society of Automotive Engineers of Japan*, 2007, vol. 38, no. 5, 9 p.
- [2] Вдовин Д.С. *Разработка методики проектирования несущих систем колесных машин, выполненных с использованием сварных точечных и клеесварных соединений*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2007.
- [3] Xu S., Deng X. An evaluation of simplified finite element models for spot-welded joints. *Finite elements in analysis and design*, 2004, vol. 40, no. 9–10, pp. 1175–1194.
- [4] Zhang F., Xu H., Fang X. Failure behavior and crash modelling of resistance rivet spot welding (RRSW) for joining Al and steel in vehicle structure. *International Journal of Crashworthiness*, 2022, vol. 27, no. 1, pp. 243–260.
- [5] Seeger F. et al. An investigation on spot weld modelling for crash simulation with LS-DYNA. *4th LS-DYNA User Forum*. Bamberg, 2005, p. 1–12.
- [6] Wood P.K.C. A new strain rate dependent spot weld model for automotive crash applications. *Proc. 11th Int. LS-DYNA Users Conf.* Michigan, Dearborn, 2010.
- [7] *MANUAL K. U. S. LS-DYNA keyword User's manual*. LSTC Co., Livermore, 2007.
- [8] Malcolm S., Nutwell E. Spotweld failure prediction using solid element assemblies. *6th European LS-Dyna users' conference*. Gothenburg, Sweden, 2007.
- [9] Zhu D. Finite element modeling method for welding structure base on spot weld failure. *Journal of Electronic Science and Technology*, 2017, vol. 30, no. 10, pp. 73–81.
- [10] Sun X., Khaleel M.A. Dynamic strength evaluations for self-piercing rivets and resistance spot welds joining similar and dissimilar metals. *International journal of impact engineering*, 2007, vol. 34, no. 10, pp. 1668–1682.