УДК 621.79

# МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ ТОЧЕЧНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

## METHODOLOGICAL RECOMMENDATIONS FOR MODELING SPOT WELDING

**Омелюсик А. В.**, канд. техн. наук., доц.;
**Шмелев А. В.**, канд. техн. наук., доц.
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь
A. Amialiusik, Ph. D. in Eng., Ass. Prof.;
A. Shmialiou, Ph.D. in Eng., Ass Prof.
The Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus,
Minsk, Belarus

*В работе представлены методические рекомендации по моделированию точечных сварных соединений на основе результатов экспериментальных данных. Методика апробирована для точечных сварных соединений с диаметром сварных точек 3 и 5 мм и основой лист толщиной 1 мм из стали 08пс. Апробация выполнена в программном комплексе ANSYS LS-DYNA для двух режимов нагружения: при срезе сварных точек и отрыве. Отклонения расчетных значений разрушающих усилий от экспериментальных при срезе и отрыве точечных сварных соединений не превысили 0,1 кН (менее 5 %). Даны рекомендации по использованию разработанных методических подходов при численном расчете более сложных машиностроительных конструкций.*

*The paper presents methodological recommendations for modeling spot welds based on the results of experimental data. The method has been tested for spot welds with a weld spot diameter of 3 and 5 mm and a base sheet 1 mm thick made of 08ps steel. The testing was performed in the ANSYS LS-DYNA software package for two loading modes: when cutting weld spots and tearing off. Deviations of the calculated values of destructive forces from the experimental ones when cutting and tearing off spot welds did not exceed 0.1 kN (less than 5%). Recommendations are given for using the developed methodological approaches in the numerical calculation of more complex mechanical engineering structures.*

***Ключевые слова***: точечная сварка, компьютерное моделирование, метод конечных элементов, прочность, испытания, отрыв, срез, ANSYS LS-DYNA.

***Keywords***: *spot welding, computer modeling, finite element method, strength, testing, tear, shear, ANSYS LS-DYNA.*

## ВВЕДЕНИЕ

Точечная сварка является наиболее распространенным способом контактной сварки, на долю которого приходится около 70 % всех соединений. Этот способ сварки широко используют в автомобиле- и вагоностроении, авиастроении, строительстве, радиоэлектронике и т. д. [1].

При проектировании новых изделий особую актуальность имеют подходы по численному моделированию точечных сварных соединений. Для моделирования разрушения сварной точки используют твердотельные модели с измельчением конечно-элементной сетки в зоне сварки [2], подробное моделирование сварной точки с выделением отдельных ее компонентов [3]. При моделировании технологического процесса получения сварной точки используют модули SYSWELD программы Spot Weld Mesh и Spot Weld Advisor [4]. Для расчетов в явной поставке (краш-тесты) широко используется программный комплекс конечно-элементного анализа ANSYS LS-DYNA. Существует ряд используемых методов моделирования точечной сварки, в зависимости от уровня детализации и используемого характера деформирования и разрушения сварных точек [5]: недеформируемая модель поведения точечных сварных точек (рис. 1, *а*); деформируемая модель поведения с использованием балочных и твердотельных элементов (рис. 1, *б*, *в*); моделирование точечной сварки с использованием контактов.

Применительно к машиностроению и, в частности, автомобилестроению целесообразно использовать метод с недеформируемым поведением и возможностью задания критерия разрушения по критическим значениям нормального и сдвигового усилия. Это позволит использовать результаты экспериментальных данных и с высокой достоверностью проводить расчетную оценку прочности кузовных машиностроительных конструкций. Таким образом, актуальной является задача выработки подходов по моделированию точечных

сварных соединений с использованием значений разрушающих усилий, полученных при испытаниях образцов точечной сварки на сдвиг и отрыв.

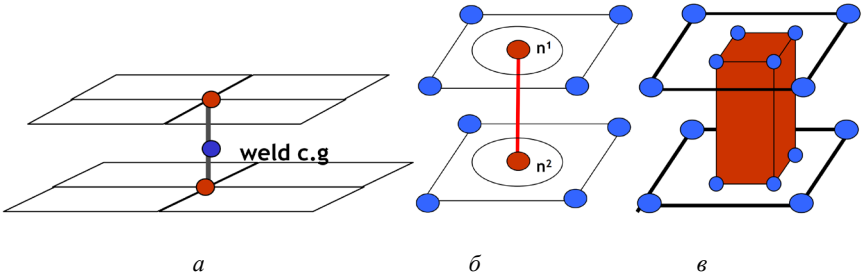



Рисунок 1 – Методы моделирования точечных сварных соединений:
*а* – недеформируемая модель; деформируемая модель: *б* – с использованием балочного элемента; *в* – с использованием твердотельного элемента

## МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТОЧЕЧНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СРЕДСТВАМИ ANSYS LS-DYNA

Для получения достоверных результатов моделирования точечных сварных соединений в программном комплексе ANSYS LS-DYNA необходимо учитывать экспериментально полученные прочностные характеристики сварных точек. В связи с этим при моделировании точечной сварки необходимо выполнить следующие этапы:

1. Выполнить определение механических характеристик материала свариваемых деталей.

Испытания проводятся путем растяжения образцов на универсальной разрывной машине. Определяются показатели прочности и деформации. После получения значений механических характеристик выполняется идентификация параметров модели материала MAT_024 PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY по методике [6].

2. Провести экспериментальные исследования механических характеристик сварных соединений, полученных методом точечной сварки.

Точечные сварные соединения испытываются на срез и отрыв согласно ГОСТ 6996-66. При испытаниях на отрыв используется специальное приспособление, фиксирующее образец. По результатам испытаний фиксируются значения разрушающих нагрузок;

3. Выполнить компьютерное моделирование натурного эксперимента с учетом полученных при испытании значений разрушающих нагрузок.

Для возможности задания и контроля свойств материала прилегающего к сварной точке в месте ее расположения на каждой соединяемой поверхности создается круг диаметром не менее 15 мм (для диаметров сварных точек до 5 мм). Центры этих кругов соединяются между собой с помощью математической модели (связи) Constrained/Spotweld, описывающей поведения сварной точки с заданием значений разрушающих усилий. Это позволяет исключить локализацию деформации в зоне, прилегающей к расположению математической связи на поверхностях деталей (Constrained/Spotweld) и характеризующейся наличием конечных элементов различных размеров. Таким образом, зона разрушения переносится на границу круга, на которой будет обеспечен необходимый контроль размеров создаваемой расчетной сетки, а, следовательно, и обеспечение необходимых уровней локализации пластической деформации с учетом размеров элементов. Последнее необходимо для реализации требуемого разрушающего усилия, соответствующего экспериментальным данным. Свойства материала, прилегающего к сварной точке (представлен указанными кругами), описываются моделью материала MAT_001 ELASTIC;

4. Дать количественную оценку полученным результатам компьютерного моделирования эксперимента.

Количественная оценка заключается в сопоставлении значений разрушающих усилий в расчете и эксперименте. При моделировании разрушения точечной сварки при срезе усилие регистрируется с зоны фиксации образца (ASCII_option/SPCFORC), а при моделировании разрушения при отрыве с помощью опции вывода усилия непосредственно для модели рассматриваемой точечной сварки (ASCII_option/SWFORC). Погрешность по данному критерию не должна превышать 5 %;

5. Выработать рекомендации по дальнейшему использованию моделей точечных сварных соединений.

Разработанные методические рекомендации по моделированию точечных сварных соединений могут использоваться при расчете более сложных деталей машиностроения, таких как кузова автомобилей, кабины грузовых автомобилей, панели обшивки и т. д. Сварные

точки могут быть смоделированы как по всей конструкции согласно карте сварных соединений, так и в наиболее нагруженных зонах, предварительно осуществив пробный расчет.

Разработанные методические рекомендации позволяют моделировать точечные сварные соединения на основе экспериментальных данных и проводить расчетную оценку прочности более сложных изделий машиностроения.

## АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА

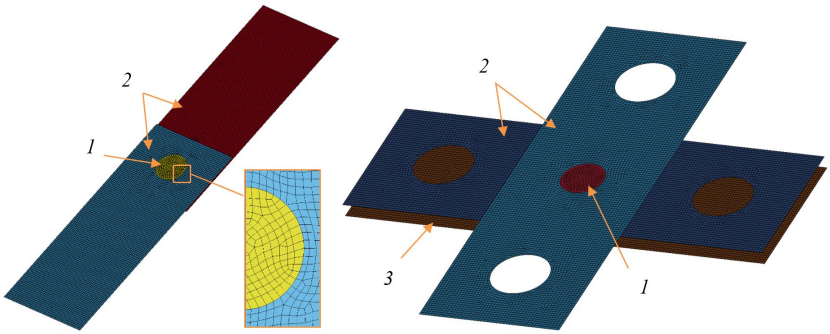
Для определения механических характеристик сварных соединений, выполненных методом точечной контактной сварки, были проведены испытания образцов на срез и отрыв. Образцы были изготовлены из листового металла толщиной 1 мм из стали 08пс. Подготавливались две группы образцов с диаметром сварной точки 3 и 5 мм. Испытания проводились на универсальной гидравлической машине INSTRON Satec 300LX. Погрешность измерения нагрузки составляла не более 0,5% от измеряемого значения.

В программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS LS-DYNA PC (R800) были разработаны оболочечные конечно-элементные модели образцов точечных сварных соединений для расчетных испытаний на срез и отрыв. Геометрические размеры образцов соответствуют номинальным размерам при испытаниях.

Конечно-элементная сетка генерировалась гексогональными элементами с размером грани порядка 1 мм, обеспечив 48 элементов по границе кругов. Общее количество элементов в оболочечной модели образца точечной сварки для испытаний на срез составило 10535, для испытаний на отрыв – 21798. На рис. 2 представлены разработанные конечно-элементные модели образцов точечной сварки.

Конечно-элементные модели образцов из системного компонента ANSYS Explicit Dynamics (LS-DYNA Export) в формате *k*-файлов передавались в программу пре-/постпроцессор LS-PrePost.

Свойства материала пластин 2 (рис. 1) кроме описанных выше их частей круглой формы 1 (рис. 1) описывались с помощью полилинейной модели материала MAT_024 PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY со значением параметров идентифицированных по методике [6] с использованием результатов испытаний образцов материалов на растяжение.




*а* *б*

Рисунок 2 – Конечно-элементные модели образцов сварных соединений для испытаний на: *а* – срез; *б* – отрыв:
*1* – круг для моделирования точечной сварки; *2* – свариваемые пластины;
*3* – вспомогательная пластина

Вспомогательная пластина 3 (рис. 1, *б*) в образце точечной сварки для испытаний на отрыв смоделирована для обеспечения симметричной деформации свариваемых пластин при нагружении. Начальные и граничные условия соответствовали проведенным натурным испытаниям. Одна из захватных частей образцов фиксировалась, а другой задавалось перемещение вдоль оси образца, тем самым вызывая его растяжение.

Результаты моделирования показали высокую сходимость с натурным экспериментом. Отклонения расчетных значений разрушающих усилий от экспериментальных при срезе и отрыве точечных сварных соединений не превысили 0,1 кН (менее 5 %). Это свидетельствует о высокой точности моделирования процессов деформирования и разрушения точечных сварных соединений, корректном выборе метода задания точечной варки и критериев ее разрушения в программном комплексе ANSYS LS-DYNA. Высокая корреляция результатов расчета и эксперимента позволяет эффективно использовать разработанные методические рекомендации к моделированию точечных сварных соединений при расчетной оценке прочности более сложных конструкций машиностроения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны методические рекомендации по моделированию точечных сварных соединений на основе результатов экспериментальных данных. Методика апробирована для точечных сварных соединений с диаметром сварных точек 3 и 5 мм и основой лист толщиной 1 мм из стали 08пс. Апробация выполнена для двух режимов нагружения: при срезе сварных точек и отрыве. Результаты моделирования показали высокую сходимость с натурным экспериментом. Отклонения расчетных значений разрушающих усилий от экспериментальных при срезе и отрыве точечных сварных соединений не превысили 0,1 кН (менее 5 %). Высокая точность моделирования точечной сварки позволит проводить расчетные исследования более сложных машиностроительных конструкций, таких как кузова автомобилей, кабины, панели обшивки и т.д.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Катаев, Р. Ф. Теория и технология контактной сварки: учебное пособие / Р. Ф. Катаев, В. С. Милютин, М. Г. Близник. – Томск: Урал. ун-т, 2015. – 144 с.

2. Radakovic, D. J. An evaluation of the cross-tension test of resistence spot welds in high-strength dual-phase steels / D. J. Radakovic, M. Tumuluru // Welding journal. – 2012. – Vol. 91. – pp. 8–15.

3. Finite element modeling of deformation and fracture of advanced high strength steels dissimilar spot welds / S. Dancette, T. Huin, D. Fabrègue [et. al.] // Engineering fracture mechanics. – 2021. – No 258 (3). – pp. 108092.

4. Угловский, А. С. Численный метод моделирования процессов точечной контактной сварки / А. С. Угловский, И. М. Соцкая, Е. В. Шешунова // Вестник АПК Верхневолжья. – 2021. – № 2. – С. 85–92.

5. Deformable Spotwelds in LS-DYNA for Impact and NVH Applications // d3View. – URL: https://www.d3view.com/wp-content/uploads/2006/12/Deformble_Spotwelds_in_LS-DYNA_ for_Impact.pdf (date of access: 20.09.2024).

6. Определение параметров полилинейной модели материала и моделирование пластического деформирования балочных конструкций машин / А. В. Омелюсик, А. В. Шмелев, А. Г. Кононов [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2017. – № 2. – С. 19–27.

Представлено 07.10.2025