СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ ВНАХЛЕСТ ПЛАСТИН ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Маркин Олег Владимирович
ведущий инженер-конструктор
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»,
РФ, г. Обнинск
E-mail: movl2007@mail.ru

Комиссар Олег Николаевич
директор по научной работе
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»,
РФ, г. Обнинск

Буш Александр Валерьевич
начальник конструкторского отдела
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»,
РФ, г. Обнинск

DETERMINATION OF THE STRENGTH OF THE ADHESIVE JOINT OF THE OVERLAP OF ALUMINUM ALLOY PLATES

Oleg Markin
Leading Design Engineer
JSC "ONPP "Technology" named after A.G. Romashina",
Russia, Obninsk

Oleg Commissioner
Director of Research
JSC "ONPP "Technology" named after A.G. Romashina",
Russia, Obninsk

Alexander Bush
Head of design department,
JSC "ONPP "Technology" named after A.G. Romashina",
Russia, Obninsk

АННОТАЦИЯ

В авиационной промышленности клеи применяются главным образом для склеивания металлов. Одним из часто используемых в авиационной промышленности металлов является алюминиевый сплав марки Д16Т. Применение клееных конструкций имеет ряд преимуществ по сравнению с применением обычных клепанных конструкции. Это, прежде всего, высокая прочность при соединении тонких металлических листов, повышение предела усталости за счет устранения концентрации напряжений, присущей клепаным, болтовым и сварным конструкциям, меньшая (по сравнению с клепаными конструкциями) скорость развития трещин. В ряде случаев клеевые соединения могут быть герметичными, что позволяет упростить и повысить надежность уплотнений отдельных узлов и элементов конструкций. Большой проблемой является определение прочности клеевого соединения при помощи численных методов и натурных испытаний. Сложность определения прочности клеевого соединения вызвана явлениями физико-химической адсорбции, которая воздействует на частицы эпоксидной смолы и приводит к их концентрированию в приграничной зоне с соответствующим упрочнением клея в приграничной зоне клеевого шва. Так же сложности в анализе прочности добавляют краевые эффекты

Библиографическое описание: Маркин О.В., Комиссар О.Н., Буш А.В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ ВНАХЛЕСТ ПЛАСТИН ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2024. 3(120). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17091

напряженного состояния клеевого шва и невозможность реализации чистого сдвига при натурных испытаниях клееных пластин. Все эти сложности оценки прочности клеевого соединения, включая оценку влияния физико-химической адсорбции клея в приграничных зонах клеевого шва, более подробно рассмотрены в данной работе.

ABSTRACT

In the aviation industry, adhesives are mainly used for bonding metals. One of the metals often used in the aviation industry is the aluminum alloy of the D16T brand. The use of glued structures has a number of advantages over the use of conventional riveted structures. These are, first of all, high strength when joining thin metal sheets, an increase in the fatigue limit by eliminating the stress concentration inherent in riveted, bolted and welded structures, and a lower crack development rate (compared with riveted structures). In some cases, adhesive joints can be sealed, which makes it possible to simplify and increase the reliability of seals of individual components and structural elements. The big problem is to determine the strength of the adhesive joint using numerical methods and field tests. The difficulty of determining the strength of the adhesive joint is caused by the phenomena of physico-chemical adsorption, which affects the particles of epoxy resin and leads to their concentration in the boundary zone with the corresponding hardening of the adhesive in the boundary zone of the adhesive seam. The edge effects of the stress state of the adhesive seam and the impossibility of realizing a net shift during full-scale tests of glued plates also add difficulties in strength analysis. All these difficulties in assessing the strength of the adhesive joint, including assessing the effect of physico-chemical adsorption of glue in the boundary zones of the adhesive seam, are discussed in more detail in this paper.

Ключевые слова: клеевое соединение, прочность клеевого шва, клей, Nastran, Femap.
Keywords: adhesive joint, adhesive seam strength, glue, Nastran, Femap.

Рассматривается два варианта постановки натурных испытаний прочности клеевого соединения пластин (КСП) – испытание клеевого соединения 2-х пластин (вар. №1) и испытания клеевого соединения 3-х пластин (вар. №2). Геометрические размеры пластин для обоих вариантов испытаний одинаковы и составляют: длина -60 мм, ширина- 20 мм, толщина- 2 мм. Материал пластин – алюминиевый сплав Д16Т. Толщина клеевого шва-2 мм.

На рис. 1 представлена конечно-элементная постановка испытания клеевого соединения 2-х пластин. Для снижения размерности конечно-элементной модели (кэм) клеевого соединения пластин используются условия геометрической симметрии и кэм КСП создана в виде пластин шириной 10 мм с нагрузкой 2500 Н.

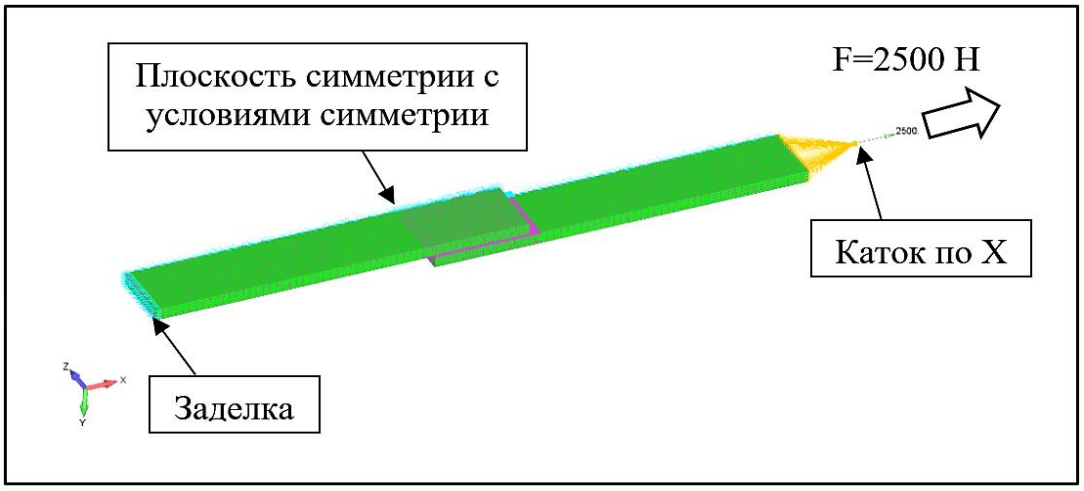

Рисунок 1. Кэм КСП

В постановке решения клеевого соединения пластин (для вар. №1 и вар. №2) имеются следующие допущения:

1. Ввиду отсутствия данных о модуле упругости клея ВК-36, расчетные характеристики клея задавались на основе клея Loctite Hysol EA 9392 Aero (на основе эпоксидной смолы) указанные в таб. 1.

Таблица 1.

Расчетные характеристики клея

Свойства клея	E, МПа	μ	Предел прочности при испытании образца клея на растяжение, МПа
Loctite Hysol EA 9392 Aero	3300	0,33	50

2. Клей в жидком состоянии, контактируя с поверхностью металла, подвергается действию сил физической и химической адсорбции, которая воздействует на частицы эпоксидной смолы и приводит к их концентрированию в приграничной зоне (рис. 2). Такой эффект приводит к значимому увеличению модуля упругости и прочности клея в приграничной зоне. Основываясь на данных работы [2], толщина приграничной зоны составляет 0,15 h, где h- толщина клеевого шва (в данной работе h=2 мм). В связи с этим, конечно-элементная структура клеевого шва создана таким образом, чтобы толщина приграничных элементов шва составляла $h_{пригр.}$=0,15 мм. Более подробно конечно-элементная структура клеевого шва представлена на рис. 2.

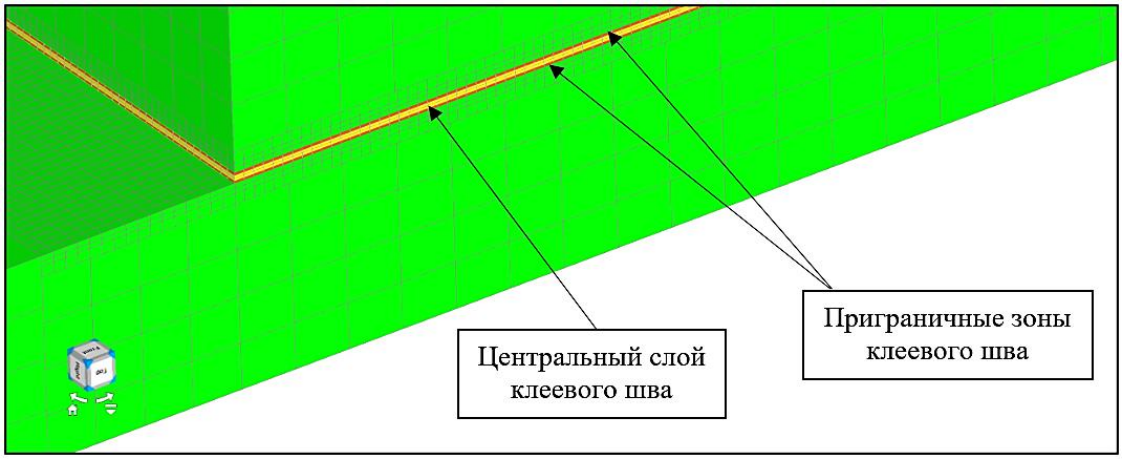

Рисунок 2. Конечно-элементная структура клеевого шва

3. Ввиду отсутствия данных о диаграмме растяжения рассматриваемого клея, расчетная диаграмма задана на основе данных о растяжении эпоксидной смолы. В некоторых источниках зависимость σ-ε при растяжении образца чистой эпоксидной смолы представлена практически в линейном виде. В других источниках диаграмма растяжения “усиленной” эпоксидной смолы представлена с выраженной зоной пластичности [1]. Расчетная диаграмма деформаций клея включает зону пластичности и указ. на рис. 3.

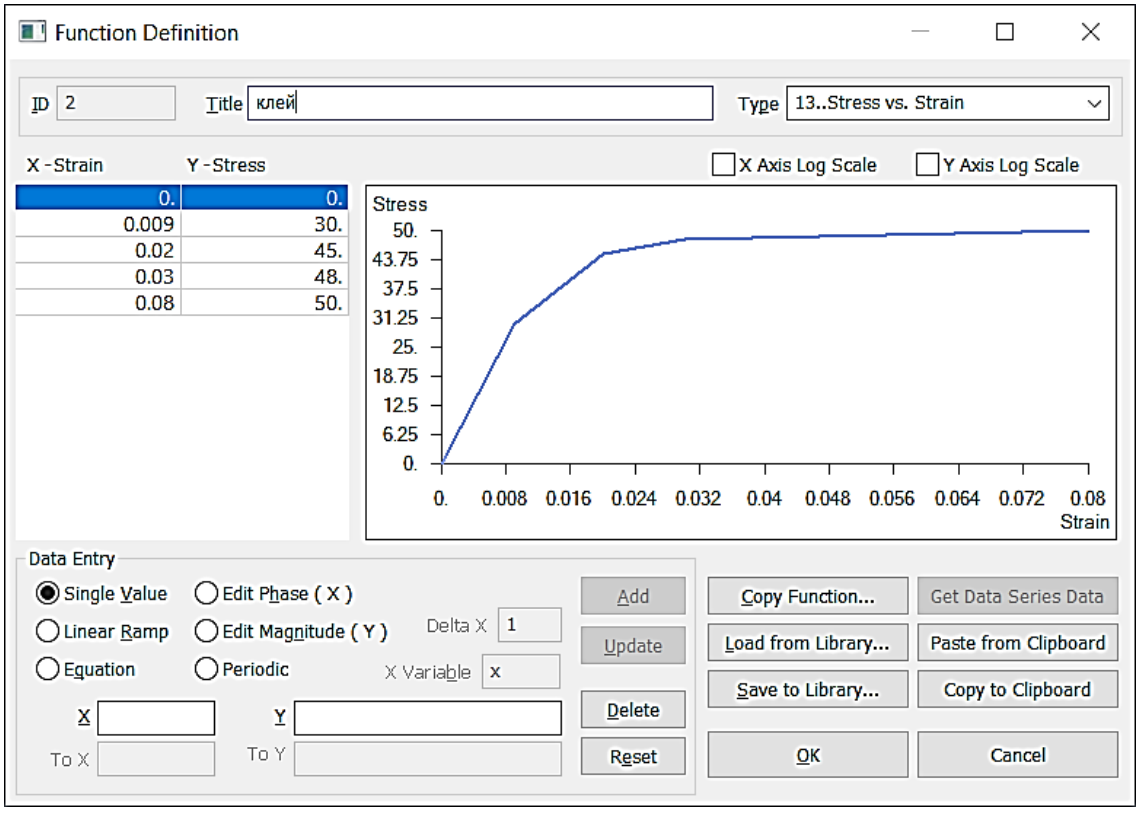

Рисунок 3. Расчетная диаграмма растяжения клея

Расчетная диаграмма растяжения алюм. сплава Д16Т представлена на рис. 4.

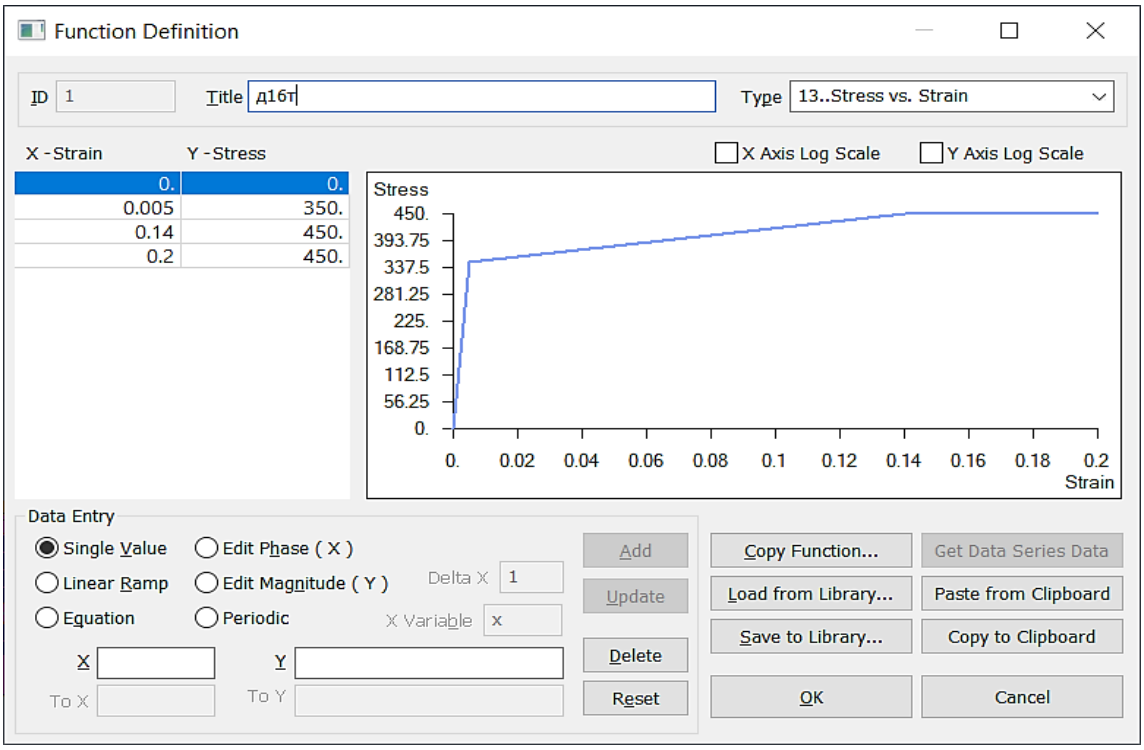

Рисунок 4. Расчетная диаграмма растяжения д16т

На рис. 5-7 представлены результаты решения КСП (вар. №1) в линейной постановке (без учета материальной нелинейности).

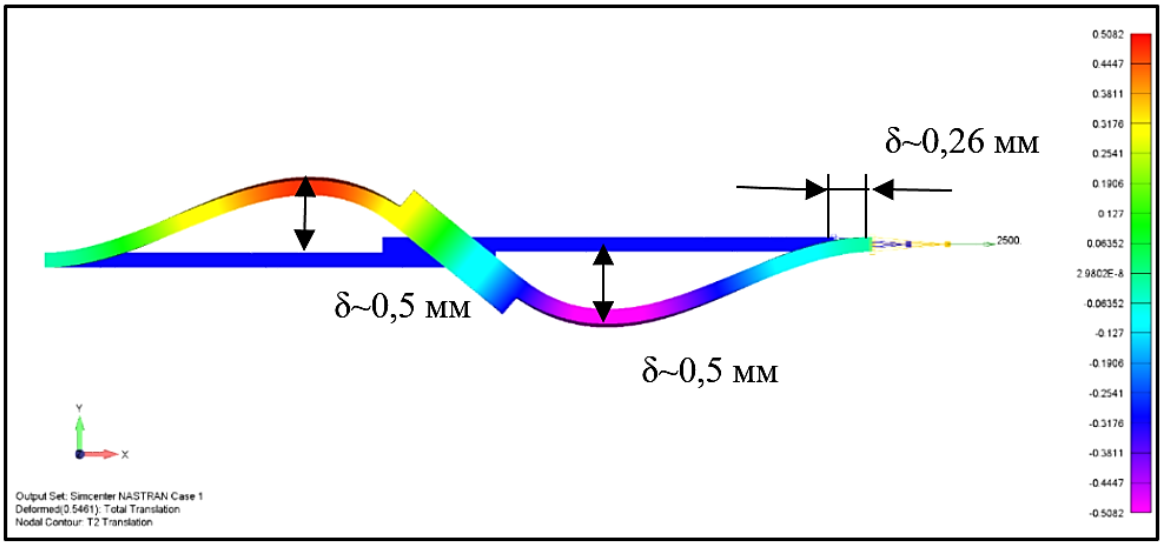

Рисунок 5. Деформированное состояние и распределение вертикальных перемещений (мм)

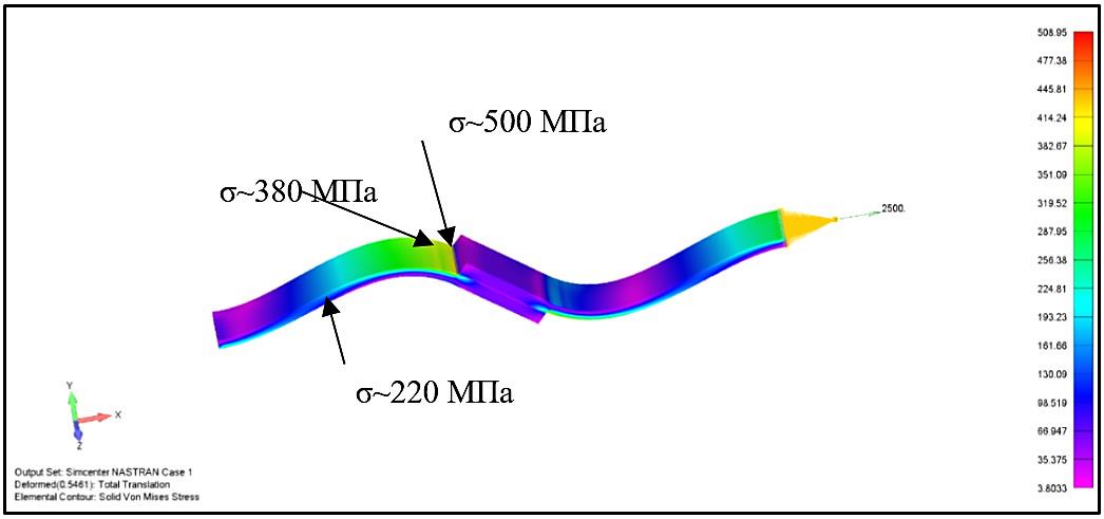

Рисунок 6. Деформированное состояние и распределение эквивалентных напряжений Мизеса (Mпа)

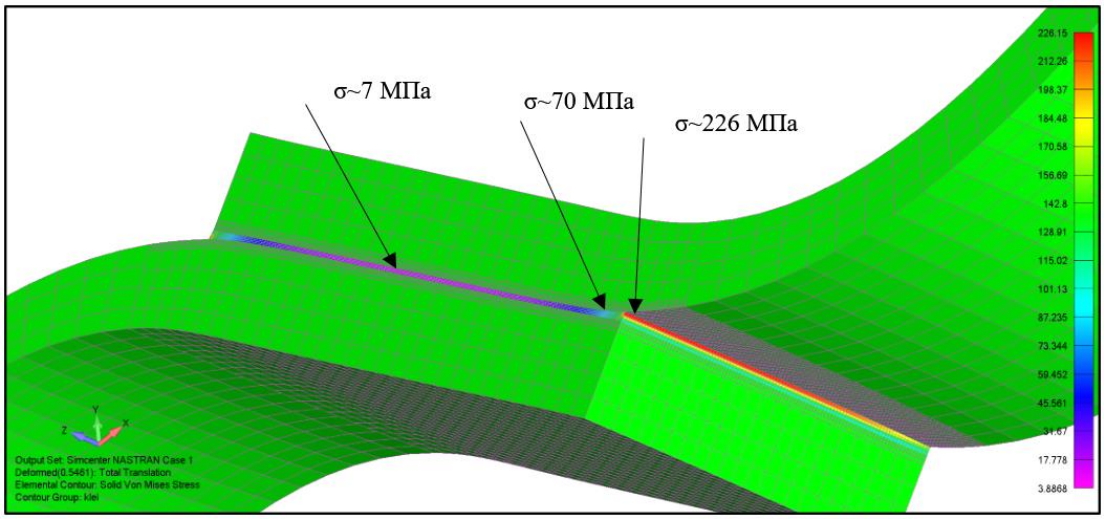

Рисунок 7. Деформированное состояние и распределение эквивалентных напряжений Мизеса (Mпа) в клеевом шве

Из рис. 6-7 видна необходимость нелинейного решения с учетом пластичности материалов. Прочности клея будет определяться по критерию максимальных деформаций. При нелинейном решении нагрузка увеличивается линейно за 15-ть равных шагов. Результаты нелинейного решения представлены на рис. 8-10. На рис.8 представлено деформированное состояние и распределение вертикальных перемещений КСП при максим. нагрузке F.

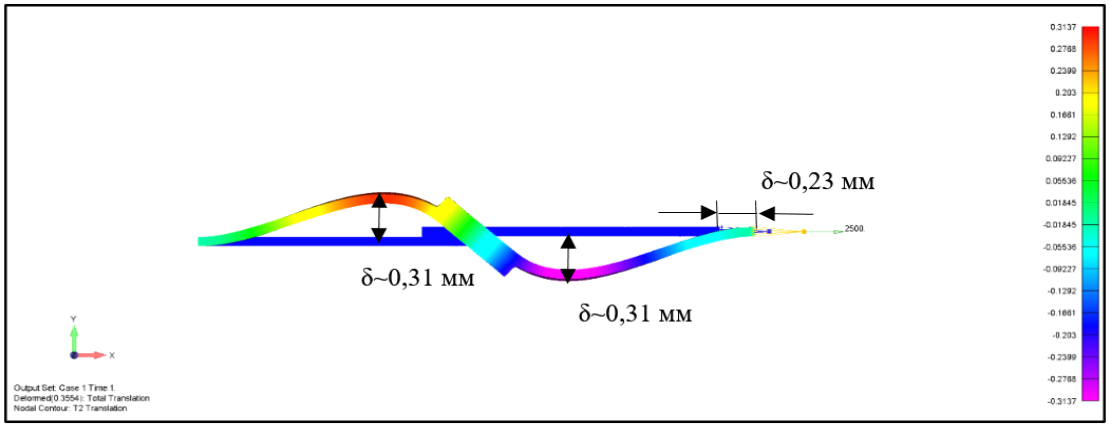

Рисунок 8. Деформированное состояние и распределение вертикальных перемещений (мм)

На рис. 9 представлено деформированное состояние и распределение полей эквивалентных напряжений по пластинам.

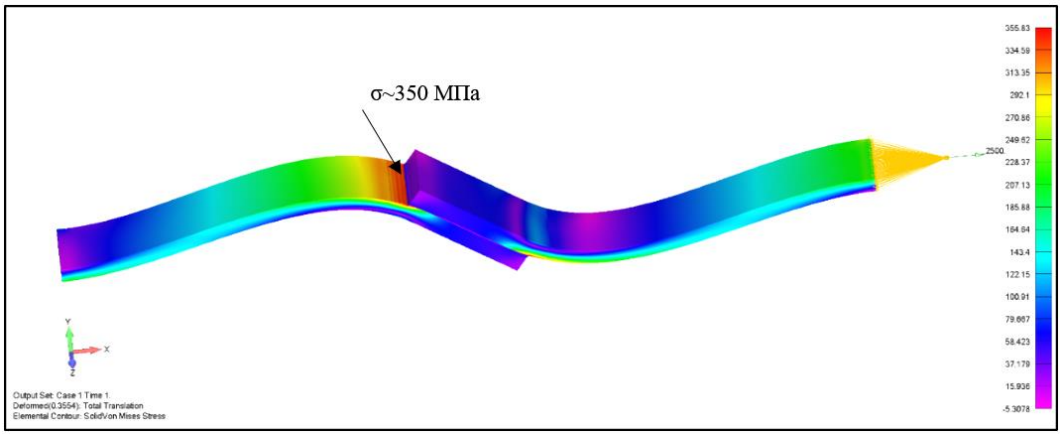

Рисунок 9. Деформированное состояние и распределение напряжений Мизеса (МПа)

Распределение полей деформаций по клеевому шву при нагрузке F представлено на рис. 10.

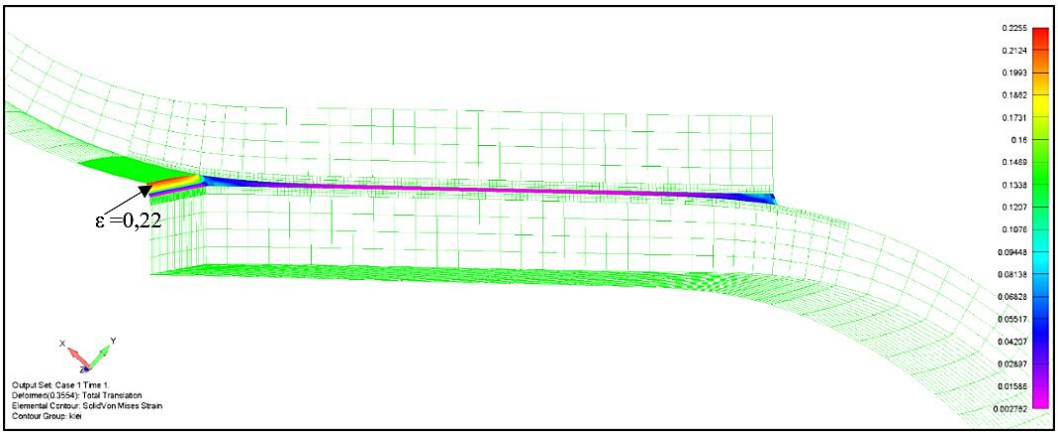

Рисунок 10. Деформированное состояние клеевого шва и распределение полей эквивалентных деформаций Мизеса

Предельные деформации в клеевом шве в интервале значений нагрузки 0,47F - 0,54F (исходя из диаграммы на рис.3, $\varepsilon_{пред.} = 0,08$).

На рис. 11 представлено распределение экв. напряжений Мизеса в клеевом шве при 0,54 F.

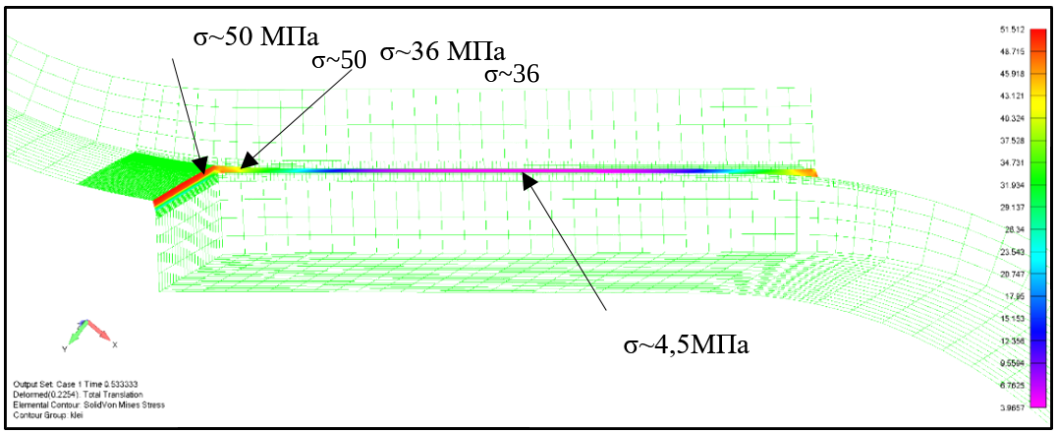

Рисунок 11. Деформированное состояние и распределение эквивалентных напряжений Мизеса (Мпа) в клеевом шве

Зависимость деформаций клея от шага нагружения КСП 2-х пластин представлено на рис. 12.

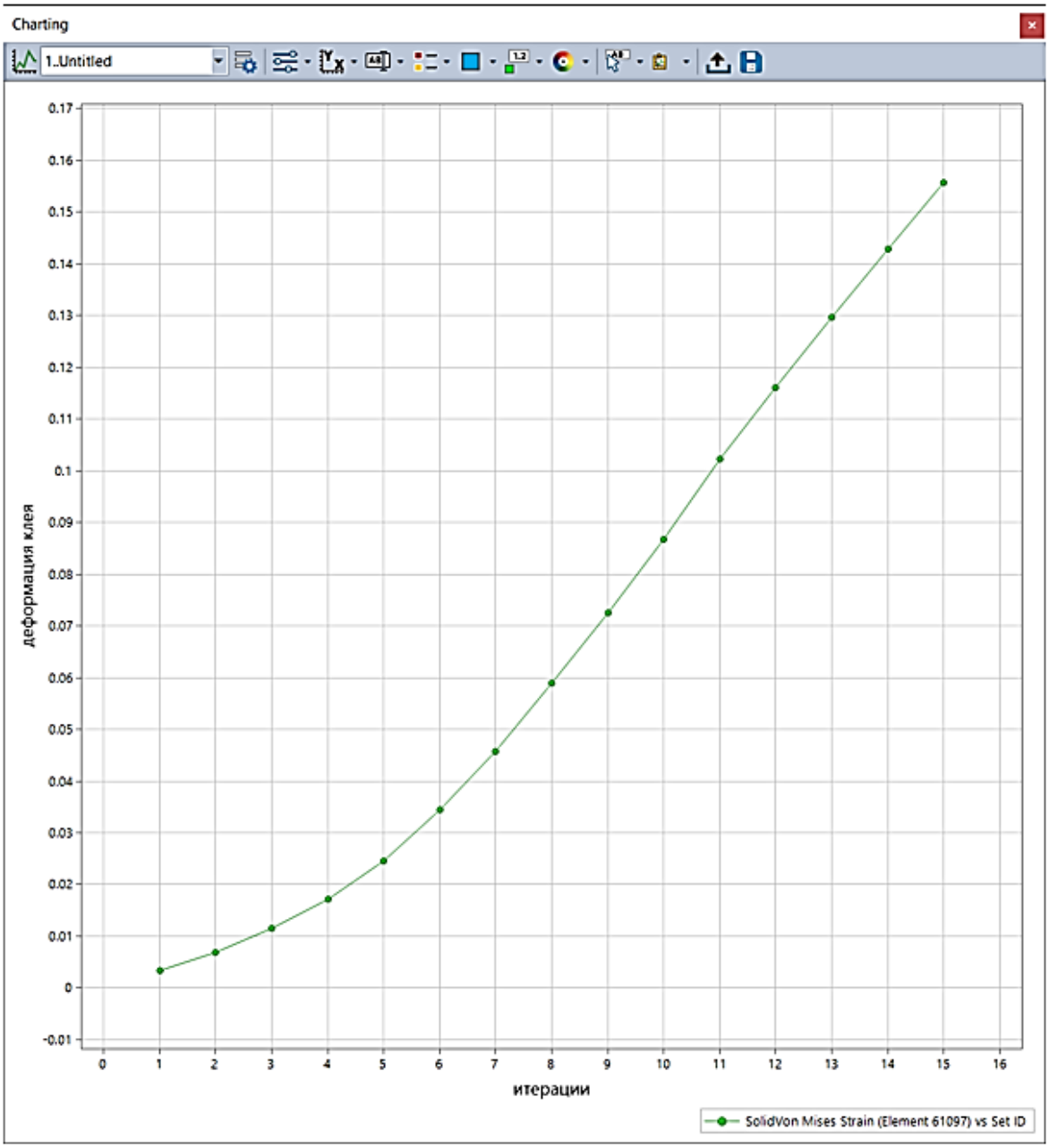

Рисунок 12. Зависимость деформаций клея от шага нагружения КСП 2-х пластин

Постановка решения КСП 3-х пластин аналогична постановке решения КСП 2-х пластин и показана на рис. 13.

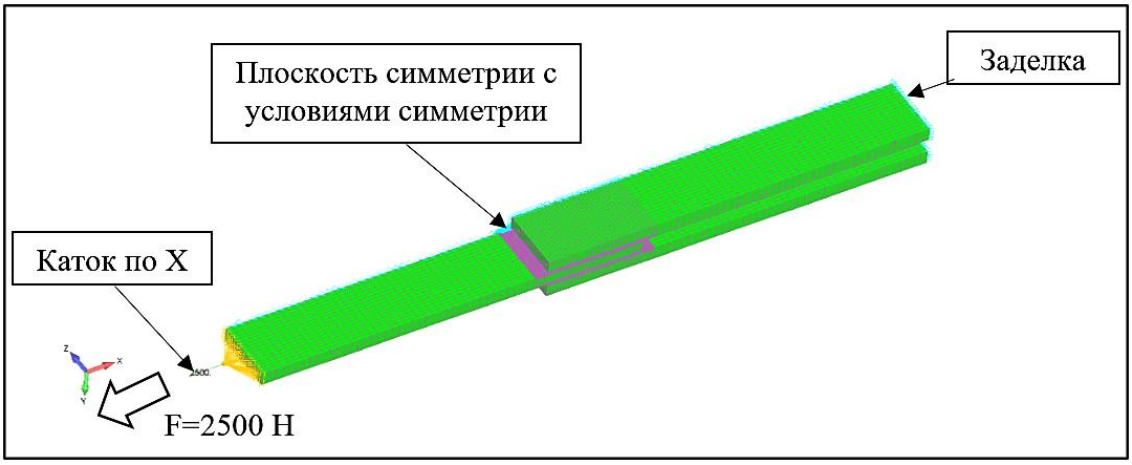

Рисунок 13. Кэм КСП 3-х пластин

На рис. 14-15 представлены результаты решения в линейной постановке КСП 3-х пластин. На рис. 14. представлено деформированное состояние КСП 3-х пластин и распределение эквивалентных напряжений по гипотезе формоизменения Мизеса (Мпа) по пластинам. На рис.15 представлено распределение напряжений Мизеса по клеевому шву.

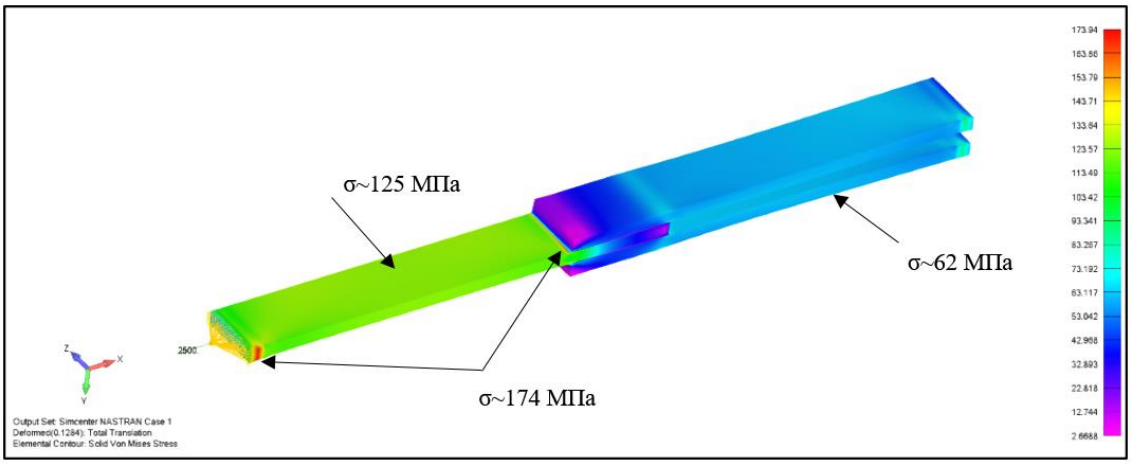

Рисунок 14. Деформированное состояние и распределение эквивалентных напряжений Мизеса (Мпа)

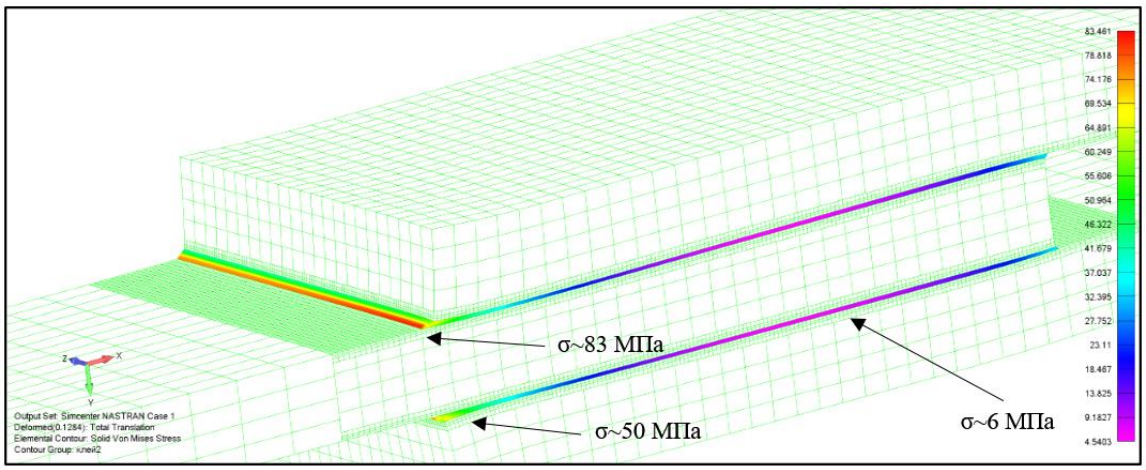

Рисунок 15. Деформированное состояние и распределение эквивалентных напряжений Мизеса (Мпа) в клеевом шве

Из рис. 15 видна необходимость нелинейного решения КСП 3-х пластин с учетом пластичности клея. На рис. 16-17 представлены результаты нелинейного решения.

На рис. 16 представлено распределение напряжений Мизеса по клеевому шву.

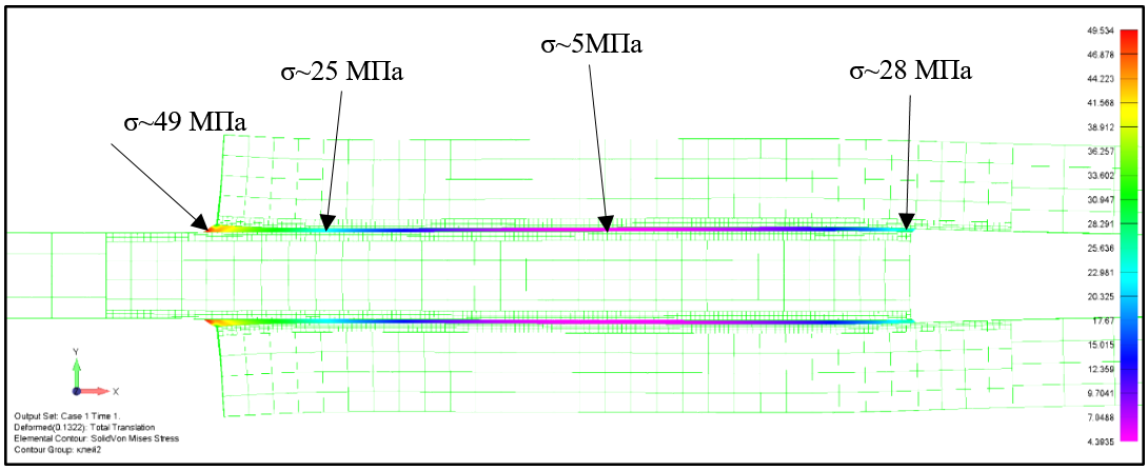

Рисунок 16. Деформированное состояние и распределение эквивалентных напряжений Мизеса (Мпа) в клеевом шве

Зависимость деформаций клея от шага нагружения КСП 3-х пластин представлено на рис. 17.

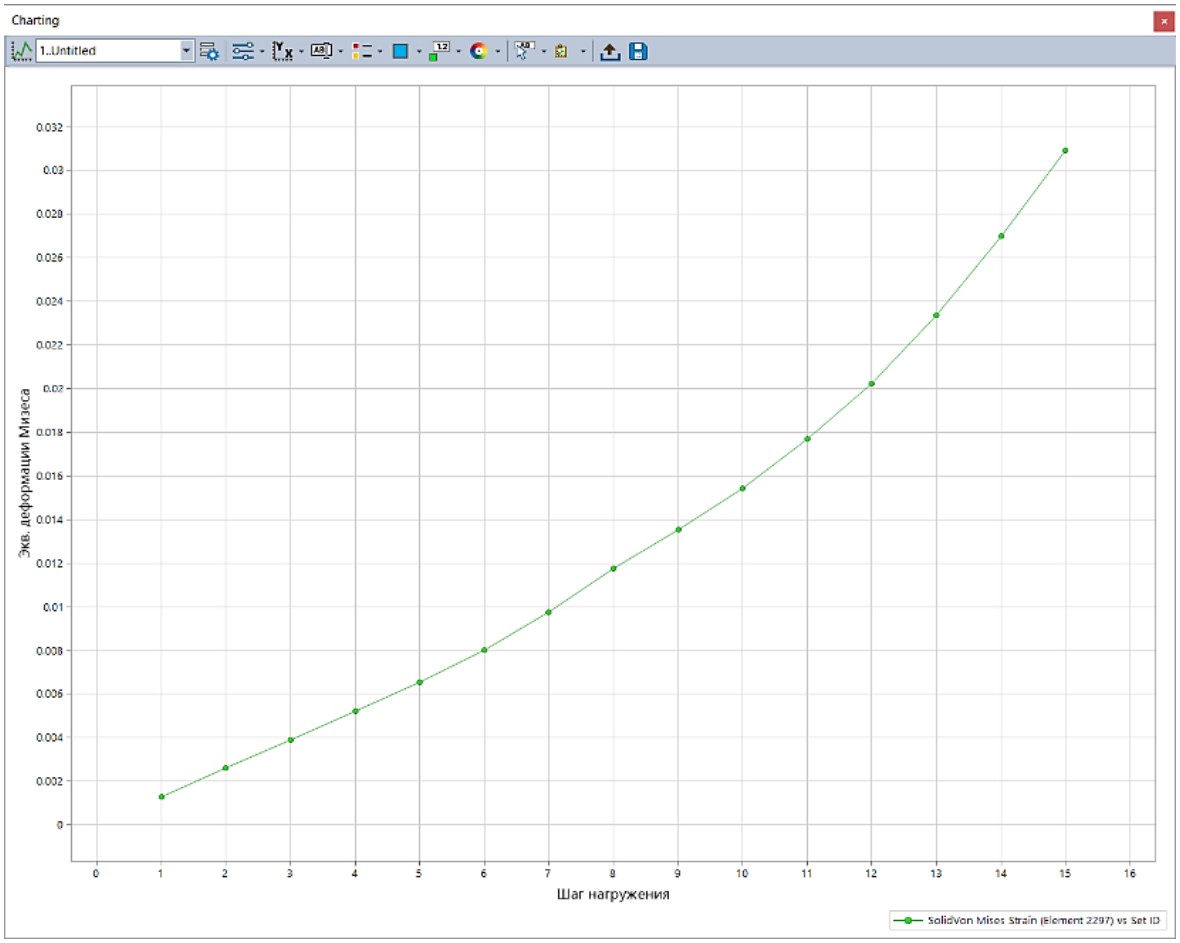

Рисунок 17. Зависимость деформаций клея от шага нагружения КСП 3-х пластин

Как видно из диаграммы на рис. 17, максимальные деформации клея (для КСП 3-х пластин) составляют ε_{max}= 0,031, что значимо меньше предельных деформаций клея $\varepsilon_{пред.}$ = 0,08. При этом, такая деформация практически соответствуют величине деформации $\varepsilon_т$= 0,032, при которой начинаются пластические течения клея (исходя из диаграммы на рис. 3).

Выводы

Как видно из рис. 5, при испытании клеевого соединения 2-х пластин форма деформаций КСП будет соответствовать выраженному изгибу, при котором значения вертикальных перемещений превышают практич. в два раза значения продольных перемещений. При этом разрушающая нагрузка, при которой деформации клея достигнут своих предельных значений, составит F~1200 Н.

Из рис. 14-15 следует, что при испытании клеевого соединения 3-х пластин, форма деформаций клеевого шва будет практич. соответствовать сдвигу с максимальными значениями деформаций в зонах краевого эффекта. При этом, более подробный анализ распределения полей напряжений в клеевом шве дает основания предположить, что поле максимальных напряжений распространяется не только на приграничный слой (который может упрочняться за счет физико-химической адсорбции), но и затрагивает срединный слой клеевого шва. Исходя из этого, есть основания полагать что разрушения клея начнется со срединного слоя шва и явление физико-химической адсорбции приграничных слоев не будет искажать картину прочности. На рис. 18 представлено распределение полей экв. напряжений по толщине клеевого шва.

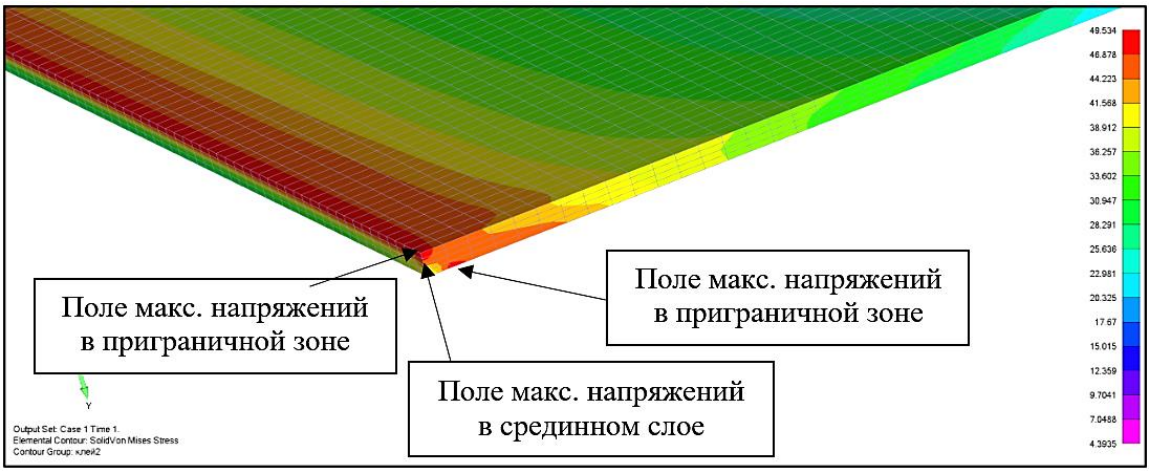

Рисунок 18. Поля напряжений Мизеса по толщине клеевого шва КСП 3-х пластин

Однако, такое утверждение может оказаться справедливым для клеевых швов толщиной не более 2 мм и для более толстых слоев клея необходимы будут дополнительные исследования.

Список литературы:

1. Dean G., Crocker L. The Use of Finite Element Methods for Design with Adhesives. Material Centre National Physical Laboratory. URL: http://www. researchgate.net/publication/242208595.
2. Анасевич К., Кучмашевский Ю. Кажущийся модуль Юнга клея при численном моделировании клеевых соединений. URL: http://doi.org/10.3390/ma14020328/ - 2021, 14(2), 328.