Научная статья
УДК 539.3
URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=189686
EDN: https://www.elibrary.ru/NPECNM

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ЖЕСТКОСТИ НА СМЯТИЕ ПЛАСТИН ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА В ЗОНЕ УСТАНОВКИ КРЕПЕЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ

П.А. Архипов✉

Акционерное общество «АэроКомпозит», г. Москва, Россия

✉ p.a.arkhipov@yandex.ru

Цитирование: Архипов П.А. Методика моделирования нелинейной жесткости на смятие пластин из композиционного материала в зоне установки крепежных элементов для решения задач статической прочности // Труды МАИ: электрон. журнал. № 150.
URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=189686

Аннотация. Рассмотрены методы моделирования крепежных элементов в конечно-элементных моделях, разработанных для анализа статической прочности. Представлена методика моделирования нелинейной жесткости на смятие пластин из композиционного материала с симметричной и сбалансированной укладкой слоев в зоне установки крепежных элементов для решения задач статической прочности.

Для моделирования жесткости на смятие пластины из композиционного материала используются два элемента CBUSH (в терминах программного комплекса MSC.NASTRAN):

1. Элемент CBUSH №1 моделирует линейную жесткость на смятие;
2. Элемент CBUSH №2 моделирует нелинейную жесткость на смятие, которая определяется из результатов испытаний согласно ASTM D5961.

Алгоритм для вычисления линейной жесткости на смятие для элемента CBUSH №1 состоит из последовательных шагов:

1. Вычисление линейной жесткости на смятие для типовой конечно-элементной модели пластины и болта с использованием трехмерных твердотельных элементов;

2. Вычисление линейной жесткости на смятие для конечно-элементной модели пластины, соответствующей типовой зоне моделирования крепежного элемента в конечно-элементной модели детали;

3. Вычисление линейной жесткости на смятие для элемента CBUSH №1 как разницы между линейной жесткостью на смятие, полученной в шаге №1, и линейной жесткостью на смятие, полученной в шаге №2.

Для элемента CBUSH №2 задается график «Перемещение-Сила», который разрабатывается по результатам испытаний образцов согласно ASTM D5961.

Проведена модификация двух существующих вариантов моделирования крепежных элементов. Проведен расчет тестовой задачи с представлением результатов с существующим вариантом моделирования крепежных элементов и с учетом его доработки по представленной методике. Представленный подход позволяет обоснованно рассчитать нагрузки на крепеж многоболтового соединения и крепеж не силовых элементов к силовым элементам конструкции при нагрузках, близких к предельным по критерию смятие под крепежным элементом.

Ключевые слова: крепёжный элемент; конечно-элементная модель; жесткость на смятие; композиционный материал.

METHOD OF MODELLING NONLINEAR BEARING STIFFNESS OF COMPOSITE LAMINATES PLATES IN THE AREA OF INSTALLATION OF THE FASTENER FOR STATIC STRENGTH ANALYSIS

P.A. Arkhipov✉

Joint Stock Company «AeroComposit», Moscow, Russia

✉ p.a.arkhipov@yandex.ru

Citation: Arkhipov P.A. Method of modelling nonlinear bearing stiffness of composite laminates plates in the area of installation of the fastener for static strength analysis // Trudy MAI. 2026. No. 150. (In Russ.). URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=189686

Abstract. The article considers methods for modeling fasteners in finite element models developed for static strength analysis. It presents a method for modeling nonlinear bearing stiffness of composite laminates (balanced and symmetric) plates in the area of fastener installation for solving static strength problems.

Two CBUSH elements (in terms of the MSC.NASTRAN software package) are used to model the bearing stiffness of composite laminates plates:

1. Element CBUSH №1 model linear bearing stiffness;
2. Element CBUSH №2 model nonlinear bearing stiffness, which obtained from results of testing according to ASTM D5961.

The algorithm for calculation linear bearing stiffness for element CBUSH element №1 consists of three consecutive steps:

1. Calculation the linear bearing stiffness for a typical finite element model of a plate and a bolt using three-dimensional finite elements;
2. Calculation the linear bearing stiffness for a finite element model of a plate, corresponding to a typical modeling zone of a fastener of the finite element model of the part;
3. Calculating linear bearing stiffness for element CBUSH №1 as the difference between the linear bearing stiffness, which obtained from finite element model with three-dimensional elements, and the linear bearing stiffness, which obtained using a finite element model of a typical zone of a fastener in the finite element model of the part.

Element CBUSH №2 uses a displacement-force graph that is developed from the results of testing the plate material according to ASTM D 5961.

It presents the calculation of the test task with the presentation of the results with the existing version of modeling fasteners and its modification according to the presented method.

The presented approach allows for a reasonable calculation of the loads on the fasteners of a multi-bolt connection and the fasteners of non-load-bearing elements to load-bearing elements of the structure under loads close to the ultimate according to the criterion of bearing under the fastener.

Keywords: fastener; finite element model; bearing stiffness; composite laminate plate.

Введение

В настоящее время в авиационной и ракетно-космической технике широко применяются болтовые соединения как для крепления основных силовых элементов между собой, так и для крепления вторичных не силовых элементов к какому-либо силовому элементу.

При проведении типовых конечно-элементных расчётов принимается, что соединение работает в упругой зоне, поэтому как правило в результате расчёта получается неравномерность нагружения крепежных элементов, связанная с особенностями геометрии деталей, болтов, особенностями расположения крепежных элементов, механическими характеристиками материалов болта и соединяемых пластин.

При нагружении болтовых соединений предельными статическими нагрузками происходит перераспределение нагрузки между болтами за счет:

- упругопластического поведения для материала металлических пластин;

- упругопластического поведения материала болта в зонах контакта;

- нелинейного поведения материала для пластин из композиционного материла.

В настоящее время используются упрощенные методики моделирования крепежных элементов:

Вариант №1: Моделирование крепежного элемента балочным элементом, который соединяет независимые узлы абсолютно жестких элементов, каждый из которых в свою очередь соединяет независимый узел в центре отверстия и зависимые узлы по контуру отверстия (см. рисунок 1). Данный вариант используется в [4];

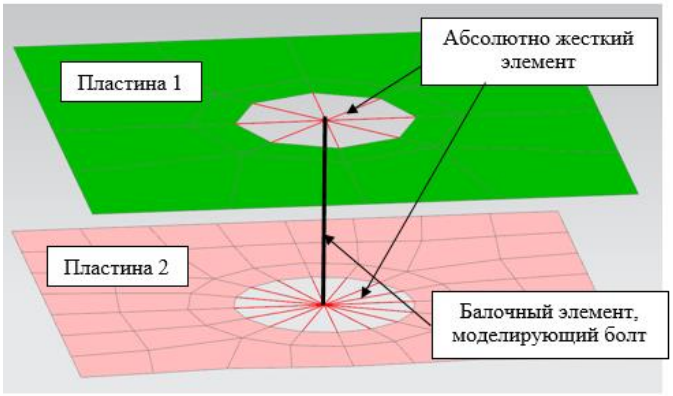
Вариант №2: Моделирование крепежного элемента балочным элементом, который соединяет независимые узлы абсолютно жестких элементов, каждый из которых в свою очередь соединяет независимый узел в центре отверстия и зависимые узлы оболочечных элементов, которые лежат от центра отверстия на расстоянии равному половине диаметра головы крепежного элемента (см. рисунок 1);

Вариант №3: Моделирование крепежного элемента балочным, который соединяет либо узлы оболочечных элементов, либо узлы интерполирующих элементов (типа RBE3 в терминах ПК MSC.NASTRAN [1]), которые соединяют ближайшие узлы оболочечных элементов (см. рисунок 1). Данный вариант используется в [5]-[13];

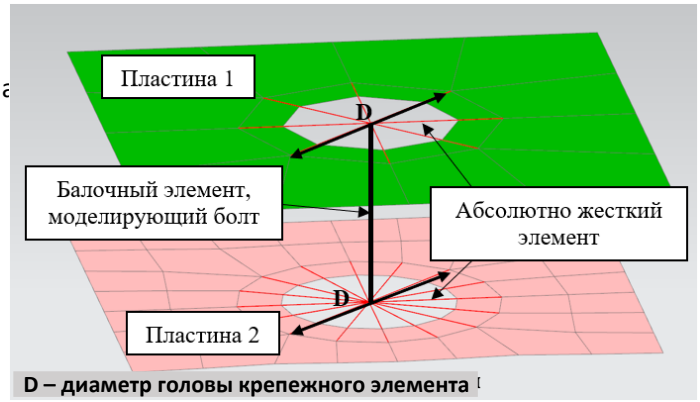
Вариант №4: моделирование крепежного элемента в соответствии с методикой Rutman, которая представлена в [2] и [3] (см. рисунок 2). Данный вариант используется в [5], [14].

Недостатком выше приведенных вариантов моделирования крепежного элемента является их линейность и как следствие отсутствие учета нелинейного поведения композиционного материала пластины в зоне контакта с телом крепежного элемента, что не позволяет корректно рассчитать нагрузки на крепеж болтового соединения при нагрузках, близких к предельным по критерию смятие под крепежным элементом.

Вариант №1



Вариант №2



Вариант №3

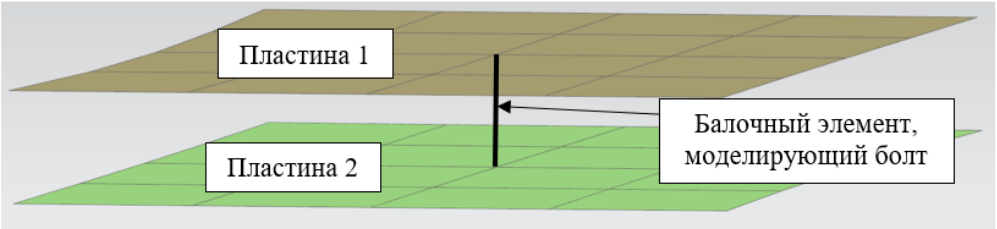


Рисунок 1 - Вариант моделирования крепежного элемента №1 – 3

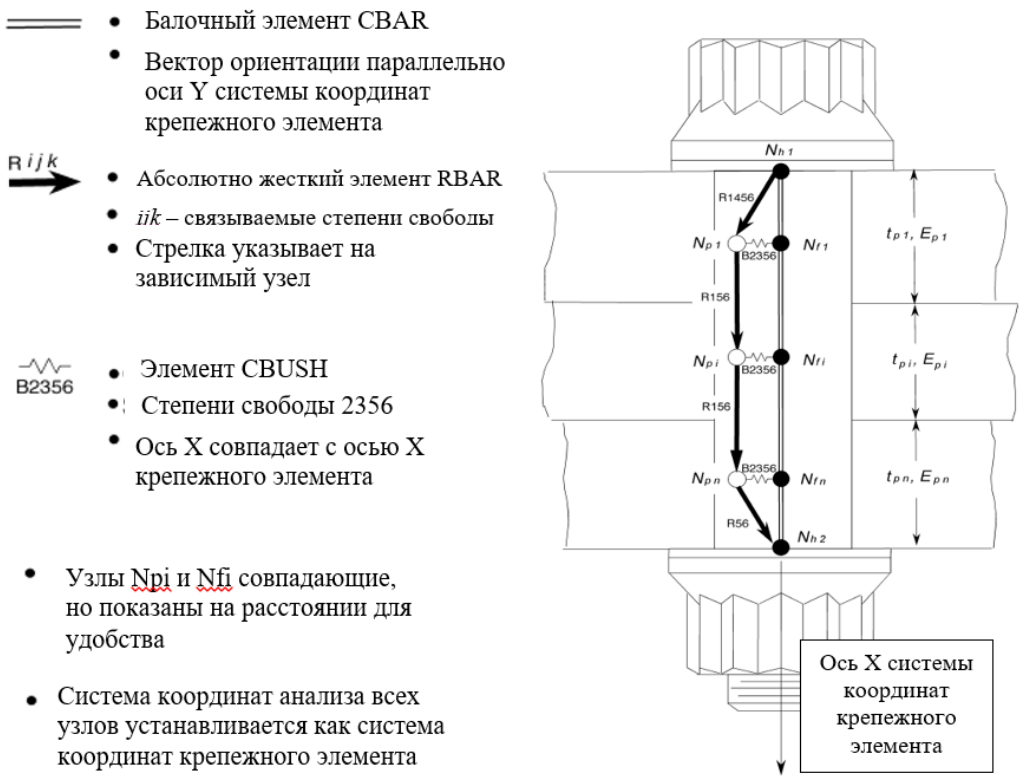


Рисунок 2 – Вариант моделирования крепежного элемента №4

В [15]-[18] представлены эмпирические формулы для вычисления поперечной жесткости крепежного элемента, где поперечная жесткость является производной от геометрии и механических характеристик материалов соединяемых металлических пластин и болта. Но такая поперечная жесткость имеет только линейный характер, а формулы актуальны для металлических пластин.

Таким образом, все варианты моделирования крепежных элементов для того, чтобы они позволили учесть корректное поведение композиционного материала пластины в зоне контакта с телом крепежного элемента, требуют доработки.

В данной статье представлена методика моделирования нелинейной жесткости на смятие пластин из композиционного материала, в которой используются результаты испытаний образцов по ASTM D5961 («Стандарт испытаний на смятие полимерных композиционных материалов»), которая предполагает доработку моделей крепежных элементов, представленных выше. Далее в статье будет рассмотрены доработки для вариантов моделирования крепежных элементов №1 и №2 в качестве примера. Варианты моделирования крепежных элементов №3 и №4 могут быть доработаны по аналогии.

Определение жесткости на смятие пластины из композиционного материала в зоне установки крепежного элемента

Определение жесткости на смятие зависит от способа моделирования связи между крепежным элементом и пластиной. Для определения жесткости на смятие крепежного элемента рассмотрено два варианта соединения крепежного элемента с пластиной через абсолютно жесткий элемент, как в вариантах моделирования крепежного элемента №1 и №2.

Для моделирования жесткости на смятие композитной пластины дополнительно последовательно устанавливаются два CBUSH-элемента между независимым узлом абсолютно жесткого элемента и узлом балочного элемента, как показано на рисунке 3.

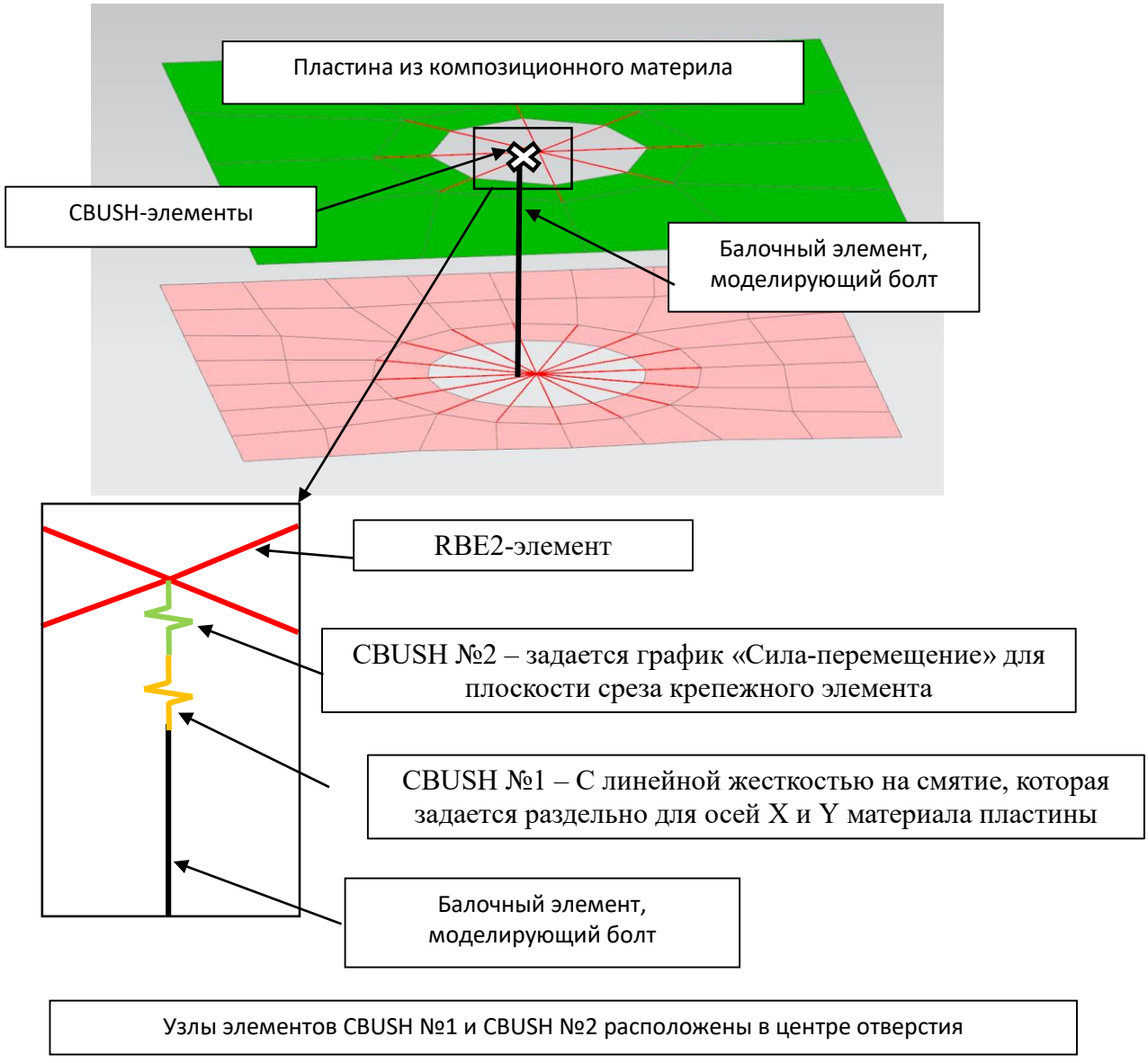


Рисунок 3 – CBUSH-элементы в составе крепежного элемента, смоделированного по варианту №2

Элемент CBUSH №1 моделирует линейную жесткость на смятие раздельно для двух направлений в плоскости среза, где направление X соответствует направлению монослоя с углом укладки 0°, а направление Y соответствует направлению монослоя с углом укладки 90°.

Элемент CBUSH №2 моделирует нелинейную жесткость на смятие в плоскости среза, полученную с использованием результатов испытаний по ASTM D5961. Жесткость на смятие для элемента CBUSH №2 задается в виде графика «Сила-перемещение».

Значения угловых жесткостей и линейной жесткости вдоль длины крепежного элемента в CBUSH-элементах принимаются такими, чтобы связи считались как абсолютно жесткие.

Порядок выполнения расчетов для получения значений линейных жесткостей для CBUSH-элемента №1:

1. Вычисление жесткости для типовой КЭМ пластины из композиционного материала и болта с использованием трехмерных конечных элементов для двух вариантов нагружения: вдоль оси X композиционного материала (вдоль монослоя с углом укладки 0°) и вдоль оси Y композиционного материала (вдоль монослоя с углом укладки 90°);

2. Вычисление жесткости для типовой КЭМ пластины из композиционного материала соответствующей типовой зоне моделирования крепежного элемента КЭМ основной детали для двух вариантов нагружения: вдоль оси X композиционного материала (вдоль монослоя с углом укладки 0°) и вдоль оси Y композиционного материала (вдоль монослоя с углом укладки 90°);

3. Вычисление линейных жесткостей для CBUSH-элемента №1 как разницы между линейными жесткостями, полученными с использованием КЭМ с трехмерными элементами (пункт 1), и линейными жесткостями, полученными с использованием КЭМ соответствующей типовой зоне моделирования крепежного элемента КЭМ основной детали (пункт 2).

График «Сила-перемещение» для элемента CBUSH №2 для моделирования нелинейной части жесткости на смятие в плоскости среза крепежного элемента

задается по результатам испытаний образцов композиционного материала по ASTM D5961.

Вычисление линейной жесткости типовой КЭМ пластины и болта с использованием трехмерных конечных элементов

Для вычисления жесткости разрабатывается типовая твердотельная КЭМ ¼ пластинки длиной и шириной 4,5d, с отверстием посередине диаметром d и толщиной пластины t. КЭМ представлена на рисунке 4.

Вычисление жесткости для типовой КЭМ пластины из композиционного материала и болта с использованием трехмерных конечных элементов проводится для двух вариантов исполнения КЭМ:

1. Ориентация оси X композиционного материала направлена вдоль оси Y глобальной системы координат для расчета жесткости при нагружении вдоль монослоя с углом укладки 0°;
2. Ориентация оси X композиционного материала направлена вдоль оси X глобальной системы координат для расчета жесткости при нагружении вдоль монослоя с углом укладки 90°.

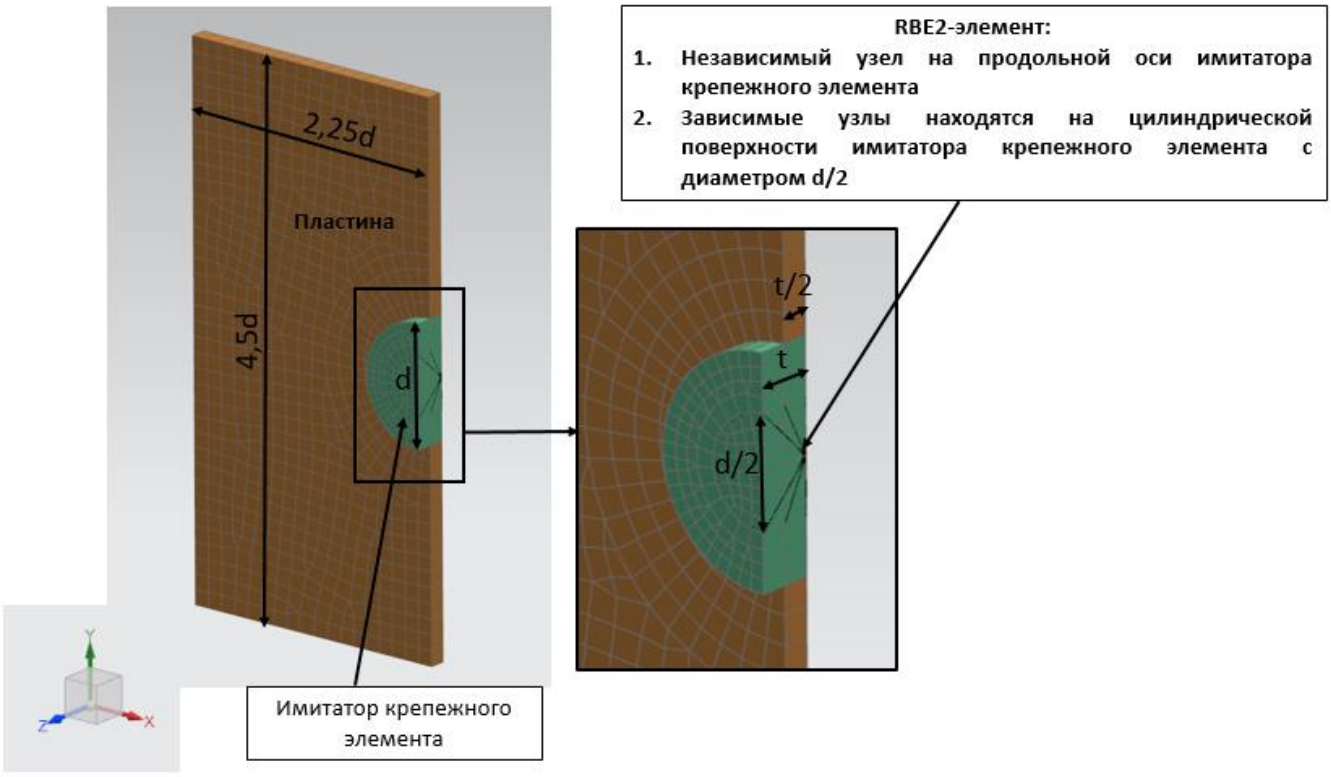


Рисунок 4 – Общий вид КЭМ

Расчет проводится с учетом контактного взаимодействия имитатора крепежного элемента и пластинки.

Нагружение КЭМ осуществляется силой $P_З$ по оси –Y, приложенной в независимом узле RBE2-элемента. Сила $P_З$ вычисляется по формуле

$$P_З = \frac{P_{доп}}{4} = \frac{d \cdot t \cdot [\sigma_{см}]}{4} \quad (1)$$

где $P_{доп}$ – допустимая срезная нагрузка на крепеж по критерию смятия пластинки под крепежным элементом, кгс;

$[\sigma_{см}]$ – допустимые напряжения на смятие под крепежным элементом композиционного материала пластинки, кгс/мм^2.

На рисунке 5 показано нагружение и закрепление КЭМ.

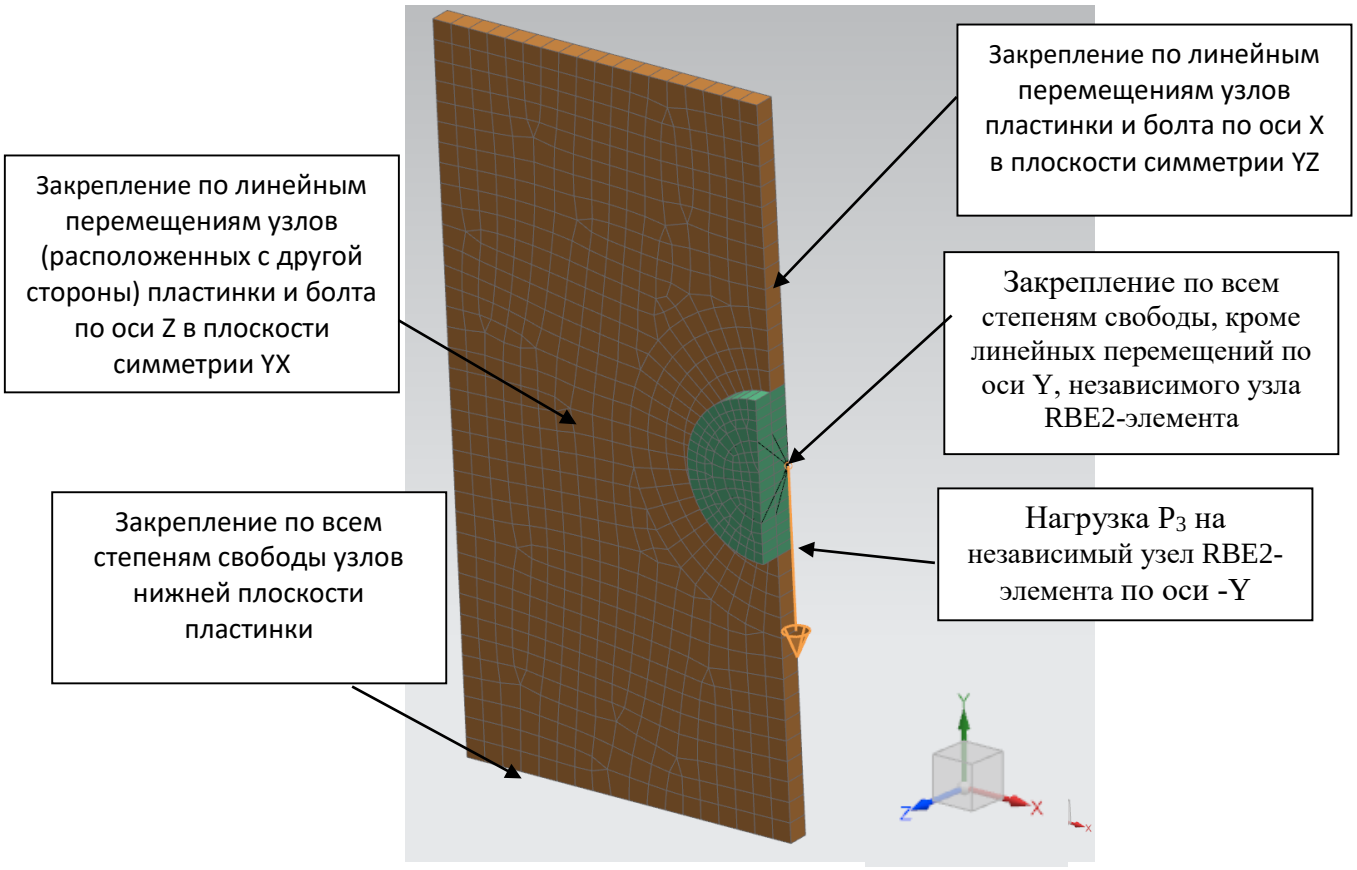


Рисунок 5 – Нагружение и закрепление КЭМ

Жесткости типовой КЭМ с трехмерными элементами вычисляются по формулам

$$K_{x\,З} = \frac{P_{доп}}{u_{x\,З}} = \frac{4 \cdot P_З}{u_{x\,З}} \quad (2)$$

$$K_{y\,3} = \frac{P_{\text{доп}}}{u_{y\,3}} = \frac{4 \cdot P_3}{u_{y\,3}} \qquad (3)$$

где $u_{x\,3}$ – перемещение независимого узла RBE2-элемента при ориентации оси X материала вдоль оси Y глобальной системы координат, мм;

$u_{y\,3}$ – перемещение независимого узла RBE2-элемента при ориентации оси X материала вдоль оси X глобальной системы координат, мм.

Вычисление линейной жесткости КЭМ пластины, соответствующей типовой зоне моделирования

Рассмотрены две типовые зоны моделирования, соответствующие вариантам крепежных элементов 1 и 2 на рисунке 1 соответственно.

На рисунке 6 слева представлена КЭМ половины пластины с вариантом типовой зоны моделирования №1, в которой зависимые узлы находятся в зоне на удалении d/2 от центра отверстия, где d-диаметр гладкой части крепежа.

На рисунке 6 справа представлена КЭМ половины пластины с вариантом типовой зоны моделирования №2, в которой зависимые узлы находятся в зоне на удалении D/2 от центра отверстия, где D-диаметр под ключ.

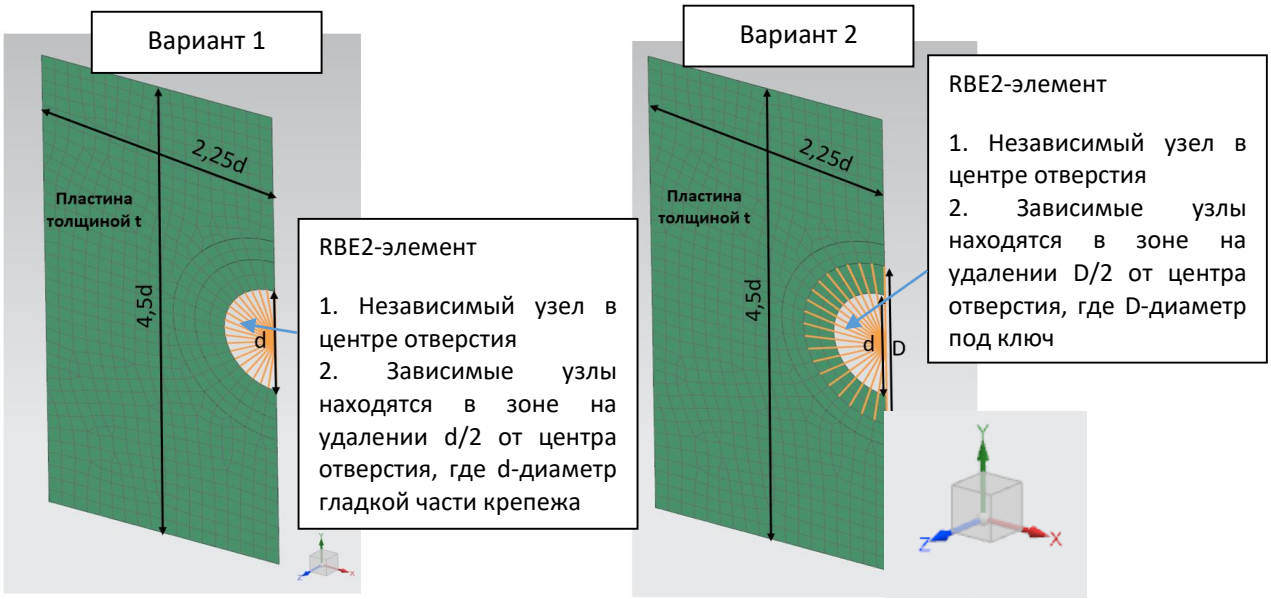


Рисунок 6 – Варианты КЭМ с типовыми зонами моделирования

Вычисление жесткости для КЭМ пластины из композиционного материала, соответствующей типовой зоне моделирования, проводится для двух вариантов исполнения КЭМ:

1. Ориентация оси X композиционного материала направлена вдоль оси Y глобальной системы координат для расчета жесткости при нагружении вдоль монослоя с углом укладки 0°;

2. Ориентация оси X композиционного материала направлена вдоль оси X глобальной системы координат для расчета жесткости при нагружении вдоль монослоя с углом укладки 90°.

На рисунке 7 представлено нагружение и закрепление типовой КЭМ зоны моделирования.

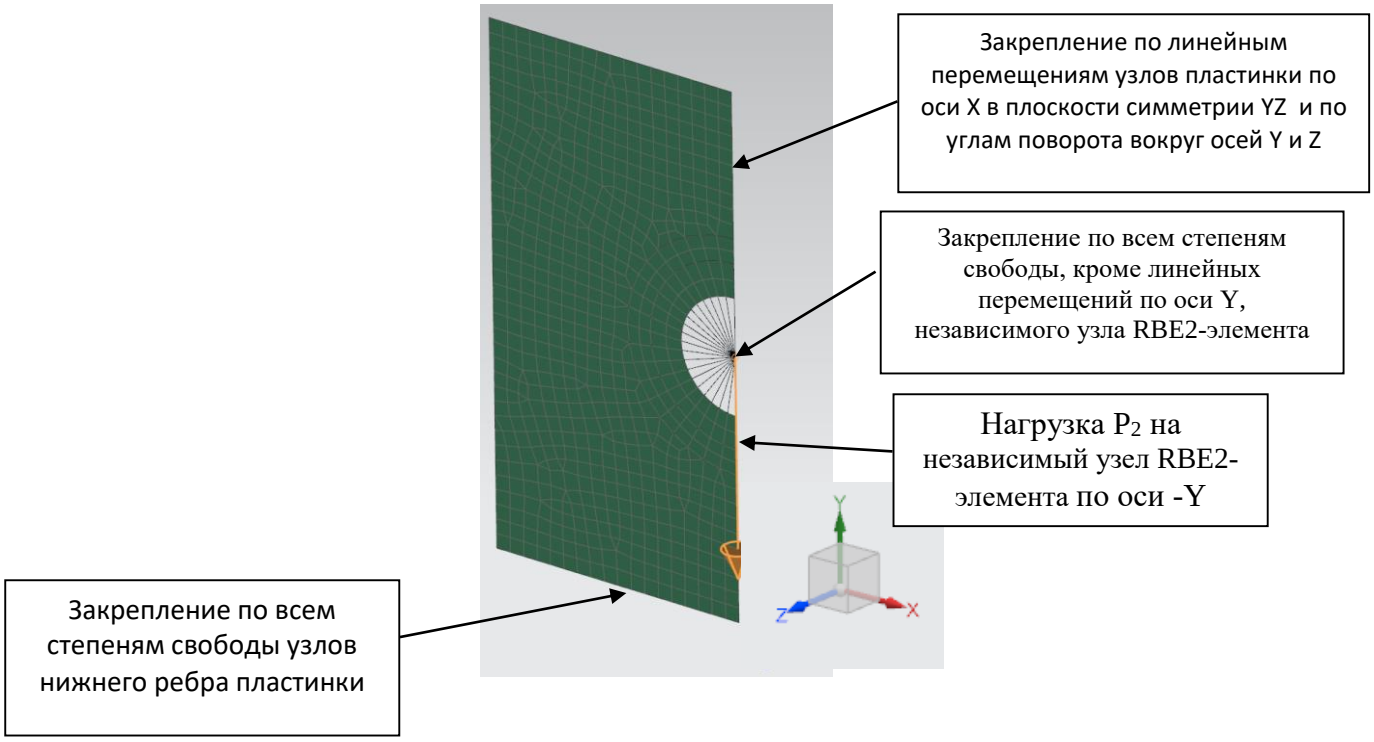


Рисунок 7 – Нагружение и закрепление типовой зоны КЭМ

Нагружение КЭМ осуществляется силой P_2 по оси –Y, приложенной в независимом узле RBE2-элемента. Сила P_2 вычисляется по формуле

$$P_2 = \frac{P_{доп}}{2} = \frac{d \cdot t \cdot [\sigma_{см}]}{2} \quad (4)$$

где $P_{доп}$ – допустимая срезная нагрузка на крепеж по критерию смятия пластинки под крепежным элементом, кгс;

$[\sigma_{см}]$ – допустимые напряжения на смятие под крепежным элементом композиционного материала пластинки, кгс/мм^2.

Жесткости КЭМ пластины из композиционного материала, соответствующей типовой зоне моделирования, вычисляются по формулам

$$K_{x\,2} = \frac{P_{\text{доп}}}{u_{x\,2}} = \frac{2 \cdot P_2}{u_{x\,2}} \quad (5)$$

$$K_{y\,2} = \frac{P_{\text{доп}}}{u_{y\,2}} = \frac{2 \cdot P_2}{u_{y\,2}} \quad (6)$$

где $u_{x\,2}$ – перемещение независимого узла RBE2-элемента при ориентации оси X материала вдоль оси Y глобальной системы координат, мм;

$u_{y\,2}$ – перемещение независимого узла RBE2-элемента при ориентации оси X материала вдоль оси X глобальной системы координат, мм.

Вычисление линейной жесткости для CBUSH-элемента №1

Жесткости для CBUSH-элемента №1 вычисляются по формулам

$$K_x = \frac{P_{\text{доп}}}{u_{x\,3} - u_{x\,2}} = \frac{K_{x\,3} \cdot K_{x\,2}}{K_{x\,2} - K_{x\,3}} \quad (7)$$

$$K_y = \frac{P_{\text{доп}}}{u_{y\,3} - u_{y\,2}} = \frac{K_{y\,3} \cdot K_{y\,2}}{K_{y\,2} - K_{y\,3}} \quad (8)$$

С учетом, что при вычислении жесткости CBUSH-элемента №1 используются КЭМ в постановке, в которых отсутствует нелинейность поведения материалов имитатора болта и пластинки и с учетом формул (3)-(5), представленных в [21] вычислив жесткости $K_x(d;t)$ и $K_y(d;t)$ для одного варианта диаметра гладкой части крепежа d и толщины пластинки t, то вычисление жесткостей $K_x(d_n;t_n)$ и $K_y(d_n;t_n)$ для другого варианта диаметра гладкой части крепежа d_n и толщины пластинки t_n может быть проведено по формулам

$$K_x(d_n; t_n) = K_x(d; t)\frac{t_n}{t} \quad (9)$$

$$K_y(d_n; t_n) = K_y(d; t)\frac{t_n}{t} \quad (10)$$

Вычисление нелинейной жесткости для CBUSH-элемента №2

На рисунке 8 представлены типовые схемы установки экстензометров при проведении испытаний на смятие по ASTM D5961 (рисунок 10 ASTM D5961) для

трех вариантов испытаний (a) и типовая схема установки двух экстензометров для варианта испытаний с одним крепежным элементом и одной плоскостью среза (b).

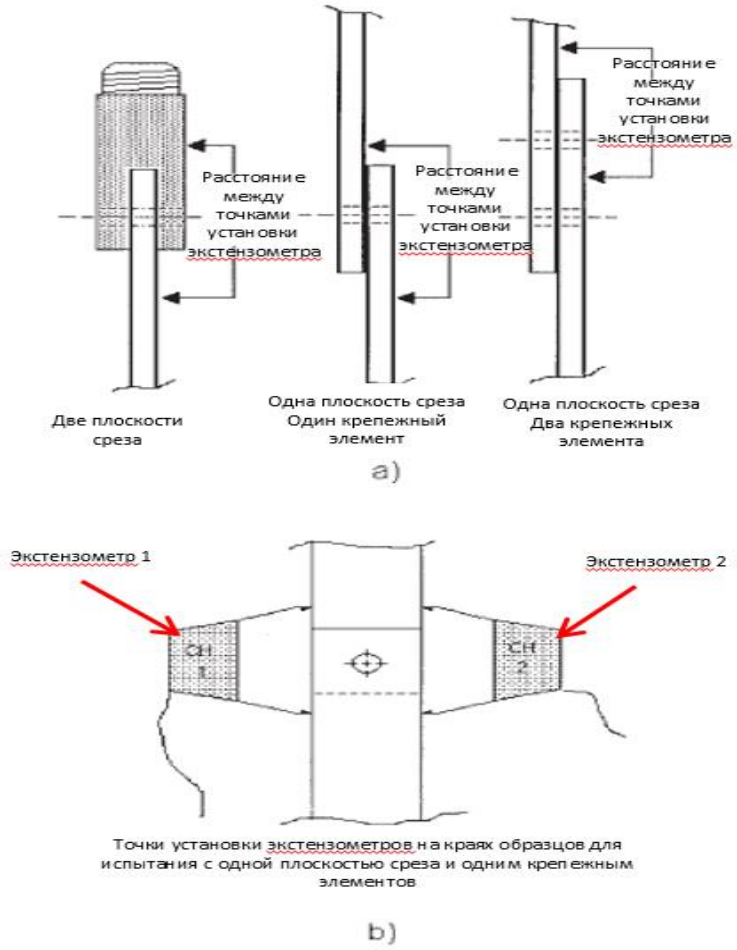


Рисунок 8 – Типовые схемы установки экстензометров при проведении испытаний

Напряжения смятия согласно пункту 13.3 ASTM D5961 вычисляются по формуле

$$\sigma_i^{br} = P_i/(k \cdot d \cdot t) \quad (11)$$

где k – коэффициент равный 1 для испытания с одним крепежным элементов и 2 для испытаний с двумя крепежными элементами

P_i – нагрузка на испытательную сборку, Н;

d – диаметр отверстия, мм;

t – толщина образца, мм.

Деформации смятия согласно пункту 13.4 ASTM D5961 вычисляются по формуле

$$\varepsilon_i^{br} = \frac{(\delta_{1i} + \delta_{2i})/2}{K \cdot d} \quad (12)$$

где δ_{1i} и δ_{2i} – показания экстензометров 1 и 2 соответственно, мм;

d – диаметр отверстия, мм;

K – коэффициент равный 1 для испытания с двумя плоскостями среза и 2 для испытаний с одной плоскостью среза.

На рисунке 9 представлен типовой график зависимости напряжений смятия от деформации смятия, полученный по результатам испытаний в соответствии с ASTM D5961. На рисунке 9 представлено графическое определение смещенной деформации смятия равной 2% и соответствующее напряжение, полученные как пересечение с графиком деформирования смещенной линии, отстоящей от линии секущего модуля на 2% по оси деформаций смятия.

Для построения графика «Сила-перемещение» для элемента CBUSH №2 определяется дополнительно предел пропорциональности на смятие $\sigma_{пц\ см}$ по двум методикам:

1. По методу наименьших квадратов строится линия (Линия 2 на рисунке 9) от предельного значения напряжения (на рисунке 9 предельное значение напряжения смятия принято равным напряжению, при котором достигается смещенная деформация смятия 2%) до пересечения с линией секущего модуля;

2. Принимается значение напряжений смятия, соответствующее значению смещенных деформаций не менее чем на порядок (в 10 раз) меньше, чем смещенная деформация смятия, которая соответствует предельному напряжению на смятие $[\sigma_{см}]$.

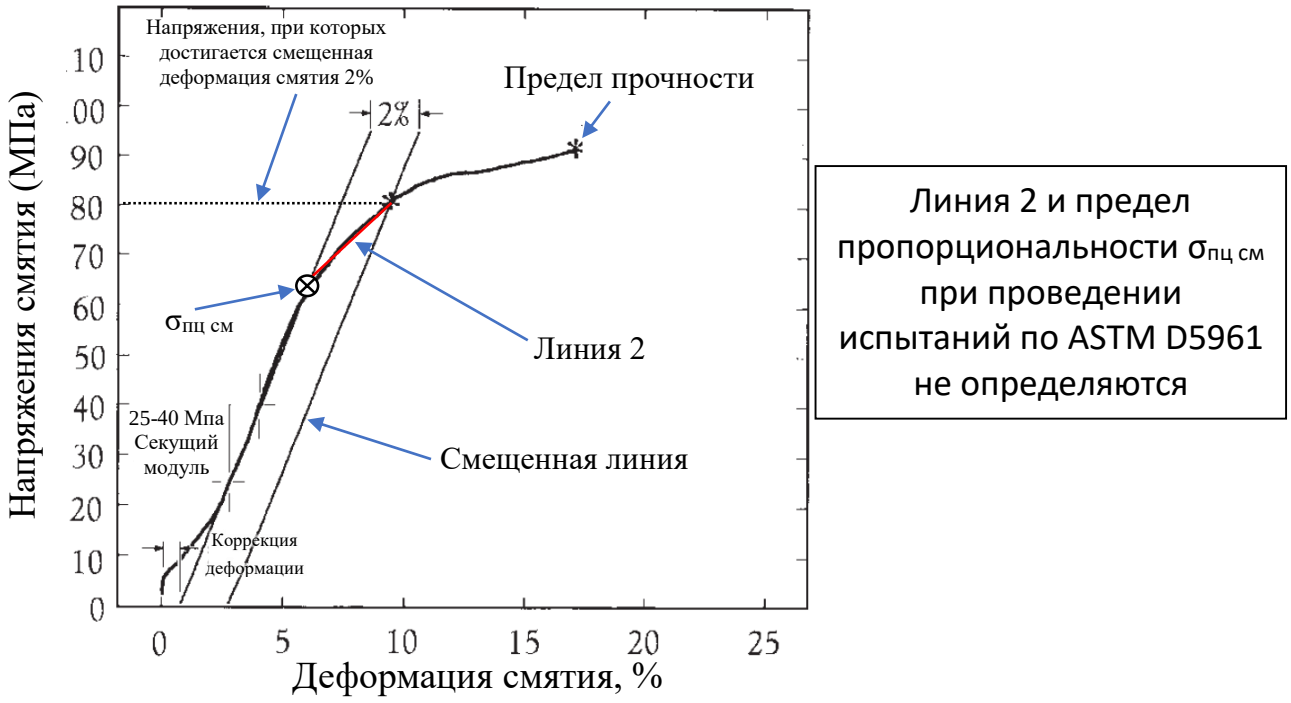


Рисунок 9 – Типовой график зависимости напряжений смятия от деформации смятия

При проектировании конструкций из композиционного материала принимается одно значение предельных(допустимых) напряжений на смятие [$\sigma_{см}$], которое равно значению предела прочности или равно значению напряжений, при которых достигается заранее определенное значение смещенной деформации смятия $\varepsilon_{см\ пред}$. При этом используется одно минимальное значение предельных напряжений на смятие для всех вариантов направления нагружения со стороны болта на пластинку из композиционного материала.

Предел пропорциональности также принимается одинаковым для всех направлений нагружения в плоскости пластинки.

На рисунке 10 представлен типовой двухточечный график «Сила-перемещение» для элемента CBUSH №2.

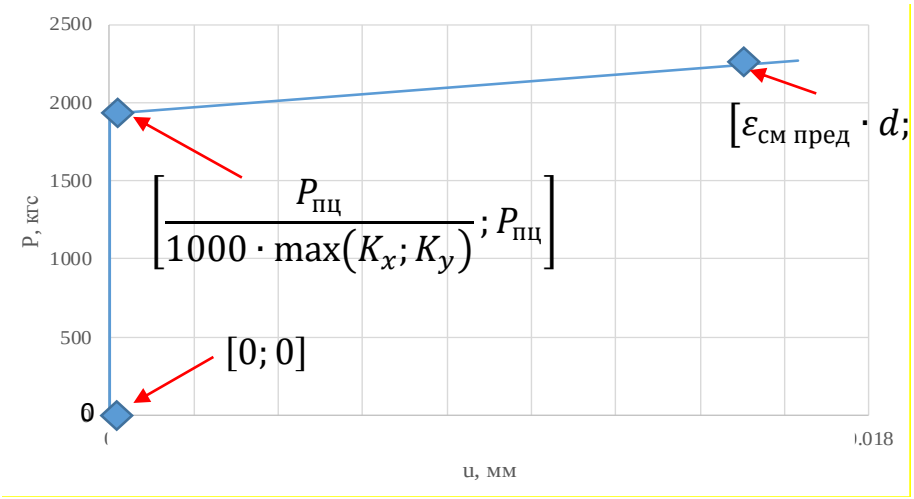


Рисунок 10 – Типовой график «Сила-перемещение» для элемента CBUSH №2:
K_x, K_y – линейные жесткости элемента CBUSH №1, вычисляются по формулам (7) и (8)
$P_{пц}$ – сила, при которой напряжения смятия в пластине достигают значение $\sigma_{пц\ см}$
$P_{см}$ – сила, при которой напряжения смятие в пластине достигают значение [$\sigma_{см}$]

Первый участок графика (сила изменяется от 0 до $P_{пц}$) строится так, чтобы его влияние на суммарную жесткость соединения элементов CBUSH №1 и CBUSH №2 было незначительным, второй участок (сила изменяется от $P_{пц}$ до $P_{см}$) моделирует нелинейный участок деформирования пластинки при смятии под крепежным элементом. На рисунке 10 представлен двухточечный график, но также допускается использовать промежуточные точки для сил в диапазоне от $P_{пц}$ до $P_{см}$.

Расчет тестовой задачи

Для проведения тестирования методики выбрана задача с проходящей нагрузкой по композитной полке, на которую установлена титановая пластина для дальнейшего крепления вспомогательных элементов. Задача решается с использованием КЭМ с помощью ПК MSC.NASTRAN 2013 и пре-постпроцессоров SIEMENS NX 10. Используется нелинейное решение 106 с параметром lgdisp установленным в значение 1, что обеспечивает учет больших перемещений. Рассматриваемая тестовая задача аналогична представленной в [21].

На рисунке 11 представлен вид разработанной КЭМ. Материал пластинки принят ВТ6ч и задан с учетом упругопластической диаграммы деформирования, представленной на рисунке 5 [21]. Толщина титановой пластинки $t_т$ равна 3 мм. Толщина композитной полки $t_к$ принята равной 10 мм.

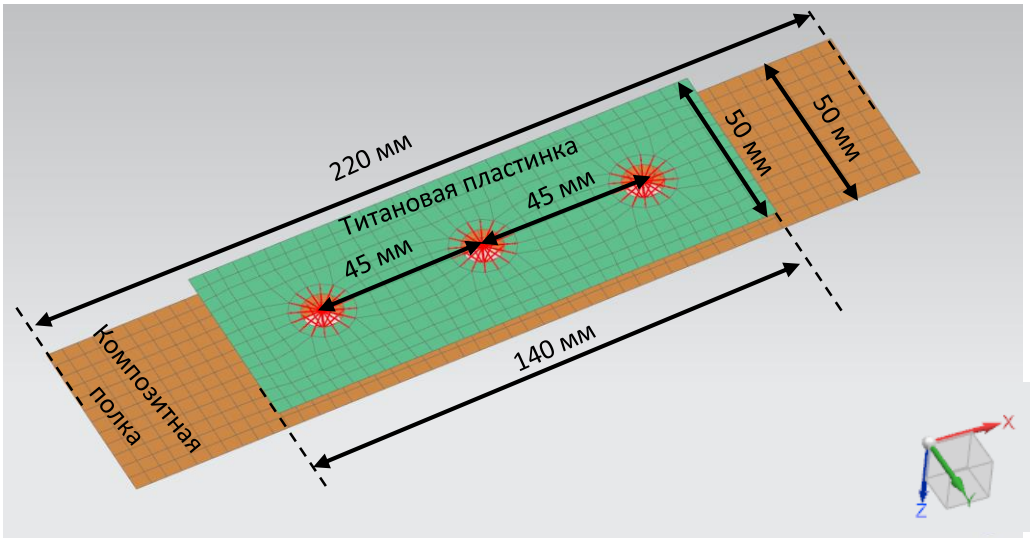


Рисунок 11 – КЭМ композитной полки с титановой пластинкой

Характеристики композитного материала приняты следующие:

1. Модуль упругости вдоль длины полки E_x=3000 кгс/мм^2;
2. Модуль упругости поперек длины полки E_y=3000 кгс/мм^2;
3. Модуль сдвига в плоскости полки G_{xy}=2000 кгс/мм^2;
4. Модуль сдвига поперек плоскости полки G_{xz}= G_{yz} =200 кгс/мм^2;
5. Коэффициент Пуассона μ_{12}=0,3;
6. Предел пропорциональности на смятие $\sigma_{пц\ см}$ 33,5 кгс/мм^2;
7. Предельное напряжение смятие [$\sigma_{см}$] 40 кгс/мм^2, что соответствует 2% смещенной деформации смятия $\varepsilon_{см\ пред}$.

Крепление титановой пластинки осуществлено с помощью трех крепежных элементов с диаметром гладкой части 11,11 мм, диаметром под ключ 17,55 мм. Материал крепежа - титановый сплав ВТ16 (Модуль упругости Е равен 11000 кгс/мм^2, коэффициент Пуассона μ=0,3). Моделирования крепежного элемента проведено по варианту №2.

На рисунке 12 показано приложение усилия к КЭМ – распределённая нагрузка по короткой стороне по оси X.

КЭМ закреплена:

1. По линейным перемещениям по оси Z по периметру композитной полки;
2. По линейным перемещениям по оси Y по длинным ребрам композитной полки;
3. По линейным перемещениям по оси X по короткому ребру композитной полки, расположенному по другую сторону прикладываемой нагрузки, как показано на рисунке 12.

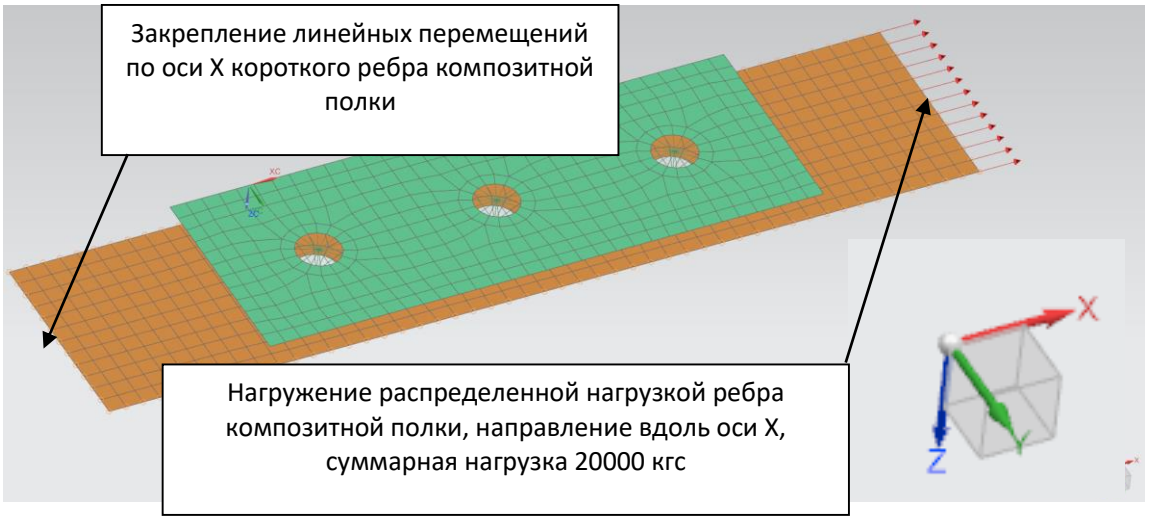


Рисунок 12 – Нагружение КЭМ и закрепление короткого ребра

Задача решается в трех вариантах:

1. Для моделирования крепежных элементов используется вариант №2;
2. Для моделирования крепежных элементов используется вариант №2 с дополнительной установкой CBUSH-элементов в зоне соединения с полкой из композиционного материала.
3. Для моделирования крепежных элементов используется вариант №2 с дополнительной установкой CBUSH-элементов и в зоне соединения с полкой из композиционного материала, и в зоне соединения с титановой пластиной

согласно методике, представленной в [21].

Для CBUSH-элемента в зоне соединения болтов с титановой пластинкой для линейных перемещений в плоскости среза крепежного элемента (плоскости XY) задается результирующий график «Сила-перемещение» с рисунка 17 [21] как для варианта крепежного элемента №2.

Для CBUSH-элемента №1 в зоне соединения болтов с композитной полкой линейная жесткость по оси X (вдоль длины полки) K_x и оси Y (поперек длины полки) K_y получены равными 67278 кгс/мм по результатам расчетов согласно разделам 3-5 данной статьи.

Срезная нагрузка на крепеж $P_{пц}$, при которой в композитной полке достигаются напряжения равные пределу пропорциональности на смятие $\sigma_{пц\ см}$, вычисляется по формуле

$$P_{пц} = \sigma_{пц\ см} \cdot d \cdot t = 33{,}5 \cdot 11{,}11 \cdot 10 = 3722 \text{ кгс} \quad (13)$$

Срезная нагрузка на крепеж $P_{см}$, при которой в композитной полке достигаются предельные напряжение на смятие $[\sigma_{см}]$, вычисляется по формуле

$$P_{см} = [\sigma_{см}] \cdot d \cdot t = 40 \cdot 11{,}11 \cdot 10 = 4444 \text{ кгс} \quad (14)$$

Для CBUSH-элемента №2 в зоне соединения болтов с композитной полкой для линейных перемещений в плоскости среза крепежного элемента (плоскости XY) задается результирующий график «Сила-перемещение», показанный на рисунке 13.

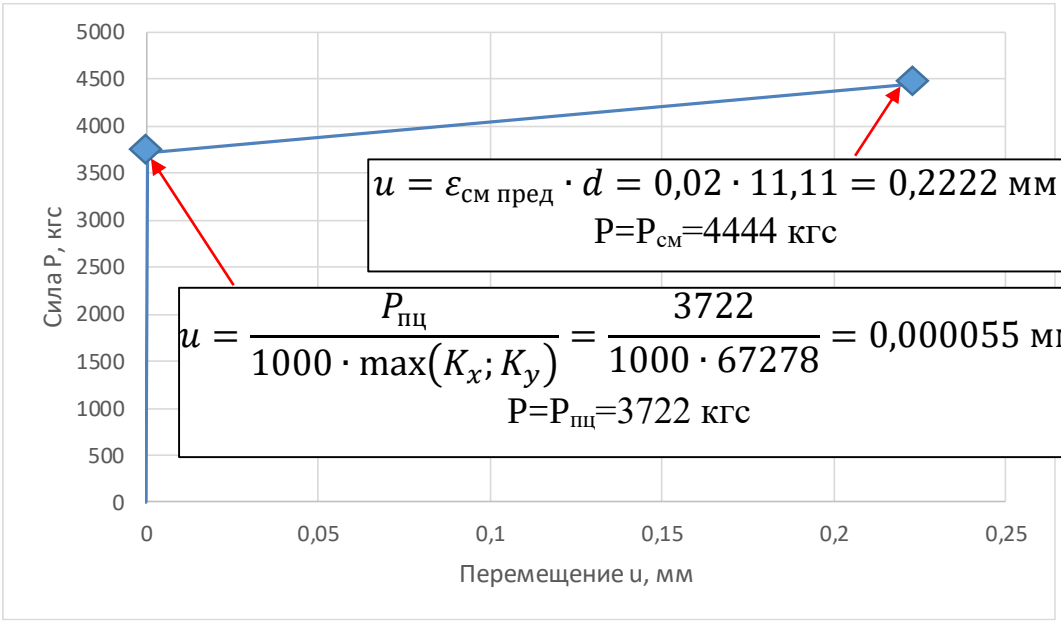


Рисунок 13 - Результирующий график «Сила-перемещение» для CBUSH-элемента №2

Напряжения смятия для титановой пластинки определяются по формуле

$$\sigma_{\text{см т}} = \frac{P_{\text{ср}}}{d \cdot t_{\text{т}}} \quad (15)$$

Предельные напряжения на смятие для титановой пластинки вычисляются по формуле

$$[\sigma_{\text{см т}}] = 1{,}5 \cdot \sigma_{\text{в}} = 1{,}5 \cdot 85 = 127{,}5 \text{ кгс/мм}^2, \quad (16)$$

где $\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности, кгс/мм^2.

Коэффициент запаса прочности на смятие для титановой пластинки вычисляется по формуле

$$\eta_{\text{т}} = \frac{[\sigma_{\text{см т}}]}{\sigma_{\text{см т}}} \quad (17)$$

Напряжения смятия для композитной полки определяются по формуле

$$\sigma_{\text{см к}} = \frac{P_{\text{ср}}}{d \cdot t_{\text{к}}} \quad (18)$$

Коэффициент запаса прочности на смятие для композитной полки вычисляется по формуле

$$\eta_{\text{к}} = \frac{[\sigma_{\text{см}}]}{\sigma_{\text{см к}}} \quad (19)$$

Результаты расчетов тестовой задачи для трех вариантов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчетов тестовой задачи

Результаты расчета	Вариант расчета		
	1	2	3
	без CBUSH-элементов	CBUSH-элементы в соединении с композитной полкой	CBUSH-элементы в соединении с композитной полкой и титановой пластиной
$P_{\text{ср}}$, кгс	4800	3840	3060
$\sigma_{\text{см к}}$, кгс/мм^2	43,2	34,6	27,5
$\eta_{\text{к}}$	0,93	1,16	1,45
$\sigma_{\text{см т}}$, кгс/мм^2	144,0	115,2	91,8
$\eta_{\text{т}}$	0,89	1,11	1,39

По результатам расчета в варианте 1 (без моделирования жесткости на смятие) коэффициент запаса для композитной полки и титановой пластины получен менее 1. При моделировании жесткости на смятие для композитной

полки (вариант расчета 2) или при моделировании жесткости на смятие для композитной полки и титановой пластины (вариант расчета 3) коэффициенты запаса прочности и для композитной полки, и для титановой пластины становятся более 1.

Таким образом использование дополнительных CBUSH-элементов для моделирования жесткости на смятие для композитной полки приводит к обоснованному снижению максимального значения срезной нагрузки и, как следствие, снижению напряжения смятия под крепежным элементом в композитной полке, что позволяет более рационально подобрать материал и укладку согласно [19] и [20].

Заключение

Представлена методика моделирования взаимодействия крепежного элемента с пластиной из композиционного материала с учетом нелинейного поведения материала пластины, получаемого по результатам испытаний на смятие по ASTM D5961.

Методика основана на доработке модели крепежного элемента путем добавления элемента CBUSH №1, который моделирует линейную жесткость на смятие, и элемента CBUSH №2, который моделирует нелинейную жесткость на смятие, определяемую из результатов испытаний согласно ASTM D5961.

Такой подход позволяет обоснованно рассчитать нагрузки на крепеж многоболтового соединения и крепеж не силовых элементов к силовым элементам конструкции при нагрузках, близких к предельным по критерию смятие под крепежным элементом.

Данная методика моделирования наиболее актуальна для применения в расчетах статической прочности при проектировании авиационной и ракетно-космической технике, т.к. именно там широко применяются многоболтовые соединения как для крепления основных силовых элементов между собой, так и для крепления вторичных не силовых элементов к какому-либо силовому элементу.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Список источников

1. MSC Nastran Quick reference guide, May 2013, Version 2013
2. Alexander Rutman, Adrian Viisoreanu, John A. Parady, Jr. Fasteners Modeling for MSC.Nastran Finite Element Analysis, SAE International and the American Institute of Aeronautics and Astronautics 2000, 18 p. DOI: 10.2514/6.2000-5585
3. Alexander Rutman, Chris Boshers, John Parady, Larry Pearce Fastener Modeling for Joining Composite Parts, Virtual Product Development Conference, 2009, 22 p.
4. Таричко В. И., Шалупина П. И. К вопросу о динамической нагруженности несущих конструкций специальных колесных шасси, Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей», 2019, выпуск №4, с. 73-83
5. R.S. Martins, S.P. Ernani, A. Lorentz Influence of Types of Discrete Modelling of Fasteners in FEM Models, NAFEMS World Congress, 2017, 26p.
6. Боровская Я. С., Гришин В. И., Качарава И. Н., Наумов С. М. Исследование прочности многорядных металлокомпозитных соединений, Ученые Записки ЦАГИ, 2013, т. XLIV, № 4, с. 80 - 90.
7. Боровская Я. С., Гришин В. И., Попов Д. В. К определению усилий среза в болтах многорядных металлокомпозитных стыков, Ученые Записки ЦАГИ, 2010, т. XLI, № 6, с. 72 - 79.
8. Богословский С.Е., Мартиросов М.И. Численное и аналитическое определение критических напряжений подкрепленной оболочки при решении задачи устойчивости, Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2020, с.481 – 490
9. Полоник Е.Н., Суренский Е.А., Федотов А.А. Автоматизация расчетов усталостной долговечности механических соединений элементов

авиаконструкций, Труды МАИ, выпуск № 92, 2017, 22 с., URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=76755

10. Дударьков Ю. И., Лимонин М. В., Наумов С. М., Осипян Е. Э. Виртуальное Моделирование эксперимента при статических испытаниях силовых панелей конструкции планера летательного аппарата, Космические аппараты и технологии, 2015, с. 32 - 39

11. Вашурин А.С., Орлов Л.Н. Расчетно-экспериментальная оценка пассивной безопасности кузова из многослойных панелей вахтового автобуса, Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2014, с. 46 – 54

12. Алябьев А.Ф., Федотов М.В., Колесников А.Б. Исследование прочностных свойств рамы грузовой платформы колесного форвардера, Научный журнал КубГАУ, 2021, выпуск №174, 13 с., DOI: 10.21515/1990-4665-174-003

13. Стрекоз А.В., Сидоренко В.В., Ледовских И.В. Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) элерона из полимерных композиционных материалов (ПКМ) с применением метода конечных элементов (МКЭ), Известия Южного федерального университета. Технические науки, 2019, с. 122 – 133, DOI: 10.23683/2311-3103-2019-6-122-133

14. R.S. Martins, M.T. Santos, E.S. Palma Fastening analysis using low fidelity finite element models, 31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2018, 10 p.

15. Geoff Morris Defining a standard formula and test-method for fastener flexibility in lap-joints, PhD thesis, Technical University Delft 2004, The Netherlands.

16. Heimo Huth Influence of fastener flexibility on the prediction of load transfer and fatigue life for multiple-row joints, In ASTM, editor, Fatigue in Mechanically Fastened Composite and Metallic Joints, 1986, 30 p.

17. S. Rosenfeld, M. B. Tate Preliminary investigation on loads carried by individual joints, NACA-TN-1051, Technical report, 1946, 74 p.

18. Swift T. Development of fail-safe design features of the dc-10, Damage tolerance in aircraft structures, ASTM STP486, American society for Testing and Materials, 1971, pp. 164-214. DOI: 10.1520/STP26678S

19. Ендогур А.И., Кравцов В.А., Солошенко В.Н. Принципы рационального проектирования авиационных конструкций с применением композитных материалов, Труды МАИ, выпуск № 72, 2014, 13 с., URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=47572

20. Ендогур А.И., Кравцов В.А. Идеология проектирования авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов, Труды МАИ, выпуск № 81, 2015, 13 с., URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=57755

21. Архипов П.А. Методика моделирования нелинейной жесткости на смятие металлических пластин в зоне установки крепежных элементов для решения задач статической прочности, Труды МАИ, выпуск № 140, 2025, 34 с., URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=184052

References

1. MSC Nastran Quick reference guide, May 2013, Version 2013

2. Alexander Rutman, Adrian Viisoreanu, John A. Parady, Jr. Fasteners Modeling for MSC.Nastran Finite Element Analysis, SAE International and the American Institute of Aeronautics and Astronautics 2000, 18 p. DOI: 10.2514/6.2000-5585

3. 3. Alexander Rutman, Chris Boshers, John Parady, Larry Pearce Fastener Modeling for Joining Composite Parts, Virtual Product Development Conference, 2009, 22 p.

4. Tarichko V. I., Shalupina P. I. On the issue of dynamic loading of supporting structures of special wheeled chassis, Vestnik Kontserna VKO «Almaz – Antei», 2019, no. №4, p. 73-83

5. R.S. Martins, S.P. Ernani, A. Lorentz Influence of Types of Discrete Modelling of Fasteners in FEM Models, NAFEMS World Congress, 2017, 26p.

6. Borovskaya Ya. S., Grishin V. I., Kacharava I. N., Naumov S. M. Study of strength of multi-row metal-composite joints, Uchenye Zapiski TsAGI, 2013, v. XLIV, № 4, p. 80 - 90.

7. Borovskaya Ya. S., Grishin V. I., Popov D. V. On the determination of shear forces in bolts of multi-row metal-composite joints, Uchenye Zapiski TsAGI, 2010, v. XLI, № 6, p. 72 - 79.

8. Bogoslovskii S.E., Martirosov M.I. Numerical and analytical calculation of critical stress for reinforced shell for stability problem solving, Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki, 2020, p. 481 – 490

9. Polonik E.N., Surenskii E.A., Fedotov A.A. Avtomatizatsiya raschetov ustalostnoi dolgovechnosti mekhanicheskikh soedinenii elementov aviakonstruktsii, Trudy MAI, no. № 92, 2017, 22 c., URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=76755

10. Dudar'kov Yu. I., Limonin M. V., Naumov S. M., Osipyan E. E. Virtual simulation of experiment at static trials of the aircraft primary structure panels, Kosmicheskie apparaty i tekhnologii, 2015, p. 32 - 39

11. Vashurin A.S., Orlov L.N. Numerical and experimental evaluation of the passive safety of a crew bus body made of sandwich panels, Mashinostroenie, 2014, p.46 – 54

12. Alyab'ev A.F., Fedotov M.V., Kolesnikov A.B. Examination of the strength properties of the cargo platform frame of a wheel forwarder, Nauchnyi zhurnal KubGAU, 2021, no. №174, 13 p., DOI: 10.21515/1990-4665-174-003

13. Strekoz A.V., Sidorenko V.V., Ledovskikh I.V. Analysis of the stress-strain state (SSS) of ailerons from polymer composite materials (PCM) using the finite element method (FEM), Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki, 2019, p. 122 – 133, DOI: 10.23683/2311-3103-2019-6-122-133

14. R.S. Martins, M.T. Santos, E.S. Palma Fastening analysis using low fidelity finite element models, 31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2018, 10 p.

15. Geoff Morris Defining a standard formula and test-method for fastener flexibility in lap-joints, PhD thesis, Technical University Delft 2004, The Netherlands.

16. Heimo Huth Influence of fastener flexibility on the prediction of load transfer and fatigue life for multiple-row joints, In ASTM, editor, Fatigue in Mechanically Fastened Composite and Metallic Joints, 1986, 30 p.

17. S. Rosenfeld, M. B. Tate Preliminary investigation on loads carried by individual joints, NACA-TN-1051, Technical report, 1946, 74 p.

18. Swift T. Development of fail-safe design features of the dc-10, Damage tolerance in aircraft structures, ASTM STP486, American society for Testing and Materials, 1971, pp. 164-214. DOI: 10.1520/STP26678S

19. Endogur A.I., Kravcov V.A., Soloshenko V.N. Principy racional'nogo proektirovanija aviacionnyh konstrukcij s primeneniem kompozicionnyh materialov, Trudy MAI, no. № 72, 2014, 13 p., URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=47572

20. Endogur A.I., Kravcov V.A. Ideologija proektirovanija aviacionnyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov, Trudy MAI, no. № 81, 2015, 13 p., URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=57755

21. Arkhipov P.A. Method of modelling nonlinear bearing stiffness of metal plates in the area of installation of the fastener for static strength analysis, Trudy MAI, no. № 140, 2025, 34 p., URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=184052

Информация об авторах

Павел Александрович Архипов, ведущий инженер-конструктор, АО «АэроКомпозит», г. Москва, Россия; e-mail: p.a.arkhipov@yandex.ru

Information about the authors

Павел Александрович Архипов, lead design engineer, JSC «AeroComposit», г. Москва, Россия; e-mail: p.a.arkhipov@yandex.ru

Получено 02 июня 2026 ● Принято к публикации 15 сентября 2026 ● Опубликовано 28 октября 2026
Received 02 June 2026 ● Accepted 15 September 2026 ● Published 28 October 2026