

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ МНОГОБОЛТОВЫХ МЕТАЛЛО-КОМПОЗИЦИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ НАПРЯЖЕНИЙ СМЯТИЯ И ОБХОДА

Гришин В.И., Глебова М.А., Боровская Я.С., Гусева Н.В.

*Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского,
г. Жуковский, Россия*

АННОТАЦИЯ

Для предсказания повреждения и разрушения в композиционных соединениях необходимо знать распределение нагрузки в элементах соединения и предсказывать способы разрушения, связанные с различными видами нагрузки. В случае, когда отношение напряжений смятия к нормальным напряжениям обхода отверстия высоки, разрушение, как правило, происходит от смятия. Если это отношение низко, то соединение разрушается от растяжения по нетто-сечению.

Предельные значения напряжений смятия-обхода можно получить из экспериментальной диаграммы разрушающих напряжений смятия-обхода. Подобные диаграммы для углепластика впервые получены американскими исследователями Гревсом и Найком и имеют довольно сложный полигональный вид. Для получения таких диаграмм разрушения требуется выполнить большое количество экспериментов на уникальной экспериментальной установке с двумя автономными каналами нагружения, чтобы независимо изменять нагрузку смятия и нагрузку обхода одновременно. Подобные эксперименты требуют значительных финансовых вложений и не всегда доступны исследователям.

В работе модифицирован известный метод расчета прочности соединений, использующий метод конечных элементов в совокупности с экспериментально полученными диаграммами несущей способности смятия-обхода. Для описания диаграммы смятия-обхода по результатам изолированных экспериментальных либо расчетных значений разрушающих напряжений смятия и обхода предложена квадратичная аппроксимация промежуточных значений. Результаты подобной аппроксимации довольно хорошо описывают полигональную зависимость Гревса и Найка, так как почти все точки полученной диаграммы укладываются в разброс экспериментальных результатов этих авторов. Полученная методика позволяет отказаться от построения диаграмм смятия-обхода с применением сложных многоканальных экспериментальных установок и тем самым значительно сэкономить средства при проектировании агрегатов новой техники.

Ключевые слова: композит; металл; метод конечных элементов; напряжения смятия-обхода; соединения; усилия среза болтов; критерий Нуизмера

STRENGTH ESTIMATION OF MULTI-BOLTED METAL COMPOSITE JOINTS UNDER COMBINED OPERATION OF BEARING AND BYPASS STRESSES

Grishin V.I., Glebova M.A., Borovskaya Ja.S., Guseva N.V.

Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Russia

ABSTRACT

It is necessary to know the load distribution in the joints elements and predict the failure ways associated with the different types of loads to forecast the damage and failure in composite joints. In the case when, the relation between the bearing stresses to the normal bypass stresses of the hole is high as a rule the failure occurs due to bearing. If this relation is low, the joint is broken down by tension on net-section.

The ultimate stresses values of bearing-bypass stresses can be obtained from the experimental diagram of the bearing-bypass destructive stresses. The similar diagrams for carbon fibre-reinforced plastic (CFRP) were obtained by American researchers Grevs and Nike at the first time and have rather complex polygonal view. To get such destruction diagrams, it is required to fulfill a large quantity of experiments on unique experimental facility with two independent loading channels to change independently the bearing and bypass loads simultaneously. Similar experiments require significant financial investments and aren't always available to researches.

The well-known joints strength calculation method, using the finite element method in combination with experimentally obtained diagrams of the bearing-bypass load capacity is modified in the work. A quadratic approximation of intermediate values is proposed to describe bearing-bypass diagram by isolated experimental or calculated data on the bearing and bypass destructive stresses values. The results of the similar approximation describe the Grevs and Nike polygonal relation quite well as almost all points of the obtained diagrams keep within the spread of the experimental results of these authors. The obtained technique allows to refuse from bearing-bypass diagram construction with application complex multichannel experimental facilities, and thereby save resources significantly at the designing of the new equipment units.

Keywords: composite; metal; finite elements method; bearing-bypass stresses; joints; bolts shearing effort; Nuizmer criterion

ВВЕДЕНИЕ

Расчет болтовых соединений при проектировании элементов конструкции самолета из композиционных материалов является сложной задачей, и методы решения этой проблемы постоянно улучшаются [1]. Предсказание повреждения и разрушения в композиционных соединениях требует знания распределения нагрузки по болтам соединения и понимания различных способов разрушения, связанных с различными видами нагрузки. Например, если отношение напряжений смятия к нормальным напряжениям обхода отверстия высоки, получающееся разрушение, как правило, происходит от смятия, а когда это отношение низко - соединение разрушается разрывом по нетто-сечению.

Используемый метод предсказания разрушения должен выявлять наиболее нагруженное отверстие и выполнять местный анализ разрушения в этом отверстии, используя полуэмпирические критерии разрушения, такие как точечный критерий Уитни и Нуизмера [2].

Недостаток этого подхода состоит в том, что местное разрушение не содержит информации о перераспределении нагрузки (соответствующей, например, разрушению при смятии в одном отверстии), или информации о состоянии начала разрушения в других отверстиях, прежде, чем произойдет окончательное разрушение соединения.

1. ДИАГРАММА СМЯТИЯ-ОБХОДА

Впервые взаимодействие нагрузок смятия с растягивающими либо сжимающими нагрузками обхода при разрушении было установлено экспериментально в работе [3] Гревсом и Найком. Они создали установку с двумя каналами нагружения, позволяющую одновременно прикладывать к болтовому соединению по одному каналу нагружение смятия болта, а по другому каналу – нагружение растяжением либо сжатием углепластиковой квазиизотропной пластины с укладкой монослоев $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{2S}$ нагрузками, обтекающими болт. Полученная Гревсом и Найком диаграмма «Смятие-обход» (bearing-bypass diagram) для данного соединения приводится на рис.1.

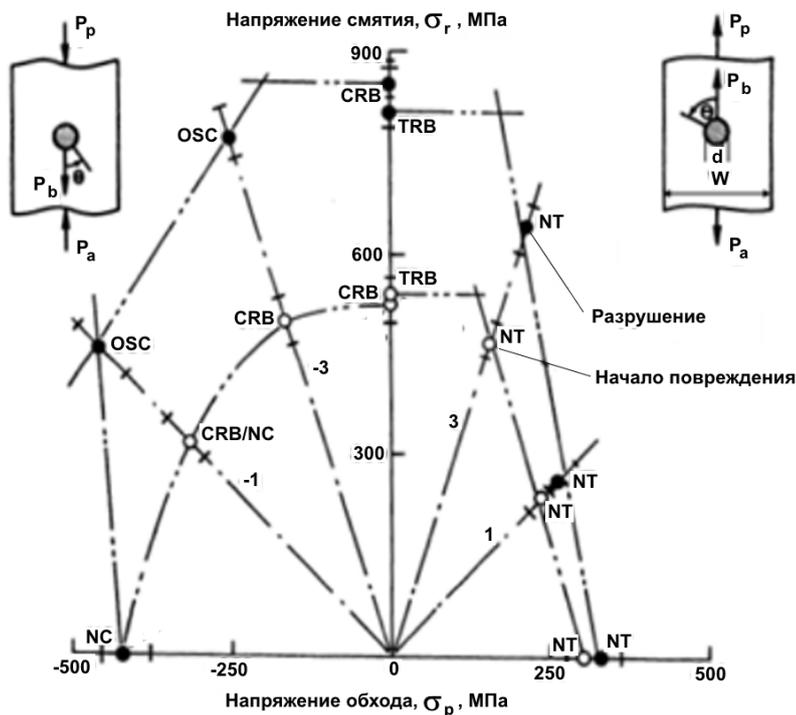


Рис.1. Экспериментальная диаграмма смятия-обхода для углепластикового одноболтового соединения [3].

На рис.1 введены следующие обозначения: NT – повреждение в нетто-сечении при растяжении; NC – повреждение в нетто-сечении при сжатии; TRB – смятие при растяжении образца; CRB – смятие при сжатии образца; OSC – начало повреждения от сжатия сдвигом.

Напряжение смятия определяется по выражению

$$\sigma_r = P_b / td \quad (1)$$

где t – толщина композиционного образца. d – диаметр болта.

Напряжение обхода определяется по выражению

$$\sigma_r = P_b / t(w - d) \quad (2)$$

где w – ширина полосы соединения.

Сверление в композиционных образцах отверстий под болт осуществлялось высокоскоростными алмазными сверлами. Отверстия тщательно рассверливались вручную, чтобы получить зазор 0.076 мм со стальными болтами. Этот зазор,

составляющий 1.2 процента от диаметра отверстия, типичен для авиационных соединений.

2. МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО ДИАГРАММЫ СМЯТИЕ-ОБХОДА

Как отмечено в предыдущем разделе, для надежного расчета прочности металло-композиционных соединений необходимо получить экспериментальные диаграммы разрушающих напряжений смятия-обхода. Подобные эксперименты требуют значительных финансовых вложений, которые не под силу были даже европейским исследователям, отвечающим за развитие расчетно-экспериментальных методов определения прочности металло-композиционных соединений [4]. С другой стороны отметим, что имеется довольно много результатов изолированного определения разрушающих напряжений при смятии отверстий (S_{br}) и разрушающих напряжений пластин со свободным отверстием и с заполненным болтом отверстием, как при растяжении, так и при сжатии (S_{bp}).

Имея значения разрушающих напряжений смятия S_{br} и разрушающих напряжений обхода для композиционных накладок с отверстиями S_{bp} можно аппроксимировать диаграмму смятие-обхода квадратичной зависимостью

$$\frac{\sigma_r^2}{S_{br}^2} + \frac{\sigma_p^2}{S_{bp}^2} = 1 \tag{3}$$

На рис.2 приводится пример подобной аппроксимации диаграммы смятия-обхода, полученной Гревсом и Найком в работе [3] (см. рис.1).

Как следует из рис.2, кривые, полученные с помощью выражения (3), довольно хорошо аппроксимируют полигональную зависимость Гревса и Найка, так как почти везде их значения укладываются в разброс экспериментальных результатов авторов работы [3].

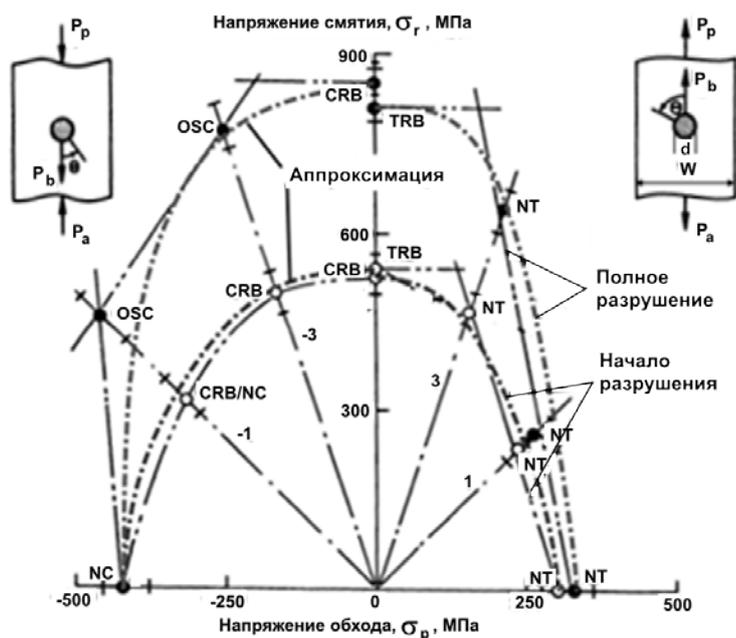


Рис.2. Аппроксимация диаграммы «смятия-обхода» для определения прочности соединений.

Предположим, что существует линейная зависимость между напряжениями смятия σ_r и напряжениями обхода σ_p , т.е.

$$\sigma_r = k\sigma_p \quad (4)$$

где коэффициент k – постоянная величина. Тогда разрушающее напряжение смятия σ_{br} определится точкой пересечения прямой (4) с диаграммой смятия-обхода (3) и равно

$$\sigma_{br} = \frac{kS_{br}}{\sqrt{k^2 + (S_{br} / S_{bp})^2}} \quad (5)$$

Таким образом, методика определения нагрузки, необходимой для разрушения многоболтового соединения, заключается в следующих шагах:

1. Экспериментальным или расчетным путем определяются предельные значения напряжений смятия S_{br} и напряжений обхода S_{bp} . В частности, для определения S_{bp} можно применить широко известный точечный метод Нуизмера [2].
2. По известным значениям S_{br} и S_{bp} и выражению (3) строится диаграмма смятия-обхода.
3. С помощью двумерного либо трехмерного МКЭ моделирования проводится расчет многоболтового соединения с определением усилий среза и значений напряжений обхода в районе каждого болта.
4. По выражениям (1) и (2) определяются в каждой отверствии под болт напряжения смятия и обхода до уровня, когда какая-либо из этих кривых (4) пересечется с построенной диаграммой смятия-обхода. Точка пересечения кривых (3) и (4) по выражению (5) определяет разрушающие напряжения σ_{br} .

3. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА

Рассмотрим применение приведенной методики на примере расчета прочности серии одно-, двух-, трех- и четырехрядных металло-композиционных соединений, схема одного из которых показана на рис.3.



Рис.3. Схема металло-композиционного двухрядного образца.

Геометрические характеристики образцов приводятся в таблице 1. В качестве материала накладок принимались углепластиковые пластины с механическими свойствами монослоя толщиной 0.12 мм, приведенными в таблице 2. Расположение слоев в композиционных накладках приводятся в таблице 3. Накладки крепились к центральному дюралевым либо стальным

пластинам болтами с пределом прочности на сдвиг $\tau_b \sim 600$ МПа, затянутыми до осевого напряжения $\sigma \sim 150$ МПа.

Модуль упругости пластин из алюминиевого сплава полагался равным 72000 МПа, коэффициент Пуассона $\nu=0.3$, предел прочности на растяжение $\sigma_b \geq 490$ МПа, предел текучести $\sigma_T=350$ МПа. Пластины из стали 30CrMnSiA с модулем упругости 210000 МПа, пределом прочности на растяжение $\sigma_b=1080$ МПа и условным пределом текучести $\sigma_{0.2}=750$ МПа.

Таблица 1.

Геометрические характеристики образцов.

Тип образца	Длина	Ширина	Толщина накладки из КМ	Диаметр болта	Количество болтов	Материал металлической вставки	Толщина металлической вставки	Количество образцов
	мм	мм	мм	мм	шт.		мм	шт.
1	170	36	4.56	6	1	Дюраль		3
2	200	40	3.72	8	4	Дюраль	14.0	3
3	210	40	2.4	6	6	Дюраль	10.0	3
4	270	40	2.76	6	8	Дюраль	12.0	3
4А	270	40	2.76	6	8	Сталь	12.0	3

Таблица 2.

Механические свойства монослоя.

Свойства(МПа)										
E_{11}	E_{-11}	E_{22}	E_{-22}	E_{12}	ν_{12}	σ_{11}	σ_{-11}	σ_{22}	σ_{-22}	σ_{12}
135000	126000	8800	10700	4470	0.33	1239	-1081	38.7	-189.4	81.2

Таблица 3.

Укладка монослоев в накладках образцов.

Номер образца	Укладка монослоев в накладках образцов
1	$[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$
2	$[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ/-45^\circ/45^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$
3	$[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ]_s$
4	$[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$
4А	$[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$

Расчётная оценка механических свойств (МПа) материала углепластиковых пластин выполнена по методике, изложенной в [5], результаты которой приводятся в таблице 4. Ось X направлена вдоль, а ось Y – поперёк образца.

Таблица 4.

Механические свойства накладок соединений.

Свойства	Номера образцов			
	1	2	3	4,4А
V_0	0.316	0.258	0.333	0.348
V_{90}	0.105	0.0968	0.0952	0.130

V_{+45}	0.316	0.323	0.286	0.261
V_{-45}	0.263	0.323	0.286	0.261
t , мм	4.56	3.72	2.52	2.76
E_{+X}	58200	51300	60000	62300
E_{-X}	55100	48700	56700	58900
E_{+Y}	35300	34700	34200	37800
E_{-Y}	34200	33500	33200	36500
G_{XY}	21300	23400	21200	19700
ν_{xy}^+	0.492	0.527	0.506	0.438
σ_{bx}^+	493	449	519	521
σ_{bx}^-	-443	-382	-452	-488
σ_{by}^+	265	265	254	289
σ_{by}^-	-288	-282	-279	-308
τ_{bxy}	251	265	245	239

В таблице приняты следующие обозначения: V_0 – относительный объем волокон в 0-градусном направлении; V_{90} – относительный объем волокон в 90-градусном направлении; E – модуль упругости; G – модуль сдвига; σ_b – разрушающие напряжения растяжения (+) либо сжатия (–) в направлениях осей X или Y ; ν – коэффициент Пуассона, τ_b – разрушающие напряжения сдвига.

В экспериментальной программе использовалось пять типов образцов: от однорядных до четырехрядных по три штуки каждого типа образцов. Испытания проводились на сервогидравлической машине LFV 200/160. Машина снабжена гидравлическими захватами (толщина испытываемых образцов 0-42 мм), позволяющими регулировать степень зажатия образца; датчиком перемещения и экстензометром типа MFA–25, с помощью которого и было проведено измерение деформаций на испытываемых образцах. Стойка управления с компьютером позволяют автоматизировать процесс как статических, так повторно-статических испытаний.

Разрушение многоболтовых образцов происходило в результате разрыва углепластиковых накладок под углом $\pm 45^\circ$ от отверстия первого, считая от зоны стыка металлических пластин, наиболее нагруженного болта и показано на рис.4.



Рис.4. Типовое разрушение образцов при растяжении.

Разрушающие нагрузки для каждого образца приведены в таблице 5. Как следует из таблицы, наибольшие разрушающие нагрузки 80103 Н соответствуют двухболтовому образцу, диаметр болтов у которого равен 8 мм. Минимальная разрушающая нагрузка соответствует трехболтовому образцу с диаметров болтов 6 мм. Как следует из сравнения разрушающих сил для образцов 4 и 4А, промежуточная вставка также влияет на изменение разрушающей силы. При увеличении ее жесткости (стальная вставка в образце 4А) несущая способность

образца понижается (сравните с образцом № 4, у которого промежуточная вставка дюралевая).

Таблица 5.

Величины средних разрушающих нагрузок P_c , полученные в эксперименте.

Номера соединений	P_c , Н	Вид разрушения
2	80103	Разрыв углепластиковой пластины по отверстию диаметром 8 мм первого ряда
3	67470	Разрыв углепластиковой пластины по отверстию диаметром 6 мм первого ряда
4	73050	Разрыв углепластиковой пластины по отверстию диаметром 6 мм первого ряда
4А	69808	Разрыв углепластиковой пластины по отверстию диаметром 6 мм первого ряда

Образцы, испытываемые на смятие, представляли собой пластину из композиционного материала с наклеенными в середине образца накладками из алюминиевого сплава. В образце просверлены три отверстия: два по краям образца и одно, большого диаметра, в центре образца для передачи усилия в процессе проведения испытаний.

Нагружение образцов происходило дискретно до исчерпания несущей способности соединения, ступенями по 2 кН. На рис.5 приводятся фотографии разрушенных образцов № 1, а в таблице 6 – величины средних разрушающих нагрузок P_b , полученные при испытании образцов на смятие.



Рис.5. Фотографии образцов №1 после испытаний на смятие.

Таблица 6.

Величины средних разрушающих нагрузок P_b , полученные при испытании образцов на смятие.

Номер образца	P_b , Н	d, мм	t, мм	σ_c , МПа	Вид разрушения
1	23375	6	4.56	854	Смятие углепластиковой пластины по отверстию диаметром 6 мм

Поскольку имеются экспериментальные данные по испытаниям на смятие одноболтовых соединений, изготовленных из того же препрега, что и образцы 2-4А, то в качестве предельного напряжения смятия S_{br} примем результаты

испытаний образца № 1 ($S_{br}=854$ МПа, см. табл.6). Из-за отсутствия экспериментальных данных по определению предельного напряжения обхода S_{br} получим его расчетным путем.

Для расчета прочности композиционных накладок в соединениях воспользуемся критерием Нуизмера, согласно которому разрушение образца с отверстием наступает тогда, когда на некотором (характеристическом) расстоянии d_0 [2] от контура отверстия напряжение достигнет величины предела прочности материала (σ_{bx}^+ , см.табл.4). Величина параметра d_0 зависит от материала образца и его геометрической формы. Физически это означает, что из-за высокой концентрации напряжений на контуре отверстия на расстоянии d_0 происходит разрыхление (растрескивание) композита. При этом разрушающее напряжение определяется выражением

$$\sigma_p = \sigma_b / K_d \quad (6)$$

где в качестве предельных напряжений σ_b следует брать напряжения σ_{bx}^+ композиционных накладок, а K_d – коэффициент концентрации напряжений в точке, расположенной на расстоянии d_0 от контура отверстий. Величина характеристического размера определяется либо экспериментально, либо для ее определения предлагаются различные аналитические аппроксимации. Для вычисления d_0 в работе [6] предложена следующая формула

$$d_0 = \sqrt{\frac{d E_{+X}}{6 E_{+Y}}} \quad (7)$$

где d – диаметр болта.

В таблице 7 приведены результаты вычислений характеристического размера d_0 по (7) для всех типов растягиваемых образцов.

Таблица 7.

Вычисление характеристического размера d_0 .

Номер образца	d, мм	E_{+X} , МПа	E_{+Y} , МПа	d_0 , мм
2	8	51300	34700	1.71
3	6	60000	34200	1.75
4	6	62300	37800	1.65
4А	6	62300	37800	1.65

Для определения предельного напряжения обхода S_{br} образцов проведем моделирование контактной задачи о растяжения композиционной пластины с отверстием, в которое вставлена стальная шайба, моделирующая болт. Моделирование выполнено с применением вычислительного пакета Abaqus [7]. На рис.6 приводится конечно-элементная 2D-модель одного отверстия образца № 2 с условиями закрепления и нагружения.

По условиям симметрии относительно оси ОУ рассматривается одна половина растягиваемой пластины. Нагрузка P задается таким образом, чтобы напряжения на правом конце пластины были равны единице ($\sigma_0 = 1$), т.е. приложенная к пластинке сила равна $P = \sigma_0 b t$.

На рис.7 приводится распределение напряжений в области отверстия в композиционной пластине, моделирующей соединение № 2, а на рис.8 показано определение коэффициента концентрации напряжений K_d на расстоянии d_0

полученных по результатам расчета по (6).

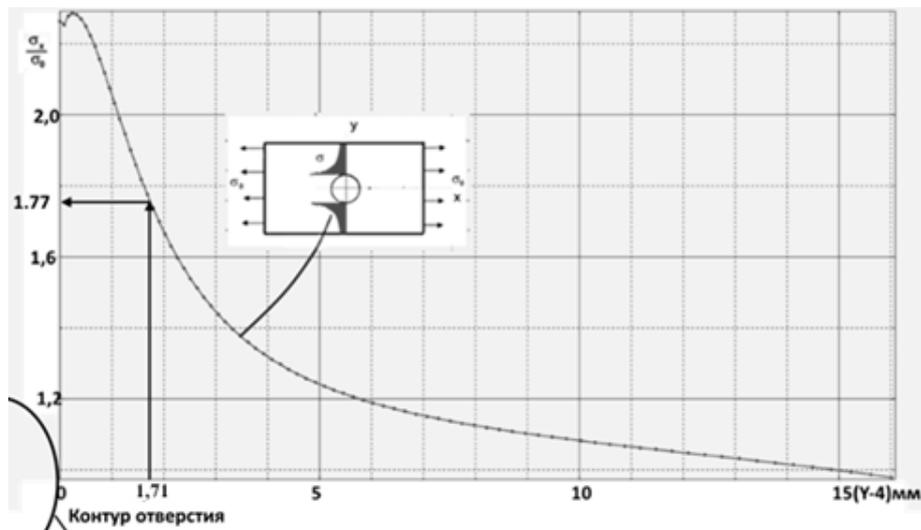


Рис.8. К определению коэффициента концентрации напряжений в пластине, моделирующей соединение №2.

Таблица 8.

Определение предельных обтекающих напряжений S_{br} .

Номер соединения	σ_{bx}^+ , МПа	K_d	S_{br} , МПа
2	449	1.77	254
3	519	1.56	333
4	521	1.55	336
4A	521	1.55	336

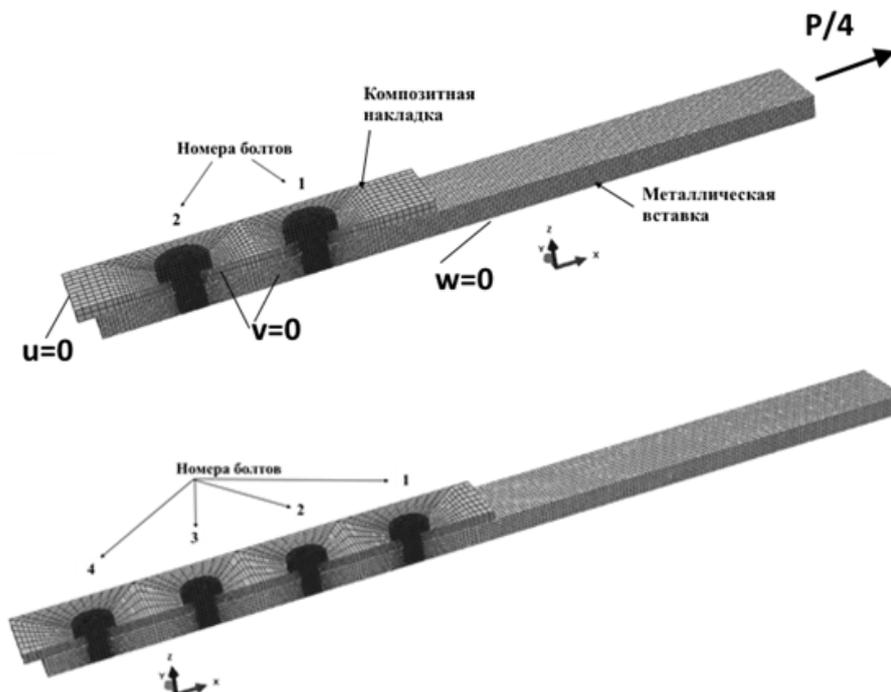


Рис.9. МКЭ – модели соединений: сверху № 2, внизу №4 (4A).

Для расчета распределения усилий по болтам соединений проведено 3D-моделирование контактного взаимодействия между композиционными накладками и металлическими болтами. Ввиду двойной симметрии соединений относительно срединных горизонтальной и вертикальной плоскостей (рис.3), при расчете учитывалась лишь одна восьмая часть рассматриваемого соединения. Конечно-элементные модели второго и четвертого образцов приводятся на рис.9.

На рис.10 приводятся напряжения σ_x в соединении №3 от действия единичного растягивающего напряжения, приложенного к металлической вставке соединений. Как следует из этого рисунка, максимальные напряжения в накладках возникают по контуру первого от срединной линии соединения отверстия и они значительно превышают напряжение, прикладываемое к сечению металлической вставки.

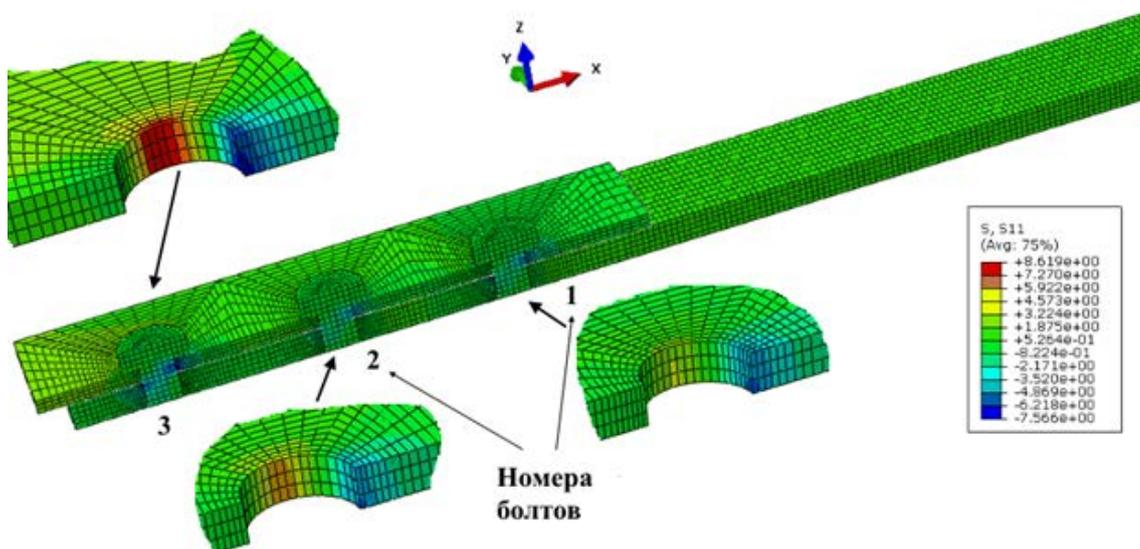


Рис.10. Напряжения σ_x в соединении №3 от действия единичного растягивающего напряжения, приложенного к вставке.

В таблице 9 приводится распределение усилий среза по болтам соединения в процентах от приложенной нагрузки.

Таблица 9.

Распределение усилий среза по болтам соединения в процентах от приложенной нагрузки.

Тип соединения	Номера болтов			
	1	2	3	4
2	43.73	56.27		
3	28.35	28.13	43.52	
4	21.16	17.61	22.37	38.86
4А	14.04	15.77	24.29	45.9

Как следует из таблицы 9, максимальные значения усилий среза возникают в болтах, расположенных в районе оси симметрии соединений.

В таблице 10 приводится определение разрушающих сил P в соединениях № 2-4А, при этом предполагается, что до момента разрушения усилия среза в болтах соединения остаются пропорциональными значениям, приведенным в таблице 9. Сила смятия на болт вычисляется в соответствии с выражением

$$P_{см} = dt\sigma_{br} \tag{8}$$

Таблица 10.

Определение разрушающей силы в соединениях.

Номер болта	P_b , Н	P_p , Н	σ_r , МПа (1)	σ_p , МПа (2)	k (4)	Напряжения смятия (σ_{br}), МПа (5)	Силы смятия $P_{см}$, Н (8)
Соединение №2							
1	43.73		0.73	0.00		556	33073
2	56.27	43.73	0.95	0.18	5.15	715	42557
Разрушающая сила P							75630
Соединение №3							
1	28.35		0.98	0.00		479	13808
2	28.13	28.35	0.98	0.17	5.62	476	13701
3	43.52	56.48	1.51	0.35	4.37	736	21197
Разрушающая сила P							48706
Соединение №4							
1	21.16		0.64	0.00		380	12588
2	17.61	21.16	0.53	0.11	4.72	316	10476
3	22.37	38.77	0.68	0.21	3.27	402	13308
4	38.86	61.14	1.17	0.33	3.60	698	23118
Разрушающая сила P							59490
Соединение №4А							
1	14.04		0.42	0.00		231	7649
2	15.77	14.04	0.48	0.07	6.36	259	8591
3	24.29	29.81	0.73	0.16	4.62	400	13233
4	45.9	54.1	1.39	0.29	4.81	755	25006
Разрушающая сила P							54478

Примечание: В таблице 10 значение усилий в болтах P_b взяты из таблицы 9 при действии растягивающей нагрузки 100 Н на металлическую вставку соединения.

В таблице 11 приводится сравнение разрушающих сил P, полученных расчетом, с экспериментальными данными для всех рассматриваемых образцов.

Таблица 11.

Сравнение разрушающих сил P, полученных расчетом, с экспериментальными данными.

Номер образца	Эксперимент, Н	Расчет, Н	γ ,%
2	80103	75630	5.6
3	67470	48706	27.8
4	73050	59490	18.6
4А	69808	54478	22.0
Средняя ошибка		18.50 %	

Как следует из таблицы, величина средней ошибки отличий расчета от эксперимента составляет 18.5%. Отметим, что приведенный в работе [4] расчет трехболтового композиционного соединения с использованием диаграмм смятия-

обхода Гревса и Найка при сравнении с экспериментом показал отличие в 17.8%. Положительным моментом расчета является тот факт, что его результаты всегда меньше экспериментальных значений, т.е. идут в запас прочности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модифицирован известный метод расчета прочности соединений, использующий метод конечных элементов в совокупности с экспериментально полученными диаграммами несущей способности смятия-обхода. Предложена квадратичная аппроксимация построения диаграмм смятия-обхода по результатам изолированных экспериментальных либо расчетных данных по разрушающим напряжениям смятия и обхода. Данная методика позволяет отказаться от использования многоканальных экспериментальных установок при построении диаграмм смятия-обхода, а, следовательно, значительно сэкономить время и средства при оценке прочности металло-композиционных соединений.

Методика проверена экспериментально на ряде двух-, трех и четырехболтовых металло-композиционных соединений и показала, что полученные оценки разрушающих сил, как правило, консервативны, т.е. идут в запас прочности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Michael McCarthy Wojcas *Bolted Joints in Composite Aircraft Structures* // Air & Space Europe. – 2001. – Vol.3. – No.3/4. – Pp.1-4.
2. Whitney J.M., Nuismer R.J. *Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations* // J. Compos. Mater. – 1974. – Vol.8. – Pp.253-265.
3. Crews J.H.Jr., Naik R.A. *Bearing-bypass loading on bolted composite joints* / NASA Technical Memorandum 89153. – USA, Virginia, Hampton: National Aeronautics and Space Administration, 1987. – 33 p.
4. McCarthy C.T., McCarthy M.A., Gilchrist M.D. *Predicting Failure in Multi-Bolt Composite Joints Using Finite Element Analysis and Bearing-Bypass Diagrams* // Key Engineering Materials. – 2005. – Vol.293-294. – Pp.591-598.
5. Сироткин О.С., Гришин В.И., Литвинов В.Б. *Проектирование, расчет и технология соединений авиационной техники*. – М.: Машиностроение, 2006. – 330 с.
6. Гришин В.И., Качарава И.Н., Беспалов В.А., Гоцелюк Т.Б. *Применение модифицированного критерия Нуизмера к расчету прочности металло-композиционных соединений* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2013. – Т.19. – №1. – С.14-34.
7. Abaqus Analysis User's Manual. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2016.

REFERENCES

1. Michael McCarthy *Bolted Joints in Composite Aircraft Structures*. Air & Space Europe, 2001, Vol.3, No.3/4, Pp.1-4.
2. Whitney J.M., Nuismer R.J. *Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations*. J. Compos. Mater., 1974, Vol.8, Pp.253-265.

3. Crews J.H.Jr., Naik R.A. *Bearing-bypass loading on bolted composite joints*. NASA Technical Memorandum 89153. USA, Virginia, Hampton, National Aeronautics and Space Administration, 1987, 33 p.
4. McCarthy C.T., McCarthy M.A., Gilchrist M.D. *Predicting Failure in Multi-Bolt Composite Joints Using Finite Element Analysis and Bearing-Bypass Diagrams*. Key Engineering Materials, 2005, Vol.293-294, Pp.591-598.
5. Sirotkin O.S., Grishin V.I., Litvinov V.B. *Proektirovanie, raschet i tekhnologiya soedinenij aviatsionnoj tekhniki [Designing, calculation and technology of aviation equipment joints]*. Moskva, Mashinostroenie, 2006, 330 p.
6. Grishin V.I., Katsharava I.N., Bepalov V.A., Gotselyuk T.B. *Primenenie modifitsirovannogo kriteriya Nuizmera k raschetu prochnosti metallo-kompozitsionnykh soedinenij [Application of Nuismer modification criteria to metal-composite joints strength calculation]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2013, Vol.19, No.1, Pp.14-34.
7. Abaqus Analysis User's Manual. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2016.

Поступила в редакцию 21 декабря 2017 года.

Сведения об авторах:

Гришин Вячеслав Иванович – д.т.н., проф., гл.н.с., ФГУП Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, Россия; e-mail: gvi0641@gmail.com

Глебова Мария Александровна – инж., ФГУП Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, Россия

Боровская Янина Стефановна – нач. установки, ФГУП Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, Россия

Гусева Наталья Вячеславовна – к.т.н., н.с., ФГУП Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, Россия