

АНАЛИЗ РАЗРЫВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И КОЭФФИЦИЕНТОВ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНАХ ОТВЕРСТИЙ В ПЛАСТИНАХ С ПКМ ОБРАЗЦА БОЛТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ

Расчетные модели болтового соединения

Как отмечено в [1, 2], проблема разработки критериев прочности болтовых соединений (БС) с композитными материалами (КМ) является актуальной. Для ее решения необходимы, в частности, четкие представления о характеристиках напряженно-деформированного состояния (НДС) в зоне отверстий в КМ. Этот вопрос исследован явно недостаточно. Причина известна: множественность конструктивно-технологических факторов, влияющих на прочность и усталость БС с КМ.

Односрезное БС по сравнению с двухсрезным гораздо отчетливее выявляет особенности характеристик НДС в болте и окрестности отверстий в композите [3]. Поэтому было рассмотрено односрезное БС, вернее – образец для испытания на усталость односрезного двухрядного БС (рис. 1) с полимерным композиционным материалом (ПКМ).

В данной статье и других [4-7] рассматривали влияние на характеристики НДС лишь двух, но важных факторов: структуры ПКМ и бокового зазора болт/отверстие.

Полные данные по образцу и материалам представлены в таблицах статьи [4]: в табл. 1 – размеры; в табл. 2 – упругие характеристики металлов (алюминиевого сплава Д16АТ – швеллера и шайбы, титанового сплава ВТ-16 – болтов); в табл. 3 – характеристики слоев ПКМ (углеродистой ленты УОЛ-300-1А и углеродистой ткани УТ-900-3А со связующим ЭДТ-69н, упругие характеристики которых взяты из [8]). Направления: 1 – продольное, 2 – поперечное, 3 – соответствует правой системе координат.

Пластины ПКМ скомпонованы из 24 слоев. Слои из УОЛ-300-1А номинальной толщиной 0.235 мм в ПКМ уложены под углами 0 и 90

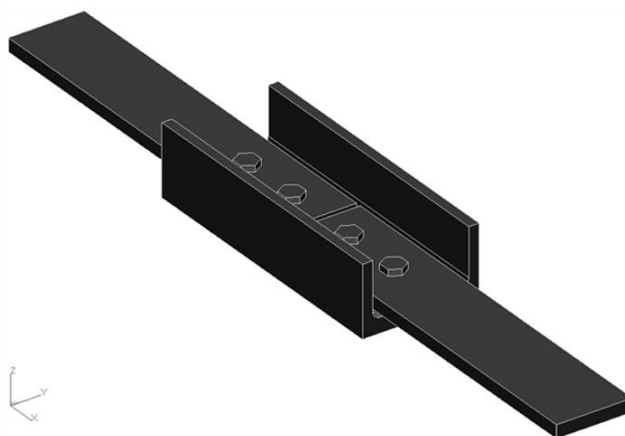


Рисунок 1 – Полная геометрическая модель образца для испытаний на усталость односрезного двухрядного болтового соединения с ПКМ

градусов относительно продольной оси X пластины, а из УТ-900-ЗА номинальной толщиной 0.220 мм – под ± 45 градусов. Т.е. ПКМ являлся ламинатом CFRP. Моделировали шесть структур: базовую ПКМ–0 (реальную) и еще пять – модельных (табл. 1). Значения "эффективных модулей" ПКМ, определенные по результатам численных экспериментов, приведены в табл. 5 в [4]. Численные эксперименты соответствовали требованиям стандарта для натуральных экспериментов [9]. Некоторые результаты расчетов образца БС представлены в [5 – 7]. Анализировались лишь данные, непосредственно связанные с прочностью БС. Наиболее контрастными по характеристикам НДС оказались две структуры: ПКМ–0 и ПКМ–III.

Таблица 1 – Смоделированные структуры ПКМ (табл. 4 в [4])

Вариант	Структура
ПКМ–0	$[-45/0/45/90/-45/0/45/90/-45/0/45/90]_s$
ПКМ–I	$[-45/90/45/0/-45/90/45/0/-45/90/45/0]_s$
ПКМ–II	$[-45/90/45/90/-45/0/45/90/-45/0/45/0]_s$
ПКМ–III	$[-45/45/90/-45/45/90/45/0/-45/0/90/0]_s$
ПКМ–IV	$[-45/90/45/90/-45/90/45/0/-45/0/45/0]_s$
ПКМ–V	$[-45/90/45/90/-45/90/45/0/-45/45/0/0]_s$

О расчетах на прочность болтового соединения на разрыв в зонах отверстий в пластинах

Кроме зоны контакта, где нормальные напряжения σ_x отрицательны [7], у отверстий в пластине есть еще зоны с нормальными напряжениями $\sigma_x \gg 0$ – это зоны с минимальными сечениями пластины, ослабленными отверстиями. В анализируемой модели таких сечений два: у первого и второго отверстия. Соединение (материал пластины) в ослабленном отверстием сечении рассчитывают на разрыв, причем в критерии прочности применяют теоретический коэффициент концентрации напряжений [1, 2]:

$$\frac{N_i \alpha_i}{h(b - md_i)} \leq \sigma_{ats}, \quad i = 1, 2. \quad (1)$$

В формуле (1):

N_i – усилие, воспринимаемое сечением, ослабленным i - м отверстием, $i = 1, 2$;

α_i – теоретический коэффициент концентрации напряжений у i - го отверстия;

h , b – толщина и ширина пластины в зоне отверстия;
 m – количество болтов ряда в сечении шириной b . Здесь $m=1$;
 d_i – номинальный диаметр i -го отверстия;
 σ_{ats} – допускаемое напряжение на разрыв материала.

Разрывные напряжения в пластинах из ПКМ в ослабленных отверстиями сечениях

На рис. 2 изображены характерные уровни напряжений σ_{11} и σ_x на поверхности первого (ближнего к нагрузке) отверстия.

Поскольку пиковые значения напряжения σ_x должны реализовываться на поверхности отверстия вдоль образующей цилиндрической поверхности, то анализировали графики σ_x (рис. 3) вдоль линии, обозначенной на рис. 2, как линия 1.

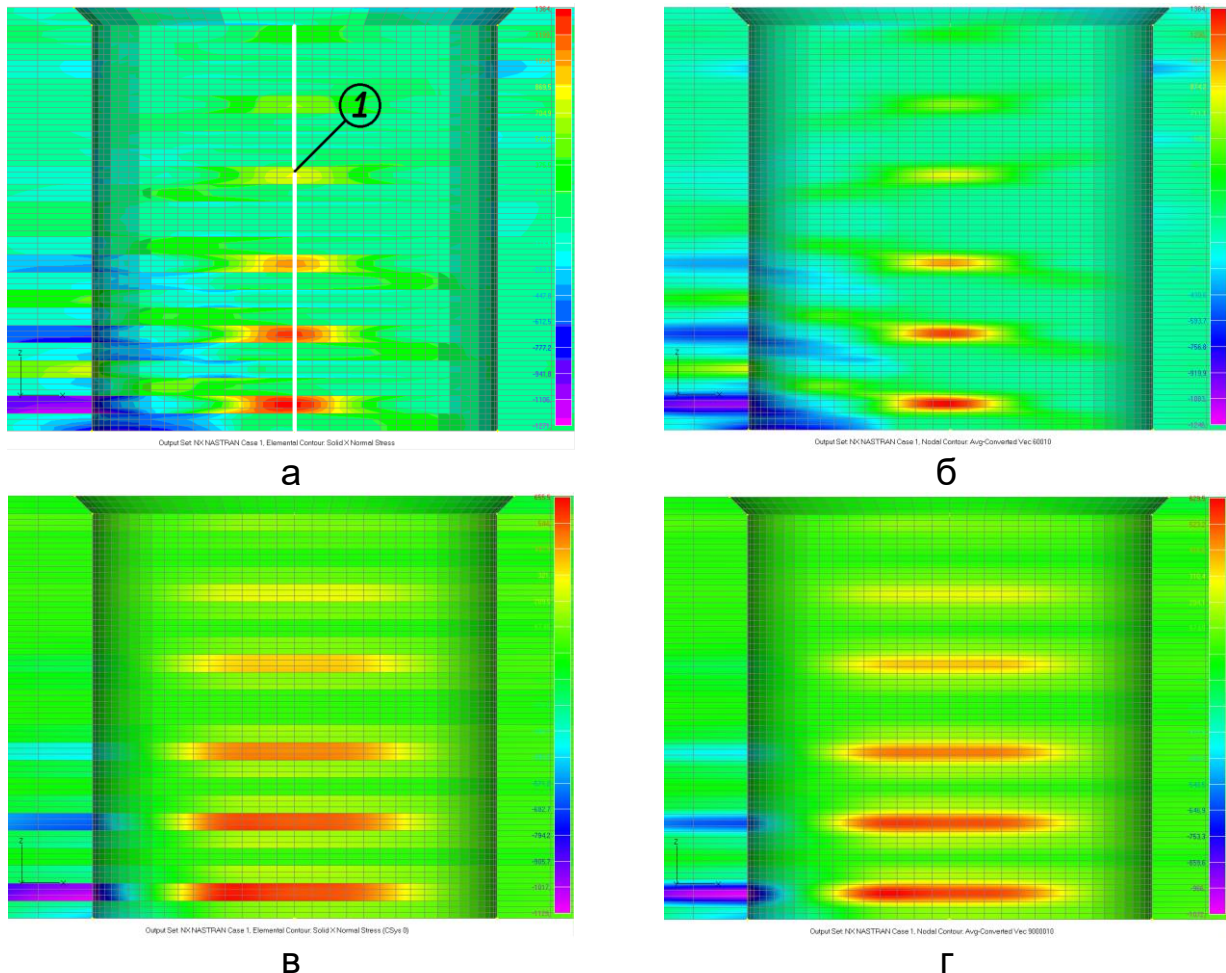
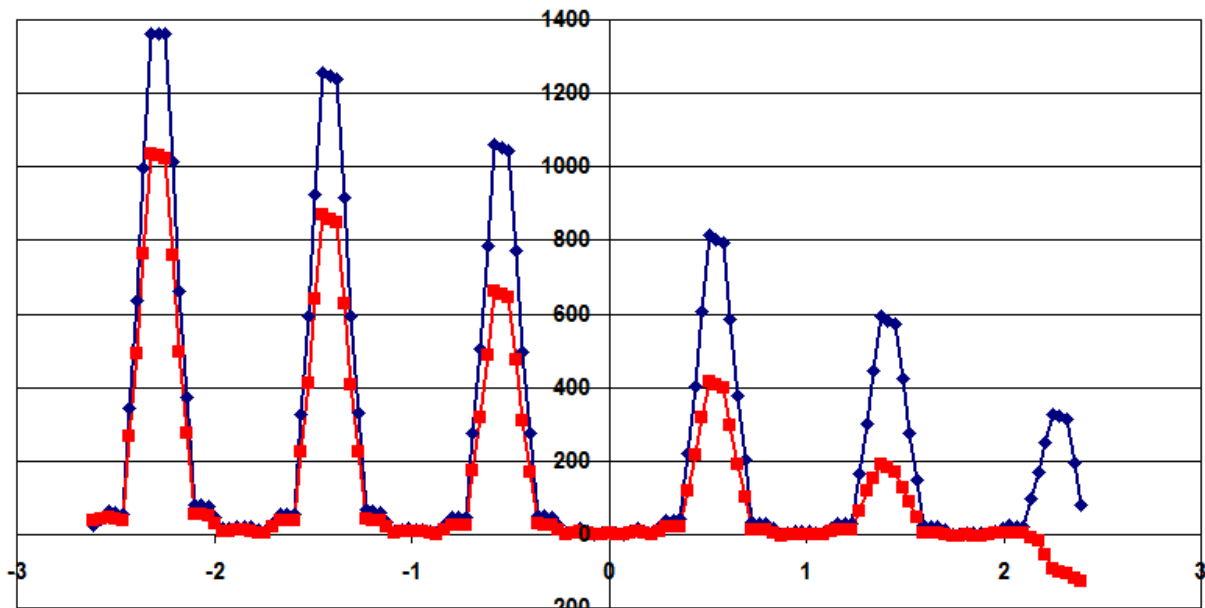
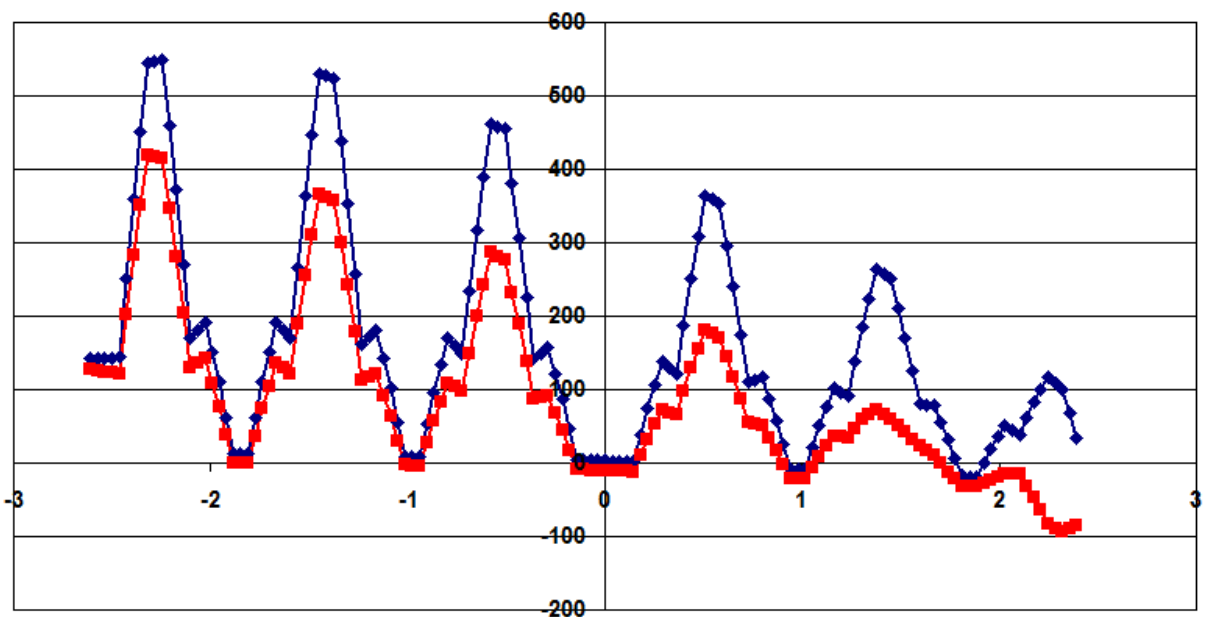


Рисунок 2 – Напряжения (МПа) на поверхности 1-го отверстия, структура ПКМ-0, $\delta = 10$ мкм: а, б – σ_{11} ; в, г – σ_x ;
 а, в – не конвертированные, б, г – конвертированные в узлы

К сожалению, в методе конечных элементов невозможно создать графики напряжений без конвертирования их в узлы. Кроме того, как свидетельствуют изображения рис. 2 и графики рис. 3, в Femap по неизвестной причине значения σ_{11} после пересчета в σ_x значительно изменяются в слое с углом укладки 0 градусов, где вовсе не должны изменяться. Именно поэтому дальнейший анализ провели только для не пересчитанных максимальных значений $\sigma_x = \sigma_{11}$ слоя ПКМ с углом укладки 0 градусов. Результаты сведены в табл. 2.



а



б

Рисунок 3 – Конвертированные в узлы напряжения (МПа) на поверхности отверстий, структура ПКМ-0, $\delta = 10$ мкм (\blacklozenge – отверстие 1, \blacksquare – отверстие 2): а – σ_{11} , б – σ_x

Таблица 2 – Максимальные значения напряжений $((\sigma_x)_{max})_i, i = 1, 2,$
в отверстиях, МПа

Вариант структуры	$((\sigma_x)_{max})_1$				$((\sigma_x)_{max})_2$				Средние значения $((\sigma_x)_{max})_1$	Средние значения $((\sigma_x)_{max})_2$
	Зазор δ , мкм				Зазор δ , мкм					
	0	10	20	70	0	10	20	70		
ПКМ–0	1398	1364	1348	1223	1042	1035	1045	914	1333	1009
ПКМ–I	1427	1378	1345	1202	1069	1001	970	877	1338	979
ПКМ–II	1305	1306	1280	1136	936	915	914	787	1257	888
ПКМ–III	1209	1204	1168	1072	830	787	753	685	1163	764
ПКМ–IV	1191	1185	1152	1032	825	800	765	688	1140	770
ПКМ–V	1212	1206	1171	1058	841	786	770	729	1162	782

Значения табл. 2 указывают на наличие влияния как структуры пластины из ПКМ, так и величины зазора между боковыми поверхностями болта и отверстия, на величины максимальных напряжений вдоль линии 1 рис. 2, а.

О теоретическом коэффициенте концентрации напряжений в пластинах из ПКМ в зонах расчетов на прочность болтового соединения на разрыв

Как известно, теоретический коэффициент концентрации напряжений – коэффициент, характеризующий местное повышение напряжений в сравнении с номинальными, в предположении об упругом деформировании материала [10]. Для нормальных напряжений

$$\alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} > 1, \quad (2)$$

где σ_{max} и σ_{nom} – наибольшие и номинальные значения местных напряжений. Рассматриваются напряжение σ_x , поэтому для (1)

$$\alpha_i = \frac{((\sigma_x)_{max})_i}{((\sigma_x)_{nom})_i} > 1, \quad i = 1, 2. \quad (3)$$

Величины $((\sigma_x)_{nom})_i$ из (1) при $\alpha_i = 1, m = 1$ и $d_1 = d_2 = d$

$$((\sigma_x)_{nom})_i = \frac{N_i}{h(b-d)}, \quad i = 1, 2. \quad (4)$$

Сила, которую воспринимает сечение у 1-го отверстия, $N_1 = N_x$, а силу у 2-го отверстия можем вычислить согласно [5] как $N_2 = N_x \chi(1-\omega)$, где коэффициент $\chi < 1$ определяет часть от силы N_x , воспринимаемую болтами (остальная ее часть

воспринимается соединением за счет сил трения), а коэффициент $\omega = k / (1 + k)$, где $k = \underline{N}_1 / \underline{N}_2$. Поэтому из (4)

$$((\sigma_x)_{nom})_1 = \frac{N_x}{h(b-d)}; \quad ((\sigma_x)_{nom})_2 = \frac{N_x \chi (1 - \omega)}{h(b-d)}. \quad (5)$$

Полученные (на основе данных табл. 2 из [5]) для разных структур ПКМ и зазоров значения номинальных напряжений приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Значения номинальных напряжений $((\sigma_x)_{nom})_i$, МПа

Вариант структуры	$((\sigma_x)_{nom})_1$				$((\sigma_x)_{nom})_2$				Средние значения $((\sigma_x)_{nom})_1$	Средние значения $((\sigma_x)_{nom})_2$
	Зазор δ , мкм				Зазор δ , мкм					
	0	10	20	70	0	10	20	70		
ПКМ–0	77				27	26	28	28	77	26
ПКМ–I					27	25	26	28		
ПКМ–II					25	25	26	28		
ПКМ–III					25	25	26	28		
ПКМ–IV					25	25	25	28		
ПКМ–V					25	25	25	27		

Что касается концентрации напряжений вокруг отверстия болтового соединения, то она формируется несколько иначе по сравнению со случаем отверстия в растянутой пластинке (рис. 4). Но рис. 5 и рис. 4,а свидетельствуют о том, что графики этих напряжений в концентраторе имеют похожие очертания.

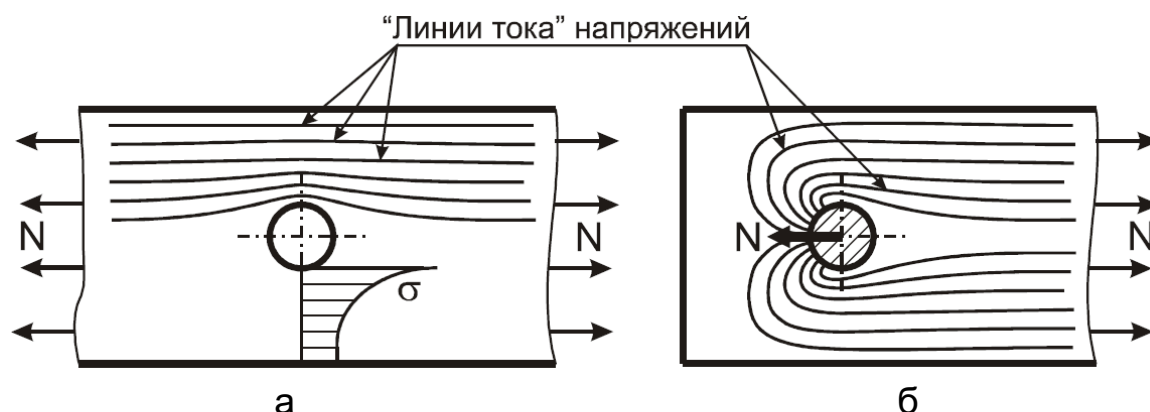


Рисунок 4 – К формированию концентрации напряжений в отверстии растягиваемой пластины (а) и у отверстия болтового соединения (б).
Часть рисунка 7 из [1]

Из аналитического решения для бесконечной пластины единичной толщины с отверстием (задача Кирша) теоретический коэффициент концентрации нормальных напряжений $\alpha = 3$ [11], и это его верхняя граница. Для пластин конечной ширины b есть эмпирическая формула

$\alpha \approx 2 + (1 - d / b)^3 < 3$. Если это так было бы и для случая болтового соединения, то в соответствии со значениями номинальных напряжений из табл. 2 максимальные напряжения σ_x в отверстиях пластины из ПКМ образца не должны превышать 230 МПа. Но это противоречит расчетным данным, приведенным на графиках рис. 3 и 5. Одну из причин объясняют те же графики рис. 3: усилия \underline{N}_j воспринимают в основном слои ПКМ с углом укладки 0 градусов, значительно меньше – слои с углами укладки ± 45 градусов, а слои с углом укладки 90 градусов – фактически не воспринимают. Т.е. площадь сечения, создающая активное сопротивление усилию \underline{N}_j , значительно меньше, чем расчетная в формулах (4). Второй причиной является изгиб пластины из ПКМ, что вызывает увеличение максимальных значений напряжений в левой части графиков рис. 3.

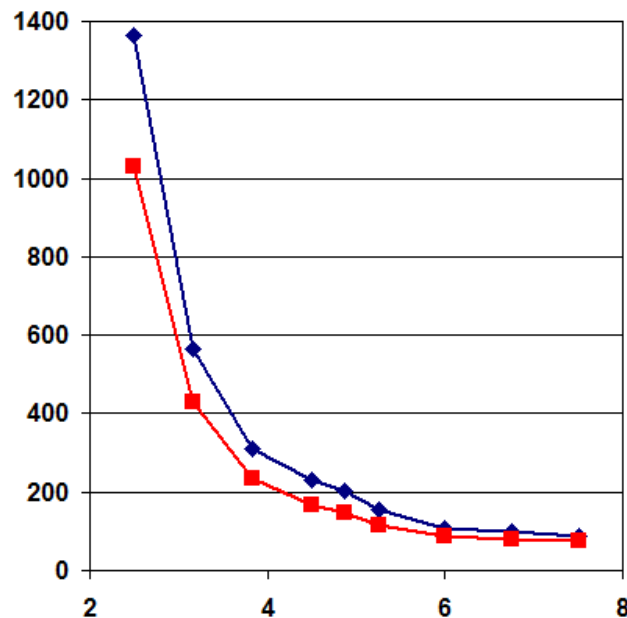


Рисунок 5 – Огибающие графики (концентрация) напряжений σ_{11} (МПа) у отверстий (◆ – отверстие 1, ■ – отверстие 2) в ПКМ болтового соединения, ПКМ-0, $\delta = 10$ мкм, в узлах конечных элементов слоя с максимальным напряжением на поверхностях отверстий, в поперечном направлении пластины (вдоль оси Y)

Из графиков рис. 5 имеем, что обобщенный коэффициент концентрации напряжений значительно больше трех единиц.

Добавим, что среднеарифметические значения напряжений σ_{11} и σ_x , рассчитанные из данных графиков, изображенных на рис. 3, составляют 244 (и 162) МПа для первого отверстия, 138 (и 88) МПа – для второго.

Итак, ситуация с σ_x в ослабленных отверстиями пластинах из ПКМ значительно отличается от "классических" представлений и требует дополнительного анализа.

Оценивание отдельных составляющих разрывного напряжения

В напряжениях σ_x , изображенных на графиках рис. 5, можно выделить три составляющие: от усилия свинчивания, обозначили их как $\bar{\sigma}_x$, от растягивания пластины силой N_x , обозначили как $\underline{\sigma}_x$, и от изгиба пластины той же силой N_x , обозначили как $\underline{\sigma}_x$. Рассмотрели эти составляющие отдельно, причем из линейности свойств материала

$$\sigma_x = \bar{\sigma}_x + \underline{\sigma}_x + \underline{\sigma}_x. \quad (6)$$

Контактной составляющей на поверхности отверстия вдоль линии 1 рис. 2,а нет, поскольку эти зоны отверстий в ПКМ не являются зонами контакта, о чем свидетельствует рис. 7 из [6]. Под поверхностью отверстий "отголоски" контактных напряжений могут проявляться, но незначительно и ими пренебрегли.

В пояснении к рис. 4,а из [7] указано, что только от свинчивания соединения максимальные значения в точке 2 (т.е. на линии 1 рис. 2,а) $\sigma_x \approx (30 \div 40)$ МПа, т.е. составляли лишь несколько процентов от максимальных значений σ_x от полной нагрузки (см. рис. 3). Поэтому приняли, что $\bar{\sigma}_x = 35$ МПа.

При оценивании напряжений от изгиба, т.е. $\underline{\sigma}_x$, использовали результаты расчетов и коэффициент изгиба [12, 13], в данном случае это была формула

$$k_u = \frac{\sigma_u}{\bar{\sigma}_x} = \frac{\sigma_u}{\sigma_0 - \bar{\sigma}_x}, \quad (7)$$

где амплитуды изгибных напряжений σ_u и средние напряжения σ_0 вычисляли по стандартным формулам

$$\sigma_u = 0.5(\sigma_{max} - \sigma_{min}), \quad \sigma_0 = 0.5(\sigma_{max} + \sigma_{min}), \quad (8)$$

а расчетные напряжения σ_{max} и σ_{min} брали из графиков напряжений σ_x (см. рис. 3) по толщине пластины в ослабленном отверстии сечении (линия 1 на рис. 2,а). Иначе говоря, из этих графиков выделяли составляющую напряжений растяжения без напряжений изгиба, а также изгибную составляющую, причем возможной нелинейностью графиков последней пренебрегали.

В табл. 2 представлены максимальные пиковые значения напряжений $((\sigma_x)_{max})_i$, $i = 1, 2$, в отверстиях, которые соответствуют

крайнему левому пику рис. 3,а. Это – значения для σ_{max} в формулах (8). А в табл. 4 занесены аналогичные пиковые значения $((\sigma_x)_{max})_i$, $i = 1, 2$, в отверстиях, которые соответствуют крайнему правому пику рис. 3,а. Это и есть значения для σ_{min} в формулах (8).

Таблица 4 – Минимальные значения пиковых напряжений $((\sigma_x)_{max})_i$, $i = 1, 2$, в отверстиях, МПа

Вариант структуры	$((\sigma_x)_{max})_1$				$((\sigma_x)_{max})_2$				Средние значения $((\sigma_x)_{max})_1$	Средние значения $((\sigma_x)_{max})_2$
	Зазор δ , мкм				Зазор δ , мкм					
	0	10	20	70	0	10	20	70		
ПКМ–0	367	315	245	172	18	-106	-97	-270	275	-114
ПКМ–I	435	413	374	321	109	-17	-26	-144	386	-20
ПКМ–II	590	514	496	462	215	115	192	-4	516	130
ПКМ–III	704	666	607	622	324	251	215	155	650	236
ПКМ–IV	673	624	606	560	295	221	196	127	616	210
ПКМ–V	686	645	619	541	301	195	194	157	623	212

Рассчитанные согласно (8) и (7) значения σ_u , σ_0 и k_u приведены в табл. 5, 6 и 7 соответственно.

Таблица 5 – Значения напряжений $(\sigma_u)_i$, $i = 1, 2$, в отверстиях, МПа

Вариант структуры	$(\sigma_u)_1$				$(\sigma_u)_2$				Средние значения $(\sigma_u)_1$	Средние значения $(\sigma_u)_2$
	Зазор δ , мкм				Зазор δ , мкм					
	0	10	20	70	0	10	20	70		
ПКМ–0	516	525	552	526	512	571	571	592	529	561
ПКМ–I	496	483	486	441	480	509	498	511	476	499
ПКМ–II	358	396	392	337	361	400	361	396	371	379
ПКМ–III	253	269	281	225	253	268	269	265	257	264
ПКМ–IV	259	281	273	236	265	290	285	281	262	280
ПКМ–V	263	281	276	259	270	296	288	286	270	285

Таблица 6 – Значения напряжений $(\bar{\sigma}_x)_i$, $i = 1, 2$, в отверстиях, МПа

Вариант структуры	$(\bar{\sigma}_x)_1$				$(\bar{\sigma}_x)_2$				Средние значения $(\bar{\sigma}_x)_1$	Средние значения $(\bar{\sigma}_x)_2$
	Зазор δ , мкм				Зазор δ , мкм					
	0	10	20	70	0	10	20	70		
ПКМ–0	848	805	762	663	495	430	439	287	769	413
ПКМ–I	896	861	825	727	554	457	437	332	827	445
ПКМ–II	913	875	853	764	541	480	518	357	851	474
ПКМ–III	922	900	853	812	542	484	449	385	872	465
ПКМ–IV	897	870	844	761	525	476	446	373	843	455
ПКМ–V	914	891	860	765	536	456	447	408	857	462

Как и ожидалось, наибольшие значения коэффициента изгиба $(k_U)_i$, $i = 1, 2$, на поверхностях отверстий реализовались в структуре ПКМ-0, а наименьшие – в структуре ПКМ-III (в табл. 7 выделены серым фоном). При этом значения коэффициента изгиба для второго отверстия оказались примерно вдвое больше, чем для первого отверстия.

Таблица 7 – Значения коэффициента изгиба $(k_U)_i$, $i = 1, 2$, в отверстиях

Вариант структуры	$(k_U)_1$				$(k_U)_2$				Средние значения $(k_U)_1$	Средние значения $(k_U)_2$
	Зазор δ , мкм				Зазор δ , мкм					
	0	10	20	70	0	10	20	70		
ПКМ-0	0.608	0.652	0.724	0.793	1.034	1.328	1.301	2.063	0.694	1.432
ПКМ-I	0.554	0.561	0.589	0.606	0.866	1.114	1.140	1.540	0.577	1.165
ПКМ-II	0.392	0.453	0.460	0.441	0.667	0.833	0.697	1.109	0.436	0.827
ПКМ-III	0.274	0.299	0.329	0.277	0.467	0.554	0.599	0.688	0.295	0.577
ПКМ-IV	0.289	0.323	0.323	0.310	0.505	0.609	0.639	0.753	0.311	0.626
ПКМ-V	0.288	0.315	0.321	0.338	0.504	0.649	0.644	0.701	0.315	0.624

Коэффициенты концентрации разрывных напряжений

Осталось оценить коэффициенты концентрации напряжений $\bar{\alpha}_x$, т.е. только от "чистого" растяжения, а также обобщенные коэффициенты концентрации напряжений σ_x .

Коэффициенты концентрации напряжений $(\alpha_{(\bar{\sigma}_x)})_i$, $i = 1, 2$, определяли как результат деления значений напряжений $\bar{\sigma}_x$ из табл. 6 на соответствующие им значения номинальных напряжений $(\sigma_x)_{nom}$ из табл. 3. Результаты представлены в табл. 8.

Обобщенные коэффициенты концентрации напряжений $(\alpha_{(\sigma_x)})_i$, $i = 1, 2$, рассчитывали как результат деления значений напряжений $(\sigma_x)_{max}$ из табл. 2 на соответствующие им значения номинальных напряжений $(\sigma_x)_{nom}$ из табл. 3. Результаты приведены в табл. 9.

Для второго отверстия коэффициенты концентрации напряжений больше, чем для первого, поскольку ослабленное сечение у первого отверстия передает полную нагрузку, а у второго – только ту часть нагрузки, которую воспринимает второй болт (см. формулы (5)). Это приводит к значительно меньшим номинальным напряжениям во втором сечении, чем в первом.

В статье [13] обобщенные коэффициенты концентрации напряжений имели асимптотическое ограничение приблизительно в 11 единиц. В ней анализировалось однорядное односрезное болтовое

соединение металлов (а не КМ), а также варьировались не структуры и зазоры, а усилие свинчивания и нагрузка. Т.е. данные табл. 8 и 9 еще раз подтвердили возможность получения значений коэффициента концентрации напряжений у отверстия в пластине, значительно большего, чем 3.

Таблица 8 – Значения коэффициентов концентрации напряжений $(\alpha_{(\bar{\sigma}_x)})_i$, $i = 1, 2$, на поверхности отверстий пластины из ПКМ

Вариант структуры	$(\alpha_{(\bar{\sigma}_x)})_1$				$(\alpha_{(\bar{\sigma}_x)})_2$				Средние значения $(\alpha_{(\bar{\sigma}_x)})_1$	Средние значения $(\alpha_{(\bar{\sigma}_x)})_2$
	Зазор δ , мкм				Зазор δ , мкм					
	0	10	20	70	0	10	20	70		
ПКМ–0	11.0	10.4	9.9	8.6	18.3	16.5	15.7	10.3	10.0	15.2
ПКМ–I	11.6	11.2	10.7	9.4	20.5	18.3	16.8	11.8	10.7	16.9
ПКМ–II	11.9	11.4	11.1	9.9	21.6	19.2	19.9	12.7	11.1	18.4
ПКМ–III	12.0	11.7	11.1	10.5	21.7	19.4	17.3	13.8	11.3	18.0
ПКМ–IV	11.6	11.3	11.0	9.9	21.0	19.0	17.8	13.3	10.9	17.8
ПКМ–V	11.9	11.6	11.2	9.9	21.4	18.2	17.9	15.1	11.1	18.2

Таблица 9 – Значения обобщенных коэффициентов концентрации напряжений $(\alpha_{(\sigma_x)})_i$, $i = 1, 2$, на поверхности отверстий пластины с ПКМ

Вариант структуры	$(\alpha_{(\sigma_x)})_1$				$(\alpha_{(\sigma_x)})_2$				Средние значения $(\alpha_{(\sigma_x)})_1$	Средние значения $(\alpha_{(\sigma_x)})_2$
	Зазор δ , мкм				Зазор δ , мкм					
	0	10	20	70	0	10	20	70		
ПКМ–0	18.2	17.7	17.5	15.9	38.6	39.8	37.3	32.6	17.3	37.1
ПКМ–I	18.5	17.9	17.5	15.6	39.6	40.0	37.3	31.3	17.4	37.1
ПКМ–II	16.9	17.0	16.6	14.8	37.4	36.6	35.2	28.1	16.3	34.3
ПКМ–III	15.7	15.6	15.2	13.9	33.2	31.5	29.0	24.5	15.1	29.5
ПКМ–IV	15.5	15.4	15.0	13.4	33.0	32.0	30.6	24.6	14.8	30.0
ПКМ–V	15.7	15.7	15.2	13.7	33.6	31.4	30.8	27.0	15.1	30.7

Следует заметить, что если для расчета номинальных напряжений использовать площадь не полного нетто-сечения, а лишь часть его, заполненную слоем с углом укладки 0 градусов, то расчетная площадь уменьшится вчетверо, поэтому вчетверо увеличатся номинальные напряжения табл. 3 и вчетверо уменьшатся коэффициенты концентрации напряжений табл. 8 и 9. Тогда их значения будут сопоставимы со значениями, полученными в [13] для однородного материала и согласуются с рис. 5.

Кстати, стандарт предлагает обязательно оговаривать, какое сечение использовалось для расчета номинальных напряжений [10].

Выводы

По результатам численного моделирования можно сформулировать следующие основные выводы из анализа разрывных напряжений и коэффициентов концентрации напряжений в зонах отверстий в пластинах из ПКМ образца болтового соединения:

1. Существуют значительное влияние как структуры, так и величины зазора между боковыми поверхностями болта и отверстия, на величины максимальных (пиковых) напряжений σ_x вдоль линии 1 рис. 2, а.

2. Наибольшие значения коэффициента изгиба на поверхностях отверстий реализовывались в структуре ПКМ-0, а наименьшие – в структуре ПКМ-III. При этом значение коэффициента изгиба для второго отверстия оказалось примерно вдвое больше, чем для первого отверстия.

3. При использовании для определения номинальных напряжений значения площади полного нетто-сечения коэффициент концентрации напряжений достигал значения в 12 единиц для первого и 22 единицы – для второго отверстия. При том же условии обобщенный коэффициент концентрации напряжений достигал значения в 18 единиц для первого и 40 единиц – для второго отверстия.

4. Значения указанных в п. 3 коэффициентов будут сопоставимы со значениями, характерными для однородного материала, если в значении площади нетто-сечения учитывать только площади слоев с углом укладки 0 градусов по отношению к силе, растягивающей образец.

Список использованных источников

1. Василевский, Е.Т. Система экспериментального обеспечения расчета на прочность механических соединений деталей из композитов [Текст] / Е.Т. Василевский, А.З. Двейрин, Я.С. Карпов, С.П. Кривенда // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2010. – № 47. – С. 42 – 52.

2. Двейрин, А.З. Обзор и анализ состояния проблемы расчетно-экспериментального обеспечения проектирования агрегатов самолета из полимерных композитов с механическими соединениями деталей [Текст] / А.З. Двейрин // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. Харьков.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2014. – № 66. – С. 5 – 19.

3. Rudakov, K. Finite element analysis of the effect of technological factors on the strength of composite bolted joints [Текст] / K. Rudakov, S. Shukaev, G. Krivov, V. Matvienko // *Mechanotronic Systems and Materials* 2014. Selected Papers. Opole University of Technology, 2015. – P. 103 – 108.

4. Дифучин, Ю.М. Чисельне моделювання болтових з'єднань з ПКМ. Повідомлення 1. Створення змішаних 3D-моделей [Електронний ресурс] / Ю.М. Дифучин, К.М. Рудаков // *Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Машинобудування*. – 2016. – № 2 (77). – С. 100 – 107. DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2305-9001.2016.77.76975>

5. Дифучин, Ю.М. Чисельне моделювання болтових з'єднань з ПКМ. Повідомлення 2. Вплив зазорів і структури ПКМ на характеристики напружено-деформованого стану болтів [Електронний ресурс] / Ю.М. Дифучин, К.М. Рудаков // *Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Машинобудування*. – 2016. – № 3(78). – С. 132 – 145. DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2305-9001.2016.78.87475>

6. Рудаков, К.М. Вплив структури ПКМ на характеристики напружено-деформованого стану в околі отворів болтових з'єднань з ПКМ [Текст] / К.М. Рудаков, Ю.М. Дифучин // *Технологические системы*. – 2016. – № 4(77). – С. 28 – 40.

7. Dyfuchyn, Y. Numerical modelling of bolted composite joints. Bolts rigidity effect on normal stresses in the composite layers [Електронний ресурс] / Y. Dyfuchyn, K. Rudakov // *Mechanics and Advanced Technologies* #1(79). – 2017. P. 19 – 25. DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.79.95756>

8. Кучер, Н.К. Деформирование и прочность слоистых углепластиков при статическом термомеханическом нагружении [Текст] / Н.К. Кучер, М.Н. Заразовский, Е.Л. Данильчук // *Механика композитных материалов*. – 2012. – Т. 48, № 6. – С. 963 – 980.

9. ГОСТ 25602-80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах. [Текст] – М. : Из-во стандартов, 1980. – 17 с.

10. Офіційний сайт Національного банку стандартизованих науково-технічних термінів України [Електронний ресурс]: http://www.ukrndnc.org.ua/index.php?option=com_terminus&Itemid=191

11. Хан, Х. Теория упругости: Основы линейной теории и ее применения : пер. с нем. Е.А. Когана; под ред. Э.И. Григолюка [Текст] / Х. Хан. – М. : Мир, 1988. – 344 с.

12. Халилаева, Р.Ю. Исследование напряжений от изгиба в двух- и трехрядных соединениях внахлест и их влияние на долговечность [Текст] / Р.Ю. Халилаева // *Вопросы проектирования и производства*

конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". – 2009. – Вып. 2 (58). – С. 32 – 38.

13. Решетникова, Р.Ю. Влияние осевого натяга на локальное напряженное состояние в односрезных болтовых соединениях [Текст] / Р.Ю. Решетникова // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". – 2013. – Вып. 1 (73). – С. 87 – 99.

Поступила в редакцию 07.07.2017.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Гайдачук,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*