

## ИСПЫТАНИЕ НА СМЯТИЕ СЛОИСТЫХ ПЛАСТИКОВ

Согласно принятой в инженерной практике и хорошо отработанной на механических соединениях системе условных расчетов смятие представляет собой обособленный вид разрушения соединения. Но на самом деле смятие, а точнее точка перехода от смятого материала к несмятому, является инициатором для таких видов разрушения, как разрыв детали, срез детали или вырыв материала детали. Это объясняет эффективность применения прессовых посадок в целях повышения усталостных характеристик соединения. Таким образом, картина напряженно-деформированного состояния элементов соединения на самом деле намного сложнее, чем та, которую можно будет описать, опираясь на традиционную систему инженерных условных расчетов. Для металлических деталей удалось обосновать приемлемые уровни осредненного напряжения смятия. В случае рассмотрения композитных материалов (КМ) необходимо учитывать анизотропию характеристик, влияние структуры пакета [1], а также влияние геометрических параметров, среди которых согласно [2] доминируют толщина детали и диаметр крепежного элемента (КЭ). Существующие стандарты эти особенности не учитывают. Так, в стандарте [3] рекомендуется использовать только один вариант толщины детали и диаметра КЭ, но в нем не исключается возможность использования (по необходимости) и других вариантов геометрических параметров, правда, вопрос анизотропии свойств не рассматривался вообще.

Для однозначной оценки допустимого уровня осредненных напряжений смятия необходимо назначить признаки предельного допустимого уровня смятия материала. Этот вопрос дискутируется до сих пор. Так, в работе [4] предлагается ориентироваться на 4%-ную овализацию отверстия. Этот критерий успешно используется для металлических деталей и одним из возможных объяснений выбора такого значения может быть тот факт, что для посадки на холодно предельно допустимый натяг составляет 5%. Правда, для металлов [5] допустимый уровень предельных осредненных напряжений смятия ниже предела пропорциональности (кроме случая прессовой посадки). В случае слоистых КМ обеспечить посадку с натягом затруднительно, возможно поэтому в стандарте [3] допустимая овализация отверстия снижена до 2%. Здесь следует отметить, что речь идет об оста-

точной оваллизации, то есть в материале детали произошла пластическая деформация, что в КМ недопустимо, так как в месте смятия зарождаются микротрещины, которые могут распространиться внутрь пакета и вызвать в дальнейшем разрушение. Таким образом, первым аргументом против назначения остаточной оваллизации отверстия являются хрупкость материала и невозможность обеспечения посадки тела болта в отверстие с гарантированным натягом. Второй аргумент – это тот факт, что все расчетные схемы многорядных механических соединений [6 – 8] базируются на линейной постановке, т.е. наличие пластических деформаций не допускается. Тогда последующая оценка несущей способности соединения по смятию должна быть основана на трактовке прочности на смятие как начала нелинейности на диаграмме «нагрузка–перемещение» (рис. 1), а численное значение вычисляется так:

$$[\sigma_{см}] = \frac{N_{см}}{d\delta}, \quad (1)$$

где  $N_{см}$  – см. рис. 1.

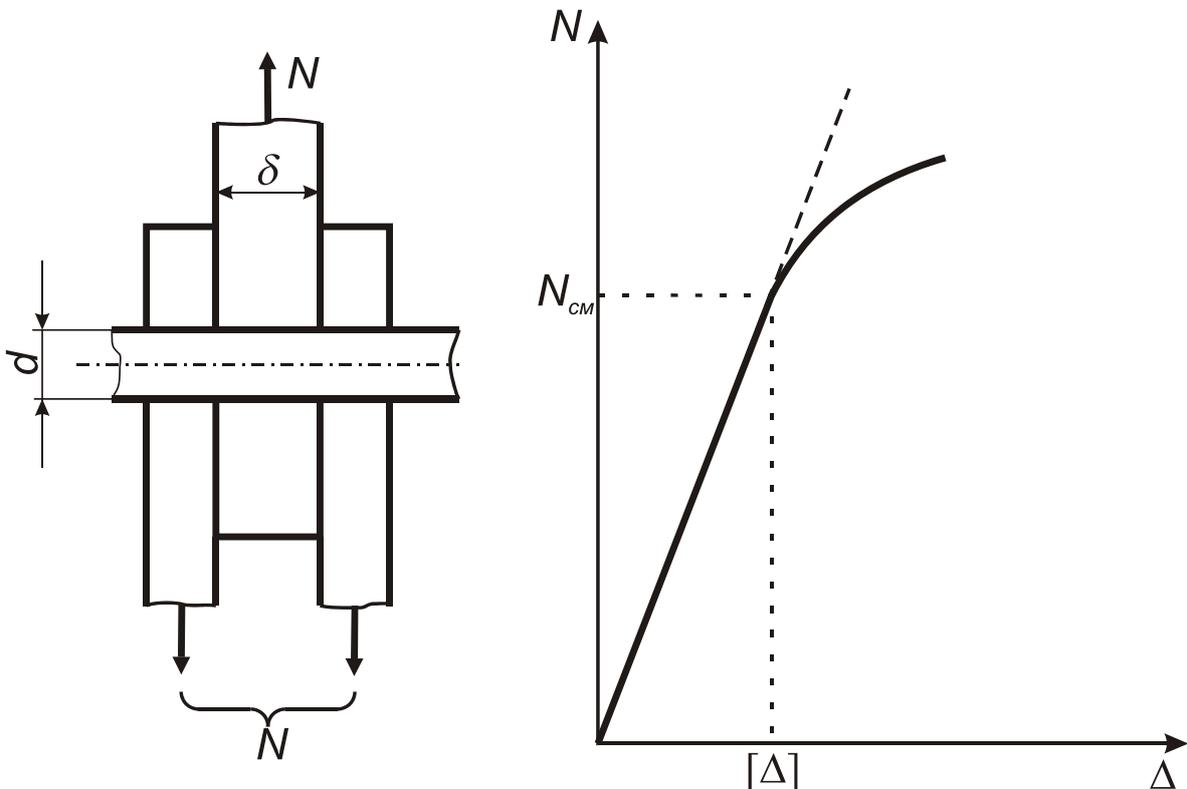


Рисунок 1 – К определению прочности КМ на смятие

В работе [1] приведены и другие аспекты проблемы экспериментального обеспечения расчета соединения, в частности на смятие. Но

нет гарантий того, что охвачены все стороны проблемы. Таким образом, на основании сказанного выше можно сделать вывод, что проблема экспериментального обеспечения многогранна и противоречива: с одной стороны, следует обеспечить максимально точное описание поведения материала в зоне контакта с учетом наиболее важных факторов, действующих в реальном соединении; с другой – при интерпретации результатов и их анализе необходимо оставаться в рамках инженерной методики расчета соединения. Последнее требование ограничивает применение анализа методом конечных элементов зон контакта КЭ с отверстием в детали. Решение всех задач требует комплексного подхода при планировании экспериментов и больших затрат на апробацию. Поэтому возможно лишь поэтапное решение перечисленных задач.

В первую очередь необходимо оценить характер анизотропии прочности на смятие и влияние на него структуры материала и таких геометрических параметров, как диаметр КЭ и толщина детали. При исследовании анизотропии прочности на смятие необходимо избежать влияния краевых эффектов, что делает нецелесообразным использование образцов в виде прямоугольных пластин. Наиболее подходящим в этом плане является образец в виде диска [6]. На основе данного прототипа были разработаны унифицированный образец (рис. 2), позволяющий измерять прочность на смятие в пяти направлениях (по шесть точек измерения в каждом), и необходимая для испытаний оснастка. Размеры образца подобраны таким образом, чтобы, выполняя условия закрепления образца в оснастке, обеспечить расстояние между отверстиями не менее четырех диаметров, что позволит утверждать об отсутствии взаимного влияния. Такой подход даст возможность выполнить задачу с минимальными затратами материала.

Для анализа влияния структуры материала на величину прочности на смятие были рассмотрены наиболее распространенные варианты укладки однонаправленного углепластика (ЭЛУР-008П/5-211-БН):  $0^\circ$ –70%,  $\pm 45^\circ$ –20%,  $90^\circ$ –10%;  $0^\circ$ –50%,  $\pm 45^\circ$ –40%,  $90^\circ$ –10%;  $0^\circ$ –30%,  $\pm 45^\circ$ –60%,  $90^\circ$ –10% и  $0^\circ$ –80%,  $\pm 45^\circ$ –20%. Во всех случаях распределение слоев с разными углами укладки равномерное по толщине образца, а в случае  $0^\circ$ –50%,  $\pm 45^\circ$ –40%,  $90^\circ$ –10% было также рассмотрено влияние группировки слоев с укладкой  $0^\circ$  по середине и по краям пакета образца. С учетом требований по структуре были изготовлены образцы толщиной: 1,74, 3,48, 5,22 и 6,96 мм. Для крепежных элементов выбраны следующие значения диаметра тела 4, 5, 6 мм. Геометрические параметры были подобраны

таким образом, чтобы обеспечить относительную толщину образца (отношение толщины образца к диаметру КЭ) в пределах 0,3...2,0, что характерно для большинства соединений, работающих на срез; для этого был составлен усеченный план экспериментов.

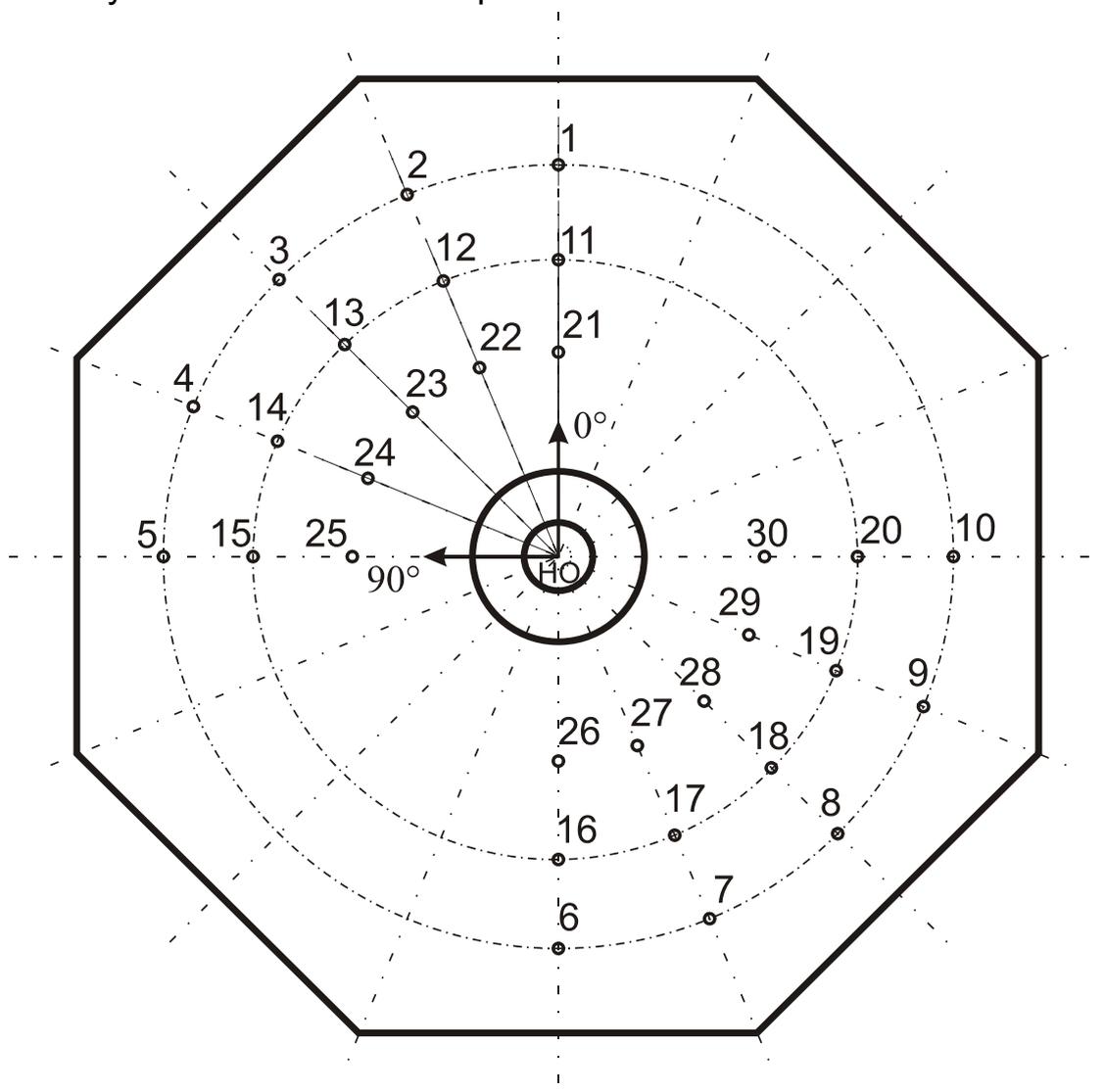


Рисунок 2 – Унифицированный образец (числами обозначен порядок измерений при испытаниях)

В результате проведения серии экспериментов были получены результаты, приведенные в табл.1 и 2 и на графиках (рис. 3 и рис. 4). В указанных таблицах даны результаты испытаний только для двух структур материала. Полноценное исследование влияния структуры материала для всех вариантов комбинаций геометрических параметров требует значительных затрат, поэтому для предварительного анализа были проведены эксперименты с образцами толщиной 5,22 мм и КЭ диаметром 6 мм. Результаты экспериментов даны в табл. 3 и показаны на рис. 5.

Таблица 1 – Значения напряжений смятия для образцов со структурой пакета  $0^{\circ}$ –70%,  $\pm 45^{\circ}$ –20%,  $90^{\circ}$ –10%, МПа

Номер образца	Толщина образца $\delta$ , мм	Диаметр КЭ $d$ , мм	Направление нагружения образца $\theta$ , $^{\circ}$				
			0	22,5	45	67,5	90
1	1,74	6	164	184	177	159	162
2	1,74	5	244	230	206	173	208
3	1,74	4	260	242	186	164	175
4	3,48	6	447	381	321	282	305
5	3,48	4	466	449	430	404	404
6	5,22	6	475	508	361	328	362
7	5,22	4	491	521	482	516	496
8	6,96	4	299	238	263	231	174

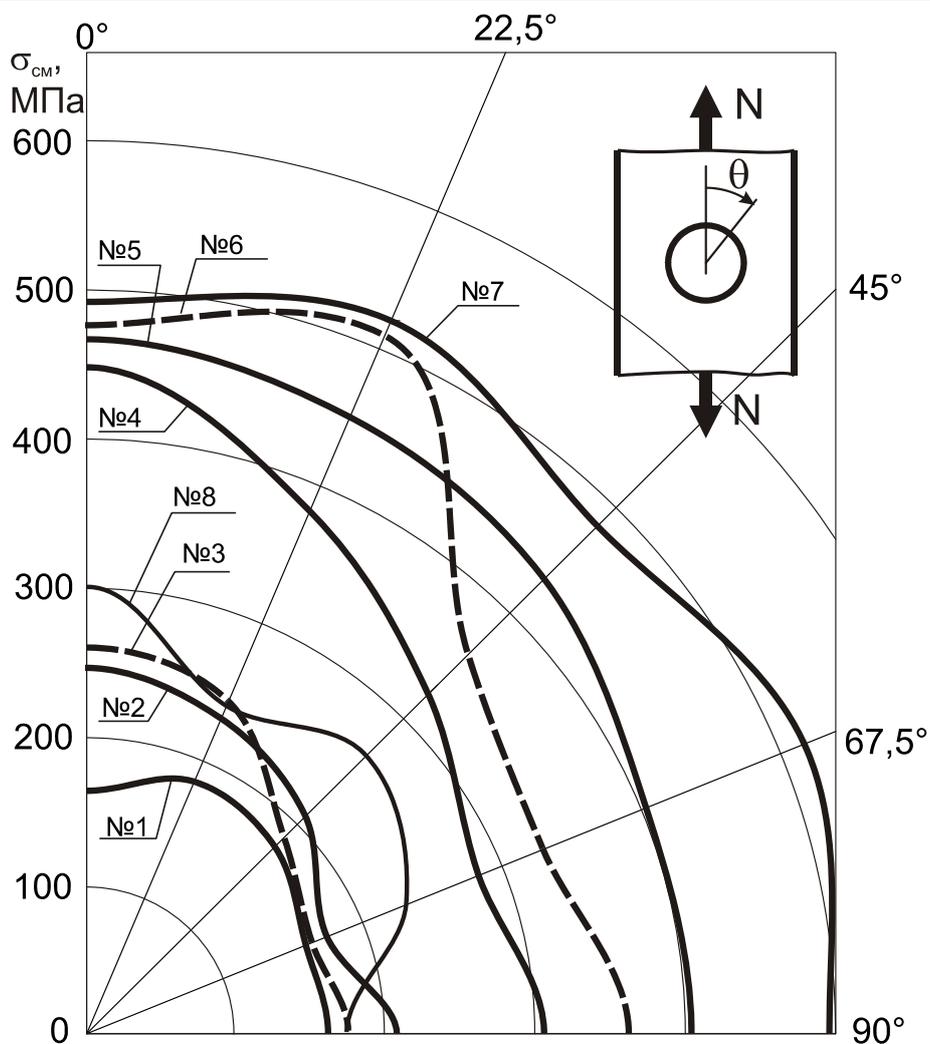


Рисунок 3 – Распределение условного предела прочности на смятие для образцов структуры  $0^{\circ}$ –70%,  $\pm 45^{\circ}$ –20%,  $90^{\circ}$ –10%

Таблица 2 – Значения напряжений смятия для образцов со структурой пакета  $0^{\circ}$ – $50\%$ ,  $\pm 45^{\circ}$ – $40\%$ ,  $90^{\circ}$ – $10\%$ , МПа

Номер образца	Толщина образца $\delta$ , мм	Диаметр КЭ $d$ , мм	Направление нагружения образца $\theta$ , $^{\circ}$				
			0	22,5	45	67,5	90
1	1,74	5	398	331	220	215	221
2	1,74	4	349	296	268	209	251
3	3,48	6	352	369	393	372	371
4	3,48	4	497	481	449	502	478
5	5,22	6	388	406	429	369	368
6	5,22	4	632	547	513	523	514
7	6,96	4	272	260	221	189	172

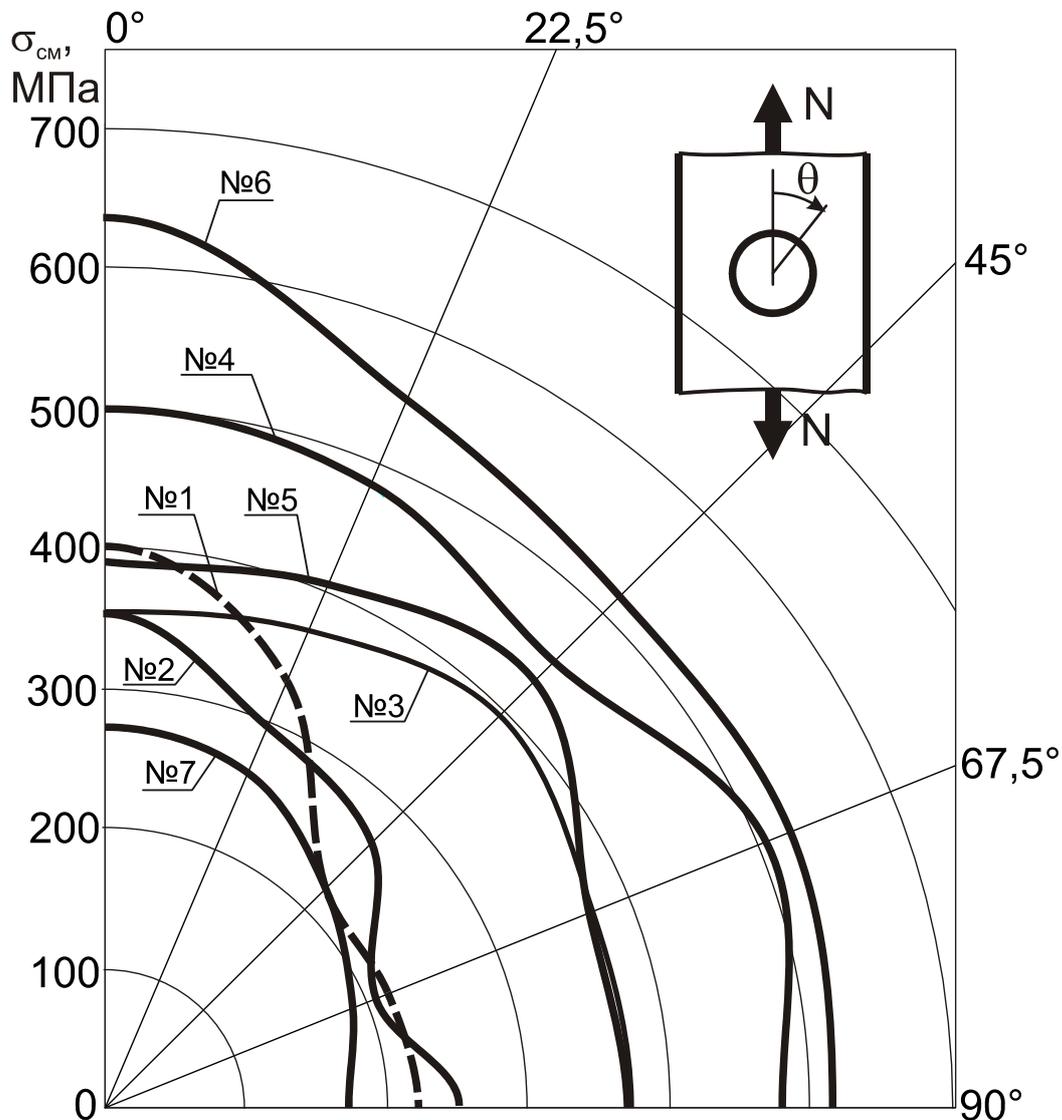


Рисунок 4 – Распределение условного предела прочности на смятие для образцов структуры  $0^{\circ}$ – $50\%$ ,  $\pm 45^{\circ}$ – $40\%$ ,  $90^{\circ}$ – $10\%$

Таблица 3 – Значения напряжений смятия для образцов с различными структурами пакета, МПа

Номер структуры	Характеристика структуры пакета	Направление нагружения образца, °				
		0	22,5	45	67,5	90
1	0°–50%, ±45°–40%; 90°–10% (слои 0° внутри)	352	285	280	291	293
2	0°–30%, ±45°–60%; 90°–10%	391	295	279	233	266
3	0°–50%, ±45°–40%, 90°–10%	388	406	429	369	368
4	0°–70%, ±45°–20%, 90°–10%	475	508	361	328	362
5	0°–80%; ±45°–20%	272	228	195	149	236
6	0°–50%, ±45°–40%; 90°–10% (слои 0° снаружи)	336	299	297	304	273

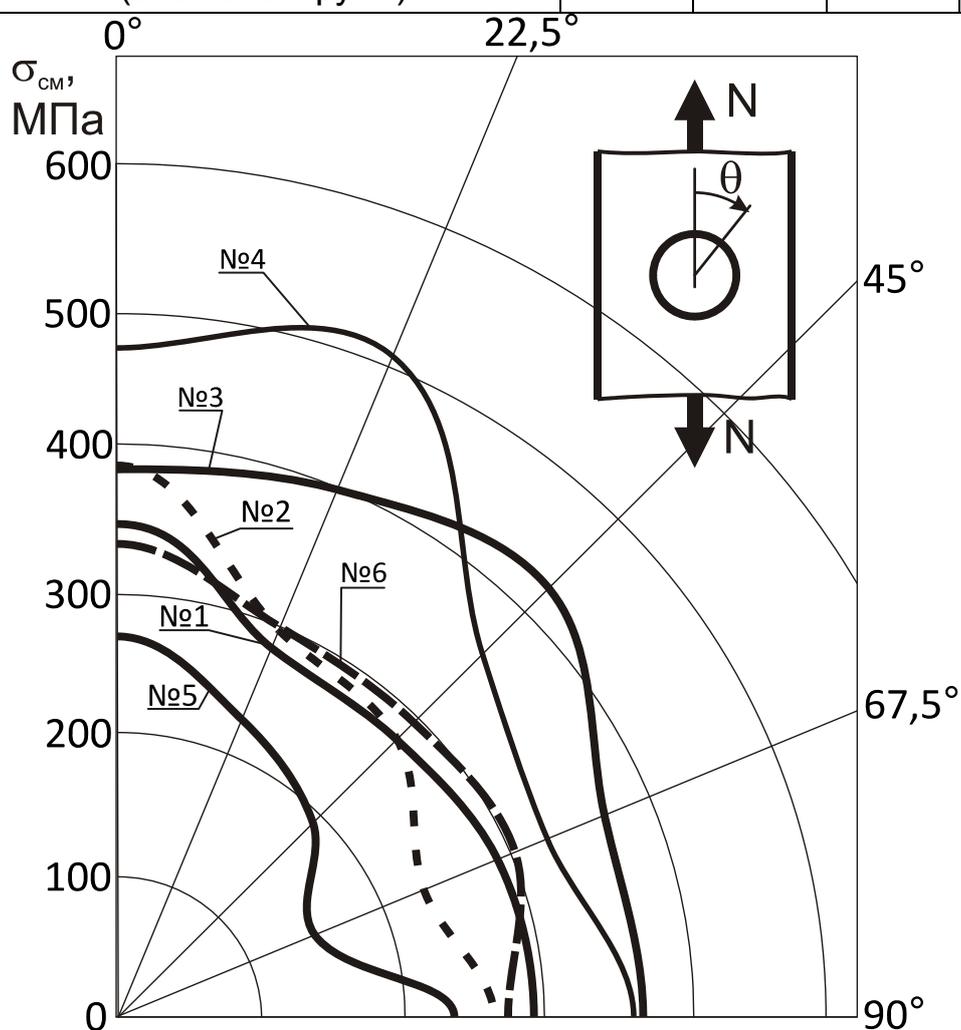


Рисунок 5 – Распределение условного предела прочности на смятие для образцов со структурами № 1 – № 6

На основе результатов испытаний на смятие были получены инженерные зависимости для прогнозирования значений предела прочности на смятие отдельно для каждой структуры:

– для  $0^\circ$ – $70^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ – $20^\circ$ ,  $90^\circ$ – $10^\circ$

$$\sigma_{см} = (356 \cos^2 \theta + 55 \sin 2\theta^2 + 286 \sin^4 \theta) (-0,684 \bar{\delta}^3 + 0,975 \bar{\delta}^2 + 0,967 \bar{\delta} + 0,192); \quad (2)$$

– для  $0^\circ$ – $50^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ – $40^\circ$ ,  $90^\circ$ – $10^\circ$

$$\sigma_{см} = (413 \cos^2 \theta + 65 \sin 2\theta^2 + 339 \sin^4 \theta) (-1,08 \bar{\delta}^3 + 2,54 \bar{\delta}^2 - \bar{\delta} + 0,83), \quad (3)$$

где  $\bar{\delta} = \delta/d$ ,  $\delta$  – толщина образца;  $d$  – диаметр КЭ;  $\theta$  – угол обхода контура отверстия.

Обработка и изучение полученных в ходе экспериментов результатов позволили сделать такие выводы:

– перепад значений предела прочности на смятие из-за анизотропии свойств исследованного материала изменяется в пределах 11... 60%;

– в основном минимальное значение предела прочности на смятие можно обнаружить в направлении  $45...67,5^\circ$ , ближе к верхней границе указанного диапазона;

– из сказанного выше следует, что в случае расчета механических соединений нагруженных нормальным, сдвиговым усилием и температурным полем (в ряду несколько КЭ), следует использовать минимальное значение предела прочности на смятие. В случае, когда направление вектора силы, действующего на КЭ, заранее определено и гарантировано, то можно использовать значение предела прочности на смятие в данном направлении;

– функция влияния относительной толщины детали имеет максимум при значении  $\bar{\delta} = 0,8...1,3$ , что необходимо дополнительно проверить, так как при больших значениях относительной толщины возможно усиление влияния изгиба стержня на условия смятия;

– при обработке результатов эксперимента возник вопрос о разработке надежного критерия назначения условного предела прочности материала на смятие, что требует проведения дальнейших исследований;

– на сопротивление детали смятию влияет структура пакета. Как показали приведенные в табл. 3 результаты, предел прочности на смятие прямо зависит от доли слоев перекрестного армирования (в данном случае  $\pm 45^\circ$ ). Рекомендуется обеспечивать долю слоев  $\pm 45^\circ$  не ниже 30%. Слои с разными углами укладки должны быть равномерно распределены по толщине пакета;

– группирование слоев с укладкой  $0^\circ$  приводит к снижению предела прочности материала на 10...34%. При этом были обнаружены такие редкие виды разрушения, как срез по четырем сторонам блока с укладкой  $0^\circ$ ;

– для успешного обобщения результатов необходимо провести дополнительно испытания с другими материалами.

Таким образом, проведенные исследования позволили решить ряд проблем обеспечения расчетов механического соединения результатами экспериментального определения пределов прочности на смятие, а также оценить роль факторов, влияющих на эту величину. С другой стороны, был выявлен ряд проблем, решение которых обеспечило бы достоверность результатов измерения.

#### Список использованных источников.

1. Система экспериментального обеспечения расчета на прочность механических соединений деталей из композитов / Е.Т. Василевский, А.З. Двейрин, Я.С. Карпов, С.П. Кривенда // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 47. – Х., 2010. – С. 42 – 52.

2. Справочник по композиционным материалам: в 2 кн. / под ред. Дж. Любина / пер. с англ. А.Б. Геллера и др. Под ред. Б.Э. Геллера. – М.: Машиностроение, 1988. – Кн. 2. – 584 с.

3. ASTM D5961/ D5961M-05 Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates.

4. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков / Ю.М. Тарнопольский, Т.Я. Кинцис – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1981. – 272 с.

5. Киркач Н.Ф. Расчет и проектирование деталей машин: Учеб. пособие для техн. вузов / Н.Ф. Киркач, Р.А. Баласян. – 3-е изд., перераб. и доп. – Х.: Основа, 1991. – 276 с.

6. Карпов Я.С. Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов / Я.С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 359 с.

7. Карпов Я.С. Исследование напряженно-деформированного состояния многорядных механических соединений деталей из композиционных материалов / Я.С. Карпов. // Авиационно-космическая техника и технология: тр. Харьк. авиац. ин-та им. Н.Е. Жуковского. – Х., 1998. – С. 328 – 334.

8. Степин П.А. К расчету на срез соединений с прерывистыми связями / П.А. Степин. // Вестник инженеров и техников. – 1951. – № 4. – С. 175 – 179.

*Поступила в редакцию 04.03.2011.*

*Рецензент: канд. техн. наук, проф. В.В. Кириченко,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*