

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

При постановке и решении задач оптимального проектирования конструкций часто сталкиваются с необходимостью учета ограничений, обусловленных возможностями имеющегося технологического оборудования. Если речь идет о композиционных материалах (КМ), то многие традиционные способы изготовления композитных деталей определяют дискретный характер толщины пакета, которая не может быть произвольной и зависит от количества слоев, толщины ленты или ткани, коэффициента армирования, режима формования (в частности, давления), усадки связующего и т.д. Это в свою очередь означает, что толщина элементарного слоя КМ и его механические свойства, которыми непосредственно и руководствуются при проектировании и расчете, являются величинами взаимосвязанными (см. табл. 1). В этом случае целевую функцию задачи оптимального армирования необходимо рассматривать в виде

$$\delta_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n \delta_k = \delta_0 \sum_{k=1}^n m_k \rightarrow \min, \quad (1)$$

где δ_k – толщина k -го слоя с углом кладки φ_k ;
 m_k – количество монослоев КМ в k -м слое.

Таблица 1 – Механические характеристики некоторых КМ

| Свойства | Углепластики | | | | Стеклопластики | |
|-----------------|----------------|----------------|------------------|--------------|------------------|---------------|
| | MR50/ LTM25 | AS4/ 3501-6 | CFS003/ LTM25 | T300/ 934 | S2-449/ SP381 | M10E/ 3783 |
| E_1 , ГПа | 155 | 140 | 53,5 | 60 | 47 | 24,5 |
| E_2 , ГПа | 7,3 | 10 | 55 | 60 | 12 | 24 |
| G_{12} , ГПа | 4,2 | 7 | 2,85 | 5,7 | 4,75 | 4,7 |
| μ_{12} | 0,345 | 0,27 | 0,042 | 0,06 | 0,28 | 0,11 |
| F_{1p} , МПа | 2020 | 2250 | 615 | 625 | 1750 | 430 |
| F_{1c} , МПа | 1140 | 1450 | 640 | 655 | 1185 | 375 |
| F_{2p} , МПа | 20 | 55 | 650 | 605 | 60 | 385 |
| F_{2c} , МПа | 145 | 225 | 555 | 620 | 150 | 335 |
| F_{12} , МПа | 85 | 75 | 85 | 80 | 135 | 85 |
| δ_0 , мм | 0,15 | 0,13 | 0,23 | 0,2 | 0,09 | 0,22 |

Такой дискретный характер толщины обуславливает множественность оптимальных решений, представляющих собой комплекс рациональных схем укладки с одинаковой толщиной, но разной структурой.

На параметр m_k могут накладываться дополнительные ограничения, которые позволяют сузить область поиска оптимума задачи, например, требования четности или кратности числа m_k четырем (что обеспечивает ортотропию механических свойств и симметричность структуры по толщине), ограничения на соотношения толщин слоев по «правилу десяти процентов» и т.п.

«Правило десяти процентов» является своеобразной эволюцией концепции «черного алюминия» в практике проектирования композитных тонкостенных конструкций [1]. Согласно этому принципу исследуется на оптимум структура $[0/90/\pm\varphi]$, а совокупная толщина каждой группы слоев с ориентацией 0° , 90° и $\pm\varphi$ должна составлять не менее 10% от общей толщины пакета. Часто принимают $\varphi = 45^\circ$. Здесь можно провести аналогию с дифференциальным методом проектирования авиаконструкций из КМ [2], основанным на разделении функций составляющих элементов сообразно их жесткости и прочности: продольные (0°) и поперечные (90°) слои воспринимают растягивающие или сжимающие осевые усилия N_x и N_y , а перекрестные слои ($\pm\varphi$) – сдвиговую нагрузку Q_{xy} .

При решении статически неопределимых задач (к которым относятся и вопросы оптимального армирования композитных конструкций) часто применяют метод исключения неизвестных. Например, если речь идет о поиске рациональной структуры КМ, нередко прибегают к дополнительным упрощениям, заведомо назначая ряд проектных переменных, например углы укладки или толщину слоев. Это существенно упрощает анализ задачи, однако отнюдь не гарантирует получение наилучшего результата. Следует отметить, что такой подход может быть основан и сугубо на технологических соображениях. Например, при использовании новых типов армирующих материалов [3], в которых волокна изначально ориентированы относительно друг друга, а конструкция формируется укладкой таких многоаксиальных полуфабрикатов в пакет. В этом случае направления армирования и относительная толщина слоев являются величинами известными.

В связи с вышесказанным известный практический интерес представляет анализ влияния подобных дополнительных ограничений на массу (толщину) тонкостенных композитных конструкций.

В данной работе рассматривались задача оптимального армирования ортотропных КМ (1), находящихся в условиях плоского напряженного состояния (растяжение или сжатие и сдвиг в плоскости укладки слоев). В качестве ограничений на проектные параметры (n , φ_k и δ_k)

накладывались условия прочности (по критерию Цая – Ву), а также наиболее часто встречающиеся конструктивно-технологические ограничения. Исследовалось приращение толщины пакета при замене рациональной структуры:

- ортогонально-армированным КМ [0/90];
- схемой [0/90/±45] (допускалось вырождение того или иного слоя);
- структурой [0/90/±φ] (проектировалась согласно «правилу десяти процентов»);
- квазиизотропными КМ [0/90/±45], [0/±60], [90/±30].

В каждом случае оценивалось отношение

$$\Delta_{\delta} = \frac{\delta_{\Sigma}^*}{\delta_{\Sigma}}, \quad (2)$$

где δ_{Σ}^* – минимальная толщина пакета с учетом конструктивно-технологических ограничений на структуру КМ;

δ_{Σ} – минимальная толщина пакета, найденная только по условиям прочности без каких-либо дополнительных ограничений.

Рис. 1, 2 иллюстрируют существенное влияние рассматриваемых конструктивных и технологических ограничений на массу разрабатываемого изделия. Как следует из анализа этих рисунков, будучи наиболее удобными в плане технологического исполнения при выкладке слоев, ортогонально-армированные КМ являются наименее рациональными с конструктивной точки зрения, особенно если условия эксплуатации подразумевают нагружение с преобладающей долей сдвиговых усилий. В этом случае прирост массы по отношению к более рациональным схемам укладки может составлять до 500%.

Аналогичные выводы можно сделать и по результатам оптимизации структуры КМ с ограничением области допустимых решений квазиизотропными схемами армирования (увеличение массы до 200%).

Отмеченный негативный эффект усугубляется при использовании материалов с ярко выраженной анизотропией механических характеристик монослоя, в частности однонаправленных углепластиков. Эти примеры наглядно иллюстрируют тезисы [4]: вполне естественное стремление упростить изготовление или расчет композитных конструкций может поставить под сомнение эффективность замены традиционных материалов композитными, применение которых в изделиях АКТ, как известно, требует привлечения дополнительных коэффициентов безопасности при проектировании.

В этом смысле структура [0/90/±45] более рациональна: в рассматриваемых расчетных случаях прирост массы не превышал 20% при укладке пакета из однонаправленных монослоев и 5% в случае КМ на основе тканых армирующих материалов.

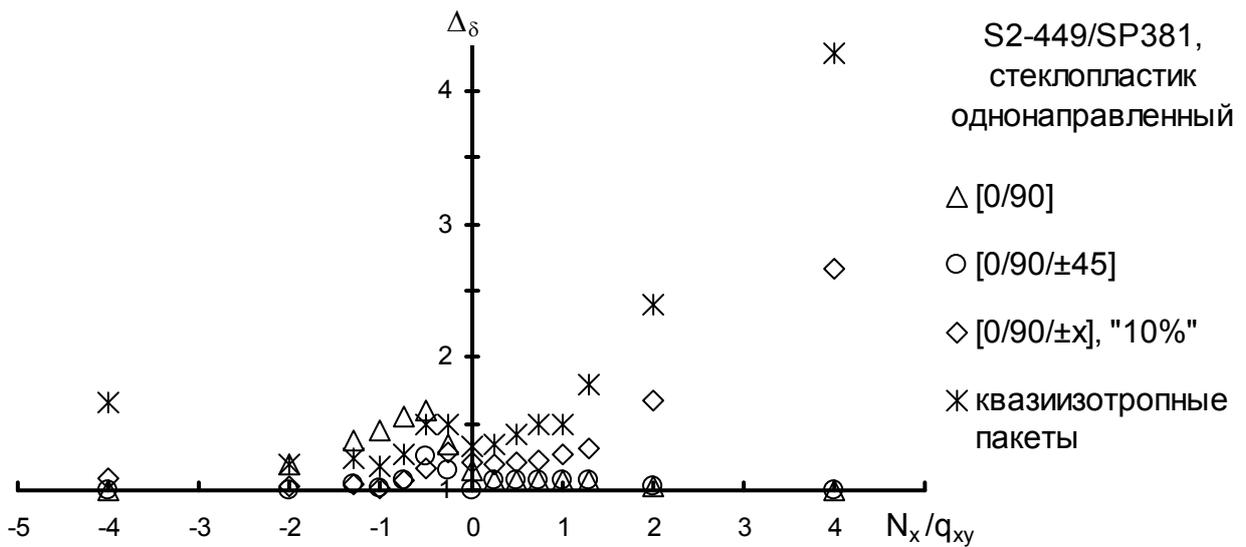
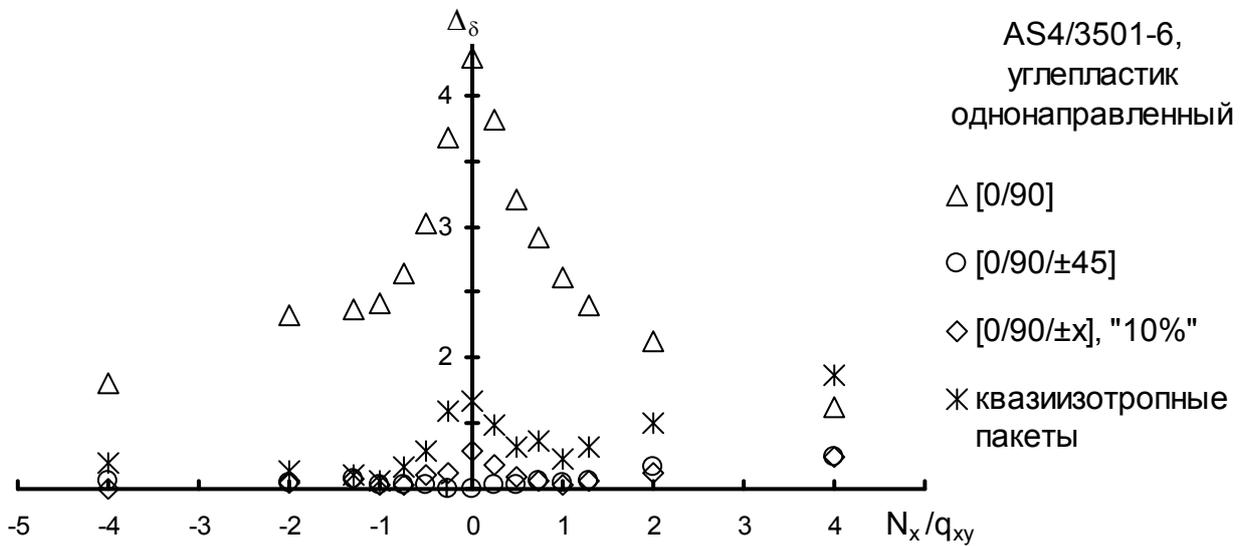
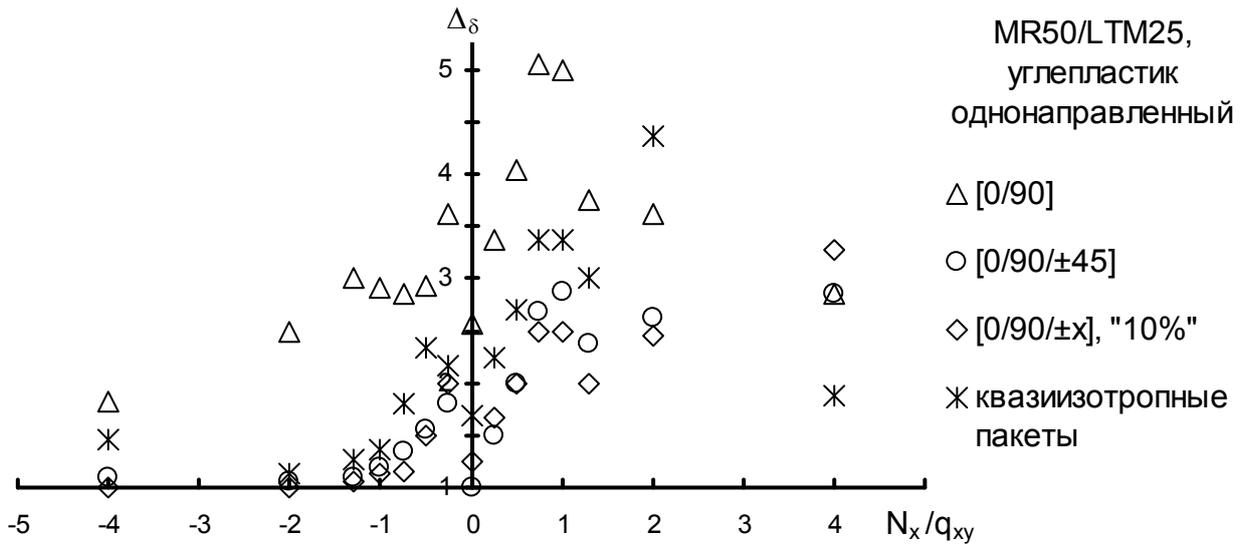


Рисунок 1 – Влияние дополнительных ограничений на толщину оптимальной структуры для КМ на основе однонаправленных армирующих материалов

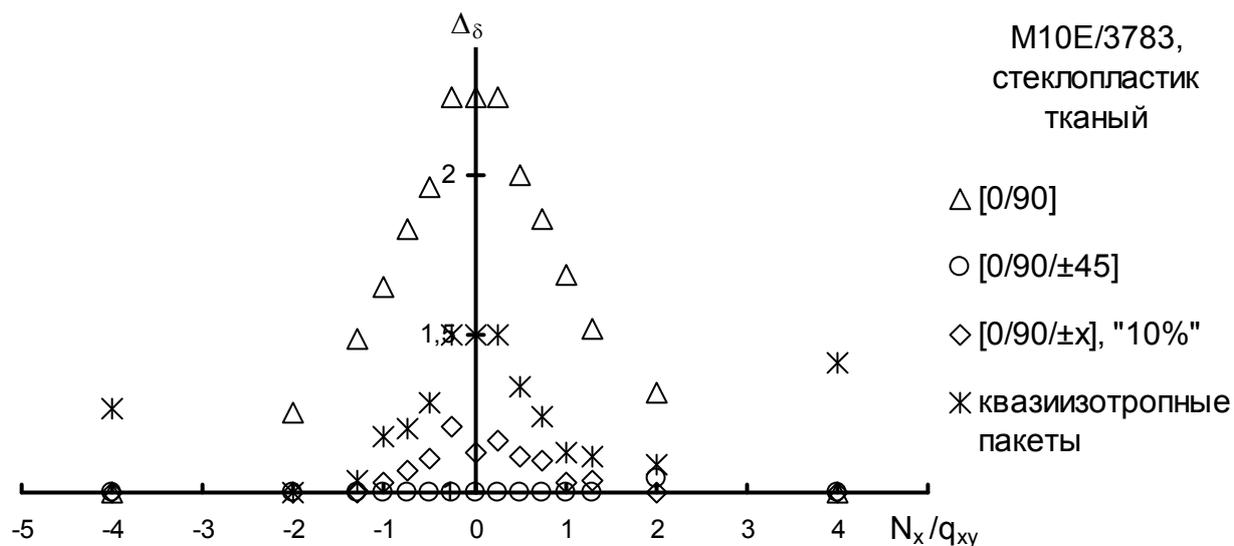
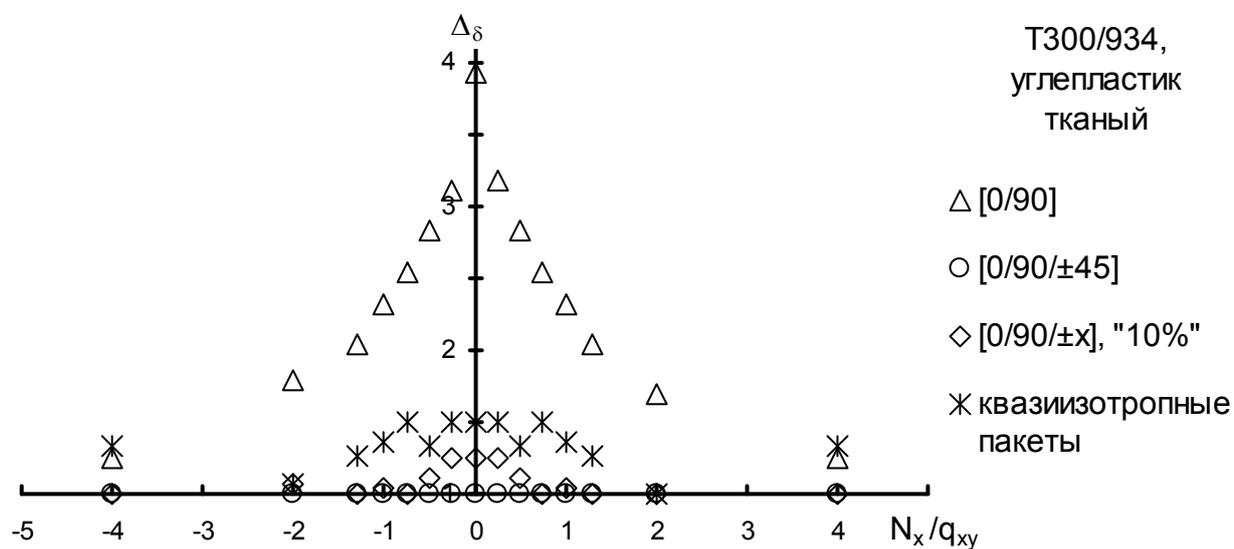
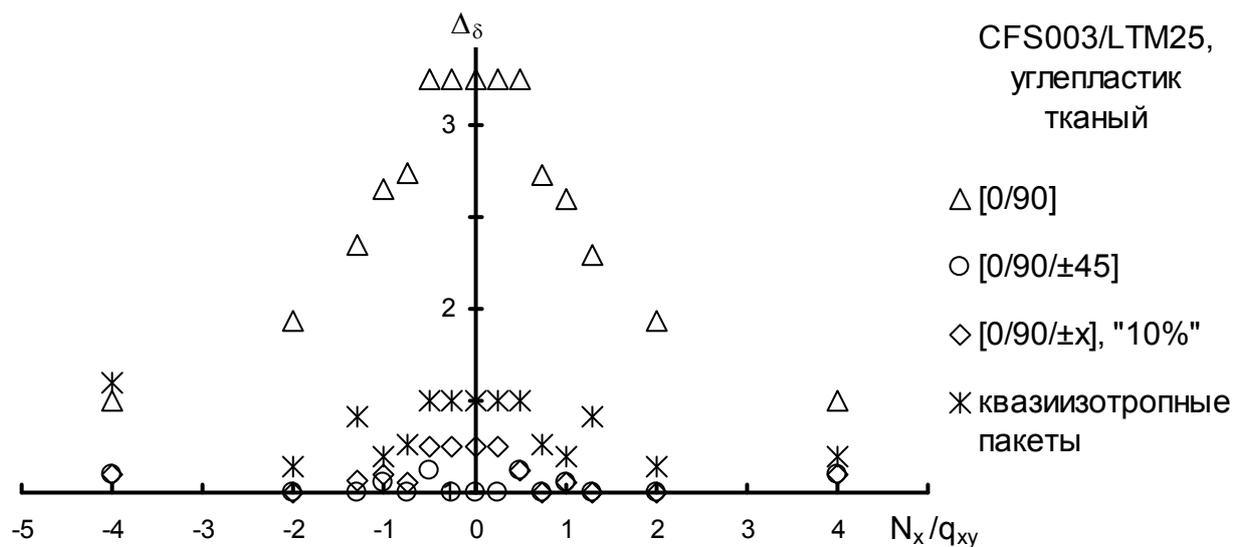


Рисунок 2 – Влияние дополнительных ограничений на толщину оптимальной структуры для КМ на основе тканых армирующих материалов

Применение эмпирического «правила десяти процентов» при оптимизации структуры более общего вида $[0/90/\pm\varphi]$ также незначительно сказывается на окончательном результате, что хорошо согласуется с выводами ряда исследований о критической, превалирующей роли угла укладки армирующего материала по отношению к другим структурным параметрами [5, 6].

Список использованных источников

1. Soden, P.D. Recommendations for designers and researchers resulting from the World-Wide Failure Exercise [Текст] / P.D. Soden, A.S. Kaddour, M.J. Hinton // Composites Science and Technology. – 2004. – Vol. 64. – Pp. 589 – 604.
2. Гайдачук, В.Е. Дифференциальный метод проектирования рациональных корпусных авиаконструкций из композиционных материалов [Текст] / В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов // Самолетостроение. Техника воздушного флота. – Х.: Изд-во ХГУ, 1978. – Вып. 43. – С. 81 – 92.
3. Black, S. Bi-angle fabrics find first commercial application [Текст] / S. Black // High-performance composites. – 2013. – Vol. 21, No.1. – Pp. 46 – 48.
4. Митрофанов, О.В. К вопросу о методологии проектирования конструкции крыла с учетом особенностей композитных материалов [Текст] / О.В. Митрофанов // Техника воздушного флота. – 2000. – Т. 74, №5. – С. 19 – 27.
5. Упитис, З.Т. Исследование зависимости прочности композита от структуры армирования при плоском напряженном состоянии [Текст] / З.Т. Упитис, Р.Б. Рикардс // Механика полимеров. – 1976. – №6. – С. 1018 – 1024.
6. Wang, B.P. Optimum design of a composite structure with three types of manufacturing constraints [Текст] / B.P. Wang, D.P. Costin // AIAA Journal. – 1991. – Vol. 30, No.6. – Pp. 1667 – 1669.

Поступила в редакцию 13.12.2013.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. Я.С. Карпов,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*