

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДЕТАЛЯХ

Наряду с традиционными процессами формообразования деталей и сборки агрегатов технология производства изделий из композиционных материалов решает еще одну проблему - максимальную реализацию высоких физико-механических характеристик слоистых КМ, которые формируются одновременно с деталями. В связи с этим к технологическим процессам предъявляются комплексные требования, основой которого является обеспечение заданных (проектных) структурных параметров монослоев и пакета слоев в целом (объемного содержания волокон, углов армирования, однородности по толщине, толщин и др.). Известно, что упругие и прочностные свойства однонаправленных волокнистых КМ определяются объемным содержанием компонентов и их физико-механическими характеристиками, а пакета слоев - еще и точностью углов укладки монослоев. Реализация этих параметров в регламентируемых пределах допусков обеспечивается полностью технологией производства и его оснащением.

Отмеченное выше обосновывает необходимость разработки конструктивных технологических решений (КТР) взамен изолированных конструктивных или технологических, сохраняя при этом первичность конструкции как продукта, товара.

На практике задачей технологии является реализация в готовом изделии заданных структурных параметров КМ, которые соответствуют физико-механическим характеристикам, использованных при проектировании изделия. Если по каким-либо обоснованным причинам этого добиться нельзя, то необходимо иметь надежные данные об информации о формируемой структуре КМ и теории расчета свойств этого нового материала. В ряде случаев в конструкции преднамеренно предусмотрены отклонения от типовых структурных параметров КМ, например, в местах перехода от одной толщины к другой, перегибов слоев, приформовки и других элементов. Некоторые технологические процессы по своей сути основаны на деформации однородного поля структурных параметров волокнистых КМ (формирование отверстий путем раздвигания волокон, прошивки, объемное армирование и др.). Эти процессы сопровождаются искривлением волокон, выходом слоя из своей плоскости, изменением объемного содержания и, как следствие, реализуемые характеристики отличаются от проектных. Это вызывает необходимость пересчета конструкции на прочность. Предпочтительней является подход, базирующийся на прогнозировании упругих и прочностных свойств в зонах неоднородности структуры КМ, что позволяет учесть при проектировании последующие изменения свойств материала. Для этого необходимы модели и методики, адекватно описывающие реальные явления. Рассмотрим конкретный пример, иллюстрирующий описанную выше взаимосвязь технологии и конструкции, а также пути и возможности задачи прогнозирования свойств КМ, реализуемых при изготовлении деталей.

Известно, что недостаточная межслоевая прочность большинства современных

ных полимерных КМ является причиной начала разрушения обшивок и панелей конструкций летательных аппаратов при наличии существенного запаса прочности в плоскости слоев. Чисто материаловедческие и технологические способы повышения межслоевой прочности практически исчерпаны, поэтому ведется интенсивный поиск КТР для решения этой задачи, среди которых важное место занимает трансверсальное армирование КМ металлическими или композитными стержнями малого диаметра (до 1,1,5 мм) на этапе формирования пакета слоев. Внедрение (запрессовка) трансверсальных элементов приводит к искривлению волокон и изменению их объемного содержания. Производителем технологическим процессом для изготовления стержней является пултрузия, а недозаполимеризация связующего в пултрузионной установке позволяет улучшить адгезию стержней к основному КМ без дополнительной обработки приформовываемых поверхностей.

Представительный элемент этого нового КМ (рис. 1) включает три разнородные зоны (стержень, спутную зону из чистого связующего и деформированный волокнистый КМ), образование которых связано с технологией трансверсального армирования, а их геометрические параметры зависят от температуры внедрения стержней, их диаметра, основной структуры армирующих компонентов, вязкости связующего и др. технологических факторов.

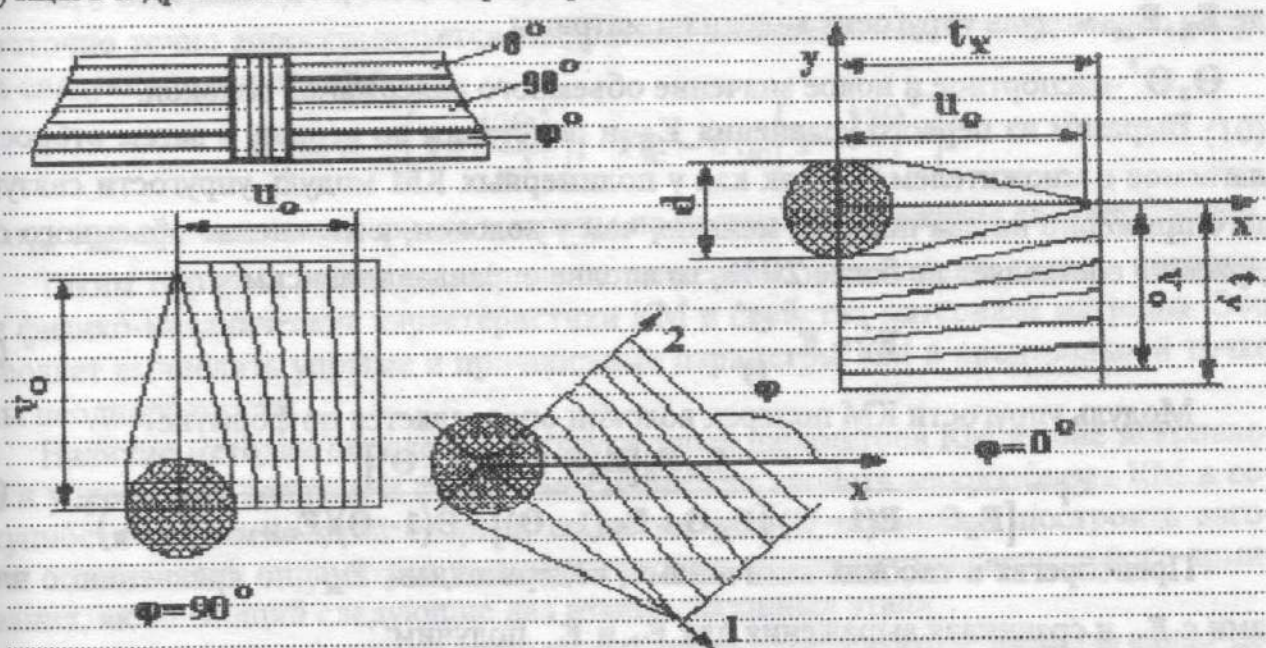


Рис. 1

В работах [1, 2, 3] предложены модели и методики для определения новых значений углов армирования и объемного содержания волокон, а также для осреднения упругих констант таких КМ. Это позволяет целенаправленно обрабатывать технологические процессы дополнительного армирования на отдельных образцах и оптимизировать их параметры.

Для вычисления физико-механических свойств монослоя КМ в каждой точке при известном объемном содержании необходимы модули упругости, коэффициенты Пуассона и пределы прочности волокон и связующего, реализуемые свойства которых в КМ не всегда известны.

Одним из путей вычисления новых величин упругих и прочностных свойств монослоя в любой точке является аппроксимация экспериментальных данных, найденных для нескольких значений объемного содержания на стандартных образцах. Хотя это достаточно трудоемкий подход, особенно для гибридных КМ, вероятно, он является наиболее надежным.

Восстановление свойств волокон и связующего по паспортным данным КМ на базе теорий армирования не отличается достоверностью как из-за несоответствия количества уравнений и неизвестных (последних меньше), так и из-за отсутствия общепринятых формул для определения свойств однонаправленных КМ, в частности, поперек волокон.

В связи с тем, что при любом подходе нужны физико-механические характеристики связующего, образующего спутную зону, возможно построение полуаналитических зависимостей, основанных на паспортных данных КМ и на свойствах матрицы. Рассмотрим вначале достаточно достоверную зависимость для модуля упругости вдоль волокон для двух значений объемного содержания [3].

$$E_1 = E_B \Theta + E_M (1 - \Theta); \quad (1)$$

$$E_1^* = E_B \Theta^* + E_M (1 - \Theta^*),$$

где E_B, E_M - модуль упругости волокна и матрицы,

Θ, Θ^* - паспортное и новое значение объемного содержания волокон.

Выразим из первого уравнения E_B и подставим во второе, а затем отбросив слагаемое с множителем E_M , так как у полимерных КМ модуль упругости связующего примерно на два порядка меньше, чем у волокон, а изменение объемного содержания составляет не более 20%, то вполне оправдана зависимость

$$E_1^* = E_1 \frac{\Theta^*}{\Theta}. \quad (2)$$

Модуль упругости КМ поперек волокон определяется по формуле

$$E_2 = \frac{E_M E_B [E_B \Theta + E_M (1 - \Theta)]}{[E_B \Theta + E_M (1 - \Theta)][E_M \Theta + E_B (1 - \Theta)] - \Theta(1 - \Theta)(E_B \mu_M - E_M \mu_B)^2} \quad (3)$$

Пренебрегая в скобках величинами, содержащими E_M , по сравнению с членами с E_B и сравнивая выражения для E_2 и E_2^* получим:

$$E_2^* = \frac{1 - \Theta}{1 - \Theta^*}. \quad (4)$$

Путем аналогичных выводов и преобразований получены зависимости для остальных упругих констант и коэффициентов линейного температурного расширения.

$$\mu_{12}^* = \mu_{12} \frac{\Theta^*}{\Theta} + \mu_M \left(1 - \frac{\Theta^*}{\Theta}\right). \quad (5)$$

$$\alpha_1^* = \alpha_1 + \frac{E_M \alpha_M}{E_1} \left(\frac{\Theta}{\Theta^*} - 1\right);$$

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_2 [\theta^* - \mu_M (1 - \theta^*)] - \alpha_M (1 + \mu_M) (\theta^* - \theta)}{\theta - \mu_M (1 - \theta)} \quad (6)$$

Отметим, что в формулах (2), (4), (5) и (6) значение объемного содержания не могут быть равными 0 или 1, что естественно для типичных волокнистых КМ.

Деформация разрушения полимерных матриц обычно больше, чем у волокон, потому что прочность КМ вдоль волокон F_1 определяется по формулам /3/

$$F_1 = \frac{\sigma_B}{E_B} \theta, \quad F_1^* = \frac{\sigma_B}{E_B} \theta^*, \quad (7)$$

Отсюда

$$F_{1P}^* = F_{1P} \frac{\theta^*}{\theta}; \quad F_{1C}^* = F_{1C} \frac{\theta^*}{\theta}. \quad (8)$$

Для прочности на сдвиг имеем

$$F_{12}^* = F_{12} \frac{\theta^*}{\theta}. \quad (9)$$

Известно, что прочность КМ поперек волокон уменьшается с увеличением объемного содержания /4, 5/. В интервале $0,5 \leq \theta \leq 0,8$ приведенная в /5/ формула достаточно точно аппроксимируется квадратной зависимостью, что позволяет получить следующие выражения:

$$F_{2P}^* = \sigma_{MP} \left(1 - \frac{12\theta^*}{\kappa^2} \right); \quad F_{2C}^* = \sigma_{MC} \left(1 - \frac{12\theta^*}{\kappa^2} \right) \quad (10)$$

где σ_{MP} , σ_{MC} - прочность материала матрицы на растяжение и сжатие соответственно.

Таким образом, приведенные выше зависимости включают только паспортные физико-механические характеристики КМ и свойства материала матрицы. Это позволяет вычислить упругие и прочностные параметры КМ в произвольной точке зоны неоднородности.

Наличие методик определения структурных параметров КМ в зоне искривления и уплотнения волокон и физико-механических свойств микрообъема КМ в совокупности с классической теорией слоистых тел /5/ позволяют построить алгоритм оптимизации параметров технологического процесса трансверсального армирования, включающий следующие два взаимосвязанных этапа:

- на основании параметрических расчетов определяются размеры зоны деформирования структурных КМ и диаметр трансверсальных элементов, обеспечивающие пределы изменения интегральных физико-механических свойств пакета слоев КМ, приемлемые для проектируемой детали или агрегата;

- ставится серия технологических экспериментов для определения влияния температуры разогрева препрега перед внедрением стержней, степени полимеризации КМ стержней, скорости прошивки и др. параметров на величины u_0 и v_0 (см. рис. 1), от которых зависят степень искривления и уплотнения волокон.

На рис. 2 показаны зависимости объемного содержания и углов армирования КМ от диаметра трансверсальных стержней, характера распределения волокон в

начальном сечении и от длины и ширины зоны неоднородности. Анализ этих графиков показывает, что структурные параметры КМ могут изменяться значительно.

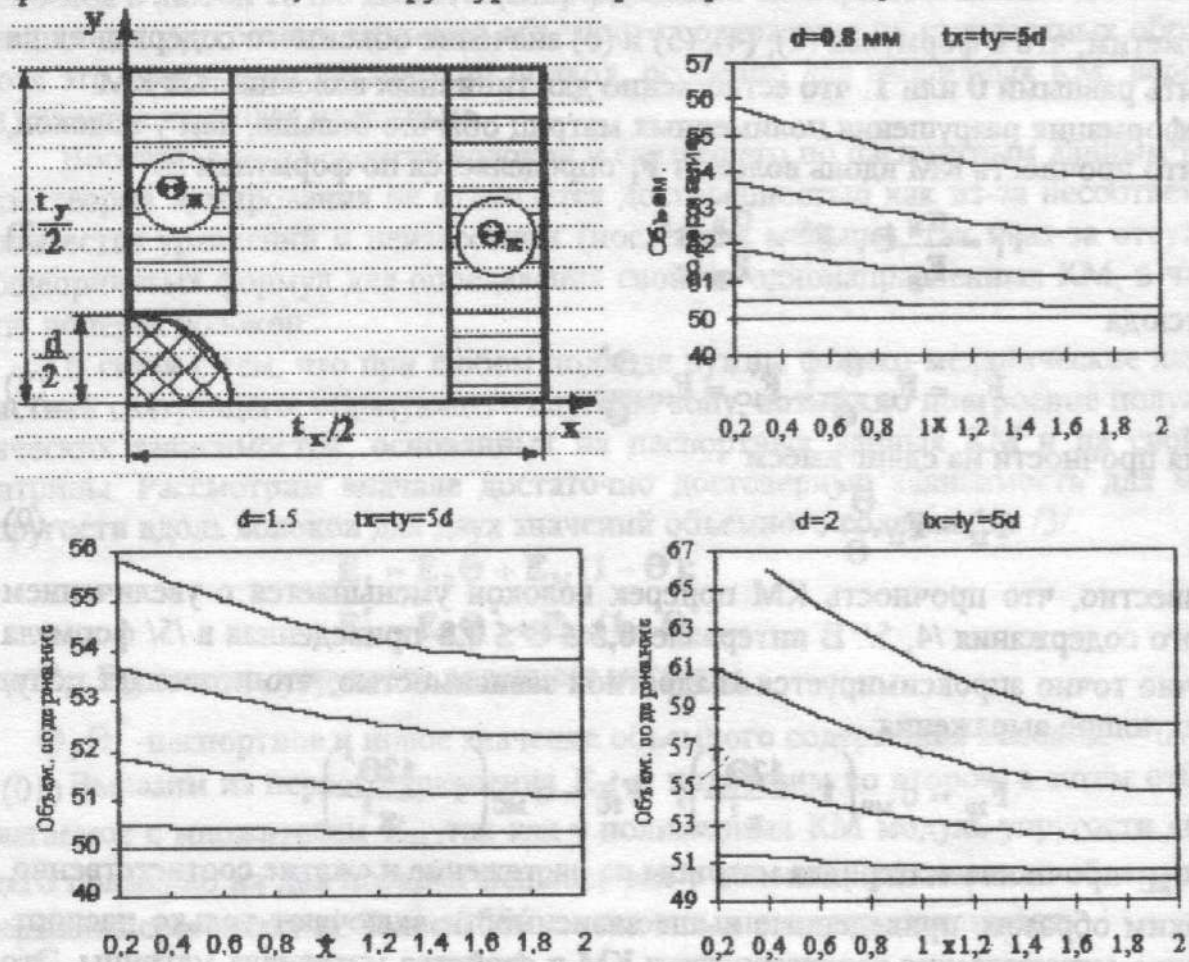


Рис. 2

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.

1. Карпов Я.С., Кива Д.С., Фролов В.М. Физико-механические свойства слоистых композиционных материалов, армированных трансверсальными стержнями /Авиационно-космическая техника технология. - Харьков. 1995. - С.218-223.
2. Фролов В.М. Исследование структуры волокнистого КМ в окрестности трансверсального армирующего элемента /Материалы Второй международной конференции "Новые технологии в машиностроении". - Рыбачье - Харьков, 1993. - С.183-187.
3. Карпов Я.С., Фролов В.М. Упругие свойства слоистого композиционного материала, армированного трансверсальными микростержнями. /Материалы Второй международной конференции "Новые технологии в машиностроении". - Рыбачье - Харьков, 1993. - С.255-258.
4. Гайдачук В.Е., Карпов Я.С., Русин М.Ю. Механика волокнистых композиционных материалов. /Учеб. пособие. - Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1991. - 98с.
5. Образцов И.Ф., Васильев В.В., Бунаков В.А., Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. - М.: Машиностроение, 1977. - 144с.