

Соединения высоконагруженных деталей из композиционных материалов. Сообщение 1. Конструктивно-технологические решения и оценка их работоспособности

Я. С. Карпов

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского “Харьковский авиационный институт”, Харьков, Украина

Представлены и проанализированы результаты исследований по обоснованию принципов конструирования соединений деталей из композиционных материалов, на основании чего предложены новые конструктивно-технологические решения металлокомпозитных соединений. Для реализации эффективного перехода от деталей из композиционных материалов к металлическому стыковому фитингу разработаны новые способы соединения с заформованными в композиционный материал продольными и поперечными крепежными микроэлементами, заформованными или установленными на металлическую деталь. Предложена модификация полупетлевого соединения, позволяющая обеспечить работу узла на сжатие и снизить уровень напряжений надавливания в зоне намотки. Исходя из анализа условий передачи усилий в разработанных конструктивно-технологических решениях и технологий их формирования сформулированы основные направления теоретических и экспериментальных исследований для обеспечения проектирования и расчета на прочность. Экспериментальная оценка статической прочности подтверждает эффективность предложенных решений.

Ключевые слова: соединение, композиционный материал, крепежный элемент, конструктивно-технологическое решение, принцип конструирования, прочность, эксперимент.

Введение. В настоящее время практически все отрасли промышленности, предприятия и организации используют в производстве композиционные материалы (КМ). Несмотря на важность и необходимость решения многочисленных проблем механики и прочности, проектирования и технологии производства конструкций из КМ, можно констатировать, что самой значимой является проблема разработки конструктивно-технологических решений (КТР) соединений высоконагруженных деталей из волокнистых КМ. Если из КМ изготавливались вспомогательные и малонагруженные элементы конструкций, то для соединений достаточно успешно применялись традиционные способы: механический крепеж и клеевые композиции.

В связи с переходом к проектированию и изготовлению силовых агрегатов из КМ, особенно в авиации и космонавтике, актуальность проблемы соединений повысилась по следующим причинам:

применение традиционного механического крепежа и способов его установки приводит к перерезанию значительной части волокон, что требует соответствующей компенсации и пересмотра структуры КМ;

склеивание высоконагруженных деталей затруднено в условиях серийного производства из-за высоких требований к параметрам и качеству выполнения технологических операций, отсутствия надежных методов неразрушающего контроля, неразрешимости вопросов ремонта, а также сложившегося недоверия конструкторов к клеевым соединениям, особенно, если они отвечают за безопасность изделия в целом;

полимерные КМ обладают низкими прочностными свойствами при испытаниях на смятие, срез и межслойный сдвиг. Приводимые в литературных источниках значения прочности при смятии, равные 400...700 МПа [1–8], получены на лабораторных образцах большой толщины, когда существенно снижается влияние масштабного фактора;

механическая обработка современных КМ является весьма трудоемким и дорогостоящим процессом, требующим нового режущего инструмента и оборудования [2, 9–11]. Пока не решены проблемы нормирования, обеспечения и контроля точности отверстий и шероховатости поверхности после резания.

В настоящее время развиваются два основных направления решения проблемы соединений:

первое – совершенствование традиционных (механический и клеевой) способов соединения с учетом особенностей КМ и технологических процессов их переработки. Сюда следует отнести исследования по использованию малоразмерного крепежа [2, 12–16], разработку композитных крепежных элементов [9, 13], поиск путей повышения прочности КМ на смятие и срез [17–19] и др.;

второе – поиск принципиально новых КТР соединений, которые органически были бы присущи конструкциям из КМ. Этот путь представляется более целесообразным, во многих случаях на его основе разработаны весьма эффективные соединения: полупетлевые соединительные законцовки [20–24]; многоступенчатые клеевые соединения [25–27]; переход в зоне соединения от полимерной к металлической матрице при сохранении непрерывности волокон [28] и др.

Исследование основных видов потери несущей способности соединений традиционными способами и путей повышения их прочностных свойств [29–31] позволило сформулировать следующие принципы конструирования соединений:

сохранение целостности арматуры при формировании соединения КМ – металл;

обеспечение съема (передачи) усилий с минимально возможного объема КМ (в пределе – с каждой нити, волокна) в направлении армирования;

миниатюризация крепежных элементов и обеспечение воспроизводимости требуемого качества их установки в серийном производстве;

интегрирование промежуточных (переходных) соединений КМ–металл в конструкцию из КМ при ее формовании.

Конструктивно-технологические решения соединений деталей из КМ. Указанные выше принципы реализованы в новых КТР соединений, разработанных и исследованных в Национальном аэрокосмическом университете им. Н. Е. Жуковского “Харьковский авиационный институт”. На рис. 1,а,б показан способ соединения на основе заформованных в деталь из КМ продольных крепежных элементов, изготовленных из металлической проволоки или борных волокон. После формования деталей проводится совмещение свободных концов проволоки (волокон) путем взаимного вхождения, а зона совмещения пропитывается клеящим веществом [32]. Поскольку количество крепежных элементов большое (их объемное содержание в

зоне совмещения находится в пределах 40...60%), целесообразно предварительно изготавливать полуфабрикаты из них, например зигзагообразно гнутая проволока (рис. 1,в), слои проволоки, скрепленные клеевой пленкой (рис. 1,г), выштамповки из металлической фольги (рис. 1,д) и др.



Рис. 1. Способ соединения с продольными заформованными крепежными микроэлементами.

Основой соединения с элементами продольной связи (рис. 1) является их адгезионное соединение в зоне совмещения и на участке заформовки в КМ. Измерение усилия выдергивания показало, что разрыв проволоки достигается при глубине более 10 мм. Эти данные были подтверждены при исследовании прочности образцов соединения деталей из углепластика с различной длиной зоны совмещения l (рис. 2, 3).

С целью проверки работоспособности соединения для высоконагруженных деталей из КМ изготавливали образцы с площадью поперечного сечения 400 мм^2 ($8 \times 50 \text{ мм}$) из углепластика со структурой $[0^\circ_{60}, \pm 45^\circ_3, 90^\circ_4]$, причем в зоне перехода к законцовке отсутствовало какое-либо усиление.

Соединение было рассчитано на нагрузку 200 кН, и каждая деталь содержала 2000 элементов продольной связи из стальной проволоки диаметром 0,25 мм. Результаты статических испытаний представлены в таблице.

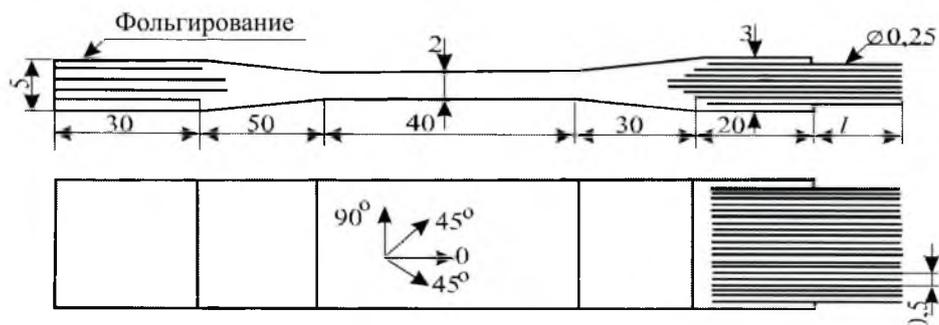


Рис. 2. Образцы соединения с элементами продольной связи.

**Результаты статических испытаний образцов соединения
с элементами продольной связи**

№ образца	Длина зоны совмещения, мм	Разрушающее усилие, кН	Характер разрушения
1	15	90,3	Разрушение законцовки в захватах испытательной машины
2	10	160,7	То же
3	18	176,0	Разрушение образца в зоне перехода к соединительной законцовке
4	12	187,3	То же
5	10	111,2	Разрушение соединения из-за некачественной пропитки клеем
6	10	201,5	Разрушение образца в зоне перехода к соединительной законцовке



Рис. 3. Зависимость прочности соединения от длины зоны совмещения. (Сплошная линия – аппроксимация; точки – данные эксперимента.)

Анализ экспериментальных результатов показал: во-первых, при длине зоны совмещения более 10 мм не удалось разрушить соединение, что свидетельствует о больших потенциальных возможностях этого КТР; во-вторых, на участке перехода к соединительной законцовке, где неизбежно искривление волокон КМ, необходимо предусмотреть дополнительное усиление. Этот вывод основан на том, что заостренные крепежные элементы, установленные на соединительной металлической накладке, после выкладки пакета слоев КМ внедряются в препрег и проводится совместная полимеризация связующего (рис. 4) [33]. При таком способе установки крепежных элементов сохраняется целостность волокон КМ и обеспечивается идентичность условий взаимодействия КМ с крепежными элементами.

На рис. 4,2–е показаны способы установки крепежных элементов путем запрессовки, сварки и фрезерования, на рис. 4,ж,з – возможные варианты их расположения по поверхности накладки. Форма и размеры накладки (фитинга) могут быть любыми в зависимости от назначения соединения и конфигурации ответного узла.

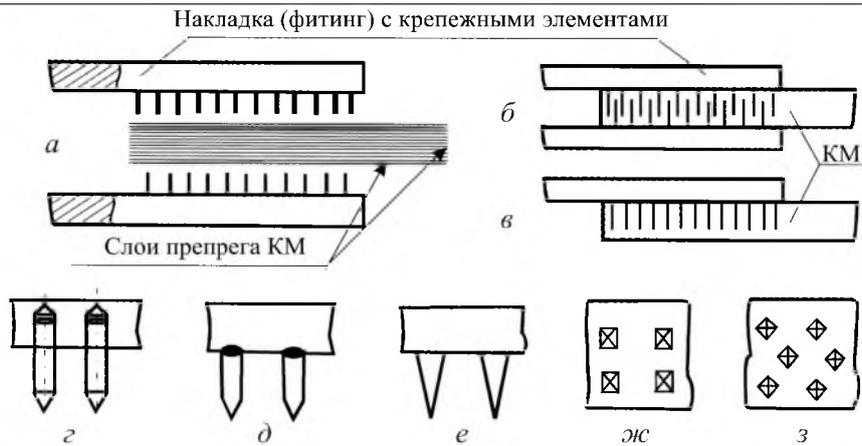


Рис. 4. Конструктивно-технологическое решение соединения с поперечными заформованными крепежными микроэлементами.

Для оценки работоспособности соединения с элементами поперечной связи на базе представленных выше экспериментальных данных были спроектированы, изготовлены и испытаны несколько видов образцов. В первой серии деталь с площадью поперечного сечения 400 мм^2 ($8 \times 50 \text{ мм}$) из углепластика со структурой $[0^\circ_{60}, \pm 45^\circ_3, 90^\circ_4]$ была снабжена законцовками, состоящими из двух накладок из сплава Д16АТ толщиной 8 мм. В каждой накладке было запрессовано по 120 стальных штифтов диаметром 1 мм с шагами 7 мм вдоль и 4 мм поперек соединения таким образом, чтобы при внедрении в КМ получить равномерное распределение штифтов по композиту. Разрушение пяти образцов при отсутствии какого-либо усиления в зоне соединения произошло по первому-второму ряду крепежных элементов при коэффициенте работоспособности 0,78.

Конструктивно-технологическое решение соединения с трансверсальными микроэлементами имеет наиболее широкие перспективы и область применения в деталях из слоистых КМ, поэтому подробное исследование всех аспектов прочности соединения и его элементов будет приведено в отдельном сообщении.

Известны преимущества и недостатки традиционного полупетлевого соединения, образованного огибанием нитями КМ стыкового болта (рис. 5,а). С целью обеспечения возможности восприятия сжимающих усилий предложено устанавливать на центральный болт (штифт, ось и т.п.) дополнительные шайбы (рис. 5,б,в), ребра (рис. 5,г) или поперечные крепежные микроэлементы (рис. 5,д), к которым при полимеризации приклеивается КМ [34].

Для оценки статической прочности этого узла изготавливали путем намотки образцы из однонаправленного углепластика с площадью поперечного сечения 400 мм^2 (две ветви $30 \times 6,6 \text{ мм}$) с шайбами из нержавеющей стали, установленными с шагом 1 мм. Разрушающая нагрузка при растяжении составляла 150 кН, при сжатии – 160 кН, причем в первом случае разрушение имело место в зоне перехода к шайбам, во втором оно произошло от разрыва и смятия шайб.

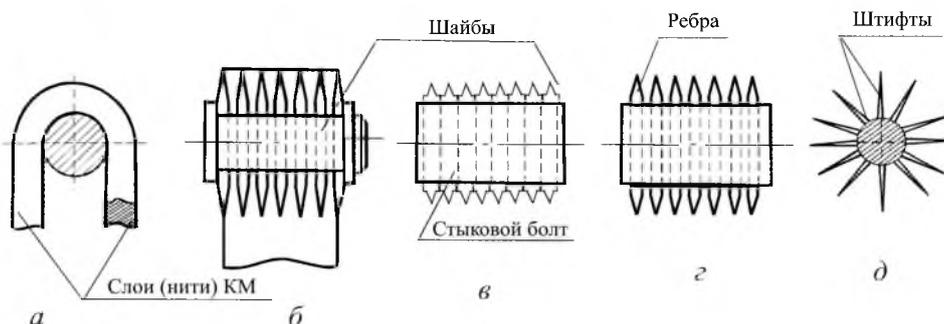


Рис. 5. Модифицированное полупетлевое соединение.

Исследовали также различные технологические процессы этого вида специфической намотки с целью обеспечения максимально равномерного натяжения всех слоев перед полимеризацией. Наилучшие результаты получены при технологическом процессе, когда межцентровое расстояние (начальное значение 250 мм) уменьшалось на 0,3 мм после каждого слоя и восстанавливалось начальное расстояние после намотки всех слоев.

Как следует из вышеприведенного описания новых КТР соединений, их задача заключалась в обеспечении эффективного перехода от композитной детали к металлическому соединительному фитингу. В зоне перехода реализуется сложная металлокомпозитная гетерогенная структура (МКГС), и от соотношения параметров компонентов зависит степень полноты реализации сформулированных принципов ее конструирования. Сравнение предложенных КТР с известными способами соединений показало, что для расчета на прочность и проектирования необходимо разработать специфический комплекс расчетного и экспериментального обеспечения, поскольку большинство имеющихся сведений для традиционных КТР соединений практически неприменимы для определения параметров МКГС.

Содержание и состав теоретико-экспериментального обеспечения расчета на прочность соединений. Расчет на прочность и проектирование соединений базируются на математических моделях определения напряженно-деформированного состояния (НДС). Для сравнения относительной эффективности различных КТР целесообразно располагать методиками оценки НДС, базирующимися на расчетных схемах одного уровня, т.е. обеспечивающими равнозначные условия сравнения целевых функций проектирования. Анализ многочисленных теорий и методик свидетельствует о том, что ни одна из них не позволяет описывать (моделировать) всевозможные КТР соединений, за исключением метода конечных элементов, хотя и этот математический аппарат слабо приспособлен для задач проектирования. Кроме того, для расчета на прочность необходимы конкретные данные об условиях взаимодействия компонентов МКГС.

Основной особенностью МКГС с поперечными крепежными элементами (рис. 4) является “обтекание” малоразмерных штифтов непрерывными волокнами (нитьями), поэтому для расчета НДС необходимо иметь количественные данные по изменению упругих свойств КМ по объему соединения.

Большое разнообразие форм, размеров и расположения крепежных элементов, а также структур КМ соединяемых деталей ставит задачу синтеза расчетно-экспериментальных зависимостей для определения коэффициентов податливости крепежных элементов и соединяемых деталей. Требуют серьезного пересмотра также методы и устройства для экспериментального определения этих величин.

Аналогичная проблема имеет место при определении прочности КМ при смятии. Результаты экспериментальных исследований [1, 3, 35–37] показали, что прочность при смятии существенно зависит от размеров крепежных элементов и структуры КМ. В связи с этим целесообразно разработать новые методы и устройства для определения прочности КМ при смятии, тем более, что при разработке конструкции агрегата (детали) рассматриваются различные структуры КМ, покрытия крепежных элементов, параметры технологических процессов изготовления, которые трудно учитывать в аналитических моделях и методах.

Важным параметром при расчете на прочность соединений с поперечными связями (рис. 4) является коэффициент снижения прочности КМ в зоне внедрения и заформовки крепежного элемента, который можно трактовать как некоторый аналог классического коэффициента концентрации напряжений. Хотя в предложенном КТР волокна не перерезаются, все же из-за искривления арматуры КМ и изменения объемного содержания происходит снижение несущей способности материала. Исследование прочности КМ с заформованными включениями позволит обосновать рациональные размеры, форму и расположение крепежных элементов.

В результате дополнительного армирования законцовки детали из КМ элементами продольной связи возникает задача определения физико-механических характеристик гибридного КМ законцовки и зоны перехода к ней, так как проектными параметрами такой структуры являются характер расположения элементов продольной связи в КМ, глубина заформовки, допустимое изменение объемного содержания компонентов КМ, а также оптимальное значение объемного содержания крепежных микроэлементов в зоне совмещения (рис. 1).

Основной задачей модифицированного полупетлевого соединения является обеспечение управляемости объемным содержанием волокон и связующего КМ в зоне законцовки (рис. 5). Кроме того, при намотке каждого последующего слоя происходит ослабление натяжения предыдущих слоев, что приводит к появлению остаточных технологических напряжений. Поэтому в процессе намотки необходимо управлять не только усилием натяжения, но и межцентровым расстоянием.

Таким образом, синтезировано содержание системы математического и экспериментального обеспечения расчета на прочность и проектирования предложенных способов соединения высоконагруженных деталей из КМ.

Выводы

1. На основе анализа специфических особенностей КМ и опыта их применения в конструкциях летательных аппаратов обоснованы принципы

конструирования металлокомпозитных соединений и предложены новые конструктивно-технологические решения их реализации.

2. Синтезированы состав и содержание теоретического и экспериментального обеспечения, необходимые для расчета на прочность и проектирования соединений.

3. Приведены результаты экспериментального исследования статической прочности предложенных КТР, подтверждающие их высокую эффективность для дальнейшего внедрения КМ в различных областях техники.

Резюме

Наведено та проаналізовано результати досліджень щодо обґрунтування принципів конструювання з'єднань деталей з композиційних матеріалів, на основі чого запропоновано нові конструктивно-технологічні рішення металокompозитних з'єднань. Для реалізації ефективного переходу від деталей з композиційних матеріалів до металевого стикового фітинга розроблено нові способи з'єднання із заформованими у композиційний матеріал поздовжніми та поперечними кріпильними мікроелементами, що установлюються на металевій деталі. Запропоновано модифікацію півпетлевого з'єднання, що дозволить забезпечити роботу вузла на стиск та зменшити рівень напружень "стиску" у зоні намотки. На основі аналізу умов передачі зусиль у розроблених конструктивно-технологічних рішеннях та технології їх формування сформульовано основні напрямки теоретичних і експериментальних досліджень для забезпечення проектування і розрахунку на міцність. Експериментальна оцінка статичної міцності підтверджує ефективність запропонованих рішень.

1. Чмилё В. Т., Иваицкый В. А., Позняков Е. И. и др. Влияние некоторых конструктивных и технологических факторов на прочность клепанных и клееклепанных соединений из углепластика // II Межотраслевая школа по проблемам проектирования конструкций: Тез. докл. – Харьков, 1980. – С. 42.
2. Воробей В. В., Сироткин О. С. Соединения конструкций из композиционных материалов. – Л.: Машиностроение, 1985. – 168 с.
3. Ильина А. Д. Исходные прочностные характеристики композиционных материалов для проектирования механических соединений // Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов. – М.: ЦАГИ, 1979. – Вып. 7. – С. 56 – 60.
4. Леонова И. Е., Семин М. И. Экспериментальное исследование анизотропии прочности болтовых соединений слоистых композитов при варьировании геометрическими и конструктивными параметрами // Механика композитных материалов. – 1990. – № 2. – С. 268 – 272.
5. Уенг Ч. Е. С., Чжанг К. Д. Оценка прочности механических соединений в конструкциях из слоистых композиционных материалов // Аэрокосм. техника. – 1986. – № 4. – С. 29 – 33.

6. *De Koning C. A. M. and Dreumel N. H. M.* Mechanical jointing in aramid fibre composites an experimental study // *J. Aircraft.* – 1983. – **20**, No. 1. – P. 1 – 16.
7. *Hart-Smith L. J.* Bonded-bolted composite joint // *Ibid.* – 1985. – **22**, No. 11. – P. 993 – 1000.
8. *Vinson J. R.* Mechanical testening of polymer composites // *Polymer Eng. Science.* – 1989. – **29**, No. 19. – P. 1332 – 1339.
9. *Матвиенко В. А., Бурау И. В.* Анализ современного уровня и перспектив конструктивно-технологического совершенствования соединений полимерных композиционных материалов // *Перспективы развития технологии изготовления конструкций из КМ: Материалы сов.* – М.: НИАТ, 1986. – С. 3 – 12.
10. *Резников В. А., Самолетов И. Д.* Точность обработки отверстий в смешанных пакетах, содержащих КМУ // *Перспективы развития технологии изготовления конструкций из КМ: Материалы сов.* – М.: НИАТ, 1986. – С. 19 – 25.
11. *Сироткин О. С.* Проектирование и технология соединений элементов конструкций из композиционных материалов // *Пласт. массы.* – 1976. – № 3. – С. 57 – 61.
12. *Ильина А. Д., Ильин Ю. С.* Высокопрочные соединения композиционных материалов // *Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов.* – М.: ЦАГИ, 1979. – Вып. 7. – С. 42 – 49.
13. *Григорьев В. П., Сироткин О. С., Громов В. Ф. и др.* Новый метод клепки конструкций из композиционных материалов // *Пласт. массы.* – 1976. – № 3. – С. 71 – 73.
14. *Абибов А. Л., Васильев В. В., Кутыинов В. Ф. и др.* Проектирование, расчет и испытание соединений конструкции из композиционных материалов // *Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов.* – М.: ЦАГИ, 1973. – Вып. 1. – С. 190 – 196.
15. *Сироткин О. С.* Проектирование соединений элементов конструкций из композиционных материалов // *Изв. вузов. Сер. Машиностроение.* – 1978. – № 2. – С. 30 – 33.
16. *Артюхов М. С., Ануфриев Б. Н., Воробей В. В. и др.* Штифтовой метод соединения деталей из полимерных композиционных материалов // *Пласт. массы.* – 1976. – № 3. – С. 66 – 68.
17. *Догматырский Б. А., Сироткин О. Н., Ярковец А. И.* Болтовые и заклепочные соединения конструкций из стеклопластиков. – М.: МАИ, 1972. – 100 с.
18. *Акулин М. И., Давыдова Т. М., Кириллин А. Н. и др.* Особенности технологических процессов выполнения клееклепанных соединений композиционных материалов // *Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов.* – М.: ЦАГИ, 1979. – Вып. 7. – С. 60 – 65.

19. Царахов Ю. С. Конструирование соединений элементов ЛА из композиционных материалов: Учеб. пособие. – М.: МФТИ, 1980. – 82 с.
20. Сироткин О. С., Литвинов В. Б., Гришин В. И. Технология и механика соединений. – М.: Арктика, 2000. – 314 с.
21. Боголюбов В. С. Формообразующая оснастка из полимерных материалов. – М.: Машиностроение, 1979. – 183 с.
22. Сироткин О. С., Зайцев Г. П., Кайков К. В. и др. Контактное взаимодействие шарнирного металлокомпозитного соединения при наличии трещиноподобных дефектов // Механика композитных материалов. – 1987. – № 1. – С. 100 – 104.
23. Благов В. А., Колмычев А. П., Кобелев В. Н. и др. Легкие судовые конструкции из пластмасс. – Л.: Судостроение, 1969. – 262 с.
24. Dörner H. Drei Welten – ein Leben. – Heilbronn: Heiner Dorner, 1995. – 304 S.
25. Композиционные материалы. В 8 т. / Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока // Т. 7. Анализ и проектирование конструкций. – М.: Машиностроение, 1978. – 342 с.
26. Композиционные материалы. В 8 т. / Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. Т. 8. Анализ и проектирование конструкций. – М.: Машиностроение, 1978. – 264 с.
27. Современные композиционные материалы / Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. – М.: Мир, 1978. – 672 с.
28. Белозеров Л. Г. Исследование эффективности элементов конструкций из композиционных материалов с регулируемыми свойствами. – М.: ЦАГИ, 1978. – Вып. 1913. – С. 13 – 26.
29. Гайдачук В. Е., Карпов Я. С. Научная школа ХАИ по проблемам создания эффективных конструкций летательных аппаратов из полимерных композиционных материалов // Технол. системы. – 1999. – № 2. – С. 81 – 83.
30. Карпов Я. С. Принципы конструирования соединений высоконагруженных деталей летательных аппаратов из композиционных материалов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. трудов. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т “ХАИ”, 2001. – 122 с.
31. Карпов Я. С. Научные основы решения проблемы соединения высоконагруженных деталей летательных аппаратов из композиционных материалов // Технол. системы. – 2000. – Вып. 3. – С. 36 – 40.
32. А. с. 1215271 СССР, МКИ В64С 11/06. Лопать воздушного винта из композиционного материала / В. Е. Гайдачук, С. И. Клименков, Я. С. Карпов и др. – Оpubл. 05.03.84.
33. А. с. 1121867 СССР, МКИ В64С 1/12. Способ соединения деталей из волокнистых композиционных материалов / В. Е. Гайдачук, Я. С. Карпов, А. В. Корженевский и др. – Оpubл. 10.01.83.

34. А. с. 1110071 СССР, МКИ В64С 1/12. Узел соединения деталей из разнородных материалов / В. Е. Гайдачук, Я. С. Карпов, В. Ф. Кутьинов и др. – Оpubл. 07.01.83.
35. Корженевский А. В., Весельский С. И., Макаренко В. А. и др. Исследование прочности композиционных материалов на смятие // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. трудов. – Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1985. – С. 112 – 116.
36. Карпов Я. С., Макаренко В. А., Марченко В. Г. Исследование анизотропии прочности композиционных материалов на смятие крепежными элементами // Расчет и проектирование конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. трудов. – Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1989. – С. 82 – 91.
37. Рабинович А. Л., Аврасин Л. Д. О механических характеристиках некоторых пластиков в связи с прочностью болтовых и заклепочных соединений // Стеклопластики и другие конструкционные материалы. – М.: Машиностроение, 1960. – С. 25 – 32.

Поступила 05. 09. 2005