

УКРАИНСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

На правах рукописи
УДК 620.224:4.001.57

ТИТОВ Вячеслав Андреевич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
И МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ**

Специальность 05.07.04. - Технология производства
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

КИЕВ - 1996

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00760254 (O)

УКРАИНСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

На правах рукописи
УДК 620.224:4.001.57

ТИТОВ Вячеслав Андреевич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
И МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ**

Специальность 05.07.04. - Технология производства
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

АВЗЧ. 719

Диссертацией является рукопись.
Работа выполнена в Украинском научно-исследовательском институте
авиационной технологии (УкрНИИАТ).

Официальные оппоненты: академик Академии инженерных наук
АИН Украины, доктор технических
наук, профессор
БОРИСЕВИЧ В.К.
доктор технических наук, профессор
БОБЫРЬ Н.И.
доктор технических наук, профессор
РЯБОВ В.Р.

Ведущая организация - Институт электросварки НАН Украины

Защита состоится "___" _____ 1996 года в 10 часов на заседании
специализированного ученого совета Д 01.16.01 в Украинском научно-
исследовательском институте авиационной технологии по адресу: 254080, Киев-
80, ул.Фрунзе, 19/21.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УкрНИИАТ.

Автореферат разослан "___" _____ 1996 г.

Ученый секретарь
специализированного ученого совета,
доктор технических наук, с.н.с.

В.Ф.Забашта

ЛИБ. И. В. Стефанюк
АН Украины

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время в промышленности существует тенденция к расширению областей применения композиционных материалов (КМ), основной объем использования которых приходится на авиакосмическую технику. В современных летательных аппаратах (ЛА) масса деталей из КМ превышает 6...10%.

Ввиду более высоких физико-механических и физико-химических характеристик КМ, чем у металлических материалов, их использование определяет уровень совершенствования и эффективность конструкции изделий машиностроения. В общем ряду КМ применяются композиты с металлической и металлополимерной матрицей для высоконагруженных и ответственных узлов, работающих в условиях термического воздействия. Такие конструкции по сравнению с аналогами из полимерных КМ дополнительно обладают повышенной вязкостью разрушения и живучестью в условиях внезапного повреждения.

Производство конструкций из КМ опирается на ряд специфических технологических процессов, требует создания специализированных производств или переоснащения и реконструкции существующих машиностроительных предприятий.

Наиболее близкими по технологической приемственности к металлическим материалам являются процессы изготовления конструкций из листовых полуфабрикатов КМ на металлической (МКМ) и металлополимерной (МПКМ) матрицах. Процессы обработки таких КМ реализуют, как правило, на традиционном оборудовании машиностроительных предприятий, используя специальную оснастку и технологии.

Учитывая высокую стоимость исходных полуфабрикатов из КМ (до 500 \$/кг), необходима разработка научно обоснованной системы подготовки производства конструкций, которая бы обеспечивала минимальные затраты трудоемкости материальных ресурсов на отработку технологических решений. Одной из определяющих операций изготовления деталей является пластическое формообразование листовых деталей из КМ при изготовлении элементов конструкций.

Особенно дорогостоящей оказывается отработка в экспериментальных условиях и реализация новых технологических процессов деформирования композитов, поэтому возрастает роль расчетов в проектировании технологических процессов. Для построения оптимизированного технологического процесса необходимы не только расчетная оценка энергосиловых параметров и точности формы деталей, но и оценка деформируемости КМ. Здесь важное значение имеет технологическая наследственность материала (механические свойства, остаточные напряжения и др.), которая в значительной мере определяет качество деталей.

При выполнении этих расчетов для КМ использовались специальные подходы и приемы, опирающиеся на методы механики деформируемого твердого

тела, которые подробно разработаны в трудах Анциферова В.Н., Арефьева Б.А., Болотина В.В., Ванина Г.А., Васильева В.В., Гайдачука В.Е., Гузя А.Н., Кривова Г.А., Мануйлова В.Ф., Новикова Ю.Н., Победри Б.Е., Тамужа В.П., Тарнопольского Ю.М., Хорошуна Л.П. и др. При этом не достаточно исследованы вопросы пластического формообразования, упругого восстановления и методов определения деформационных свойств КМ.

В настоящей работе для листовых КМ на металлической и металлополимерной матрицах, которые используются в конструкциях ЛА, предложена и обоснована единая система теоретического решения технологических задач пластического формообразования, разработаны экспериментальные и экспериментально-аналитические методы определения механических свойств КМ и их деформируемых компонентов, освоены методы подготовки производства процессов, а также обобщен накопленный опыт по реализации технологических процессов и оценке качества конструкций.

Решена научная проблема разработки технологической механики пластического формообразования элементов конструкций из листовых КМ с деформируемой матрицей, что обеспечивает конкурентноспособность и рентабельность производства конструкций в сравнении с существующим уровнем.

В работу вошли результаты разработок, выполненные в соответствии с целевыми комплексными программами МАП и НИАТ, Национальной программой "Критические технологии", научно-техническими программами Министерства машиностроения, ВПК и конверсии Украины ("Технология-96" и "Наука-2000"), Государственной программой развития алюминиевой промышленности Украины "Алюминий Украины" (Постановление КМУ от 18 декабря 1993 г. N1033). Дальнейшее развитие работ также предусмотрено другими программами Минмашпрома, Минпрома, ГКНТ Украины. В диссертации обобщен более чем двадцатилетний опыт работы автора в области производства изделий из КМ на металлической матрице.

Цель работы. Разработка основ технологической механики пластического формообразования элементов конструкций летательных аппаратов из листов металлических и металлополимерных КМ, что обеспечит освоение технологических процессов в условиях машиностроительных предприятий.

В работе поставлены и решены следующие основные задачи:
определены основные технологические операции формообразования типовых конструкций из слоистых металлических (СМКМ), волокнистых металлических (ВМКМ) КМ и МПКМ;

выработан обобщенный подход к анализу процессов деформирования листовых КМ, используемых при производстве конструкций ЛА;

разработаны теоретические, экспериментальные и экспериментально-аналитические методы определения механических свойств КМ и их деформируемых структурных компонентов;

разработана методика расчета напряженно-деформированного состояния

(НДС) при формообразовании и упруго-пластическом восстановлении деталей; установлены основные закономерности процесса деформирования слоистых металлических, металлополимерных и волокнистых КМ;

разработаны и обоснованы методы увеличения технологической пластичности КМ;

разработаны способы и технологические рекомендации по реализации процессов деформирования;

выполнены исследования, реализованы в опытном производстве технологические процессы соединения трубчатых элементов из ВМКМ с законцовкой и разработаны рекомендации по совершенствованию процесса диффузионной сварки для освоения в серийном производстве;

освоены в промышленных условиях технологические процессы изготовления элементов конструкций из листовых слоистых металлических (обшивки, чашки, коробки, жесткости и др.), металлополимерных (профили, стенки, отбортовки, обшивки одинарной и двойной кривизны) и волокнистых (профили, трубчатые детали и подкосы) КМ;

разработан общий подход и выполнена оценка реализации свойств композитов в элементах конструкций.

Методы исследований. Выполненные исследования базируются на уравнениях механики сплошных сред, теории тонких пластин и оболочек, теории пластического течения металлов, энергетических принципах деформирования и упругого поведения сплошных сред. Решение исследуемых задач реализовано на ПЭВМ с использованием численных методов вычислительной математики.

Достоверность разработанных методов теоретического анализа и математических моделей подтверждена результатами экспериментальных исследований при определении геометрических и энергетических параметров процессов деформирования слоистых и волокнистых КМ.

Кинематические закономерности процессов механики деформирования и разрушения при гибке КМ определены и обоснованы экспериментально: поляризационно-оптическим методом в области упругих деформаций; методами сеток и слоистых моделей в области пластических деформаций; методами металлографического анализа.

Научная новизна. Разработаны научные основы технологической механики пластического формообразования элементов конструкций ЛА из листовых металлических и металлополимерных КМ с детерминированной структурой. Они включают механику развития деформаций на активной и пассивной стадиях формоизменения, взаимосвязь между технологическими параметрами и внутренней микромеханикой развития деформаций, а также обоснование последовательности технологических операций и физико-механических воздействий на деформируемую заготовку.

Предложен и обоснован обобщенный подход к расчету процессов упруго-

пластического деформирования листовых композитов с детерминированной структурой в представлении слоистого неоднородного тела.

Теоретически обоснована целесообразность экспериментального определения эффективных свойств композитов. Разработаны экспериментальные и экспериментально-аналитические методы определения деформационных свойств КМ и их структурных компонентов.

Экспериментально установлена и теоретически подтверждена механика деформирования и разрушения волокнистых и слоистых КМ, включающая взаимосвязь кинематических закономерностей взаимодействия слоев и механических свойств компонентов от показателя жесткости схем нагружения, а также зависимость распределения характеристик НДС от особенностей структуры КМ, условия возникновения и распространения разрушающей трещины.

Разработаны и экспериментально обоснованы математические модели процессов деформирования при изгибе многослойных и волокнистых КМ с учетом реальных механических свойств материалов компонент, изменения толщины отдельных слоев и заготовки в целом. Использование экстремальных энергетических принципов процессов деформирования и разгрузки позволило увеличить точность определения технологических параметров.

Впервые для расчета процессов пружинения изогнутых деталей из композитов теоретически и экспериментально обоснована необходимость учета вторичных пластических деформаций.

Практическая значимость работы. Создан комплекс технического и программного обеспечения для проектирования технологических процессов изготовления авиационных конструкций из листовых полуфабрикатов металлических и металлополимерных слоистых и металлических волокнистых КМ на опытных и серийных заводах. Результаты работы использованы также при подготовке нормативно-технической документации для конструкторов КБ и опытных заводов (РТМ-78, РТМ-80 и др.), конструкторов и технологов серийных авиационных заводов (ДТМ, ТР 1.4.1806-87, ТР 1.4.1818-87, ТР 1.4.1966-90, ОПИ 189-81, ТИ 36-34-93 и др.).

Реализация результатов работы. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования, разработанные на их основе технические и технологические решения, использованы на пяти предприятиях отрасли при проектировании и производстве шести типов самолетов (Ан-26, Ан-32, Ан-72, Ан-125, Ан-70, БТС). Экономический эффект от использования разработанных технических и технологических решений в самолетах, находящихся в эксплуатации, определяется снижением массы и увеличением ресурса конструкции. Реализация разработанных решений на предприятиях авиационной промышленности обеспечивает сокращение:

затрат на техническое перевооружение и подготовку производства на

15...28% за счет использования универсального оборудования машиностроительных предприятий;

расхода дорогостоящих полуфабрикатов МКМ и МПКМ за счет повышения коэффициента использования материала (КИМ) до 0,85...0,90 и уменьшения брака, а также выбора эффективных технологических процессов формообразования деталей.

Апробация работы. Отдельные разделы работы докладывались и обсуждались на:

отраслевых научно-технических конференциях НИАТ, г.Москва (1978, 1979, 1981, 1984, 1986 г.г.), Всесоюзной конференции "Совершенствование технологии производства", г.Казань (1978 г.), республиканской конференции "Повышение качества деталей машин пластическим деформированием", г.Фрунзе (1988 г.), всесоюзных конференциях и семинарах по проблемам композиционных материалов г.Черноголовка (1986, 1987, 1989 г.г.), г.Москва (1991 г.); I всесоюзной конференции "Теория и практика технологии производства изделий из КМ" г.Киев (1988 г.); Всесоюзной конференции "Механика и технология изделий из металлических и металлокерамических композиционных материалов", г.Волгоград (1989 г.); I Всесоюзном съезде технологов-машиностроителей, г.Москва (1989 г.); I Московской международной конференции по композитам, г.Москва (1990 г.); международной конференции "Fetique-90", Гонолулу, Гавайи, США (1990 г.); II Московской международной конференции по композитам, г.Москва (1994 г.); международной конференции по механике композиционных материалов, Рига, Латвия (1995 г.); Беларусском конгрессе по теоретической и прикладной механике. "Механика-95", г.Минск, 1995 г. и др.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 3 монографиях, 49 печатных изданиях, 21 авторском свидетельстве, 14 отчетах НИР.

Структура и объем работы. Диссертация включает введение, 6 разделов, выводы и приложения, изложена на 603 страницах, в том числе содержит 282 страницы машинописного текста, 290 рисунков на 225 страницах, 35 таблиц на 45 страницах, приложения на 33 страницах и перечень литературы на 18 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и дана общая характеристика работы.

В первом разделе рассмотрены вопросы эффективности применения и основные проблемы производства элементов конструкций из листовых

полуфабрикатов МКМ и МПКМ.

Отмечено, что перспективность вновь создаваемых ЛА, в основном, оценивается надежностью, экономичностью эксплуатации и материалоемкостью конструкций. Эти показатели непосредственно зависят от физико-механических характеристик материалов.

Прочность конструкционных сплавов ограничена, удельная прочность алюминиевых сплавов составляет 15..24 км и по прогнозу может быть увеличена до 31...35 км. При этом удельное значение модуля упругости находится на уровне (2,4...2,7) 10^3 км.

Увеличение удельных характеристик конструкционных материалов достигают в КМ на полимерной (ПКМ) и металлической матрицах. Высокие удельные характеристики прочности и жесткости при температурах до 100...150°C, термическая стабильность, технологичность, сравнительно низкая стоимость обеспечили ПКМ широкое применение в авиакосмической технике.

Для надежной работы конструкций в условиях высоких статических, динамических и виброакустических нагрузок, термических и радиационных воздействий эффективными являются КМ на металлической и металлополимерной матрицах. Удельные показатели прочности и жесткости МКМ значительно превышают аналогичные характеристики конструкционных сплавов. Так для МКМ системы Al-B удельная прочность составляет 45...50 км, жесткость (8,3...9,0) 10^3 км, системы Mg-B - прочность 45...55 км, жесткость - (10,0...11,5) 10^3 км. При этом предельные напряжения на сдвиг вдоль волокон превышают аналогичные для ПКМ и составляют 120...150 МПа. Определенные преимущества МКМ имеют также при сравнении показателей вязкости разрушения (предельная деформация не менее 0,006...0,030) и живучести в условиях внезапных повреждений.

Высокая стоимость МКМ предопределила их преимущественную область применения - авиационная и космическая техника. Выполненный анализ использования МКМ в конструкциях ЛА показал, что они обеспечивают значительное снижение массы для различных типов конструкций. В работе показано, что использование волокнистых композитов для высоконагруженных трубчатых конструкций (подкосы, раскосы) обеспечивает снижение массы на 45...55%, для силовых стрингерных панелей - на 35...55%. Слоистые металлополимерные КМ используют в качестве обшивок, стенок нервюр и других элементов конструкций, которые обеспечивают снижение массы до 12%, увеличение демпфирующей способности, ресурса в 2...3 раза и живучести в 10...15 раз. Многослойные металлические КМ используют для более широкого класса деталей: обшивок, обтекателей, профилей, электрошин и др.

В то же время, по сравнению с существующими конструкционными сплавами, стоимость волокнистых МКМ выше в 50...100 раз, слоистых металлополимерных - в 10...25 раз, слоистых металлических - в 2...5 раз.

В последние десятилетия разработана технология и освоены в производстве листовые полуфабрикаты слоистых металлических КМ

(Д16+ВТ1-0 - ТУ 1.9.34-76; 12Х18Н10Т+АД1 - ТУ 1.809.649-82; АПМ-2 - ТУ 1.809.431-82 и др.), волокнистых металлических КМ (ВКА-2 - ТУ 1.808.074-87 и др.): Разработана и осваивается в условиях производства самолетных предприятий технология изготовления слоистых металлополимерных КМ. Наряду с этим, высокая стоимость КМ требует применения технологических процессов, обеспечивающих высокий коэффициент использования материала и качество изготовления деталей.

Автором выполнен анализ основных конструктивно-технологических характеристик типовых элементов конструкций ЛА из листовых МКМ, результаты которого показаны в табл.1. Установлено, что технологические процессы изготовления включают в зависимости от типа элементов конструкции операции механической обработки, пластического формообразования, сварки и клепки. Основной операцией, определяющей качество изготовленных деталей, является пластическое формообразование, которое влияет на структуру и свойства МКМ.

Уровень механических свойств КМ в результате выполнения операций пластического формообразования определяется показателями технологической наследственности, к основным из которых можно отнести величину остаточных напряжений, прочность соединения компонентов, характеристики сплошности и др. Оптимизированные технологические процессы должны обеспечивать условия деформирования, которые гарантируют уровень механических свойств, близкий к исходному материалу.

Основными факторами, ограничивающими процессы формообразования и качество деталей для рассматриваемых КМ, являются низкие пластические свойства (МКМ - $\delta \leq 8...12\%$, МПКМ - $\delta \leq 2,0...3,5\%$, ВМКМ - $\delta \leq 0,4...0,6\%$), высокое пружинение, недопустимость ударных методов доводки и др.

Показано, что интенсификация процессов возможна при использовании специальных методов: комбинированных схем нагружения заготовки, термического воздействия на заготовку, коррекции рабочего контура формообразующей оснастки и др., а также их комбинации.

Проектирование технологических процессов изготовления качественных деталей из МКМ требует изучения технологической механики пластического формообразования элементов конструкций ЛА из листовых МКМ и МПКМ, включающей механику развития деформаций на активной и пассивной стадиях формоизменения, установление взаимосвязи технологических параметров процесса с внутренней механикой развития деформаций, а также обоснование последовательности технологических операций и физико-механических воздействий на деформируемую заготовку. Это позволит разработать технологические рекомендации, способы и средства реализации технологических процессов изготовления деталей из МКМ методами пластического деформирования.

Таблица 1

Основные конструктивно-технологические характеристики деталей ЛА из КМ на металлической матрице

Используемые типы листовых КМ на металлической матрице	Металлические КМ, упрочненные непрерывными волокнами		Слоистые металлические КМ (биметаллы)								
				Слоистые металлополимерные КМ							
Типы элементов конструкций	Стержневые конструкции	Усиливающие накладки	Стрингерные панели	Интерцептор, зерлок, захрылок	Осесимметричные оболочки	Обшивки одинарной кривизны	Обшивки двойной кривизны	Отбортовки криволинейной формы	Жесткости	Обтекатели, чашки	Шины силовых электросистем
Схемы элементов конструкций											
Операции пластического формообразования для придания пространственной формы плоской заготовке		—									
Сварка плавлением							—	—	—	—	—
Механо-обработка	Резка плоских листов	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Резка объемных полуфабрикатов	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Образование отверстий	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Образование неразъемных соединений	Контактная сварка	—				—	—	—	—	—	—
	Заклепочные соединения	—			—	—	—		—	—	—

Во втором разделе рассмотрены вопросы моделирования процессов деформирования композиционных материалов. Показано, что теоретический анализ процессов деформирования композитов при изготовлении конструкций имеет ряд трудностей, обусловленных многообразием видов полуфабрикатов композитов (слоистые металлические - биметаллы, слоистые металлополимерные, волокнистые и др.), форм армирующих компонентов, их механических, физических и прочих характеристик. Такое многообразие, в силу особенностей сочетания параметров, определяет в каждом отдельном случае свои подходы к расчету. Основные подходы формируются в зависимости от цели производимого расчета:

необходимости получения комплекса технологических параметров;

расчета НДС компонентов и композита в целом;

расчет остаточных напряжений и деформаций в композите и его компонентах;

обеспечение точности определения названных параметров с учетом взаимодействия структурных компонент и их междуконтактных связей и др.

Методы расчета основываются на использовании основных законов механики сплошных сред и геометрических соотношений, описывающих структурные особенности композитов.

В теоретическом анализе процессов деформирования композитов сложилось несколько подходов: феноменологический, структурный и структурно-феноменологический, определяющий комбинацию предыдущих двух подходов.

При построении теории деформирования в рамках феноменологического подхода композиционной среды ставится в соответствие однородная деформируемая среда. Переход от структурных характеристик деформирования (на микроуровне) к эффективным (макроскопическим) осуществляют с использованием понятия элементарного (или представительного) макрообъема. Существенным недостатком феноменологических моделей является то, что даже при незначительном изменении структуры материала изменяются его свойства. В этом случае для каждого конкретного материала необходимо проводить установочную серию экспериментов по определению деформационных свойств.

Феноменологический подход обеспечивает получение основных силовых и энергетических характеристик процессов деформирования на основании усредненных показателей НДС в рассматриваемой области композита. Определение истинного НДС в каждом из компонентов деформируемого композиционного тела позволяет сделать структурный подход, в рамках которого композиционный материал рассматривается как неоднородная среда. Исследование параметров процесса деформирования ведут с использованием системы уравнений механики сплошных сред, а деформационные свойства задают разрывными кусочно-постоянными функциями координат, описывающими феноменологические свойства компонентов. Использование структурного подхода для сложно-армированных композитов вызывает технические трудности,

связанные с большим объемом расчетных работ.

Показано, что для процессов деформирования композитов сложных структур используют комбинированные подходы, которые, в основном, заключаются в исследовании деформируемой области в феноменологической постановке с последующим решением задачи деформирования представительного объема. Они включают все положительные стороны феноменологического и структурного подходов. Однако, их реализация трудоемка в силу разнообразия структур композитов, а конечный результат зависит от постановщика задачи.

В диссертации на основании топологического анализа и принятых допущений о детерминированности структуры разработана единая система расчета процессов деформирования используемых в ЛА листовых композитов как слоистых тел с неоднородными слоями - слоисто-неоднородных тел.

Схема расчета заключается в следующем. На этапе пластического деформирования:

композит рассматриваемой структуры приводится к слоистому, имеющему отдельные жестко взаимосвязанные условные или реальные слои;

для каждого из слоев устанавливаются феноменологические свойства на основании постановочных экспериментов непосредственно или в результате аналитического расчета эффективных свойств;

выполняется расчет процесса деформирования композита слоистой (упрощенной) структуры с учетом всех известных технологических факторов методами механики сплошных сред;

при необходимости, выделяется представительный объем в рассматриваемом слое композита и, на основании установленных для него на предыдущем этапе расчета граничных параметров, выполняется расчет НДС в этом объеме;

определяются необходимые технологические параметры (усилие, работу деформирования, предельные радиусы кривизны и др.) на основании результатов расчета НДС.

На этапе упругого восстановления деформированной заготовки (разгрузки):

устанавливаются геометрические параметры пружинения заготовки композита, представленного в виде слоистого тела, с использованием феноменологических характеристик материалов;

величина остаточных напряжений и деформаций в отдельных слоях определяется при рассмотрении представительного объема, выделенного в данном слое.

При рассмотрении задач деформирования принято во внимание, что композиционные материалы в общем случае имеют анизотропию свойств, величина которых обусловлена, в основном, двумя факторами: направлением расположения волокон и качеством связи на граничной поверхности волокон и матрицы. Главные оси анизотропии, обычно, совпадают с осями армирующих волокон.

Так для однонаправленно армированных волокнами слоев композитов

типа МКМ А1-В в плоскости, перпендикулярной осям волокон, в силу детерминированности структуры свойства считаем изотропными, а сам композит-трансверсально-изотропным. В реальных композитах, в ряде случаев, наблюдается несовершенная связь между матрицей и волокнами. В этом случае свойства в плоскости, перпендикулярной осям волокон, нельзя считать изотропными.

В соответствии с предложенной схемой расчета рассмотрено аналитическое определение эффективных упругих свойств слоев композиционного тела, армированных волокнами круглой формы. В рамках подхода, предложенного Г.А.Ваниным и И.П.Семенюком, рассмотрены задачи определения эффективных свойств для случаев: с совершенным контактом на границе матрицы и волокна, а также с несовершенным контактом. На основании численного эксперимента показано (рис.1), что:

отсутствие контакта между волокном и матрицей вызывает анизотропию свойств в плоскости композита, перпендикулярной осям волокон;

увеличение зоны отсутствия контакта уменьшает эффективные сдвиговые характеристики композита. Так увеличение зоны до $\theta = \pi$ может изменить величину эффективного модуля сдвига G_{ii} ($i=1,2,3$) в 8,0-8,5 раз для КМ с объемным содержанием волокон $V_f=50\%$;

с уменьшением объемного содержания волокон уменьшается влияние наличия зоны несовершенного контакта. При этом происходит сближение эффективных характеристик композитов к предельному значению при $G_m/G=0$ (пористый материал).

Зависимость отношения эффективных модулей сдвига G_{12} при совершенном контакте ($\theta = 0$) и его полном отсутствии ($\theta = \pi$) от объемного содержания волокон (V_f) в металлическом КМ и соотношения модулей сдвига волокна и матрицы (G_a/G)

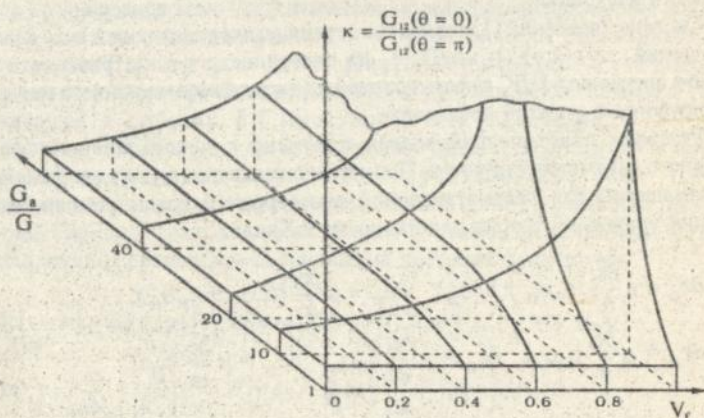


Рис.1

Таким образом, полученные зависимости эффективных механических характеристик композитов, с учетом несовершенного контакта на границе волокно-матрица, являются более общим случаем аналитического описания феноменологических свойств композитов, включающим случай с совершенным контактом при $\theta = 0$ и полным отрыве волокна от матрицы при $\theta = \pi$.

Показано, что, ввиду статистического характера распределения и величины несовершенств структуры, их влияние на феноменологические свойства более полно может быть учтено в результате экспериментального определения.

На основе ассоциативного закона течения проведено исследование процесса упруго-пластического деформирования композиционного слоя. При формоизменении рассмотрено плоское деформированное состояние композиционного слоя, как анизотропной среды. При совместном решении систем уравнений состояния с геометрическими соотношениями Коши и уравнениями равновесия, а также установленного соотношения эффективных модулей упругости с физическими константами для КМ, получена система дифференциальных уравнений Ламе в виде:

$$\begin{cases} \left[\frac{E_{11}}{1-\nu_{12}^2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2G_{23} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \left[\frac{\nu_{12} E_{11}}{1-\nu_{12}^2} + 2G_{23} \right] \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right] = 0; \\ \left[2G_{23} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{E_{11}}{1-\nu_{12}^2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \left[\frac{\nu_{12} E_{11}}{1-\nu_{12}^2} + 2G_{23} \right] \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right] = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $E_{11}=E_{22}$ - модули упругости в плоскости изотропии трансверсально изотропного композиционного тела; $\nu_{12} = \nu_{21}$ - коэффициенты Пуассона в плоскости изотропии.

Система уравнений (1) совместно с граничными условиями в виде функций перемещений $u=u(x,y)$ и $v=v(x,y)$ на поверхности рассматриваемого слоя позволяет определить НДС деформируемой области композиционного материала на макроуровне в упругой постановке.

Решение пластической задачи получено с использованием метода переменного параметра упругости. При этом соотношение между напряжениями и деформациями для рассматриваемой анизотропной среды установлено на основании уравнений теории пластичности Р.Хилла:

$$\begin{aligned} de_{11} &= \mu \frac{\partial \bar{e}_1}{\partial \sigma_1} (c_{11} \sigma_{11} + c_{12} \sigma_{22}); & de_{22} &= \mu \frac{\partial \bar{e}_1}{\partial \sigma_1} (c_{12} \sigma_{11} + c_{22} \sigma_{12}); \\ de_{12} &= \mu \frac{\partial \bar{e}_1}{\partial \sigma_1} c_{13} \sigma_{12}; & de_{13} &= \mu \frac{\partial \bar{e}_1}{\partial \sigma_1} c_{23} \sigma_{13}; & de_{23} &= \mu \frac{\partial \bar{e}_1}{\partial \sigma_1} c_{33} \sigma_{23}, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{3\sigma_{11r}^2 \sigma_{11r}^2}{\sigma_{11r}^2 + \sigma_{11r}^2}; \quad C_{11} = \frac{1}{\sigma_{11r}}; \quad C_{12} = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{11r}^2} + \frac{1}{\sigma_{11r}^2} \right); \\ C_{22} &= \frac{1}{\sigma_{11r}^2}; \quad C_{13} = \frac{1}{\sigma_{11r}^2}; \quad C_{23} = \frac{1}{\sigma_{11r}^2}; \quad C_{33} = \frac{1}{\sigma_{11r}^2}; \end{aligned} \quad (3)$$

σ_{1ir} и σ_{2jr} ($i = 1, 2; j = 1, 2, 3$) - ординаты диаграмм растяжений и сдвига, характеризующие текущие пределы текучести в направлении главных осей анизотропии для конкретных условий деформаций.

При решении пластической задачи коэффициенты задавались на основании построенной экспериментально феноменологической модели деформирования КМ в интенсивностях напряжений и деформаций.

Полученное решение в макрооднородной постановке позволяет задать граничные условия для представительного объема слоя КМ. Описание упруго-пластического деформирования представительного объема выполнено в изотропной постановке. При заданных граничных условиях в перемещениях решение сводилось к системе дифференциальных уравнений Ламе, а при граничных условиях в напряжениях - к системе дифференциальных уравнений Навье-Стокса. Решение пластической задачи выполнялось методами переменного параметра упругости.

В работе показано, что при решении задач пластического деформирования композитов в представлении слоисто-неоднородного тела необходимо получать совместные решения, удовлетворяющие условиям внешнего нагружения и совместности деформаций слоев. Для этого рассмотрены основные условия совместности деформирования для идеального контакта слоев.

Получено общее решение задачи формообразования оболочки двойной кривизны из первоначально плоского многослойного листа, представляющего слоисто-неоднородное тело. Аналитическая модель формообразования построена на основе метода решения физически и геометрически нелинейных задач, предложенного Б.Я.Кантором. Для сведения трехмерной задачи к двумерной в рамках гипотез Кирхгофа-Лява использованы подходы неклассической теории, развиваемой в работах В.Г.Пискунова, А.О.Рассказова, А.Ф.Рябова, В.С.Сипетова, Н.А.Шульги и др. Это позволило заранее не оговаривать толщину, порядок расположения и жесткость произвольного слоя. Процесс формообразования сведен к упругопластическому изгибу с большими прогибами (гипотеза Кармана) тонкой полой оболочки, имеющей начальный погиб. На основе принципа возможных перемещений построен функционал

$$\begin{aligned} & \iint \left[\frac{1}{2} R(w, w) - R(w, \varphi) - \frac{1}{2} R(\varphi, \varphi) \right] ds - \delta \iint \left[\Delta_k \varphi + L_2 \left(\frac{1}{2} w + w_0 \varphi \right) - \right. \\ & \left. - \frac{1}{2} F(w_2) + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) U + Z \right] w ds + \int \left(M_n^0 \frac{\partial w}{\partial n} - Q_n^0 w \right) d\ell = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

внешне подобный известному, но учитывающий слоистость структуры заготовки по высоте. Здесь δ - знак варьирования, U - потенциал объемных сил; A и B - параметры Ламе; R_1 и R_2 - радиусы кривизны; s и l - площадь и длина контура оболочки; M_n^0, Q_n^0, Z - изгибающий момент, поперечная сила и распределенная по поверхности нормальная нагрузка; w и φ - функции прогибов и усилий; $w_2 = w + 2w_0$. Кроме величины Δ_κ , известной из теории оболочек, операторы в (4) имеют вид

$$\begin{aligned}
 F(\omega) &= x \frac{1}{A} \frac{\partial \omega}{\partial \alpha} + y \frac{1}{B} \frac{\partial \omega}{\partial \beta} - U_4 \omega; \\
 R(\omega, \eta) &= A_{\omega\eta} \delta L_1(\omega, \eta) + B_{\omega\eta} \delta L_2(\omega_0, \eta); \\
 L_1(\omega, \eta) &= \omega_{\alpha\alpha} \eta_{\alpha\alpha} + 2\omega_{\alpha\beta} \eta_{\alpha\beta} + \omega_{\beta\beta} \eta_{\beta\beta}; \\
 L_2(\omega, \eta) &= \omega_{\alpha\alpha} \eta_{\alpha\alpha} - 2\omega_{\alpha\beta} \eta_{\alpha\beta} + \omega_{\beta\beta} \eta_{\beta\beta}; \\
 R(\omega, \eta) &= A_{\omega\eta} \delta L_1(\omega, \eta) + B_{\omega\eta} \delta L_2(\omega_0, \eta),
 \end{aligned} \tag{5}$$

где ω и η принимают значения w и φ , а

$$A_{ww} = B_7 - B_3^2 / B_1; \quad A_{\varphi\varphi} = D_1; \quad B_{ww} = B_7 + B_3^2 / B_1; \quad B_{w\varphi} = D_3; \quad B_{\varphi\varphi} = D_2;$$

$$D_1 = \frac{B_2}{B_1^2 - B_2^2}; \quad D_2 = \frac{B_2}{B_2^2 - B_1^2}; \quad D_3 = \frac{B_2 B_4 - B_1 B_3}{B_2^2 - B_1^2}; \quad D_4 = \frac{B_2 B_3 - B_1 B_4}{B_2^2 - B_1^2};$$

$$B_1 = \sum_{\kappa=1}^n \int_{b_{\kappa-1}-\delta_1}^{b_\kappa-\delta_1} C_\kappa d\gamma; \quad B_2 = \sum_{\kappa=1}^n \int_{b_{\kappa-1}-\delta_1}^{b_\kappa-\delta_1} C_\kappa \mu_\kappa^* d\gamma; \quad B_3 = \sum_{\kappa=1}^n \int_{b_{\kappa-1}-\delta_1}^{b_\kappa-\delta_1} C_\kappa \gamma d\gamma; \quad B_4 = \sum_{\kappa=1}^n \int_{b_{\kappa-1}-\delta_1}^{b_\kappa-\delta_1} C_\kappa \gamma \mu_\kappa^* d\gamma;$$

$$C_\kappa = \frac{E_\kappa^*}{1 - \mu_\kappa^*}; \quad E_\kappa^* = E_\kappa^*(\gamma), \quad \mu_\kappa^* = \mu_\kappa^*(\gamma) - \text{переменные параметры упругости } k\text{-го}$$

слоя; δ_1 - расстояние от нижней поверхности оболочки до поверхности приведения; b_κ и $b_{\kappa-1}$ - расстояния от низа оболочки до верхней и нижней поверхности слоя k ; n - количество слоев.

Уравнение (4) используется непосредственно (без перехода к системе дифференциальных) для решения задачи деформирования физически и геометрически нелинейных слоистых оболочек. Главное преимущество такого подхода заключается в отсутствии производных от функций, зависящих от физических параметров слоев, что увеличивает точность решения численными методами с использованием разработанного алгоритма.

Для определения остаточной кривизны оболочек после снятия внешней нагрузки вследствие восстановления заготовки под действием потенциальной

энергии сил упругих составляющих деформаций использована теорема Лагранжа-Дирихле об устойчивости равновесной системы материальных точек, согласно которой система в положении устойчивого равновесия обладает минимумом потенциальной энергии.

Анализ процесса проведен в системе обобщенных координат q_{ij} , характеризующейся тем, что при их нулевом значении система имеет минимум энергии. Показано, что для композиционных оболочек, обладающих определенной совокупностью геометрических параметров и физико-механических свойств - Ω , величина функции распределения упругой энергии Y_{ij} зависит от двух переменных параметров - главных внутренних радиусов кривизны R_1 и R_2 .

При этом обобщенные координаты численно равны изменению внутренних радиусов заготовки относительно равновесного положения - остаточных радиусов оболочки R_{01} и R_{02} , величина которых определяется уравнениями:

$$\left(\frac{d \left\{ \int_{\Omega} Y_{ij} [(q_1 + R_{01}), (q_2 + R_{02}), \Omega] d\vartheta \right\}}{dq_1} \right)_{q_i=0} = 0;$$

$$\left(\frac{d \left\{ \int_{\Omega} Y_{ij} [(q_1 + R_{01}), (q_2 + R_{02}), \Omega] d\vartheta \right\}}{dq_2} \right)_{q_i=0} = 0. \quad (6)$$

где ϑ - объем заготовки.

Решение уравнений (6) выполнено численными методами. Для этого они представлены разностными уравнениями:

$$\left| \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} Y_{ij(\ell_1-1)} [(R_{01} + q_{1(\ell_1-1)})(R_{02} + q_{2(\ell_1-1)}), \Omega] - \right. \\ \left. - \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} Y_{ij\ell_1} [(R_{01} + q_{1\ell_1})(R_{02} + q_{2\ell_1}), \Omega] \right| \leq \xi_1;$$

$$\left| \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} Y_{ij(\ell_2-1)} [(R_{01} + q_{1(\ell_2-1)})(R_{02} + q_{2(\ell_2-1)}), \Omega] - \right. \\ \left. - \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} Y_{ij\ell_2} [(R_{01} + q_{1\ell_2})(R_{02} + q_{2\ell_2}), \Omega] \right| \leq \xi_2. \quad (7)$$

где ξ_1 и ξ_2 - задаваемые погрешности вычисления упругой энергии; $i=1, \dots, N_1$, $j=1, \dots, N_2$ - индексы; определяющие количество точек упругих функций, заданных таблично в области деформирования; $\ell_1 = 1, \dots, n_1$, $\ell_2 = 1, \dots, n_2$ - индексы, определя-

ющие порядок приближения в итерационном цикле решения уравнений (7).

Величины остаточных радиусов находятся из выражений

$$R_{01} = R_{B1} - \sum_{q_1} \Delta q_{1q_1}; \quad R_{02} = R_{B2} - \sum_{q_2} \Delta q_{2q_2}. \quad (8)$$

При определении величины энергии остаточных упругих напряжений учитывалась возможность возникновения вторичных пластических деформаций в материалах отдельных слоев заготовки. Для этого принято допущение, что материалы слоев обладают "идеальным" эффектом Баушингера.

Предложенная система расчета использована для исследования процессов формообразования конструкций ЛА из слоистых и волокнистых КМ типовых структур, для которых определены основные деформационные свойства.

В третьем разделе предложены, разработаны и обоснованы экспериментальные и экспериментально-аналитические методы построения феноменологических моделей деформирования композитов и их структурных компонентов.

Определение деформационных свойств выполнялось для листовых полуфабрикатов КМ различных типов: слоистых металлических (биметаллы Д16+ВТ1-0; АД1+12Х18Н10Т; М1+АД1+М1; АМг6+ВТ1-0 и др.), слоистых металлополимерных (трехслойных Д16+ВК41/СВМ+Д16; В95+ВК41/СВМ+Д16; пятислойных Д16+ВК41/СВМ+Д16+ВК41/СВМ+Д16 и др.), волокнистых (системы АД1-В; АД33-В; АД1-сталь; АВ+АД33-В+АВ и др.). Образцы вырезались под углом 0°, 45°, 90° к направлению прокатки или расположения основного армирующего компонента.

Экспериментальные методы построения деформационных кривых базировались на стандартных методах с учетом особенностей механики деформирования КМ.

В процессе испытаний выполнялся анализ факторов, влияющих на процесс пластического деформирования и разрушения КМ и его структурных компонентов. Установлено, что механизм разрушения слоистых металлических и металлополимерных КМ, включает накопление повреждений в слоях на микроуровне, разрушение слоев и композита в целом на макроуровне. Механизмы разрушения различны в зависимости от прочности соединения слоев. При прочном соединении слоев, в случае нарушения устойчивости деформирования одного из слоев, происходит перераспределение напряжений между слоями. Место концентрации напряжений менее пластичного слоя блокируется более пластичными слоями за счет возникновения в этой зоне дополнительных касательных напряжений. В этом случае разрушение слоистых КМ происходит одновременно. Если прочность соединения слоев недостаточна, то при разрушении образцов наблюдается их расслоение и неодновременность разрушения.

Показано, что разрабатываемая технология не должна уменьшать механическую прочность на граничной поверхности слоев, поскольку

энергозатраты на разрушение образцов с прочной связью выше.

Учитывая малую величину предельной степени деформаций (до 0,2...0,3%) для ВМКМ в направлении, перпендикулярном волокнам, величину деформаций измеряли тензодатчиками, наклеенными непосредственно на поверхность образцов.

В результате испытаний установлено, что для ВМКМ уровень деформационных свойств при растяжении ниже, чем при сжатии (рис.2). Экспериментально установлено также, что в области деформирования связь между напряжениями и деформациями нелинейная. Аналитически показано, что нелинейный вид связи между напряжениями и деформациями характерен для ВМКМ, которые имеют высокую неоднородность структуры. Эффективный предел пропорциональности для ВМКМ в направлении, перпендикулярном волокнам, определяется зависимостью

$$\sigma_{\perp} = \frac{E}{\delta_0} \left(\frac{K}{E} \right)^{\frac{1}{1-n}} \left[(n+1)(\delta_0 - 2nr) + nr \left(1 - \frac{2r}{a_0} \right) \right], \quad (9)$$

где E , K и n - коэффициенты аппроксимации диаграммы деформирования сплава матрицы КМ; δ_0 - толщина образца; r - радиус волокон; n - количество монослоев волокон, a_0 - параметр структуры.

Для типовых структур бороалюминиевых КМ аналитически показано, что при изменении шага волокон в пределах 0,16...0,24 мм и диаметре волокон 0,14 мм величина эффективного предела пропорциональности ВМКМ составляет 0,12...0,42 от предела пропорциональности сплава его матрицы, а погрешность определения предела пропорциональности - не превышает 15%.

Предложено аналитическое выражение для построения диаграмм деформирования ВМКМ при нагружении перпендикулярно армирующим волокнам, описывающее деформационные свойства с погрешностью в пределах 12...17%:

$$\sigma = \frac{E}{\delta_0} \{ (\delta_0 - 2nr) \} e_1^n + 2nre_{20}, \quad (10)$$

где e_1 - деформация образца;

$$e_{20} = \frac{a_0^2 e_1}{r(a_0 + 2r)} \cdot \operatorname{arctg} p - \frac{\pi a_0 e_1}{4r}; \quad p = \sqrt{\frac{a_0 + 2r}{a_0 - 2r}}$$

Для увеличения точности расчета технологических параметров операций формообразования разработан и экспериментально обоснован метод построения деформационных зависимостей эффективных свойств ВМКМ на основании испытаний заготовок при изгибе.

Коэффициенты аппроксимации диаграмм деформирования определяют при решении системы уравнений:

$$\int_0^{\sigma_{\perp}} d\sigma \sum_{i=1}^n d_i \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{r}{\rho} - 1 \right)^{2i-1} + \int_0^{\sigma_{\perp}} d\sigma \sum_{i=1}^n b_i \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{r}{\rho} - 1 \right)^{2i-1} = a_{\perp}; \quad (11)$$

Деформационные зависимости при одноосном сжатии и растяжении МКМ системы АД33-В ($V_f=45\%$)

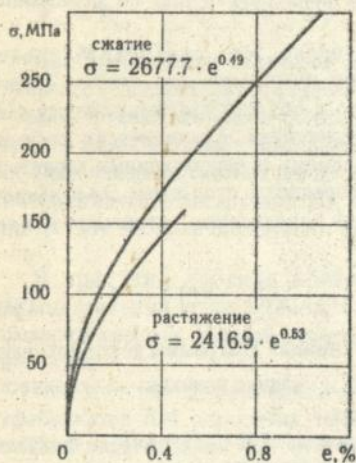


Рис.2

Деформационные зависимости при сжатии МКМ системы АД33-В ($V_f=45\%$) для различных температур

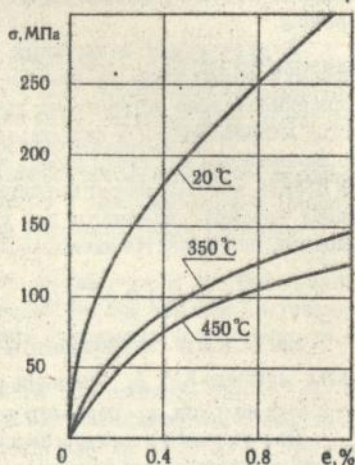


Рис.3

Сравнение деформационных зависимостей для холоднокатаного листа из алюминиевого сплава АД33 (1) и материала матрицы МКМ системы АД33-В при сжатии (2) и растяжении (3)

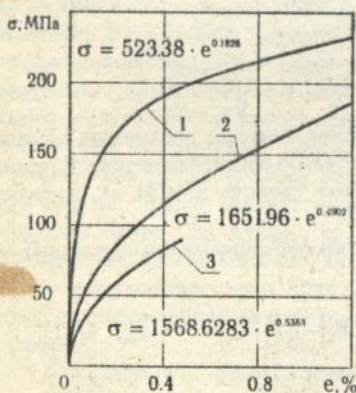


Рис.4

Диаграмма пластичности МКМ системы АД33-В ($V_f=45\%$)

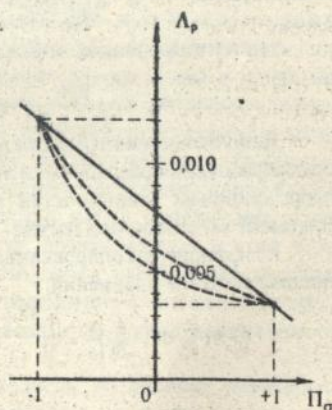


Рис.5

$$\sum_{k=1}^N \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{2^{k-1}} + \frac{2^{1-k}}{2^{1-k} + 1} \left\{ (R_n - \rho)^{2^{k-1}} [\rho + R_n(2^{1-k} + 1)] d_k + (R_n - \rho)^{2^{k-1}} [\rho + R_n(2^{1-k} + 1)] b \right\} = 0,$$

где $a_{уд}$ - удельная работа деформации при изгибе, определяемая экспериментально; R_n, R_s, ρ - радиусы заготовки, соответственно, наружный, внутренний и нейтральной поверхности (НП); γ - параметр интегрирования; b_k, d_k - коэффициенты аппроксимации деформационной зависимости соответственно на растяжение и сжатие иррациональным многочленом вида:

$$\sigma_i = \sum_{k=1}^N b_k e_i^{2^{k-1}} \quad (12)$$

Система $2N$ уравнений решается для N точек, в которых экспериментально определены соответствующие значения удельной работы и радиуса НП. Величина радиуса НП определяется также при испытаниях на изгиб (а.с.1802444).

Разработанный экспериментально-аналитический метод может быть использован для построения диаграмм деформирования гомогенных металлов и сплавов. В этом случае количество уравнений уменьшается в два раза, поскольку коэффициенты $b_k = d_k$, а величина радиуса НП устанавливается известными зависимостями.

Проверка экспериментально-аналитического метода, выполненная для гомогенных сплавов Д16М, АМг6, сталь 3, 12Х18Н10Т и других показала, что погрешность аппроксимации не превышает 5%. Сравнение деформационных зависимостей КМ, полученных двумя методами - на одноосное нагружение и изгиб показало, что их взаимная погрешность не превышает 12-18%.

Разработанные методы обеспечили расчет на ЭВМ деформационных зависимостей для ВМКМ при различных температурах деформирования, которые представлены на рис.3.

Для определения реальных деформационных свойств матрицы волокнистых МКМ, разработан экспериментально-аналитический метод, который использует в качестве исходных данных деформационную зависимость для КМ, установленную на основании экспериментальных данных. Коэффициенты аппроксимации b_k деформационных зависимостей для матрицы КМ определяют при решении системы уравнений вида:

$$\sum_{k=1}^N b_k \left[(\delta_0 - 2nr) e_{11}^{2^{k-1}} + 2nr e_{33}^{2^{k-1}} \right] = \sigma_j, \quad j = 1, \dots, N \quad (13)$$

Полученные результаты расчета показывают, что сопротивление деформированию материала матрицы КМ из сплава АД33 на сжатие выше, чем на растяжение (рис.4). Эти свойства матрицы ниже соответствующих свойств листов из сплава АД33.

На основании экспериментальных результатов по одноосному нагружению

образцов волокнистых МКМ построены диаграммы пластичности, которые характеризуют способность материала к необратимому формоизменению без разрушения. Для описания схем напряженного состояния диаграммы принят коэффициент жесткости $P_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / \sigma_1$, предложенный Г.А.Смирновым-Аляевым, а в качестве показателя пластичности - величина предельной сдвиговой деформации Λ_p .

Типовая диаграмма пластичности для бороалюминиевого композита показана на рис.5. Диаграмма строилась по двум экспериментальным точкам, соответствующим предельным сдвиговым деформациям на одноосное растяжение ($P_0 = +1$) и одноосное сжатие ($P_0 = -1$). Определение промежуточных точек затруднено, поскольку для ВМКМ сложно найти такие виды испытаний, в которых можно оценить показатели схемы напряженного состояния и предельной сдвиговой деформации. Анализ показывает, что прямая, соединяющая две экспериментальные точки, ограничивает сверху истинные значения показателей предельной пластичности в рассматриваемом интервале. За пределами этого интервала выполняются соотношения: при $P_0 > +1$ $\Lambda_p \leq 0,0035$ и при $P_0 < -1$ $\Lambda_p > 0,0120$. Необходимо отметить, что в отличие от большинства металлических материалов, воздействие сжимающих напряжений в процессах деформирования ВМКМ способствует более интенсивному увеличению предельной пластичности.

Полученные экспериментальные результаты, а также результаты расчета кривых деформирования и диаграмм пластичности введены в базу данных и использованы в дальнейших расчетах технологических параметров процессов формообразования.

В четвертом разделе выполнено теоретическое и экспериментальное исследование процессов пластического формообразования конструкций из многослойных композитов. Рассмотрены процессы деформирования многослойных композитов, отдельные (физические) слои которых являются однородными металлами (СМКМ, в частном случае биметаллы) или описываются феноменологическими моделями, близкими к однородным ввиду возникновения в них малых деформаций (полимерные слои - МПКМ). Теоретический анализ деформирования выполнен с использованием замкнутой системы уравнений механики сплошных сред с привлечением полей скоростей перемещений для описания процесса деформирования.

На основании результатов экспериментальных исследований закономерностей пластического изгиба слоистых композитов разработана математическая модель процесса гибки многослойных КМ для произвольного количества слоев m , включающая систему кинематических и физических уравнений:

$$\varepsilon_{nj} = -\varepsilon_{npj} = -\frac{V_{j-1}}{R_j + R_{j+1}} \left[\left(1 - \frac{k_j R_j}{R_j - R_{j-1}} \right) - \frac{R_j R_{j+1}}{r_0^2} \left(1 + \frac{k_j R_{j-1}}{R_j - R_{j-1}} \right) \right]$$

$$\varepsilon_{nj} = 0; \quad k_j = 1 - \frac{R_0(R_1^2 - \rho^2)}{R_1(R_0^2 - \rho^2)}$$

$$k_j = \frac{R_j R_{j-1}}{R_j} \left[1 - \frac{(R_j + R_{j-1})[(1 - k_{j-1})R_{j-1} - R_{j-2}]}{(1 - k_{j-1})(R_{j-1}^2 - R_{j-2}^2)} \right], j = 2, \dots, m; \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^m \left\{ \frac{K_j \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n_j+1}}{(n_j + 2)\rho^{n_j+2}} \left[|\rho - R_{0-0}|^{(n_j+1)} [|\rho + R_{0-0}|(n_j + 1)] - |\rho - R_j|^{(n_j+1)} [|\rho + R_j|(n_j + 1)] \right] \right\} = 0,$$

где ε_{kij} - скорость деформаций частиц металла слоев в процессе изгиба;

V_j - скорости перемещений граничных поверхностей слоев; R_j - текущие радиусы кривизны слоев; k_j - коэффициенты изменения толщины слоев; K_j и n_j - коэффициенты степенной аппроксимации функций феноменологических моделей деформирования материалов слоев; ρ - радиус НП слоев.

Исследование модели деформирования показало, что положение НП зависит от относительного радиуса изгиба, соотношения механических свойств, упрочнения материалов и начального соотношения толщин слоев. В процессе пластической деформации происходит дополнительное смещение НП вследствие:

изменения толщины слоев, влияние которого необходимо учитывать при

$$R_b \leq (60 \dots 70)\delta_0;$$

изменения сопротивления деформированию материала слоев в виду упрочнения, которое необходимо учитывать при развитых пластических деформациях ($R_b \leq 200\delta_0$).

Установлено, что деформация слоев по толщине увеличивается при уменьшении относительного радиуса изгиба (рис.6). При $R_b \geq (50 \dots 60)\delta_0$ деформация слоев по толщине составляет доли процента и она, практически, не оказывает влияния на процесс деформирования, а при $R_b / \delta_0 < 50 \dots 60$ интенсивно увеличивается и при $R_b / \delta_0 < 10 \dots 15$ достигает нескольких десятков процентов, что оказывает влияние на точность расчета технологических параметров процесса деформирования.

Анализ НДС показал, что интенсивность напряжений, интенсивность деформаций, а также энергетические параметры (функция распределения полной энергии и функция распределения упругой энергии) имеют разрыв на граничных

Зависимости изменения толщины биметалла (а), слоев (б,в) и коэффициента изменения толщины слоев (г) от относительного радиуса гибки

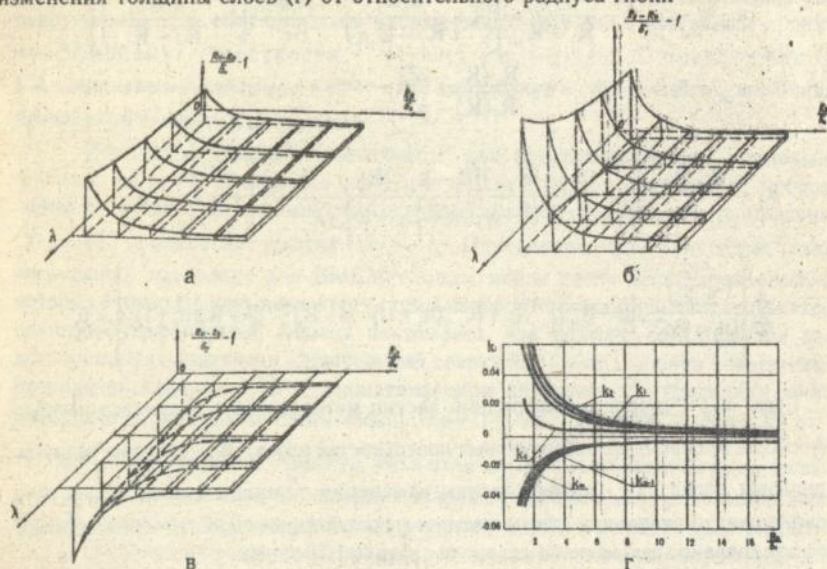


Рис.6

Сравнение методов расчета остаточного радиуса кривизны при изгибе биметалла Д16+ВТ1-0 толщиной 1.0 мм ($\lambda=0.3$)

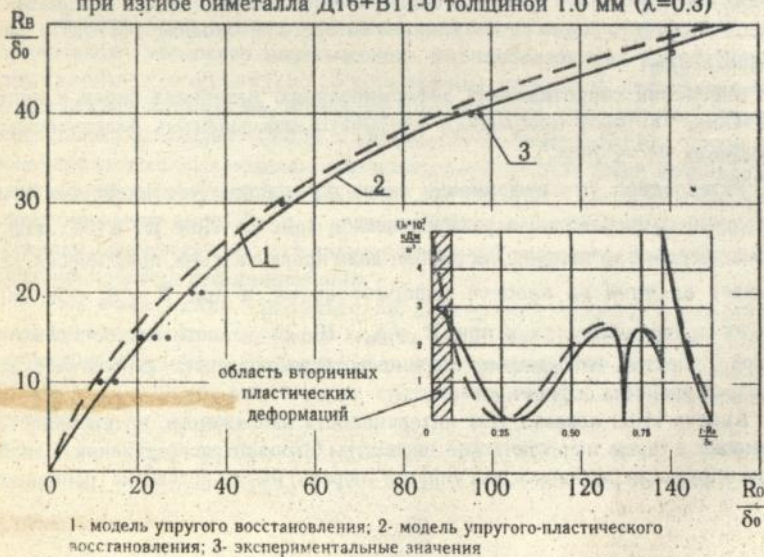


Рис.7

поверхностях. Непрерывными функциями являются тангенциальные деформации.

В процессе исследований установлено также, что при изгибе многослойных композитов возможен пластический сдвиг слоев по промежуточному слою. Показано, что предельная длина фланца заготовки прямо пропорциональна толщине смещаемого слоя и отношению условных пределов текучести смещаемого слоя и слоя по которому происходит сдвиг. При этом, чем больше разница механических свойств слоев, тем больше должна быть необходимая длина фланца заготовки, чтобы он работал как "жесткий конец". В случае деформирования МПКМ несоблюдение этого условия приводит к разрушению заготовки в зоне фланца по граничной поверхности металл-полимер вследствие малого ресурса пластичности полимерного слоя. Экспериментально установлено, что при изгибе многослойных заготовок, имеющих жесткий фланец, сдвиговые напряжения локализуются в примыкающей к зоне изгиба части фланца. В однородных материалах и слоях, имеющих слои с близкими по величине механическими свойствами, эти напряжения затухают в результате перемещения материальных слоев. При наличии среднего слоя, имеющего механические свойства, отличающиеся на порядок по сравнению с внешними слоями, в процессе гибки происходит искривление фланца в области его сопряжения с зоной изгиба, что характерно для МПКМ. Результатом этого явления является местное разрушение заготовки в виде разделения слоев.

При анализе процесса разгрузки установлено, что при упругом восстановлении многослойных заготовок, изогнутых первоначально на $R/\delta < 50..60$, часть материальных слоев, наиболее удаленных от НП получает вторичную пластическую деформацию обратного знака. В этом случае энергетические затраты изменения формы выше, чем при чисто упругом восстановлении, так как часть упругой энергии расходуется необратимо на пластические деформации, а изменение формы заготовки проявляется в большей степени (рис.7).

Обосновано и экспериментально подтверждено, что величина угла пружинения изгибаемой многослойной заготовки с несимметричным расположением слоев, имеющих различные механические свойства, зависит от направления изгиба во внутрь или наружу и относительной толщины слоев $\lambda = \delta_i / \delta_0$, где δ_i - толщина i -го слоя. Это объясняется изменением толщины слоев изгибаемой заготовки. Величина изменения угла пружинения уменьшается при увеличении радиуса гибки и при $R/\delta \geq 40..60$ практически равна нулю (рис.8).

Экспериментально показано, что комплексный учет структурных особенностей и механических свойств слоев при изгибе многослойных композитов позволяет обеспечить необходимую точность расчета технологических параметров, а именно, погрешность вычислений:

энергетических параметров процесса деформирования (работы, упругой

энергии) не превышает 22%;

величины пружинения для монометаллов не превышает 10...12% и для биметаллических материалов - 10-15%. При этом в диапазоне $R/\delta < 40..50$ точность вычисления пружинения для биметаллических материалов и трехслойных МПКМ в среднем, на 10% выше по разработанной методике, чем по известным;

минимального радиуса гибки не превышает 28%.

Изменение величины угла пружинения для наружного и внутреннего расположения плакирующего слоя в зависимости от относительного радиуса изгиба

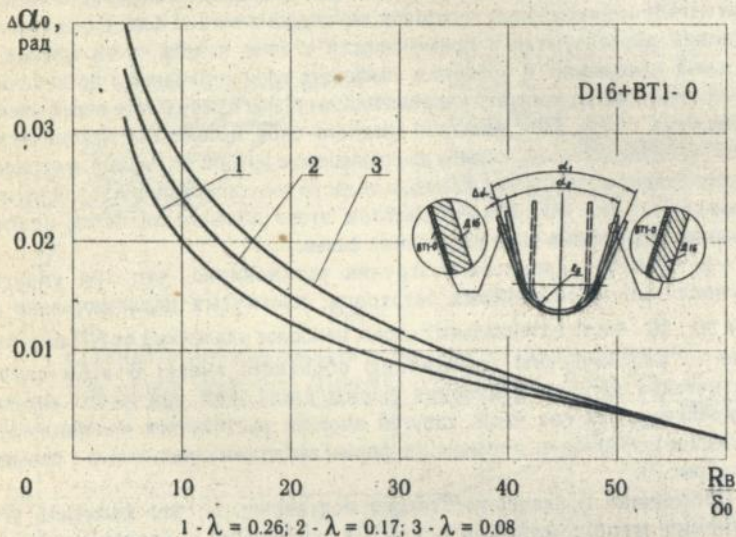


Рис.8

Основные кинематические и физические закономерности, полученные для процесса изгиба слоистых композитов с однородными слоями, использованы для анализа процессов деформирования волокнистых композитов по схеме расчета в представлении их в виде слоисто-неоднородного тела.

В пятом разделе рассмотрены вопросы механики деформирования металлических композитов, армированных непрерывными волокнами, в условиях чистого изгиба, дополнительного нагружения и термовременного воздействия на заготовку.

На основании принятых гипотез и допущений показано, что ВМКМ с

детерминированной структурой можно рассматривать как слоистое тело с условными слоями, совпадающими с границами монослоев. Если толщины условных слоев равны между собой, то композит можно рассматривать как "квазигомогенное" тело в феноменологическом представлении. Если же толщины монослоев различны или имеют различный шаг укладки волокон, то ВМКМ необходимо представлять в виде совокупности слоев с различными феноменологическими свойствами.

Поскольку зоны растяжения и сжатия в операциях гибки ВМКМ описываются различными феноменологическими моделями деформирования, предложено композит рассматривать как двухслойное тело, условная граница слоев которого совпадает с НП.

Рассмотрен цилиндрический изгиб листовых ВМКМ с большими и малыми радиусами кривизны. Определены величины радиуса НП, разделяющие условные слои, для упруго-пластической, идеально-пластической и физически-нелинейной феноменологических моделей композита. Сформулированы граничные условия и выполнен расчет НДС представительного объема.

Анализ результатов расчета напряжений на граничной поверхности волокно-матрица показал, что:

область максимального значения среднего напряжения (гидростатического растяжения) совпадает с направлением главного тангенциального напряжения и составляет 60-70% от его величины;

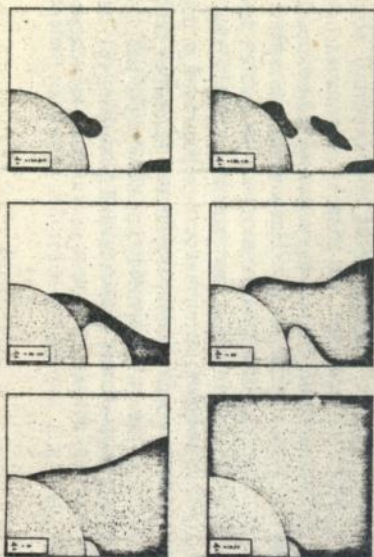
в зоне тангенциального растяжения область гидростатического сжатия может возникнуть для композитов с большим объемным содержанием волокон (более 25-30%) за счет радиальных напряжений в слоях, которые находятся в непосредственной близости от нейтральной поверхности. Ее положение совпадает с направлением радиальных напряжений;

область максимального значения интенсивности напряжений (второго инварианта тензора напряжений) расположена под углом близким к 45° к направлению главных напряжений;

величина интенсивности напряжений увеличивается при увеличении объемного содержания волокон и по мере удаления монослоя от НП заготовки.

Рассмотрен процесс развития пластических деформаций в представительном объеме заготовки из волокнистого композиционного материала. Аналитически показано, что области первоначального зарождения пластических деформаций находятся на граничной поверхности волокон и в геометрическом центре полной ячейки. Направление развития пластических деформаций совпадает с диагоналями, которые являются касательными к граничным поверхностям соседних волокон монослоя. Этим же областям соответствуют максимальные интенсивности деформаций и поэтому они, в соответствии с принятым критерием разрушения, являются опасными с точки зрения возможного начала разрушения композиционного материала (рис.9). В результате металлографических исследований показано, что первоначальные трещины, как правило, возникают в зоне растяжения изгибаемой заготовки в

Динамика развития пластических деформаций в представительном объеме волокнистого композита



$V = 35\%$

Рис.9

Зависимость интенсивности напряжений на границе от места расположения несовершенного контакта между волокном и матрицей

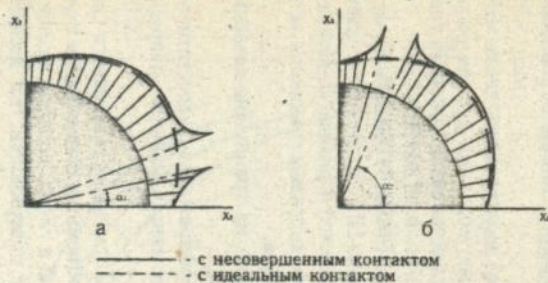
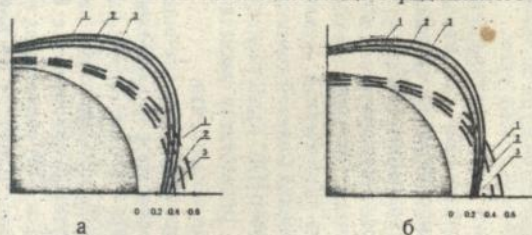


Рис.10

Зависимость инвариантов тензора напряжений на межфазной границе компонент композита от величины сжимающего радиального напряжения



а и б - для волокна, расположенного, соответственно, в зоне близкой к наружному радиусу и к радиусу нейтральной поверхности заготовки;
1, 2 и 3 - для относительной величины радиального сжимающего напряжения ($\frac{\sigma_r}{\sigma_m}$), соответственно 0.01; 0.25; 0.50;

————— - интенсивность напряжений;
----- - среднее гидростатическое напряжение

Рис.11

монослоях с максимальными тангенциальными деформациями и зарождаются на границах волокон, которые наиболее удалены от радиуса нейтральной поверхности. При деформировании трещины распространяются в представительном объеме по касательной к волокнам. При дальнейшем увеличении деформаций трещины возникают в соседних монослоях, развиваясь они соединяются и стремятся выйти на наружную поверхность, что приводит к разрушению заготовки.

Установлено, что на границе области отсутствия контакта матрицы с волокном интенсивность напряжений значительно возрастает (рис.10). Величина пика напряжений на границе зависит от места расположения зоны отсутствия контакта по отношению к направлению действия растягивающей нагрузки и превосходит соответствующую величину для идеального контакта в зоне, близкой к направлению растягивающей нагрузки в 1,8...1,9 раз, а в зоне, ортогонально расположенной к действию этой нагрузки в 1,15...1,35 раз. В целом кривая распределения для несовершенного контакта лежит несколько выше кривой, соответствующей идеальному контакту. Это приводит к некоторому уменьшению технологической пластичности композиционных материалов, которая для процессов гибки оценивается предельным (минимальным) радиусом гибки.

Показано, что избежать возникновения трещин возможно двумя путями: уменьшением величины деформаций в зоне тангенциального растяжения и увеличением предельно допустимой пластической деформации матрицы композита.

В первом случае уменьшение величины тангенциальных деформаций в зоне растяжения изгибаемой заготовки достигают в реализуемых технологических процессах за счет смещения радиуса НП в сторону наружной поверхности путем изменения схемы внешнего нагружения заготовки.

Во втором случае повышение деформируемости сплава матрицы достигают изменением схемы НДС или термическом воздействии на деформируемую заготовку.

Выполнен анализ деформирования совмещенных технологических схем, которые используют дополнительное нагружение заготовки из ВМКМ в радиальном и тангенциальном направлении. Показано, что с увеличением давления на внешнюю поверхность заготовки в радиальном направлении, например, эластичной или другой среды радиус гибки ВМКМ уменьшается. Процесс протекает устойчиво при величине контактных напряжений меньше предела текучести заготовки ($\sigma_1 < \sigma_{*}$). При увеличении контактных напряжений свыше предела текучести ($\sigma_1 > \sigma_{*}$) происходит утонение заготовки и возможно дробление волокон в зоне гибки, а следовательно, уменьшение продольной прочности композита.

Установлено, что при создании дополнительных радиальных сжимающих напряжений по толщине заготовки деформируемость сплава матрицы

увеличивается вследствие значительной чувствительности величины предельных деформаций ВМКМ от показателя жесткости схемы НДС (Π_0).

В качестве примера приведены некоторые результаты расчета НДС в представительном объеме изгибаемой заготовки композита в зависимости от величины дополнительного напряжения радиального сжатия (рис. 11). Величина напряжений радиального сжатия приведена к соответствующему значению тангенциальных напряжений. Установлено, что при увеличении напряжения радиального сжатия пластичность материала увеличивается быстрее, чем разрушающее напряжение. Так, например, при увеличении относительного напряжения радиального сжатия с 0,01 до 0,50 относительная величина второго инварианта тензора напряжений увеличивается в среднем на 28...31%. При этом величина первого инварианта (гидростатического напряжения растяжения) уменьшается таким образом, что показатель жесткости схемы напряженного состояния уменьшается с $\Pi_0 = +1$ до $\Pi_0 = +0,57$. Изменение схемы НДС приводит к увеличению предельной степени деформации материала матрицы в среднем на 57...62%. Это позволяет выполнять процессы формообразования с большей степенью деформации. Такое нагружение на практике реализуется при гибке в эластичную среду и с жесткими подкладками.

Деформирование заготовки из ВМКМ с пластичными технологическими подкладками позволяет создать в заготовке наряду с радиальными дополнительные напряжения тангенциального сжатия за счет сил трения на граничной поверхности заготовка-подкладка.

Максимальное смещение радиуса нейтральной поверхности достигают при жестком соединении технологической подкладки с заготовкой. Установлено, что при толщине подкладки

$$\delta_n = (R_0 + \delta_0) \left[\left(1 + \frac{\delta_0}{R_B} \right)^{\frac{\sigma_m}{\sigma_s}} - 1 \right] \quad (15)$$

вся композитная заготовка находится в зоне сжатия.

Дальнейшее уменьшение минимального радиуса гибки возможно в условиях принудительного тангенциального сжатия (гибка со сжатием).

Установлено также, что в технологических процессах для уменьшения предельного радиуса гибки эффективно термическое воздействие на заготовку, которое может проявляться на следующих этапах:

перед холодным деформированием заготовки в виде предварительной термической обработки (закалки, отжига и др.), характерной для вида сплава, составляющего матрицу;

при горячем деформировании для нагрева заготовки с целью увеличения пластичности материала матрицы.

Так в результате отжига пластичность матричного сплава АД33 повышается и относительный радиус гибки ВМКМ ВКА-2 уменьшается на

30...40% при стабилизации свойств материала. Разброс экспериментальных данных уменьшается с 25...28% до 10...12%, что гарантирует качество изготавливаемых деталей. В результате старения пластичность композитов уменьшается (рис. 12). Поэтому для обеспечения качества процессы деформирования необходимо выполнять непосредственно после термической обработки.

Экспериментально обосновано, что максимальная технологическая пластичность соответствует деформированию заготовки в нагретом состоянии в интервале температур 420...470°C для ВМКМ на основе сплава АД33. Превышение верхней границы этого интервала ведет к уменьшению пластических и механических свойств композита вследствие образования интерметаллидов на границе компонент.

Экспериментально установлено также, что для достижения максимальной пластичности ВМКМ типа ВКА-2 при технологических операциях необходимо учитывать еще два фактора: время выдержки заготовки при температуре деформирования перед гибкой и время предварительного отжига (рис. 13 и 14). Комплексный учет этих факторов обеспечивает качество выполнения технологических операций. Погрешность расчета энергетических параметров при температурах деформирования до 450°C не превышает 23...28%, а предельного радиуса гибки - 18...25%.

Зависимости, определяющие технологическую пластичность при различных способах гибки листов волокнистых МКМ, сведены в табл. 2. Полученные определяющие расчетные зависимости учитывают все вышеприведенные факторы процессов деформирования и позволяют рассчитывать технологические и предельные параметры процесса гибки с использованием разработанного ППП. Приведенные достижимые относительные радиусы гибки показывают эффективность применения каждого из используемых методов.

В шестом разделе на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разработаны технологические процессы и рекомендации по изготовлению деталей из МКМ для применения в конструкциях ЛА. Поэтому специфика учета факторов, влияющих на точность и качество, определила необходимость рассмотрения технологических процессов в отдельности для каждого из типов композитов с учетом общих закономерностей деформирования.

Отработаны технологии изготовления деталей различных классов из листовых СМКМ (биметаллов): обшивки одинарной и двойной кривизны, отбортовки прямолинейные и криволинейные, жесткости, обтекатели и чашки, шины силовых электросистем. Экспериментально установлено, что неравномерность упругих свойств при формообразовании пологих оболочек (обшивок) двойной кривизны требует применения разработанных специальных способов (А.с. 517326, 755377, 486526).

Для стабилизации механических свойств СМКМ в последовательности

Зависимость относительного минимального радиуса гибки МКМ ВКА-2 ($\frac{\delta}{R_{\min}} = 0,4$) от объемного содержания волокон и времени выдержки после термообработки

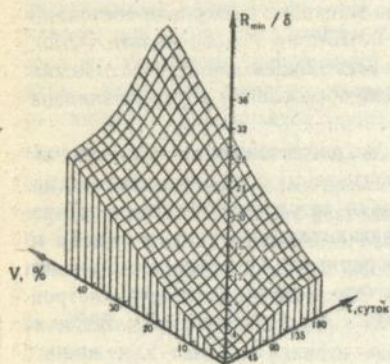


Рис.12

Зависимость относительного минимального радиуса гибки бороалюминиевого КМ ($V_f=40\%$) от температуры нагрева при деформировании и времени предварительного отжига заготовки

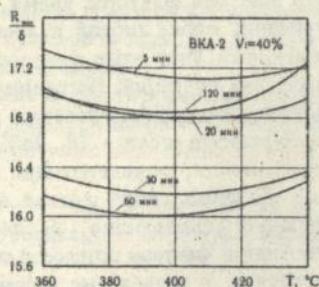
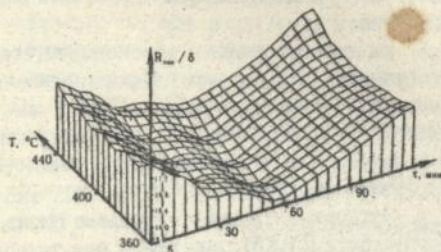


Рис.13

Зависимость относительного минимального радиуса гибки бороалюминиевого КМ ($V_f=40\%$) от температуры и времени нагрева заготовки в штампе перед деформированием

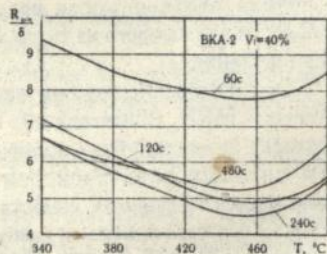
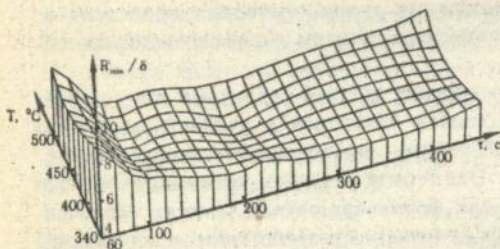
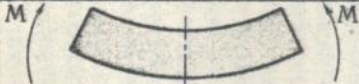
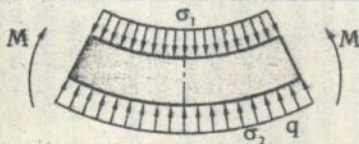

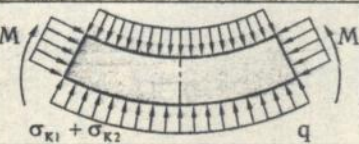



Рис.14

Таблица 2

Методы оптимизации технологической пластичности при гибке листов МКМ марки ВКА-2

Метод	Схема нагружения	Определяющие расчетные зависимости	Достижимый относительный радиус гибки (МКМ ВКА-2)
Свободная гибка		$\rho = R_B^{\frac{\sigma_{sc}}{\sigma_{sp} + \sigma_{sc}}} R_H^{\frac{\sigma_{sp}}{\sigma_{sp} + \sigma_{sc}}}$	22,0 - 25,0
Радиальное сжатие		$\rho_0 = \left(R_H^{\sigma_{sp}} R_B^{\sigma_{sc}} e^{\sigma_1 - \sigma_2} \right)^{\frac{1}{\sigma_{sp} + \sigma_{sc}}}$ $\Lambda_p = f(\Pi_\sigma)$	13,0 - 15,0
Тангенциальное сжатие		$\rho = \left(R_H^{\sigma_{sp}} R_B^{\sigma_{sc}} \exp \frac{\sigma_{всп} \delta_0}{R_H} \right)^{\frac{1}{\sigma_{sp} + \sigma_{sc}}}$ или $\rho = (1 + e_0) \left(R_H^{\sigma_{sp}} R_B^{\sigma_{sc}} \right)^{\frac{1}{\sigma_{sp} + \sigma_{sc}}}$	6,0 - 10,5
Радиальное и тангенциальное сжатие		$\rho_0 = \left(\frac{R_H^{\sigma_{sp}} R_B^{\sigma_{sc}}}{e^{\sigma_{k1} + \sigma_{k2}}} \right)^{\frac{1}{\sigma_{sp} + \sigma_{sc}}}$	5,0 - 8,0
Нагрев		$\rho_0 = k \left(R_H^{\sigma_{sp}} R_B^{\sigma_{sc}} \right)^{\frac{1}{\sigma_{sp} + \sigma_{sc}}}$ $\sigma_{sp} = f_1(e_p, T, \tau)$ $e_{sc} = f_2(e_{sc}, T, \tau)$	4,5 - 5,0

операций технологического процесса рекомендуется вводить термическую обработку. Это позволяет уменьшить минимальные радиусы гибки за счет увеличения технологической пластичности слоев и величину пружинения вследствие уменьшения величины упругих составляющих деформаций.

Учитывая анизотропию пластических свойств ВМКМ, разработана методика определения оптимального варианта расположения заготовок в исходном листе. Методика использована при проектировании технологии изготовления деталей сложной формы из слоистых металлических и металлополимерных материалов.

Особенности структуры и низкие пластические свойства слоистых листовых МПКМ определяют схемы построения технологических процессов изготовления деталей. Изготовленные детали из МПКМ, как правило, должны иметь натянутые армирующие компоненты для обеспечения высоких механических и ресурсных характеристик. Начально-напряженные конструкции листов МПКМ предложено получать пластическим деформированием в условиях одноосного или двухосного растяжения предвременно склеенных листов с предельной степенью деформации не более 1,5...2,5%. При изготовлении обшивок обтяжкой натяжение армирующего компонента достигают при образовании формы деталей.

Разработанные теоретические положения позволили определить предельные параметры формообразования, величину пружинения и обосновать использование методов деформирования, исключающих дефекты, обусловленные механизмами взаимодействия слоев, для изготовления деталей различных типов. Результаты комплексного исследования влияния процессов деформирования и механической обработки торцевой поверхности на качество деталей обеспечили разработку технологических рекомендаций по изготовлению конструкций из МПКМ (ТР 1.4.1806-87 и др.). В производстве АНТК "Антонов" освоены технологические процессы изготовления основных типов деталей (профили, стенки с круглыми отбортовками, обшивки одинарной кривизны, диафрагмы с прямолинейными и криволинейными отбортовками и др.) при изготовлении конструкций из листового МПКМ трехслойной структуры Д16/ВК-41 самолета Ан-70.

Наибольшая эффективность достигается при использовании листовых МПКМ для обшивок фюзеляжа самолетов, представляющих оболочки одинарной (ООК) и двойной (ОДК) кривизны.

Применение традиционных методов гибки ООК приводит к изменению начального уровня напряжений в тангенциальном направлении в МПКМ по сравнению с исходным материалом. В аксиальном направлении уровень остаточных напряжений, практически, не изменяется. Поэтому эти способы используют, когда не предъявляется жестких требований к уровню остаточных напряжений в деталях. Для достижения гарантированного уровня остаточных напряжений в тангенциальном направлении рекомендовано использовать способы гибки с растяжением на прессах типа ОП-5, РО-3, FEKD и др.

Экспериментально установлено, что технологические процессы обтяжки ОДК имеют следующие особенности:

в процессе нагружения необходимо контролировать степень деформации, величина которой в зоне максимального растяжения не должна превышать для плоских листов 1,2...1,5% и обшивок двойной кривизны - 2,6...2,8%;

после формообразования изменение формы детали выше, чем у алюминиевых сплавов. Учитывая недопустимость ударных методов доводки для листов МПКМ, технологический процесс изготовления обшивок должен предусматривать необходимую точность формообразования.

Разработана методология выбора технологического процесса изготовления ОДК пологой формы на основании величины максимальных деформаций, необходимых для формообразования:

если необходимые деформации меньше предельных изготовление ОДК из листа МПКМ осуществляют обтяжкой по пуансону, контур рабочей поверхности которого выполнен с учетом пружинения заготовки. Технологический процесс включает следующие этапы. На первом этапе лист МПКМ обтягивают по оснастке теоретического контура. На втором этапе на основании замера результатов строят математическую модель пружинения МПКМ для конкретного процесса, использование которой позволяет рассчитать контур и изготовить обтяжной пуансон с учетом пружинения. Если после обтяжки неприлегание вновь полученной обшивки выше допустимой величины, производят корректировку математической модели или используют методы доводки эластичной средой. Опыт показывает, что после построения математической модели первого уровня неприлегание обшивки не превышает 2-3 мм. При этом построенная математическая модель может быть использована для обтяжки аналогичных обшивок из МПКМ соответствующей структуры;

если необходимые деформации превышают предельные, технологический процесс предусматривает раздельное изготовление обшивок из алюминиевого сплава Д16Т по оснастке теоретического контура, сборку пакета совместно с препрегом полимерного слоя и склейку. При сборке пакета допускается создание натяжения армирующих компонентов полимерного слоя. Для обеспечения точности окончательной формы ОДК в качестве заключительной допускается операция дополнительной обтяжки готовой обшивки на прессе.

Изготовление экспериментальной ОДК передней части фюзеляжа самолета АН-70 выполнено обтяжкой по оснастке с рабочим контуром, учитывающим пружинение. Математическая модель пружинения построена на основании предварительных результатов обтяжки листов МПКМ по пуансону теоретического контура с использованием метода группового учета аргумента. Процесс обтяжки реализован на обтяжном прессе РО-3М с предельной степенью деформации 2,0...2,5%.

Выполненные исследования процессов гибки ВМКМ на металлической матрице показали, что только комплексный учет структурных и технологических факторов на этапах изготовления листового полуфабриката композита и

формообразования детали из него позволяет обеспечить качество деталей.

Процессы получения листовых полуфабрикатов должны обеспечить, наряду с максимальной прочностью соединения на граничной поверхности, некоторый резерв ресурса термовременного воздействия для проведения технологических операций деформирования и термической обработки, а также эксплуатации при повышенных температурах:

$$\Phi_0 - \Phi_n \geq \Phi_d + \Phi_s, \quad (16)$$

где $\Phi_0 = f(T, \tau, p)$ - полный ресурс термовременного воздействия на МКМ; T - температура, τ - время, p - давление; Φ_n и Φ_d - ресурс, израсходованный, соответственно, на изготовление МКМ и детали из него; Φ_s - ресурс, необходимый для функционирования детали из МКМ в изделии.

Для используемых композитов на основе алюминиевых сплавов АД1, АД33, АВ с волокнами бора и стали разработчиками материала определены оптимальные значения технологических параметров, обеспечивающие высокую прочность соединения волокон с матрицей и определенный уровень пластичности МКМ. В силу этого, влияние на пластичность МКМ этой группы факторов ограничено.

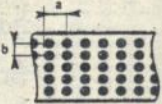

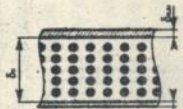

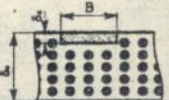
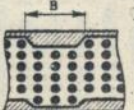


На этапе проектирования композитов перспективно создание специальных структур, реализующих следующие пути оптимизации: назначение параметров объемного содержания и расположения армирующих волокон; использование лакирующих слоев конструкционного и технологического назначения, а также создание локальных зон повышенной пластичности в очаге деформирования. Представленные в табл.3 зависимости позволяют выполнять оценку структурных параметров в зависимости от необходимого радиуса изгиба с точностью до 20...25%.

На этапе изготовления деталей оптимизация технологической пластичности осуществляется вариацией схем нагружения и термического воздействия на заготовку. Разработаны рекомендации по проектированию технологических процессов гибки в зависимости от факторов повышения пластичности композитов. В работе обобщен опыт реализации технологических процессов пластического формообразования трубчатых деталей подкосов, стрингеров и гофров панелей из волокнистых МКМ типа ВКА-2 и КАС-1А. Спроектированы и изготовлены специальные штампы для гибки труб в эластичную среду, калибровки труб со сжатием в холодном состоянии, штамп для совмещенной гибки-калибровки труб в горячем состоянии, штамп для многопереходной гибки стрингеров и гофров в горячем состоянии, которые реализуют основные рекомендуемые схемы и разработанные технологические решения (А.с.1531298, 1736056, 1517211). Технология производства конструкций с использованием этих штампов освоена в производстве АНТК "Антонов"; УкрНИИАТ и ВИАМ (Россия).

Выполнен необходимый комплекс работ по обеспечению качества изготовления подкосов при соединении трубчатого композиционного элемента с законцовкой сваркой давлением (диффузионной сваркой) и освоено

Таблица 3

Основные пути оптимизации структуры композиционных материалов для выполнения операций гибки

№	Пути оптимизации	Типовая схема листовой заготовки	Определяющие зависимости	Схема изогнутого элемента детали	Примечание
1	Назначение величины объемного содержания волокон и параметров их взаимного расположения		$R_{\min} = \frac{\delta_k - d}{2(k_m - 1)} \frac{\delta_0}{2}$ $k_m = \exp\left(1 - \frac{2hV_0}{\pi} c_m\right)$ $h = \frac{b}{a}$		
2	Использование лакирующих слоев конструкционного и технологического назначения		$R_{\min} = \frac{\delta_k - d}{2(k_m - 1)} \frac{\delta_0}{2}$ $k_m = \exp\left(1 - \frac{2}{\pi} \frac{c_m}{hV_0(1 + \frac{\delta_{\text{от}}}{\delta_k} + \frac{\delta_{\text{от}}}{\delta_k})}\right)$ $\beta = \frac{\delta_k(k_m - 2)(k_m - 1)}{(k_m - 1)h\delta_k - d - d_0(k_m - 1)} = 1$		Лакирующие слои технологического назначения после гибки удаляются, например, травлением
3	Использование конструктивных вставок и заготовок специального строения	 	$R_{\min} = \frac{\delta_k - d}{2(k_m - 1)} \frac{\delta_0}{2}$ $k_m = \exp\left(1 - \frac{2}{\pi} \frac{c_m}{hV_0(1 + \frac{\delta_{\text{от}}}{\delta_k} + \frac{\delta_{\text{от}}}{\delta_k})}\right)$ $\beta = \frac{\delta_k(k_m - 2)(k_m - 1)}{(k_m - 1)h\delta_k - d - d_0(k_m - 1)} = 1$ $B = R_0 \alpha = 2 \frac{\sigma_m}{\sigma_m} (R_0 - \delta) \ln \frac{R_0}{R_0 - \delta}$	 	

технологический процесс в опытном производстве УкрНИИАТ. Процесс реализован в специальном штамповом блоке на гидравлическом прессе. Штамповый блок оснащен разъемными полуматрицами для обжима зоны соединения трубы с законцовкой, обеспечивает нагрев законцовки и создание защитной атмосферы (аргона). При диффузионной сварке использованы режимы, рекомендуемые ВИАМ.

Разработаны перспективные направления совершенствования процесса для серийного производства: использование промежуточных слоев металлов, создание дополнительного механического сцепления соединенных деталей и механизация процесса.

В результате комплекса выполненных технологических, металлографических, структурных и прочностных исследований обоснована целесообразность использования промежуточных слоев меди и никеля, которые обеспечивают сдвиговую прочность не менее 60...65% от сдвиговой прочности матричного сплава и защиту поверхности титановой законцовки от взаимодействия с окружающей средой при нагреве. Применение механического сцепления в виде рельефа на свариваемой поверхности законцовки увеличивает прочность до 85...90%.

Разработана специализированная установка, обеспечивающая всестороннее сжатие заготовки в технологическом цикле, автоматизированную регулировку параметров процесса и уменьшение термовременного воздействия на заготовку в 2 раза.

Выполнен расчет геометрических параметров конструкции соединения законцовки с композиционной трубой, обеспечивающих равномерное распределение удельной нагрузки на граничной поверхности в условиях полного соединения и возможных несовершенств контакта трубы и законцовки.

Базовым вариантом комплексного технологического процесса производства подкосов явились новые конструкторско-технологические решения (А.с.311927). При реализации комплексных технологических процессов использованы также разработанные при участии автора новые технические решения по процессам аргоно-дуговой сварки продольных швов (А.с.1466127, 1531347, 1531355 и др.). На основании разработанных технических решений и рекомендаций по их реализации освоены комплексные технологические процессы изготовления конструкций ЛА: трубчатых подкосов и стрингерных (гофрированных) панелей (рис.15), которые регламентируются разработанной под руководством автора НТД (ТР1.4.1818-87, ТР1.4.1966-90 и др.).

В работе выполнено также комплексное исследование влияния режимов технологического процесса на механические свойства профилей и трубчатых подкосов из МКМ ВКА-2 и КАС-1А.

Приведена оценка реализации предельной прочности ВМКМ для типовых профилей при испытаниях на растяжение, сжатие и сдвиг по разработанной методике. Установлено, что продольная прочность профилей зависит от накопленной деформации в процессе формообразования элементов профиля,

Структурные схемы изготовления типовых деталей трубчатых подкосов (а) и стрингерных панелей (б)

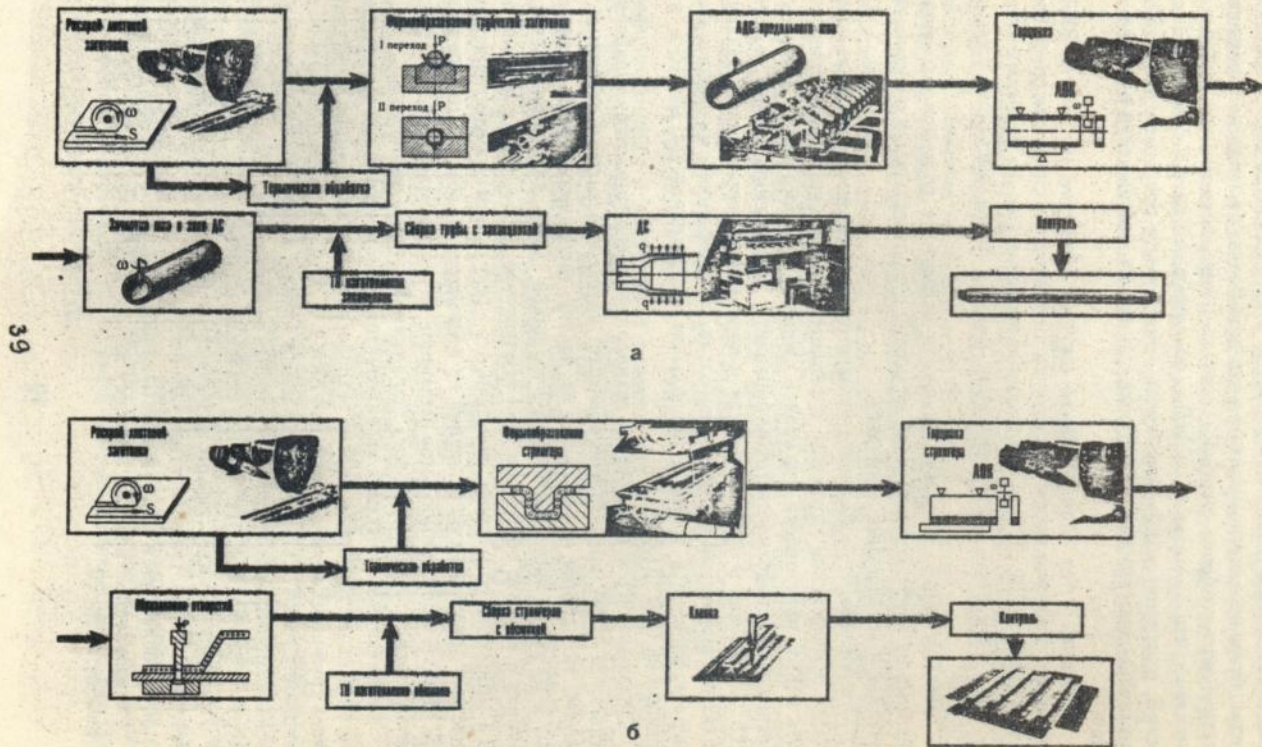


Рис.15

которая определяется последовательностью воздействий при деформировании. При этом потеря прочности композита в изогнутых зонах профиля не превышала статистического разброса значений предела прочности исходного материала. Установлено, что предельная величина разрушающей нагрузки на сдвиг для профилей, полученных гибкой из листа выше, чем у профилей, полученных компактированием примерно в 2 раза при одинаковой площади поперечного сечения.

Показано, что использование гнутых профилей из листа ВКА-2 обеспечивает снижение массы конструкции по сравнению с гнутыми профилями из сплава Д16Т на 26...32% и прессованными профилями из бороалюминия - на 4...8%. При этом гнутые профили имеют более высокую вязкость разрушения.

Исследования подкосов включали испытания образцов материала, вырезанных из трубчатой заготовки по осевой и тангенциальной координатах, статические и усталостные испытания.

Установлено, что соблюдение технологических режимов, обеспечивающих получение бездефектной структуры, позволяет сохранить уровень механических свойств МКМ, практически, на уровне свойств исходного листа. Появление микротрещин на поверхности трубы приводит к уменьшению прочности трубы на 10,5...15,5% как в продольном, так и поперечном направлениях. Наличие пор, окисных включений в зоне сварного шва, в дополнение к микротрещинам, уменьшает прочность трубы в продольном направлении на 10...15% и в поперечном на 12,5...21,0%.

Показано, что использование технологий, обеспечивающих увеличение пластичности МКМ, значительно повышает качество деталей и стабильность процессов. Испытания, выполненные на партии трубчатых деталей диаметром 60, 40 и 20 мм из листа МКМ ВКА-2 толщиной 2,0 мм, полученных методом штамповки в горячем состоянии при температуре $470 \pm 10^\circ\text{C}$ в штампе для гибки и калибровки со сжатием, показали, что в регулярном сечении уменьшение прочности в продольном направлении не превышает 2...3%, а в поперечном - 4...6%. При этом 85% результатов испытаний образцов находятся в интервале значений статистического разброса прочности исходного композита.

Комплексные испытания характеристик, выполненные при статических испытаниях на растяжение и сжатие технологических укороченных и натуральных образцах трубчатых подкосов из МКМ ВКА-2 и КАС-1А диаметром 60 и 40 мм с толщиной стенки 1,2...2,0 мм, показали вязкий характер разрушения без образования продольных трещин. Остаточная деформация для бороалюминиевых подкосов составляла 0,4...0,6%, а для сталеалюминиевых - 1,5...2,5%.

Проведены комплексные ресурсные испытания бороалюминиевых подкосов как непосредственно, так и в составе узла шасси Ан-124. Подкос при ресурсных испытаниях более чем в три раза превысил заданный уровень (200000 циклов).

Изготовленные подкосы проходят летные испытания на Ан-124 и были установлены на Ан-70.

Результаты выполненных исследований использованы на всех этапах подготовки конструкторской документации и сопровождения при освоении процессов изготовления элементов конструкций из МКМ (рис.16). Они нашли отражение в НТД для конструкторов ОКБ, опытных заводов (РТМ-78, РТМ-80), конструкторов и технологов серийных авиационных заводов (ДТМ, ТР 1.4.1806-87, 1.4.1818-87, ТР 1.4.1966-89, ОПИ 189-81, ТИ 36-34-93 и др.).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Научно обоснована проблема проектирования технологии и реализации процессов пластического формообразования элементов конструкций ЛА из листовых слоистых металлических (СМКМ), слоистых металлополимерных (МПКМ) и волокнистых металлических (ВМКМ) композитов.

2. Предложен и экспериментально обоснован принципиально новый обобщенный подход к расчету процессов упруго-пластического деформирования и восстановления при разгрузке листовых композитов с детерминированной структурой в представлении слоистого неоднородного тела, который позволяет свести решение задачи деформирования композита с произвольной структурой к деформированию слоистого тела с "квазиоднородными" слоями. НДС в слоях определяют для представительного объема на основании граничных параметров, установленных на этапе расчета слоистого неоднородного тела.

3. Экспериментально и теоретически обоснована механика деформирования и разрушения волокнистых и слоистых КМ, включающая взаимосвязь кинематических закономерностей взаимодействия слоев и механических свойств компонентов, зависимости распределения НДС от особенностей структуры КМ, условия возникновения и распространения разрушающей трещины от показателя жесткости схемы напряженного состояния.

Разработаны и экспериментально обоснованы математические модели формоизменения на активной и пассивной стадиях процессов гибки многослойных и волокнистых КМ с учетом реальных механических свойств материала компонентов, изменения толщины слоев и композита в целом, физико-механических воздействий на деформируемую заготовку. Они позволили увеличить точность расчета технологических параметров на стадии деформирования до 7...12% и на стадии разгрузки до 15%.

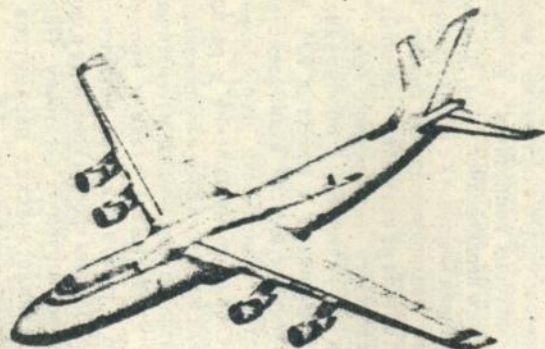
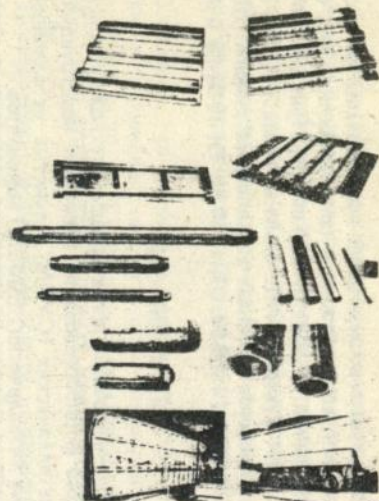
4. Рассмотрены особенности определения эффективных упругих свойств композиционных слоев, упрочненных непрерывными круглыми волокнами для двух случаев: с идеальным и несовершенным контактом на границе волокно-матрица. На основании численного эксперимента обоснована целесообразность экспериментального определения эффективных свойств слоев. Предложены и обоснованы экспериментальные и экспериментально-аналитические методы определения реальных свойств композитов различных типов и их деформируемых компонентов. Впервые получены деформационные зависимости для ВМКМ в широком интервале температур.

Использование листовых МКМ в конструкции ЛА и нормативно-техническое обеспечение производства конструкций

Слоистые металлические КМ



Волокнистые металлические КМ



КД для самолетов Ан-26, Ан-32, Ан-72, Ан-74,
Ан-124, Ан-70, БТС "Буран"

Слоистые металлополимерные КМ

РТМ-78, РТМ-80
ОПИ-189-81
ТР 1.4.1806-87,
ТИ 56-24-88



ТР 1.4.1818-87
ТР 1.4.1966-90
ТИ 36-34-93
ТИ 16-626-94

Рис.16

5. Разработаны, экспериментально обоснованы и освоены в производстве новые технические решения при изготовлении типовых деталей из листов металлических и металлополимерных композитов, в том числе профилей, труб, отбортовок криволинейной формы, а также обшивок одинарной и двойной кривизны. Аналитически и экспериментально показана эффективность дополнительного нагружения заготовки в радиальном и тангенциальном направлениях при гибке, термического воздействия и оптимизации раскрытия заготовки. Разработаны комплексные технологические процессы изготовления обшивок двойной кривизны из МПКМ, трубчатых подкосов и стрингерных панелей из ВМКМ.

Изучены основные направления и даны рекомендации по обеспечению качества выполнения соединения композиционной трубы с законцовкой при изготовлении подкосов диффузионной сваркой, включающие использование промежуточных слоев и дополнительное механическое соединение. Для реализации процесса разработан проект механизированной установки, обеспечивающей выполнение сварки в нейтральной среде и уменьшение термовременного воздействия на заготовку в 2 раза.

6. Впервые установлены и экспериментально подтверждены закономерности деформирования ВМКМ от факторов термовременного воздействия на заготовку (промежутка времени между гибкой и термической обработкой, температуры нагрева заготовки при деформировании, времени выдержки при температуре). Рекомендованы интервалы температур и времени, обеспечивающие максимальную пластичность заготовки при деформировании. Освоены в производстве процессы гибки трубчатых и профильных деталей из ВМКМ в горячем состоянии с тангенциальным сжатием, которые обеспечивают максимальную реализацию свойств КМ.

7. Разработаны технологические рекомендации по проектированию конструкции деталей, структуре и режимам технологических процессов, а также техническому оснащению для освоения производства. Результаты работы использованы при разработке НТД для конструкторов и технологов ОКБ, опытных и серийных авиационных заводов. Они нашли применение при изготовлении деталей и узлов из металлических КМ при проектировании и производстве шести типов самолетов (Ан-26, Ан-32, Ан-72, Ан-124, Ан-70, БТС "Буран").

8. Экономическая эффективность разработанных технологических и технических решений при реализации на предприятиях авиационной промышленности определяется:

в сфере производства - сокращением на 16...25% затрат на техническое перевооружение, снижением сроков подготовки производства в 2...4 раза, увеличением КИМ до 0,80...0,85 и обеспечением надежности, стабильности и качества процессов;

в сфере эксплуатации - уменьшением массы элементов конструкций на 8...55%, увеличением эксплуатационной надежности (прочность, ресурс, живучесть и др.).

Основные результаты диссертации отражены в публикациях:

1. Конструкции из металлических композиционных материалов / Г.А.Кривов, В.А.Титов, Б.В.Лупкин и др. - Киев: Техніка, 1992. - 224 с.
2. Современные технологии обработки и сборки изделий машиностроения / Г.А.Кривов, В.В.Сухов, В.А.Титов и др. - Киев: Техніка, 1993. - 143 с.
3. Моделирование и расчет элементов конструкций из неоднородных материалов / Н.А.Шульга, Г.А.Кривов, В.А.Титов и др. - К.: Техніка, 1996. - 244 с.
4. Титов В.А., Огурек О.Н. Исследование процесса изгиба биметалла. - Сб. Совершенствование технологии производства. - Казань: НИАТ, 1978, с.37-41.
5. Титов В.А., Огурек О.Н. К вопросу об оценке влияния погрешностей аппроксимации кривых упрочнений при определении полной работы деформирования в ОМД. - В сб.: Материалы X НТК молодых ученых и специалистов: Общая технология. - М.: НИАТ, 1981, с.79-82.
6. Технологические особенности изготовления деталей малой жесткости из биметалла / Белецкий В.М., Титов В.А., Захарченко В.В. и др. - В сб. Материалы X НТК молодых ученых и специалистов. Общая технология. - М.: НИАТ, 1981, с.76-79.
7. Формообразование деталей из биметаллических листовых материалов / Захарченко В.В., Белецкий В.М., Титов В.А. и др. - Обработка металлов давлением в машиностроении. - Харьков: "Выща школа", 1982, вып.18, с.83-87.
8. Титов В.А., Огурек О.Н. Анализ напряженно-деформированного состояния многослойных металлов в процессе изгиба. - Сб. Молодые специалисты Украинского филиала в научно-техническом прогрессе. - М.: НИАТ, 1984, .
9. Определение минимального радиуса изгиба биметаллических материалов / Семенов В.И., Титов В.А., Ромашко И.М., Эрлих А.И. - Вопросы авиационной науки и техники. Серия Технология легких сплавов - Вып.7. - М.: ВИЛС, 1986, с.36-40.
10. К вопросу оценки пластичности и определению минимального радиуса гибки слоисто-волоконистых металлических композиционных материалов при изгибе вдоль волокон / Кривов Г.А., Титов В.А., Сахаров В.В. и др. - В сб. Перспективы развития технологии изготовления конструкций из КМ. - М.: НИАТ, 1986, с.65-73.
11. Особенности деформирования композиционного материала на магниевой основе / Строганова В.Ф., Харатов И.Н., Титов В.А. и др. - В сб. Перспективы развития технологии изготовления конструкций из КМ. - М.: НИАТ, 1986. с.77-81.
12. Кривов Г.А., Титов В.А. Использование поверхностного пластического деформирования при изготовлении листовых деталей из биметаллических материалов. - В сб. Повышение качества деталей машин пластическим деформированием, - Фрунзе: 1988, с.148-149.

13. Опыт и особенности изготовления типовых элементов конструкций из листовых металлополимерных композиционных материалов трехслойной структуры методами пластического деформирования / Титов В.А., Сухов В.В., Мильченко Е.И. и др. - Вопросы авиационной технологии науки и техники. Серия Авиационная технология - Вып.5(8), - М.: НИАТ, 1988, с.110-113.

14. Титов В.А., Степинская Н.В., Мильков В.Л. К вопросу о возможности использования испытаний на изгиб для оценки механических свойств материалов. - В сб. Молодые ученые - НТП. - М.: НИАТ, 1988. - с.50-58.

15. Разработка модели деформирования металлических композитов при гибке / Смирнягин В.М., Титов В.А., Бойко В.Н. и др. - В сб. Механика и технология изделий из металлокерамических композиционных материалов. - Волгоград: Дом техники НТО, 1989, с.141-144.

16. Особенности технологии изготовления профилей из листовых МКМ марки ВКА-2 / Г.А.Кривов, В.А.Титов, Л.К.Вшивкин и др. - Проблемы создания авиационно-космических систем / Под общ.ред.Г.Е.Лозино-Лозинского. - Вопросы технологии авиационно-космических самолетов. - М. - Вып.1, 1989. - с.106-118.

17. Влияние основных структурных и технологических факторов на механику деформирования КМ на металлической матрице, упрочненной непрерывными волокнами, при получении изделий из листовых полуфабрикатов / В.А.Титов, Г.А.Кривов, Е.И.Мильченко, В.И. и др. - В сб. IY черноголовского семинара по механике и технологии композитов. - Черноголовка, 1989.

18. Титов В.А., Кривов Г.А., Полищук В.М. Технологические принципы пластического деформирования листовых полуфабрикатов из КМ на металлической матрице, - В сб. Московской международной конференции по композитам. - М.: Академия наук СССР, 1990, с.137.

19. Исследование деформативных свойств волокнистых композитов с нелинейно-упругой матрицей при поперечном нагружении / Г.А.Кривов, В.А.Титов, М.И.Яценко и др. - В сб. Московской международной конференции по композитам. - М.: Академия наук СССР, 1990, с.187.

20. Титов В.А., Кривов Г.А., Шлянников В.Н. Исследование пластических свойств металлических и металлополимерных КМ. - Сб. Технология производства деталей из композиционных материалов. - М.: ВИМИ, 1991, с.56-57.

21. Титов В.А., Мильков В.Л., Яценко А.О. Исследование процесса гибки МКМ с большим объемным содержанием непрерывных армирующих волокон. - Сб. Технология производства деталей из композитных материалов. - М.: ВИМИ, 1991, с.57-58.

22. Титов В.А., Мильченко Е.И., Булах Ю.В. Проблемы и особенности изготовления деталей одинарной и двойной кривизны из листовых слоистых металлополимерных КМ / - Сб. Технология производства деталей из композиционных материалов. - М.: ВИМИ, 1991, с.59-61.

23. Кривов Г.А., Титов В.А., Ганжа В.Ф. Моделирование процесса пластического деформирования КМ на металлической матрице. - Сб. Технология

производства деталей из композиционных материалов М.: ВИМИ, 1991, с.62-63.

24. Кривов Г.А., Моляр А.Г., Титов В.А. Тенденция совершенствования показателей качества изделий за счет применения новых композиционных материалов. - Сб. Конструирование и производство изделий из полимерных и металлических композиционных материалов. - Киев: 1993, с.4-5.

25. Прочность сварного соединения боралюминий со сплавами титана / Титов В.А., Мороз В.П., Вишняков Л.Р. и др. - Сб. Конструирование и производство изделий из полимерных и металлических композиционных материалов. - Киев: 1993, с.11-12.

26. Титов В.А. Математическое моделирование процессов деформирования и технологические принципы обеспечения качества конструкций, изготавливаемых из листовых металлических КМ. - Сб. Конструирование и производство изделий из полимерных и металлических композиционных материалов. - Киев: 1993, с.14-15.

27. Титов В.А. Исследование и прогнозирование свойств КМ при изготовлении конструкций. - В сб. Второй Московской конференции по композитам. - М.: Академия наук России, 1994, с.50-51.

28. Титов В.А. Производство конструкций из листовых полуфабрикатов КМ на металлической матрице. - В сб. Второй Московской конференции по композитам. - М.: Академия наук России, 1994, с.91-92.

29. Fracture and Fatigue of Materials and Structures Made of Composites with an Aluminium Matrix / G.A.Krivov, V.H.Shlynnikov, V.M.Polytshuk, V.A.Titov, M.I.Jatzenko - Proceedings of the Fourth International Conference on Fatigue and Fatigue, Honolulu, Hawaii, USA, 1990, p.251-259.

30. Кривов Г.А., Титов В.А., Митрофанова В.В. и др. Экспериментальные исследования деформационных свойств композитов с металлической матрицей // Белорусский конгресс по теоретической и прикладной механике "Механика-95": Труды докладов. - Минск, 1995. - с.142-143.

31. Кривов Г.А., Титов В.А., Федоренко Ю.М. Моделирование технологических процессов формообразования деталей из плоских металлополимерных композитов // Механика композитных материалов, 1995. - N 3. - с.417-427.

32. Кривов Г.А., Титов В.А. Система формообразования конструкций из полуфабрикатов композиционных материалов // I съезд технологическо-машинистроителей: Сборник докладов. - М., 1989. - с.86-87.

33. А.С. 571326 (СССР). Способ изготовления деталей из листовой заготовки / Житний Г.Д., Титов В.А. и др. - Оpubл. в Б.И., 1977. N 33.

34. А.С. 755377 (СССР) Способ изготовления деталей двойной кривизны из биметаллического материала / Титов В.А., Павлов И.В. и др. - Оpubл. в Б.И., 1980. N 30.

35. А.С. 1120572 (СССР). Способ сварки плавлением биметаллических листов (его варианты) / Д.Н.Цапренко, В.В.Щербак, В.А.Титов и др. -

заявл.28.03.1983 N 3568256.

36. А.С. 1517211 (СССР). Способ гофрирования листового материала / Г.А.Кривов, В.А.Титов, В.Л.Мильков и др. // Открытия. Изобретения. - 1988. - N 36. - с.40.

37. А.С. 1426872 (СССР). Гибочный штамп / Г.А.Кривов, В.И.Стеблюк, В.А.Титов и др. // Открытия. Изобретения. - 1988. -N 36. - с.40.

38... А.С. 1466127 (СССР). Способ соединения сваркой толстолистовых заготовок из металлических композиционных материалов / А.Г.Чаюн, Г.И.Сергацкий, В.А.Титов и др. - Оpubл.в Б.И., 1988.

39. А.С. 1531298 (СССР). Способ изготовления труб из мерных листовых заготовок / Г.А.Кривов, В.А.Титов, В.Л.Мильков и др. // Открытия. Изобретения. - 1989. - N 48. - с.277.

40. А.С.1531347 (СССР). Способ сварки встык заготовок из плакированных металлических композиционных материалов / А.Г.Чаюн, Г.И.Сергацкий, В.А.Титов и др. - Оpubл. в Б.И., 1989.

41. А.С.1531355 (СССР). Способ соединения сваркой тонколистовых заготовок из металлических композиционных материалов / Г.А.Кривов, А.Г.Чаюн, В.А.Титов и др. Заявл.07.07.1987, N4280640, опубл. в БИ, 1989.

42. А.С.1736056 (СССР). Способ производства прямошовных электрических труб и устройство для его осуществления / Г.А.Кривов, В.А.Титов, Е.И.Мильченко и др. - заявл.26.02.1990 N 4794944 / 27.

43. А.С.1802444 (СССР). Способ определения длины развертки листовых деталей, изготовленных гибкой. / Титов В.А., Кривов Г.А. и др. // Открытия. Изобретения - 1992. - N 48.

Анотація

Титов В.А. Технологічна механіка формоутворення елементів конструкцій літальних апаратів із металевих і металополімерних композитів. Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук по спеціальності 05.07.04 - Технологія виробництва літальних апаратів. Український науково-дослідний інститут авіаційної технології, Київ, 1996.

Науково обгрунтована проблема проєктування технології і реалізації процесів формоутворення елементів конструкцій ЛА із листових шаруватих металевих, шаруватих металополімерних і волокнистих металевих композитів. Запронований принципово новий узагальнений підхід до рішення технологічних задач пластичного формоутворення, враховуючий механіку розвитку деформацій на активній і пасивній стадіях формозмінення, взаємозв'язок між технологічними параметрами і внутрішньою мікромеханікою розвитку деформацій, а також послідовність технологічних операцій і фізико-механічному впливу на деформівну заготовку. Обгрунтованні експериментальні і експериментально-аналітичні методи визначення деформаційних властивостей композитів і структурних компонентів.

Розроблена нормативно-технічна документація по проєктуванню процесів

виготовлення деталей різних класів, а тому числі обшивок одинарної і подвійної кривизни із шарових, а також трубчатих підкосів і стрінгерових панелей із волокнистих композитів.

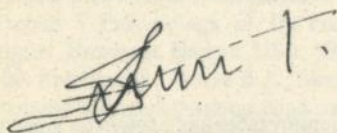
Annotation

Vyacheslav A. Titov. Technological mechanics of shaping of metal matrix and metalopolymer matrix composite elements of aircraft structure. Manuscript.

Thesis for a doctor of technical sciences degree, speciality 05.07.04. - Aircraft production technology, Scientific Research Institute of Aviation Technology, Kiev, 1996.

The thesis presents scientifically grounded problem of technology developing and implementation of shaping process of sheet stratified metal, stratified metalopolymer matrix and fibrous metal matrix composite elements of aircraft structure. Taking into account mechanics of deformation development on active and passive stages of shape change and interrelation between technological parameters and internal micromechanics of deformation development, succession of technological operations and physical & mechanical action on the billet being deformed, the new in essence generalized approach to the solution of problems of plastic shaping is submitted. Experimental and analytic methods of determination of composites and structural components deformation properties are substantiated.

Normative technical documentation for manufacturing process of parts of various classes including coverings of single and double camber, pipe braces and stringer panels made of fibrous composite materials has been developed.





AV 34.719