

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ГОЛОВНОЙ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ПО ОРГАНИЗАЦИИ
ПЕРЕПОДГОТОВКИ И ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ
ПЕДАГОГИЧЕСКИХ
И РУКОВОДЯЩИХ КАДРОВ СИСТЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**ОТРАСЛЕВОЙ ЦЕНТР ПЕРЕПОДГОТОВКИ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ КАДРОВ ПРИ
ТАШКЕНТСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

по модулю

**“СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В
АВИАСТРОЕНИИ”**

направления

**“ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОЗДУШНОГО
ДВИЖЕНИЯ”**

Тошкент – 2022

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ГОЛОВНОЙ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ПО
ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕПОДГОТОВКИ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ И РУКОВОДЯЩИХ
КАДРОВ СИСТЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**ОТРАСЛЕВОЙ ЦЕНТР ПЕРЕПОДГОТОВКИ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ КАДРОВ ПРИ
ТАШКЕНТСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

по модулю

**“ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОЗДУШНОГО
ДВИЖЕНИЯ”**

Направления

**“СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В
АВИАСТРОЕНИИ”**

Ташкент-2022

Данная учебная рабочая программа разработана на основании учебной программы утвержденного приказом Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан № 538 от 25-декабря 2021 года

Составила: проф. Кадирбекова К

Рецензент: Н. Абдужабаров - ТГТУ, доцент к.т.н

Данная учебная рабочая программа разработана на основании учебной программы утвержденного приказом Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан № 538 от 25-декабря 2021 года

СОДЕРЖАНИЕ

I.	Рабочая программа.....	5
II.	Интерактивные методы обучения, используемые в модуле.....	10
III.	Теоретические материалы.....	11
IV.	Материалы практических занятий.....	54
V.	Глоссарий.....	78
VIII.	Список литературы.....	81

Введение

Гражданская авиация стала одним из важных факторов мирового развития. Глобализация межгосударственных и межнациональных отношений, укрепление экономических связей, расширение гуманитарных отношений и, в частности, развитие туризма – вот далеко не полный список областей человеческой деятельности, где гражданская авиация играет важнейшую роль. Научно-технический прогресс в гражданской авиации проявляется в нескольких направлениях. Прежде всего это относится как к увеличению разнообразия используемых типов летательных аппаратов (начиная с малой коммерческой авиации и заканчивая широкофюзеляжными аэробусами и сверхзвуковыми воздушными лайнерами), так и к повышению общего объема воздушных перевозок, сопровождающемуся ростом числа трасс их протяженности.

Рабочая учебная программа «Современные материалы в авиационной» относится к числу основополагающих для диспетчеров по управлению воздушным движением, дающая глобальные профессиональные знания, прививающая практические навыки, закладывающая базовые знания в области эксплуатации объектов аэропортов (аэродромов) и воздушные перевозки.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ МОДУЛЯ

Целью изучения модуля «Современные материалы в авиационной» является формирование у обучающегося комплекса профессиональных знаний, умений и практических навыков в области организации, обслуживания и управления воздушного движения.

Задачами модуля являются:

- изучение теоретических основ организации обслуживания воздушного движения;
- изучение основ осуществления обслуживания воздушного движения;
- изучение современных и перспективных технологий и способов организации обслуживания воздушного движения.

Требования, предъявляемые к знаниям, умениям и навыкам по модулю

В результате освоения дисциплины обучающийся должен продемонстрировать следующие результаты образования:

- **иметь представление** о структуре воздушного пространства Республики Узбекистан, принцип и задачи ОВД, а также планирования потоков ВД в Республике Узбекистан;
- **знать** правила эшелонирования, правила организации потоков воздушного движения, передачи управления ВД с одной диспетчерской зоны на другой **и уметь использовать** аэродромных средств и материальных комплексов аэропорта.
- **приобрести навыки** оказания диспетчерского обслуживания воздушным движением, оказания помощи в особых условиях и особых случаях в полете, создание и соблюдение правил регулирования интервалов взлетов и посадок и т.д.

Взаимосвязь учебного модуля с другими модулями

Модуль является один из начальных в цикле специальных дисциплин по изучению процесса управления воздушным движением. Знания, полученные при изучении данной дисциплины, используются в последующих профилирующих дисциплинах, таких как «Технология работы диспетчера УВД», «Эксплуатация аэропортов и воздушные перевозки» и «Автоматизированные системы УВД». В связи с этим данный модуль имеет тесный связь с остальными модулями обучения.

Рекомендации по проведению и организации модуля

При проведении обучения запланировано использование современных методов, педагогических и информационно - коммуникативных технологий:

- лекции запланированы проводить в форме презентаций с использованием современных компьютерных технологий;
- практические занятия запланировано проводить с помощью интерактивных методов.

Распределение времени между составляющими модуля:

№	Темы	Учебная нагрузка, час			
		Итого	Теоретические	Практические	Выездное
1.	Требования, предъявляемые к применяемым в авиастроении сплавам на основе цветных металлов и к неметаллам.	8	2	2	4
2.	Современные деформируемые и литейные алюминиевые сплавы, магниевые авиастроения	4	2	2	
3.	Деформируемые магниевые сплавы в авиастроении	2		2	
4.	Композиционные материалы.	2	2	2	
	Общие	18	6	8	4

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ МОДУЛЯ

1-тема: Требования, предъявляемые к применяемым в авиастроении сплавам на основе цветных металлов и к неметаллам.

Значениеи роль современных функциональных материалов в авиастроении. Требования, предъявляемые к сплавам на основе цветных металлов и к неметаллам.

2-тема: Современные деформируемые и литейные алюминиевые, магниевые сплавы в авиастроении

Деформируемые алюминиевые сплавы. Высокопрочные алюминиевые сплавы. Высокоресурсные алюминиевые сплавы. Алюминий-литиевые сплавы пониженной плотности. Свариваемые, устойчивые к коррозии высокотехнологичные алюминиевые сплавы. Литейные алюминиевые сплавы. Магниевые сплавы средней и высокой прочности. Магниевые сплавы пониженной плотности. Высокопрочные, жаропрочные, коррозионностойкие литейные магниевые сплавы.

3-тема: Композиционные материалы

Композиционные материалы, классификация, составляющие компоненты. Особенности композиционных материалов. Применение композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов.

СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

1-практическое занятие: Требования, предъявляемые к применяемым в авиастроении сплавам на основе цветных металлов и к неметаллам

Состав, свойства, особенности слоистых алюмокомпозитов относительно других композитов, привести примеры и обосновать области применения этих материалов.

2- практическое занятие: Современные деформируемые и литейные алюминиевые сплавы , магниевые авиастроения

Преимущества алюминий-литиевых сплавов. Разновидности, маркировка, состав, особенности, свойства, применение в конструкциях летательных аппаратов, привести примеры и обосновать.

Деформируемые магниевые сплавы в авиастроении

Преимущества магниевых сплавов. Разновидности, маркировка, состав, особенности, свойства, применение в конструкциях летательных аппаратов, привести примеры и обосновать

Композиционные материалы.

Композиционные материалы, классификация, составляющие компоненты. Особенности композиционных материалов. Применение композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов.

СОДЕРЖАНИЕ ВЫЕЗДНЫХ ЗАНЯТИЙ

Тема: Требования, предъявляемые к применяемым в авиастроении сплавам на основе цветных металлов и к неметаллам.

В рамках внеаудиторных занятий предусмотрена организация экскурсии слушателей в международный аэропорт «Ташкент-Южный». Планирована ознакомиение с процессом предоставления воздушным судам метеорологических и аэронавигационных информации, и обслуживание полетов.

ФОРМА ОБУЧЕНИЯ

Форма обучения отражает такие внешние стороны учебного процесса, как способ его существования: порядок и режим; способ организации обучения: лекция, семинар, самостоятельная работа и пр; способ организации совместной деятельности обучающего и обучающихся:

фронтальная, коллективная, групповая, индивидуальная.

При обучения важным является выбор формы организации учебной деятельности участников:

- **Коллективная** – коллективное, совместное выполнение общего учебного задания всеми студентами. Характер полученного результата: итог коллективного творчества.
- **Групповая** – совместное выполнение единого задания в малых группах. Характер полученного результата: итог группового сотрудничества на основе вклада каждого.
- **Индивидуальная** – индивидуальное выполнение учебного задания. Характер полученного результата: итог индивидуального творчества. Обычно предшествует групповой работе.

II. ИНТЕРАКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОБУЧЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В МОДУЛЕ.

МЕТОД "МОЗГОВОЙ ШТУРМ"

Мозговой штурм (брейнсторминг - мозговая атака) – метод коллективной генерации идеи решения научной или практической задачи.

Во время мозгового штурма участники стремятся совместно решить сложную проблему: высказывают свое мнение по решению задачи (генерируют), отбирают наиболее соответствующие, эффективные и оптимальные идеи без критики остальных вариантов, обсуждают отобранные идеи и развивают их, а также оцениваются возможности их обоснования или опровержения.

Основная цель мозговых атак – активизация учебной деятельности, самостоятельное изучение проблемы и развитие мотивации его решения, культура общения, формирование коммуникативных навыков, избавление от инерции мышления и преодоление привычного хода мышления при решении творческой задачи.

- **Прямой коллективный мозговой штурм** – обеспечивает сбор максимального числа мнений насколько это возможно. Вся группа исследования (не более 20 человек) занимается решением одной проблемы.

- **Массовый мозговой штурм** – дает возможность резко повысить эффективность генерации идей в большой аудитории, разделенной на микрогруппы.

- В каждой группе решается один из аспектов проблемы.

Разработка метода «Мозговой штурм»:

вопросы:

1. Что такое метоеобстановка?
2. Расчет пропускной способность по количеству перевезенных пассажиров?
3. Расчет пропускной способность по количеству перевезенных грузов?

ТЕХНИКА ИНСЕРТ

Инсерт – это интерактивная система пометок в тексте для эффективного чтения и мышления.

Инсерт – это процедура, которая начинается с актуализации предыдущих знаний и постановки вопросов для пометок в тексте. Затем идет разметка различных видов информации, которая встречается в тексте.

Инсерт – это мощный инструмент, обеспечивающий возможность обучающимся активно отслеживать свое собственное обучение в процессе работы с текстом.

Инсерт – это техника обучения, которая используется для решения комплексных задач усвоения и закрепления учебного материала, развития учебных умений работы с книгой.

III. СОДЕРЖАНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Тема - 1: Требования, предъявляемые к применяемым в авиастроении сплавам на основе цветных металлов и к неметаллам

План:

1. Значение и роль современных функциональных материалов в авиастроении.
2. Требования, предъявляемые к сплавам на основе цветных металлов и к неметаллам

Ключевые слова: современные авиационные материалы, самолёт, планер, конструкция, алюминий, магний, литий, металлические сплавы, неметаллы, наноматериалы, полимерлары, пластмассы, керамика, состав, свойства, особенности.

1. Значение и роль современных функциональных материалов в авиастроении

От качества материалов, применяемых в отечественной авиационной технике, в большой мере зависит ее конкурентоспособность.

Основным конструкционным материалом для планеров самолётов остаются алюминиевые сплавы. С целью улучшения характеристик давно и успешно применяемых в авиации алюминиевых сплавов (таких как Д16, АК6, АМГ6, АЛ9, В95 и др.) во всем мире и в России постоянно ведётся научно-исследовательская работа по созданию новых алюминиевых сплавов. Во вновь созданных и внедрённых в российское авиастроение конструкционных алюминиевых сплавах сделан упор на улучшение следующих их важнейших свойств (рис. 1).

1. Удельной прочности (отношению предела прочности материала к его плотности), которая определяет массу авиационной конструкции по условию статической прочности (способности конструкции воспринимать без разрушения однократно приложенные максимальные (расчётные) внешние нагрузки), а также по условию отсутствия недопустимых остаточных деформаций под действием эксплуатационных нагрузок.

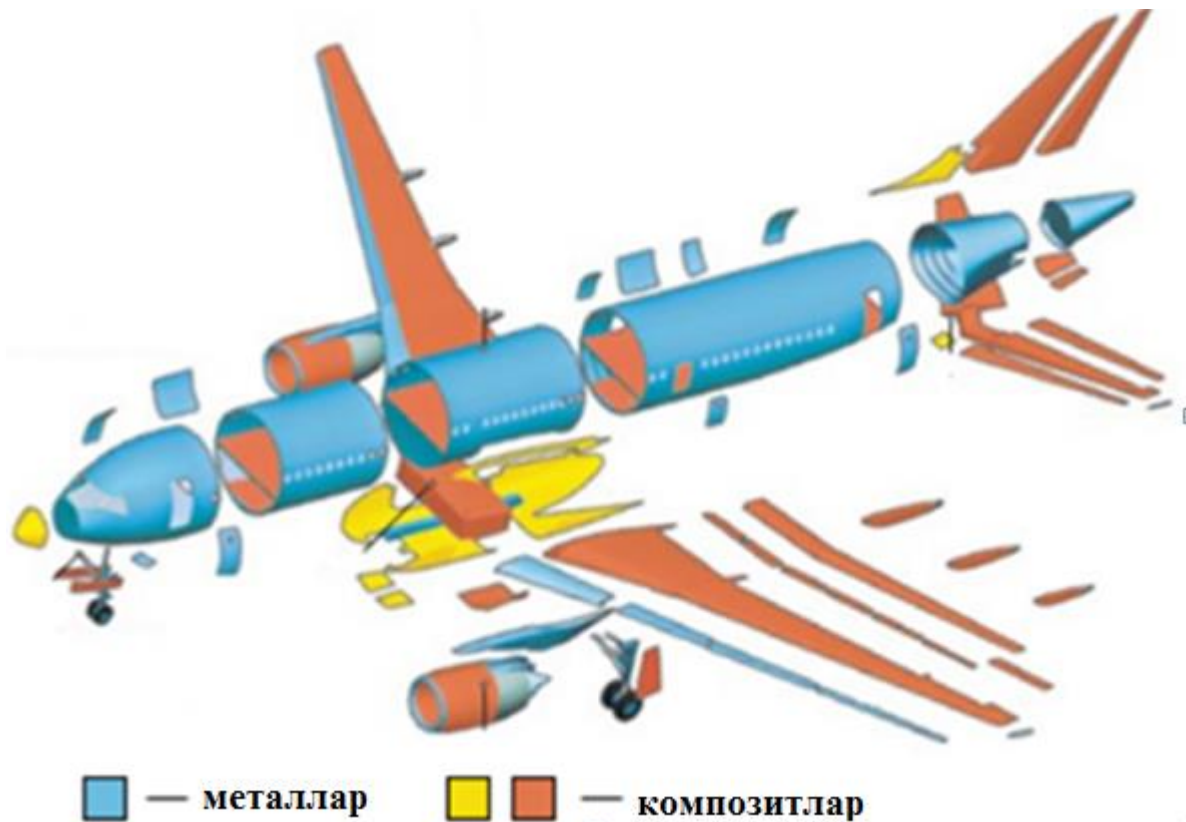


Рис 1. Материалы, применяемые в конструкциях самолётов.

2. Усталостной прочности, или выносливости (способности материала сопротивляться разрушению под действием многократно повторяющейся переменной нагрузки).

3. Технологичности (обрабатываемости материалов высокопроизводительными процессами).

4. Ремонтопригодности (возможности быстро восстанавливать повреждённые части конструкции).

Задача повышения характеристик сплавов, применяемых в агрегатах планера самолётов и вертолёт, решается за счёт значительного улучшения химического состава сплавов – уменьшения содержания примесей кремния и железа, – разработки новых режимов термообработки, улучшения качества полуфабрикатов.

Ещё один способ улучшения свойств алюминиевых сплавов – уменьшение их плотности, которое достигается путём создания релаксационных

сплавов, легированных литием. Создана серия алюминий –литиевых сплавов:

- средней прочности (1420, 1424, 1441);
- высокой прочности (например, 1460 и др.).

Плотность этих сплавов составляет $\rho = 2450\text{--}2650 \text{ кг/м}^3$. Высокопрочный свариваемый сплав 1460 предназначен для эксплуатации в широком интервале температур: от $+175^\circ\text{C}$ до -253°C .

Значительные успехи достигнуты в последнее время в направлениях улучшения свойств других типов авиационных конструкционных материалов: титановых и магниевых сплавов, высокопрочных сталей и сплавов на основе железа и углерода со специальными свойствами, а также композиционных материалов (рис.2.).

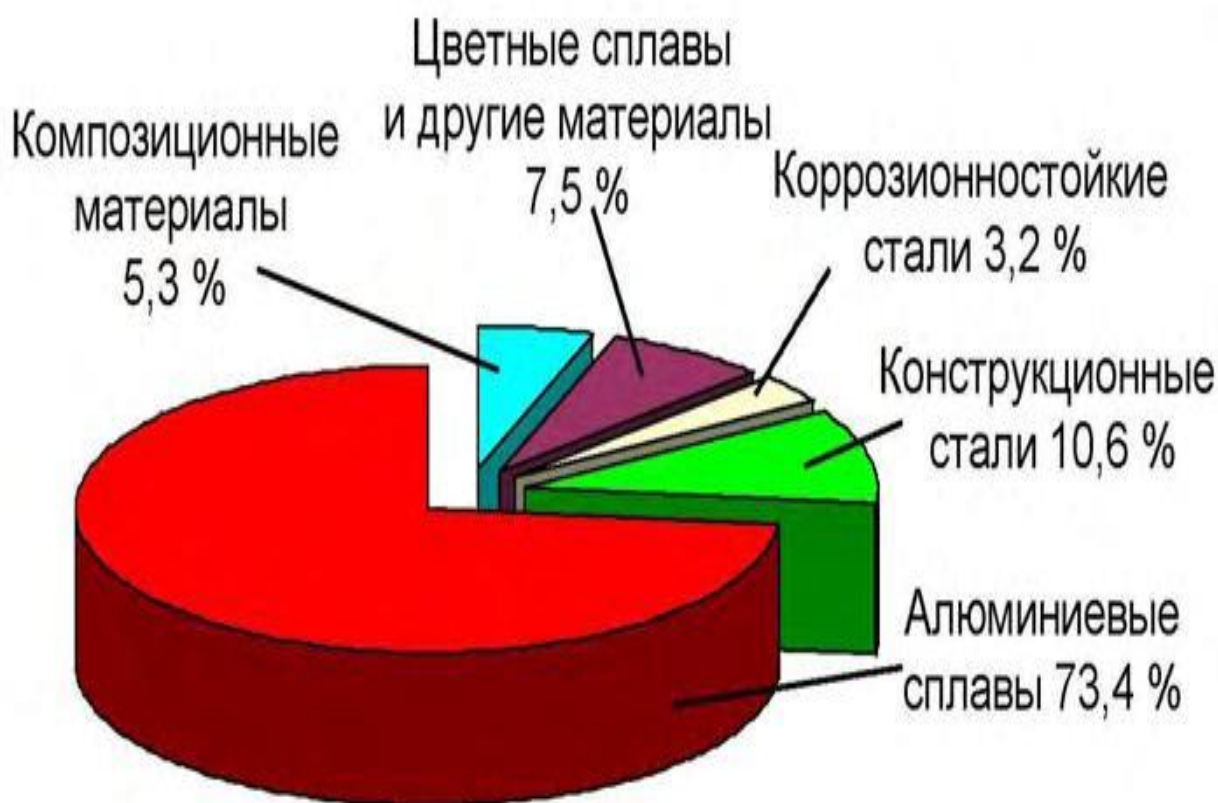




Рис 2. Конструкционные материалы, применяемые в авиастроении

В практике работы конструктора основным источником сведений о свойствах конструкционных материалов служит известный справочник

по авиационным конструкционным материалам [1]. Следует иметь в виду, что в конструкции самолета, особенно предназначенного для серийного производства и применения в гражданской сфере, должны применяться только сертифицированные материалы. Сертификация подразумевает всестороннюю тщательную проверку свойств материалов. Проверке и подтверждению подлежат свойства материалов как в состоянии поставки (полуфабрикатов), так и после их обработки с целью получения готовых деталей, сборочных единиц и самолета в целом, т.е. свойства материалов в составе конструкции.

Процесс создания и сертификации новых конструкционных материалов сложный и длительный, создание и переиздание справочников по конструкционным материалам также требует больших затрат труда и времени. Поэтому в конструкторских бюро и в проектноконструкторских подразделениях предприятий используется значительное число дополнительных источников сведений о новых конструкционных материалах в форме отраслевых нормативнотехнических документов: технических условий (ТУ), руководящих технических материалов (РТМ), перечней разрешенных к использованным в авиационной технике или в конструкциях отдельных летательных аппаратов материалов и полуфабрикатов и др.

Правильный выбор материалов элементов конструкции летальных аппаратов позволяет снизить его массу, улучшить летно-технические характеристики, а также снизить затраты на производство и эксплуатацию.

По природе материалы делятся на металлы, металлические сплавы, неметаллы и композиты; по условиям эксплуатации: жаропочные, криогенные, износостойкие, коррозионностойкие, стойкие к воздействию топлива, масел и др.

Требования, предъявляемые к материалу в зависимости от условий его работы, характера механического нагружения, температуры и

воздействия среды могут быть различными. Например, для изготовления лонжеронов самолёта требуется материал, обладающий большой жёсткостью и статической прочностью; валы авиадвигателей необходимо изготавливать из материала, хорошо сопротивляющегося ударному и знакопеременному нагружению; в подшипниках авиадвигателей необходим антифрикционный материал, износостойкий и обеспечивающий нормальную смазку при эксплуатации. Для обшивки самолёта используется прочный лёгкий материал, хорошо сопротивляющийся действию атмосферных условий (табл).

Таблица

Сравнительные характеристики материалов, используемых в авиационных конструкциях

Материал	Плотность, ρ , кг/м ³	Предел прочности при растяжении, σ_b , МПа	Модуль упругости при растяжении, E , ГПа	Удельная прочность, σ_b / ρ , км	Удельная жесткость, E / ρ , км
Алюминиевые сплавы	2700	400...650	72	14,8...24,0	26500
Магниеые сплавы	1800	200...340	45	11,0...18,9	2500
Титановые сплавы	4500	500...1300	120	11,0...29,0	26600
Стали средней прочности	7800	800...1300	210	16,7...29,7	27000
Высокопрочные стали	7800	1300...2300	210	16,7...29,5	27000
Композиционные материалы	1400...2600	500...1300	35...250	40...60	25000...100000

Из таблицы видно, что в температурном интервале 300-500°C максимальной удельной прочностью обладают титановые сплавы. По этому показателю по сравнению с другими материалами, используемыми в конструкциях самолетов титановые сплавы наиболее производительные.

Необходимо отметить, что дифференцированное применение материалов зависит от конкретных условий эксплуатации. Детали

летательных аппаратов и приборов работают при статических, циклических и ударных нагрузках; при низких и высоких температурах, в контакте с различными средами. Эти факторы определяют требования к применяемым материалам. Основные из которых: эксплуатационные, технологические и экономические.

Эксплуатационные требования обеспечиваются конструкционной прочностью материала. Конструкционной прочностью называется комплексная характеристика, включающая сочетание критериев прочности, надёжности и долговечности. Критерии прочности материала выбираются в зависимости от условий его эксплуатации.

Для материалов, используемых в авиационной технике важное значение имеет эффективность материала по массе. Она оценивается удельными характеристиками:

Удельная прочность: $\sigma/\rho g$,

где ρ - плотность;

g – ускорение свободного падения.

Удельная жесткость: $E/\rho g$,

где E - модуль упругости.

В каждом конкретном случае выбираются те характеристики, которые наиболее полно отражают прочность в условиях эксплуатации.

Технологические требования (технологичность материала) направлены на обеспечение наименьшей трудоёмкости при изготовлении деталей и конструкций, с обеспечением необходимых свойств.

Экономические требования сводятся к тому, чтобы материал имел невысокую стоимость и был доступен.

Таким образом, выбор материала для деталей и узлов самолета с учетом конструктивных особенностей, внешних факторов, в частности коррозионной и теплостойкости, требует в одинаковой степени знаний основанных на свойствах материалов и конструкции самолета.

Контрольные вопросы

1-Вопрос: Из какого материала был изготовлен планер первого самолёта?

2- Вопрос: Что такое структура материала?

3- Вопрос: Какие требования предъявляются к материалам, применяемым в авиастроении?

4- Вопрос: В чем сущность эксплуатационных требований?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по конструкционным материалам: Справочник/ Б.Н. Арзамасов, Т.В. Соловьева, С.А. Герасимов и др.; Под ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 640 с.: ил.
2. Конструкционные материалы в самолетостроении/А.Г. Моляр, А.А. Коцюба, А. С. Бычков, О.Ю. Нечипоренко – К.: КВИЦ, 2015. – 400 с.
3. Житомирский Г. И. Конструкция самолетов / Г.И. Житомирский. – М.: Машиностроение, 1991. – 400 с.

Тема - 2: Современные деформируемые и литейные алюминиевые, магниевые сплавы в авиастроении

План:

Ключевые слова: современные авиационные материалы, самолёт, планер, конструкция, магний, литий, металлические сплавы, жаропрочные, плотность, вибростойкость коррозионностойкие, состав, свойства, особенности.

План:

1. Деформируемые алюминиевые сплавы. Высокопрочные алюминиевые сплавы.
2. Высокоресурсные алюминиевые сплавы. Алюминий-литиевые сплавы пониженной плотности.
3. Свариваемые, устойчивые к коррозии высокотехнологичные алюминиевые сплавы.
4. Литейные алюминиевые сплавы.
5. Магниевые сплавы средней и высокой прочности.
6. Магниевые сплавы пониженной плотности.
7. Высокопрочные, жаропрочные, коррозионностойкие литейные магниевые сплавы.

1. Деформируемые алюминиевые сплавы. Высокопрочные алюминиевые сплавы

1.1 Высокопрочные сплавы

Преимущества по сравнению с ранее применяемыми (традиционными) сплавами:

- повышенная на 15–25 % удельная прочность при статическом нагружении;
- повышенная усталостная прочность.

1965-1 – особо прочный ($\sigma_B = 615\text{--}645\text{МПа}$; $\sigma_{0,2} = 595\text{--}620\text{МПа}$; $\delta = 7\div 8\%$) сплав.

Рекомендуется для применения в сжатых зонах конструкций планера самолётов: для верхних обшивок крыла, стоек и других элементов.

Поставляется промышленностью в виде длинномерных катаных плит или листов, прессованных полуфабрикатов: профилей, панелей, полос.

Из данного сплава освоено литьё крупногабаритных круглых прутков и плоских листов; сплав обладает хорошей технологической пластичностью при изготовлении полуфабрикатов в металлургическом производстве.

В95 п.ч./о.ч. ($\sigma_B = 500\text{--}560$ МПа; $\sigma_{0,2} = 430\text{--}480$ МПа; $\delta = 7\text{--}8$ %) – широко применяемый (вместо традиционного В95) высокопрочный сплав в виде катаных и прессованных длинномерных (до 30 м) полуфабрикатов для верхних обшивок крыла (плиты, листы), стрингеров, балок, стоек (профили, трубы) и других элементов фюзеляжа и крыла современных самолётов (Ту-204, Бе-200, Ил-96, SSI-100).

1933-Т2/Т3 – основной высокопрочный ковочный сплав для внутреннего силового набора (фитингов, шпангоутов, кронштейнов и др.), обладает высоким уровнем прочностных свойств ($\sigma_B = 450\text{--}520$ МПа; $\sigma_{0,2} = 380\text{--}460$ МПа; $\delta = 7\text{--}8\%$), характеристик ресурса (вязкости разрушения: $K1c \geq 37\text{--}44$ МПа $\sqrt{м}$; сопротивления усталости), коррозионной устойчивости. Благодаря высокой технологичности сплава **1933** в серийном производстве из него изготавливают кованные и прессованные полуфабрикаты в широком диапазоне размеров (массой до 2000 кг и толщиной до 400 мм). Преимущества сплава 1933 в состояниях, достигаемых новыми улучшенными видами термообработки (1933-Т2), перед серийными отечественными сплавами составляют: по прочностным характеристикам – 6–12 %, по вязкости разрушения – 15–50 %, по малоцикловой усталости – 35–80 %. Сплав 1933 превосходит по этим показателям сплавы США (7175 и 7050). Сплав 1933 в состояниях Т2 и Т3

широко применяется в современных самолётах, таких как Ан-148, Ту-204, SSI-100, Т-50).

В-1963 – новый ковошный высокопрочный сплав, предназначен для изготовления сильно нагруженных деталей внутреннего набора агрегатов планера самолёта (шпангоутов, фитингов, кронштейнов, балок и др.). Благодаря дополнительному легированию серебром и скандием обладает высокими прочностными характеристиками ($\sigma_B = 500\text{--}560$ МПа; $\sigma_{0,2} = 480\text{--}520$ МПа; $\delta = 8\%$), вязкостью разрушения ($K1_c \geq 33\text{--}34$ МПа $\sqrt{м}$) и сопротивлением усталости. Сплав обладает также улучшенными характеристиками свариваемости по сравнению с аналогичными сплавами без серебра ($\sigma_{в.св.} = 0,7\sigma_B$).

Сводка механических свойств сплавов приведена в табл. 1.

Таблица 1. Механические свойства высокопрочных сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	σ_B	$\sigma_{0,2}$	E ,	δ ,	$K1_c$,	ρ ,
		МПа		ГПа	%	МПа $\sqrt{м}$	кг/м ³
1965-1	Листы Профили Плиты	615– 645	595– 620	72	7–8	24	$2,78 \times 10^3$
В95 пч/оч	Листы Профили Плиты	500- 560	430- 480	72	7-8	32	$2,78 \times 10^3$
1933- Т2/Т3	Поковки Штамповки	450- 520	380- 460	72	7-8	37-43	$2,78 \times 10^3$
В1963	Поковки Штамповки	500- 560	480- 520	72	8	34	$2,78 \times 10^3$

2.1 Высокоресурсные сплавы

1163АТ (1163АТВ, 1163РДТВ) – современный высокоресурсный сплав типа дюралюминий ($\sigma_{\text{в}} = 420\text{--}460$ МПа; $\delta = 11\text{--}15$ %) с повышенными характеристиками пластичности, вязкости разрушения и усталостной долговечности, позволяющими повысить ресурс и надежность самолета. Сплав является основным для изготовления обшивок фюзеляжа и нижних обшивок крыла, обшивок оперения, элементов внутреннего набора планера.

Выпускается вся номенклатура промышленных полуфабрикатов (листы, плиты, пресованные профили и панели), в том числе длинномерные (до 30 м).

Применение в сплаве **1163РДТВ** твердой регламентированной плакировки из сплава **АД35** толщиной 1,5–2,5 % вместо 2–6 % в листах базового сплава **1163АТ** с плакировкой из мягкого алюминиевого сплава **АДО** в сочетании с повышенной в 1,5 раза чистотой по примесям железа и кремния позволило улучшить характеристики выносливости, вязкости разрушения и пластичности, коррозионной стойкости обшивочных листов из сплава **1163РДТВ**. Сплав **1163АТ** не уступает по свойствам американскому сплаву **2524**.

Сводку свойств сплава в сравнении с традиционным сплавом **Д16чАТ** в табл. 2.

Таблица 2. Механические свойства высокоресурсных сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	$\sigma_{\text{в}}$	$\sigma_{0,2}$	E , ГПа	δ , %	K_{1c} , МПа $\sqrt{\text{м}}$	ρ , кг/м ³
		МПа					
Д16чАТ	Листы Профили Плиты	400-490	270-360	70	10-13	118-131	$2,78 \times 10^3$
1163АТ	Листы Профили Плиты	420-460	340-380	72	11	130-140	$2,78 \times 10^3$

2.2 Алюминий-литиевые сплавы пониженной плотности

1420 – среднепрочный, устойчивый к коррозии, с высоким модулем упругости, свариваемый сплав пониженной плотности ($\rho = 2470 \text{ кг/м}^3$; $E = 78 \text{ ГПа}$; $\sigma_{\text{в}} = 420\text{--}450 \text{ МПа}$; $\sigma_{0,2} = 270\text{--}300 \text{ МПа}$; 9–10 %).

Сплав предназначен для использования в конструкции самолётов (сварные герметичные отсеки, окантовки иллюминаторов, компоненты кабины). Сплав эффективно используется для изготовления штамповок вместо сплава АК-6 в связи с пониженной (на 10 %) плотностью, повышенными характеристиками усталости и коррозионной стойкости, а также высоким модулем упругости. Сплав широко применялся в клепаных фюзеляжах палубных штурмовиков вертикального взлета ЯК-36 и ЯК-38; в виде штамповок в пассажирском самолете ЯК-42; в сварных топливных баках и сварной кабине пилота истребителя МиГ-29М; в конструкциях самолётов Су-27 и Ту-204, вертолёт Ми-26Т.

1424 – среднепрочный, устойчивый к коррозии свариваемый сплав пониженной плотности с высоким модулем упругости ($\rho = 2540 \text{ кг/м}^3$; $E = 80 \text{ ГПа}$; $\sigma_{\text{в}} = 430\text{--}460 \text{ МПа}$; $\sigma_{0,2} = 290\text{--}350 \text{ МПа}$) и характеристиками вязкости разрушения, устойчив к трещинам. Освоено серийное производство листов, пресованных профилей, разработаны технологии сварки ($\sigma_{\text{в.св.}} = 0,8\sigma_{\text{в}}$) и изготовления деталей сложной конфигурации в режиме сверхпластичности (способности сплава очень сильно деформироваться при растяжении при повышенной температуре и контролируемой скорости деформации).

Рекомендуется для клепаных и сварных конструкций самолётов (обшивка и внутренний набор фюзеляжа, сварные элементы конструкций), обеспечивает снижение массы на 10-20% по сравнению со сплавами **1163**, **1933** за счет высокой удельной прочности.

1441 – высокотехнологичный, среднепрочный с высоким модулем упругости сплав ($\sigma_{\text{в}} = 410\text{--}430 \text{ МПа}$; $E = 80 \text{ ГПа}$; $\rho = 2540 \text{ кг/м}^3$) позволяет получать из него плакированные и не плакированные листы толщиной до

0,3 мм. Установлено, что скорость роста трещин усталости в листах сплава **1441-T1** в коррозионной среде (3,5 %-ный раствор NaCl) при низких частотах нагружения ($f = 0,01$ Гц) сохраняет низкие значения, сопоставимые со скоростью роста усталостных трещин в листах сплава Д16чТ. Освоено промышленное производство листов с различной регламентированной плакировкой, прессованных профилей и плит. Рекомендуется для силовых элементов планера (обшивок фюзеляжа, стрингерного набора), работающих в любых климатических условиях (до 130°C). Листы из сплава **1441** длительно и успешно применяются в конструкциях обшивки гидросамолетов Бе-103 и Бе-200 ОАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева».

В-1461-T1 – высокопрочный, устойчивый к коррозии, свариваемый сплав пониженной плотности, с повышенным модулем упругости ($\rho = 2630$ кг/м³; $E = 79,5$ ГПа; $\sigma_{\text{в}} = 40\text{--}560$ МПа; $\sigma_{0,2} = 490\text{--}510$ МПа).

Освоено производство листов, плит и прессованных полуфабрикатов.

Рекомендуется для клёпаных и сварных конструкций авиакосмической техники (обшивка и силовой набор планера, элементы конструкций), обеспечивает снижение массы на 8–15 % и работоспособность конструкций в широком интервале температур.

В-1469-T1 – высокопрочный, устойчивый к коррозии свариваемый сплав пониженной плотности ($\rho = 2670$ кг/м³; $E = 78\text{--}80$ ГПа; $\sigma_{\text{в}} = 580\text{--}600$ МПа; $\sigma_{0,2} = 540\text{--}560$ МПа; $\delta = 8$ %; $\sigma_{\text{в.св.}}/\sigma_{\text{в}} \geq 0,6$).

Сплав технологичен при литье и обработке давлением, что позволяет получать из него все виды полуфабрикатов, в том числе листы холодной рулонной прокатки, которые свариваются всеми видами сварки.

Освоено промышленное производство листов толщиной 1,2–6,0 мм и прессованных профилей.

Рекомендуется для элементов, работающих на сжатие длительно в любых климатических условиях (до 150°С) – верхние поверхности крыла, лонжероны, балки, стрингеры.

Сплавы **В-1461, В-1469** могут применяться взамен сплава **В95пч** для силового набора планера самолетов. Рациональное использование их в авиационной технике может обеспечить снижение массы деталей и узлов на 10 % в клепаной и на 20 % в сварной конструкции.

Сводка механических свойств сплавов этой группы дана в табл. 3.

Таблица 3. Механические свойства сплавов пониженной плотности

Сплав	Вид полуфабриката	σ_B	$\sigma_{0,2}$	E ,	δ ,	$K1_c$,	ρ ,
		МПа		ГПа	%	МПа \sqrt{m}	кг/м ³
1420	Штамповки	420–450	270-300	78	9–10	38	2,47×10 ³
1424	Листы, плиты Профили	430-460	290-350	80	6	-	2,54×10 ³
1441	Листы, плиты Профили	410-430	305-355	80	5	31	2,54×10 ³
В-1461-Т1	Листы, плиты Профили	540-560	490-510	79,5	-	-	2,63×10 ³
В-1469-Т1	Листы, плиты Профили	580-600	540-560	78-80	8	35	2,67×10 ³

3. Свариваемые, устойчивые к коррозии высокотехнологичные алюминиевые сплавы

АМг2, АМг3, АМг6 – термически не упрочняемые сплавы для внутреннего набора самолётов, сварных ёмкостей и топливных баков,

прочность сварных соединений составляет 0,9–0,95 прочности основного материала.

1577 – сплав, легированный скандием, имеет прочность в отожженном состоянии, близкую к прочности закаленного и естественно состаренного сплава Д16ч-Т и позволяет изготавливать сложные по конфигурации детали в режиме сверхпластичности.

1370Т1 – высокотехнологичный, устойчивый к коррозии, термически упрочняемый сплав с повышенными характеристиками жаропрочности ($\sigma_B = 400\text{--}500$ МПа; $\sigma_{0,2} = 350\text{--}370$ МПа; $\sigma_B^{150^\circ\text{C}} = 290$ МПа; $\delta \geq 8$ %) и технологичности при холодной деформации.

Сплав используется в виде листов толщиной 0,5–1,2 мм на самолёте Ан-148 (обшивка и гофры носовой части стабилизатора, гофры предкрылков и отклоняемого носка крыла). Освоено производство листов, пресованных профилей и плит, разработана технология сварки. Рекомендуется для обшивки и внутреннего набора фюзеляжа.

1913 (В91п.ч.) -Т3 – устойчивый к коррозии, свариваемый, термически упрочняемый сплав с высокой прочностью сварных соединений ($\sigma_B = 450$ МПа, $\sigma_{B.св.} = 0,9\sigma_B$). Освоено производство листов, пресованных профилей и штамповок, разработана технология сварки. Рекомендуется для применения в авиационной технике, в том числе для гидросамолётов и экранопланов (обшивки и внутренний набор фюзеляжа).

В-1341-Т(Т1) – высокотехнологичный, устойчивый к коррозии, свариваемый сплав средней прочности (свойства в состоянии Т1: ($\sigma_B = 330$ МПа; $\sigma_{0,2} = 260$ МПа; $\delta \geq 10$ %)).

Разработана промышленная технология получения листов толщиной 0,6–3,0 мм с размером зерна менее 50 мкм, что обеспечивает их высокую технологичность при холодном формообразовании (минимальный радиусгиба 0,5–1 толщины листа). Рекомендуется использование в изделиях авиационной техники в виде обшивок, деталей

внутреннего набора, перегородок, крепёжных узлов, трубопроводов, сварных баллонов различного назначения, работающих в диапазоне температур от -70°C до $+150^{\circ}\text{C}$. Применение тонких листов (до 1,5 мм) в сварных баллонах, работающих под внутренним давлением, вместо листов сплава АМг-4 (до 3 мм), обеспечивает герметичность по основному металлу и снижение массы изделий на 35–40%. Освоено промышленное производство всех видов полуфабрикатов.

Сплав применён в новом региональном самолёте SSI-100 (детали внутреннего набора, перегородки, крепежные узлы, трубопроводы системы жизнеобеспечения).

Механические свойства группы сплавов приведены в табл. 4.

Таблица 4. Механические свойства свариваемых сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	σ_b	$\sigma_{0,2}$	E , ГПа	δ , %	K_{Ic} , МПа $\sqrt{\text{м}}$	ρ , кг/м ³
		МПа					
АМг2	Все виды	200	100	71	23		$2,68 \times 10^3$
АМг3	Все виды	230	120	71	25		$2,68 \times 10^3$
АМг6	Все виды	340-400	270-300	71	30		$2,64 \times 10^3$
1370Т1	Листы Профили Штамповки	400-500	350-370				
1913Т3	Листы Профили Штамповки	450	350				
В-1341-Т(Т1)	Все виды	330	260				

4. Литейные алюминиевые сплавы

Литейные алюминиевые сплавы предназначены для изготовления деталей, обладающих низкой плотностью ($\rho = 2500\text{--}2600 \text{ кг/м}^3$) и высокой удельной прочностью, что позволяет в ряде случаев применять отливки взамен поковок и штамповок. При этом повышается коэффициент использования металла (КИМ) и снижается трудоёмкость изготовления деталей.

Данный вид сплавов нашел значительно более широкое применение в конструкциях авиационной и космической техники, чем магниевые. В настоящее время используются алюминиевые сплавы более 15 марок. Среди них наиболее распространенными являются **ВАЛ12**, **ВАЛ14**, **ВАЛ16**. Наиболее высокопрочный из них литейный алюминиевый сплав ВАЛ12 (Al-Zn-Mg-Cu) может успешно конкурировать не только с деформируемыми алюминиевыми сплавами, но и с малоуглеродистыми сталями, бронзами, латунями. Сплав обладает удовлетворительными литейными свойствами и коррозионной стойкостью (общей и под напряжением), предназначается для производства деталей, к которым предъявляются повышенные требования по характеристикам надежности, а также прочности, текучести, усталости.

АЛ4МС – высокопрочный высокотехнологичный сплав (системы Al-Si-Cu-Mg – медистый силумин со скандием) обеспечивает при литье в кокиль высокие характеристики ($\sigma_{\text{в}} = 360\text{--}400 \text{ МПа}$; $\delta \geq 4 \%$), не склонен к образованию трещин, рабочая температура 250°C , можно отливать детали любыми способами, в том числе прогрессивным способом литья по газифицируемым и выжигаемым моделям.

ВАЛ12 – высокопрочный сплав (системы Al-Zn-Mg-Cu), литье в кокиль и жидкая штамповка, рабочая температура 250°C (длительно) и 300°C (кратковременно), ($\sigma_{\text{в}} \geq 550 \text{ МПа}$, $\delta \geq 3 \%$).

ВАЛ14 и ВАЛ18 – жаропрочные сплавы (системы Al-Cu-Mn), литьё в песчаные формы, для высоконагруженных деталей, работающих при температурах 300–350°C ($\sigma_B = 380\text{--}500$ МПа; $\delta = 7,5\text{--}10$ %).

ВАЛ16 – устойчивый к коррозии литейный алюминиевый сплав (системы Al-Mg), в том числе свариваемый ($\sigma_{B,св.} = 240$ МПа), эксплуатирующийся при температурах от -70°C до $+140^\circ\text{C}$ (длительно) и до 150°C (кратковременно).

ВАЛ20 – высокопрочный сплав (системы Al-Cu-Mg), предназначенный для литья в песчаные формы фасонных отливок сложной конфигурации деталей внутреннего набора (корпуса, качалки, кронштейны). Рабочая температура $+200^\circ\text{C}$ (длительно), $+250^\circ\text{C}$ (кратковременно), ($\sigma_B = 420$ МПа; $\delta = 7$ %).

В табл. 5 представлены механические свойства группы литейных алюминиевых сплавов.

Таблица 5. Механические свойства литейных алюминиевых сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	σ_B	$\sigma_{0,2}$	E , ГПа	δ , %	$K1_c$, МПа $\sqrt{м}$	ρ , кг/м ³
		МПа					
АЛ4МС	Все виды литья	360-400	280	70	23	≥ 4	$2,72 \times 10^3$
ВАЛ12	Кокиль, жидкая штамповка	540	400	70	25	≥ 3	$2,8 \times 10^3$
ВАЛ14	Песчаные формы	380-500	450	70	30	7,5-10	$2,8 \times 10^3$
ВАЛ16:	Кокиль	255		70		6	$2,8 \times 10^3$
ВАЛ18	Песчаные формы	380		70		7,5	$2,8 \times 10^3$
ВАЛ20	Песчаные формы	420		70		7	$2,8 \times 10^3$

Алюминиевые сплавы 1163Т 1163АТ 1163АТВ 1933 В9504Т2



5. Магниеые сплавы средней и высокой прочности.

МА20 ($\sigma_{в} = 170$ МПа; $\sigma_{0,2} = 157$ МПа; $\delta = 18$ %).

МА20СП ($\sigma_{в} = 270$ МПа; $\sigma_{0,2} = 220$ МПа; $\delta = 14$ %).

Эти сплавы отличаются от других деформируемых магниевых сплавов повышенной пластичностью и технологичностью. Они не склонны к коррозионному растрескиванию, обладают удовлетворительной коррозионной стойкостью. Сплавы хорошо свариваются аргонодуговой электрической сваркой и контактной электросваркой.

Сплав **МА20СП** предназначен также для изготовления деталей сложной конфигурации методом сверхпластичной деформации (детали приборных панелей, декоративные детали, спинки и подлокотники пассажирских кресел). Механические свойства сплавов приведены в табл.

Таблица 1. Механические свойства магниевых сплавов средней прочности

Сплав	Вид полуфабриката	σ_B	$\sigma_{0,2}$	E , ГПа	δ , %	$K1_c$, МПа \sqrt{m}	ρ , кг/м ³
		МПа					
МА20	Все виды	170	157	41	18		$1,76 \times 10^3$
МА20СП	Все виды	270	220	41	14		$1,76 \times 10^3$

МА14 ($\sigma_B = 275$ МПа; $\sigma_{0,2} = 175$ МПа; $\delta = 7$ %).

МА15 ($\sigma_B = 295$ МПа; $\sigma_{0,2} = 245$ МПа; $\delta = 5$ %).

МА22 ($\sigma_B = 335$ МПа; $\sigma_{0,2} = 240$ МПа; $\delta = 8$ %).

Детали из **МА14** предназначены для длительной эксплуатации, при температуре до 125°C. Сплав нашел широкое применение в конструкциях не только гражданских, но и военных самолетов (Су-27, Су-30, МиГ-29 и др.). Из этого сплава изготавливаются различные детали систем управления (качалки, кронштейны, рычаги и пр.) и детали внутреннего набора из плит, профилей, штамповок и т.д.

Из сплава **МА22** изготавливаются детали, которые могут длительно (до 100 часов) эксплуатироваться при температуре до 200°C. Детали из данного сплава хорошо свариваются аргодуговой электрической сваркой ($\sigma_{B,св.}/\sigma_B = 0,88$). Механические свойства высокопрочных магниевых сплавов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Механические свойства высокопрочных магниевых сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	σ_B	$\sigma_{0,2}$	E , ГПа	δ , %	$K1_c$, МПа \sqrt{m}	ρ , кг/м ³
		МПа					
МА14	Поковки	275	175	41	7		$1,8 \times 10^3$
МА15	Штамповки	295	245	41	5		$1,8 \times 10^3$
МА22	Поковки	335	240	41	8		$1,8 \times 10^3$

1. Магниевые сплавы пониженной плотности

Эти сплавы наряду с другими легированными элементами содержат литий в количестве до 10,5 % (по массе). Плотность сплавов понижается с повышением содержания лития и составляет 1500–1600 кг/м³ (вместо 1780-1820 кг/м³ для обычных магниевых сплавов).

МА18 ($\sigma_B = 167$ МПа; $\sigma_{0,2} = 127$ МПа; $\delta = 30$ %).

Данный сплав отличается высокой пластичностью при комнатной и криогенной температурах, повышенным модулем упругости ($E = 47$ ГПа) и высокой удельной жесткостью. Из сплава могут быть изготовлены все виды полуфабрикатов, свариваемых аргодуговой электрической сваркой. Сплав обладает удовлетворительной коррозионной стойкостью.

МА21 ($\sigma_B = 225$ МПа; $\sigma_{0,2} = 175$ МПа; $\delta = 14$ %).

Данный сплав предназначен для эксплуатации в диапазоне температур $\pm 60^\circ\text{C}$, когда требуется высокая жесткость и повышенная прочность при сжатии. Механические свойства магниевых сплавов пониженной плотности представлены в табл. 3.

Таблица 3. Механические свойства магниевых сплавов пониженной плотности

Сплав	Вид полуфабриката	σ_B	$\sigma_{0,2}$	E ,	δ ,	ρ ,
		МПа		ГПа	%	кг/м ³
МА18	Лист	167	127	47	30	$1,6 \times 10^3$
	Пруток					
МА21	Лист	225	175	47	14	$1,6 \times 10^3$
	Пруток					

2. Литейные магниевые сплавы

2.1 Высокопрочные сплавы

ВМЛ20-Т6 ($\sigma_B = 300$ МПа; $\sigma_{0,2} = 200$ МПа; $\delta = 4,5$ %).

Данный сплав имеет повышенную коррозионную стойкость. Рекомендуется к применению вместо сплавов МЛ5, МЛ8, МЛ12 для деталей узлов агрегатов самолетов и двигателей (корпуса насосов, картеры, редукторы, вентиляторы).

ВМЛ24-Т6 ($\sigma_B = 330$ МПа; $\sigma_{0,2} = 245$ МПа; $\delta = 5$ %).

Данный сплав предназначен для изготовления литых нагруженных деталей самолетов, вертолетов, двигателей (авиационные колеса, кронштейны, фермы, рамы и др.).

Механические свойства высокопрочных сплавов приведены в табл. 4.

Таблица 4. Механические свойства высокопрочных магниевых сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	σ_B	$\sigma_{0,2}$	E ,	δ ,	ρ ,
		МПа		ГПа	%	кг/м ³
ВМЛ20-Т6	Кокиль	300	200	43	4,5	$1,8 \times 10^3$
ВМЛ24-Т6	Кокиль	330	245	43	5	$1,8 \times 10^3$

2.2 Коррозионностойкие сплавы

ВМЛ18-Т4 ($\sigma_B = 245\text{--}250$ МПа; $\sigma_{0,2} = 100\text{--}110$ МПа; $\delta = 5\text{--}8$ %).

Сплав предназначен для работы во всех климатических условиях. Рекомендуется для изготовления деталей внутреннего набора планера самолетов и вертолетов, приборных рам, деталей кабин пилотов, систем управления, трансмиссий взамен сплава МЛ5 п.ч. Сплав выплавляется по специальной технологии, разработанной в ВИАМ. Он превосходит по коррозионной стойкости и чистоте все существующие магниевые сплавы. Механические свойства сплава приведены в табл. 5.

Таблица 5. Механические свойства коррозионностойкого сплава

Сплав	Вид полуфабриката	σ_B	$\sigma_{0,2}$	E , ГПа	δ , %	ρ , кг/м ³
		МПа				
ВМЛ18-Т4	Кокиль	245- 250	100- 110	42	5-8	1,85×10 ³

2.3 Жаропрочные сплавы

МЛ9-Т6 ($\sigma_B = 230$ МПа; $\sigma_{0,2} = 120$ МПа; $\delta = 4$ %).

МЛ10-Т6 ($\sigma_B = 230$ МПа; $\sigma_{0,2} = 140$ МПа; $\delta = 3$ %).

МЛ19-Т6 ($\sigma_B = 220$ МПа; $\sigma_{0,2} = 120$ МПа; $\delta = 3$ %).

Сплавы предназначены для изготовления деталей самолетов, вертолетов, двигателей, приборов, маслоагрегатов, редукторов и других агрегатов, работающих при повышенной (до 300°С) температуре.

Наиболее широко применяется сплав **МЛ10**, отличающийся повышенным уровнем механических свойств, см. табл. 6. Для всех сплавов характерны хорошие литейные свойства, которые позволяют изготавливать из них сложные крупногабаритные отливки, мало склонные к образованию микрорыхлот, имеющие повышенную герметичность, устойчивое постоянство размеров выплавляемых деталей.

Таблица 6. Механические свойства жаропрочных сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	σ_B	$\sigma_{0,2}$	E , ГПа	δ , %	ρ , кг/м ³
		МПа				
МЛ9-Т6	Кокиль	230	120	43	4	1,76×10 ³
МЛ10-Т6	Кокиль	230	140	42	3	1,78×10 ³
МЛ19-Т6	Кокиль	220	120	43	3	1,78×10 ³

Контрольные вопросы

1-Вопрос: В чём преимущество новых высокопрочных магниевых сплавов от ранее применяемых?

2- Вопрос: Какие сплавы относятся к новым высокопрочным деформируемым магниевым сплавам?

3- Вопрос: Какие деформируемые магниевые сплавы пониженной плотности вы знаете?

4- Вопрос: Какие сплавы относятся к жаропрочным литейным магниевым сплавам?

5- Вопрос: Какие сплавы относятся к коррозионностойким литейным магниевым сплавам?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по конструкционным материалам: Справочник/ Б.Н. Арзамасов, Т.В. Соловьева, С.А. Герасимов и др.; Под ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 640 с.: ил.
2. Callister William D., Materials science and engineering, Wiley and Sons UK, 2015
3. T Fischer, Materials Science for Engineering Students, 1st Edition, Elsevier 2008
4. Materials Science and Technology, W.F. Smith, MacGrawHill, 4 International Ed., 2004.

Тема - 3: Композиционные материалы

План:

1. Композиционные материалы, классификация, составляющие компоненты
2. Особенности композиционных материалов.
3. Применение композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов.

Ключевые слова и выражения: композиционные материалы, компонент, матрица, армирующие, неметаллические, металлические, нуль-мерные, одномерные, двух мерные, органические, неорганические, корбиды, нитриды, оксиды, углерод-углеродные, керамические, методы обработки и др.

1. Композиционные материалы, классификация, составляющие компоненты.

Композиционными называют материалы, состоящие из двух и более компонентов, объединенных различными способами в монолит и сохраняющими при этом индивидуальные особенности.

Для композиционных материалов характерна следующая совокупность признаков:

- состав, форма и распределение компонентов материала определены заранее;
- материалы состоят из двух компонентов и более различного химического состава, разделенных в материале границей;
- свойства материала определяются каждым из его компонентов, содержание которых в материале достаточно большое;
- материал обладает свойствами, отличными от свойств компонентов, взятых в отдельности;
- материал однороден в макро- масштабе и неоднороден в микро- масштабе;
- материал не встречается в природе, а является созданием человека.

Композиционные материалы **классифицируют: по геометрии наполнителя, расположению его в матрице и природе компонентов.**

По геометрии наполнителя композиционные материалы подразделяют на три группы:

- с **нуль-мерными наполнителями**, размеры которых в трех измерениях имеют один и тот же порядок;
- с **одномерными наполнителями**, один из размеров которых значительно превосходит два других;
- с **двухмерными наполнителями**, размеры которых значительно превосходят третий.

По схеме расположения наполнителей выделяют три группы композиционных материалов:

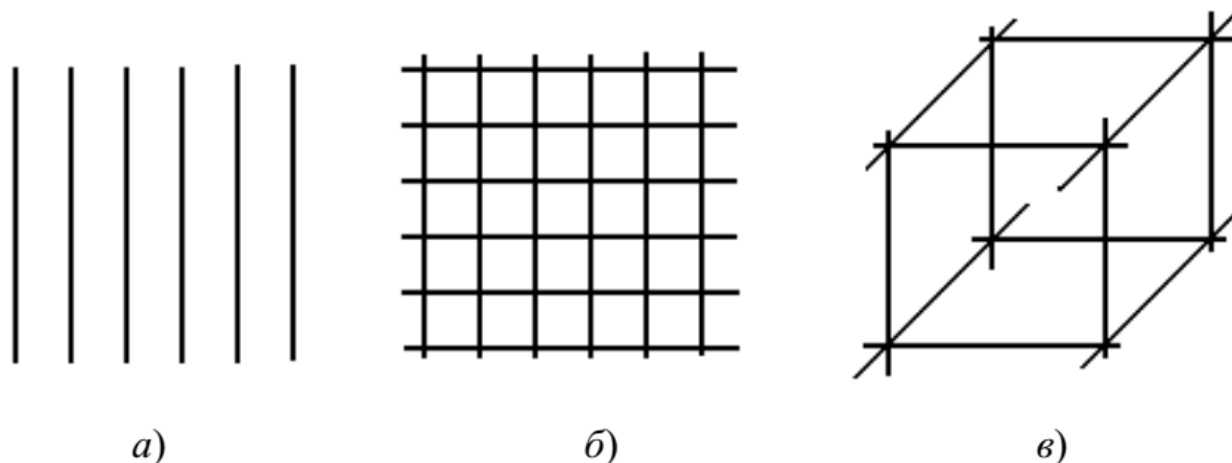
- с **одноосным (линейным)** расположением наполнителя в виде волокон, нитей, нитевидных кристаллов в матрице параллельно друг другу;
- с **двухосным (плоскостным)** расположением армирующего наполнителя в виде волокон, матов из нитевидных кристаллов, фольги в матрице в параллельных плоскостях;
- с **трехосным (объемным)** расположением армирующего наполнителя и отсутствием преимущественного направления в его распределении (рис.1).

По природе компонентов композиционные материалы разделяются на четыре группы:

- композиционные материалы, содержащие компонент из металлов или сплавов;
- композиционные материалы, содержащие компонент из неорганических соединений оксидов, карбидов, нитридов и др.;
- композиционные материалы, содержащие компонент из неметаллических элементов, углерода, бора и др.;

- композиционные материалы, содержащие компонент из органических соединений (эпоксидные, полиэфирные, фенольные и другие смолы).

Рис.1. Схемы армирования: а – одноосное; б – двухосное; в – трехосное (объёмное)



В названную классификацию не входят полиармированные композиционные материалы, содержащие чередующиеся слои двух композиций или более, с матрицами, отличающимися химическим составом.

2. Компоненты, используемые при производстве композиционных материалов.

Компоненты композиционного материала различны по геометрическому признаку. Компонент, который обладает непрерывностью по всему объему, является **матрицей**. Компонент же прерывный, разделенный в объеме композиционного материала, считается **армирующим** или **упрочняющим**. В качестве матриц в композиционных материалах могут быть использованы металлы и их сплавы, а также полимеры органические и неорганические, керамические, углеродные и другие материалы. Свойства матрицы определяют технологические параметры процесса получения композиции и ее эксплуатационные характеристики: плотность, удельную прочность,

рабочую температуру, сопротивление усталостному разрушению и воздействию агрессивных сред.

Армирующие или упрочняющие компоненты равномерно распределены в матрице. Они, как правило, обладают высокой прочностью, твердостью и модулем упругости и по этим показателям значительно превосходят матрицу. Более широким понятием, чем армирующий или упрочняющий компонент, является термин «**наполнитель**», поскольку наполнитель в матрице помимо изменения прочности оказывает влияние и на другие характеристики композиции.

Свойства композиционных материалов зависят не только от физико-химических свойств компонентов, но и прочности связи между ними.

В композиционных материалах с нуль-мерными наполнителями наибольшее распространение получила **металлическая матрица** из металла или сплава. Композиции на металлической основе упрочняются равномерно распределенными дисперсными частицами различной зернистости: микроскопические с диаметром частицы $d \sim 0,01—0,1$ мкм; мелкие с диаметром частицы $d \sim 1—50$ мкм.

Композиционные материалы с равномерным распределением частиц упрочнителя отличаются изотропностью свойств.

Армирующими наполнителями чаще служат дисперсные частицы тугоплавких оксидов, нитридов, боридов, карбидов (Al_2O_3 , ThO_2 , HfO_2 , BN , SiC , Be_2C и др.). Эти тугоплавкие соединения имеют высокие значения модуля упругости, низкую плотность, значительную инертность в отношении материала матриц. Так, например, модуль упругости оксидов ThO_2 и Al_2O_3 равен $380,5 \cdot 10^3$ и $146,12 \cdot 10^3$ МПа, а плотность — 1,0 и $3,97$ г/см³ соответственно.

Промышленное применение нашли композиционные материалы **на основе алюминия**, упрочненные частицами Al_2O_3 . Их получают методами порошковой металлургии прессования алюминиевой пудры с

последующим спеканием (САП). Частицы пудры имеют форму чешуек толщиной 1 мкм. Размеры частиц по длине и ширине мало отличаются друг от друга. Оксидная пленка на поверхности частиц имеет толщину 0,01—0,1 мкм. Уменьшение размеров частиц пудры увеличивает их общую поверхность и содержание оксидов алюминия.

Упрочняющим компонентом в композиционных материалах с **никелевой матрицей** являются токсичные частицы диоксида тория (ThO_2) или диоксида гафния (HfO_2). Эти материалы обозначаются ВДУ-1 и ВДУ-2 соответственно. В сплаве ВДУ-3 матрицей служит никелево-хромовый твердый раствор (20% хрома), а упрочнителем — диоксид гафния. Оксиды гафния и тория обнаруживают высокие значения микротвердости и прочности при сжатии, а также максимальную стабильность в матрице. Объемное содержание упрочняющей дисперсной фазы оксидов тория и гафния находится в пределах 2—3%. Твердость оксида HfO_2 ; составляет 9070 МПа и мало отличается от твердости ThO_2 .

Жаропрочные свойства дисперсно-упрочненных сплавов зависят как от количества и размеров оксидных частиц, так и от размеров, формы и строения зерен и субзерен матриц, формируемых при оптимальных режимах обработки давлением и термической обработки.

Композиционные материалы ВДУ-1, ВДУ-2 и ВДУ-3 при умеренных температурах по прочности уступают жаропрочным никелевым сплавам. При комнатной температуре временное сопротивление разрыву сплавов ВДУ-1 и ВДУ-2 составляет 540—570 и 450—500 МПа соответственно, а у сплава ВДУ-3 — 800—850 МПа. Большая прочность сплава ВДУ-3 по сравнению с остальными двумя связана с легированием матрицы хромом. При высоких температурах по жаропрочности дисперсно-упрочненные сплавы превосходят стареющие деформируемые никелевые сплавы.

В качестве матрицы в композиционных материалах на неметаллической основе используют **отвержденные эпоксидные, полиэфирные, фенольные, полиамидные** и другие смолы.

Наиболее распространены композиции, армированные **стеклянными, углеродными, органическими, борными** и другими видами волокон.

Композиты, армированные однотипными волокнами, получили названия по упрочняющему волокну. Так, композицию, содержащую наполнитель в виде длинных стекловолокон, располагающихся ориентированно отдельными прядями, называют ориентированным стекловолокнитом. Неориентированные стекловолокниты содержат в качестве наполнителя короткое волокно. В том случае, если упрочнителем является стеклоткань, — стеклотекстолитом. Композиционный материал, содержащий углеродное волокно, называют **углеволокнитом**, борное волокно — **бороволокнитом**, органическое волокно — **органоволокнитом** (органитом).

Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) — одни из наиболее известных современных композитов. Материалы этого типа часто считают самыми перспективными для изготовления конструкций, работа-ющих при высоких температурах. Они используются для изготовления носовых обтекателей ракет, сопловых блоков, лопаток турбин, деталей тормозных устройств самолетов, высокотемпературных подшипников ядерных силовых установок, других деталей ответственного назначения. УУКМ состоят из углеродной (графитовой) матрицы, упрочненной углеродным (графитовым) волокном. Углеродные волокна используются не только как упрочняющие элементы, они препятствуют распространению трещин. Основные достоинства УУКМ, определяющие их широкое применение, заключаются в высокой прочности, малой плотности, высокой теплостойкости, стойкости к тепловому удару и облучению. В

окислительной среде углерод-углеродные материалы сохраняют работоспособность до 773 К, в инертной среде и в вакууме – до 3273 К. УУКМ способны выдерживать перепад температур, достигающий 1000 К/см. В зависимости от структуры предел прочности на растяжение углерод-углеродных композитов изменяется в диапазоне ~ 100...1000 МПа.

3. Применение композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов.

Применение полимерных композиционных материалов

Композиционные материалы, благодаря своим качествам (высокая удельная прочность, возможность управления структурой и формообразованием изделий практически любой геометрии, лёгкость комбинирования с разными материалами), нашли широкое применение в самолётостроении[1].

Развитие самолётостроение связано с непрерывной борьбой за снижение веса конструкции. Повышенная по отношению к традиционным металлическим конструкционным материалам удельная прочность и жесткость композиционных материалов определяется свойствами упрочняющего волокна – наполнителя.

Композиционный материал (иногда его называют композит) состоит из высокопрочного наполнителя, ориентированного в определённом направлении, и матрицы. В качестве армирующих наполнителей (силовая основа композиции) применяются волокна бериллия, стекла, графита, стали, карбида кремния, бора или так называемые нитевидные кристаллы окиси алюминия, карбида бора, графита, железа и т. д. Матрицы изготавливаются из синтетических смол (эпоксидных, полиэфирных, кремниево-органических) или сплавов металлов (алюминия, титана и других). Соединение волокон или нитевидных кристаллов с матрицей производится горячим прессованием, литьём, плазменным напылением и некоторыми другими способами .

Наибольшее распространение получили композиционные материалы на основе высокопрочных волокон. Композиционный материал ведёт себя как единое структурное целое и обладает свойствами, которых не имеют составляющие его компоненты. Особенностью композиционных материалов является анизотропность их свойств (то есть зависимость, физических, в том числе механических, свойств материалов от направления), которая определяется ориентацией армирующих волокон. Заданную прочность материала получают, ориентируя волокна наполнителя в направлении действия основной усилия, что это открывает новые возможности при конструировании силовых элементов самолётов и вертолётов.

С точки зрения характеристик удельной прочности и удельной жёсткости наиболее перспективны композиционные материалы, в которых в качестве упрочняющей арматуры используются волокна бора, карбида бора и углерода. К таким материалам относятся бороэпоксидные материалы (боропластики, углепластики, бороалюминий).

В настоящее время мало летательных аппаратов, в конструкции которого не были бы использованы композиты на основе углеродных, стеклянных и арамидных волокон в сочетании с эпоксидными и гетероциклическими полимерными матрицами различного строения.

Опыт эксплуатации полимерных композиционных материалов в конструкциях авиакосмической техники показал, что их применение взамен металлических сплавов обеспечило снижение массы конструкций до 30–50 %, повышение ресурса эксплуатации – в 2–5 раз, снижение трудоемкости изготовления – на 20–40 % и материалоемкости – до 50 % .

Новые теплостойкие металлополимерные слоистые композиты на основе послойного сочетания тонких листов титановых сплавов с углепластиковыми разрабатываются для авиационных конструкций, эксплуатируемых при температуре 150-350°C. Материалы этого класса превосходят титановые сплавы по характеристикам удельной прочности

и жесткости в 1,4–2 раза, а по стойкости к вибрационным и акустическим нагрузкам – в 10 раз.

Контрольные вопросы:

1-вопрос: Что такое композиционный материал (КМ)?

2- вопрос: Что такое матрица в КМ ?

3- вопрос: Что такое армирующий элемент КМ?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по конструкционным материалам: Справочник/ Б.Н. Арзамасов, Т.В. Соловьева, С.А. Герасимов и др.; Под ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 640 с.: ил.

2. Конструкционные материалы в самолетостроении/А.Г. Моляр, А.А. Коцюба, А. С. Бычков, О.Ю. Нечипоренко – К.: КВИЦ, 2015. – 400 с.

3. Материаловедение и технология металлов: учебник для вузов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др. М.: Высш. шк., 2002. – 638 с.

4. Лахтин, Ю.М., Леонтьева, В.П. Материаловедение: учебник для вузов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева, М.: Альянс, 2011. – 448 с.

IV. МАТЕРИАЛЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Практическое занятие №1

Применение слоистых алюмокомпозитов в конструкциях летательных аппаратов (2 часа)

Цель занятия. Изучение состава, свойств и особенностей слоистых алюмокомпозитов.

Порядок выполнения работы. По теме данного занятия должны быть рассмотрены: состав, свойства, особенности слоистых алюмокомпозитов относительно других композитов, приведение примеров и обоснование области применения этих материалов в конструкциях летательных аппаратов.

Общие сведения.

Разработанные в 1990-х годах слоистые гибридные металлополимерные композиционные материалы (МПКМ, за рубежом их называют волокнисто-металлические слоистые материалы FML – Fibre Metal Laminates) являются принципиально новым конструкционным материалом для силовых конструкций авиационной техники. Они состоят из чередующихся тонких (0,3...0,5 мм) металлических листов и прослоек пластика – клееного препрега с армирующими волокнами (рис. 1). Количество и структура листов и полимерных прослоек определяется назначением детали и конструкции. По сравнению с монолитными листами из металлических сплавов они отличаются прежде всего кардинально повышенным (в 10 раз) сопротивлением разрушению (что позволяет в полной мере реализовать концепцию «безопасной повреждаемости» при проектировании), пониженной (на 10–15 %) плотностью (достижение которой является одной из главных задач для летательных аппаратов), повышенной прочностью и рядом других неординарных характеристик.

В настоящее время практическое развитие и применение нашли слоистые алюмокомпозиты: марки СИАЛ (Стеклопластик и алюминий) – в России, марки GLARE (Glass Laminate Aluminium REinforced) – в Западной Европе и США. GLARE применяется для обшивок и соединительных лент отсеков фюзеляжа крупнейшего самолета А-380 (рис.2) с весовой эффективностью более 500 кг при

повышении живучести и надежности. Стандартные варианты GLARE содержат листы из дуралюмина 2024Т3 в естественно состаренном состоянии (Д16чТ, 1163Т в России), которые обычно используют как ресурсные для фюзеляжных обшивок, и препрег со стеклом S2.

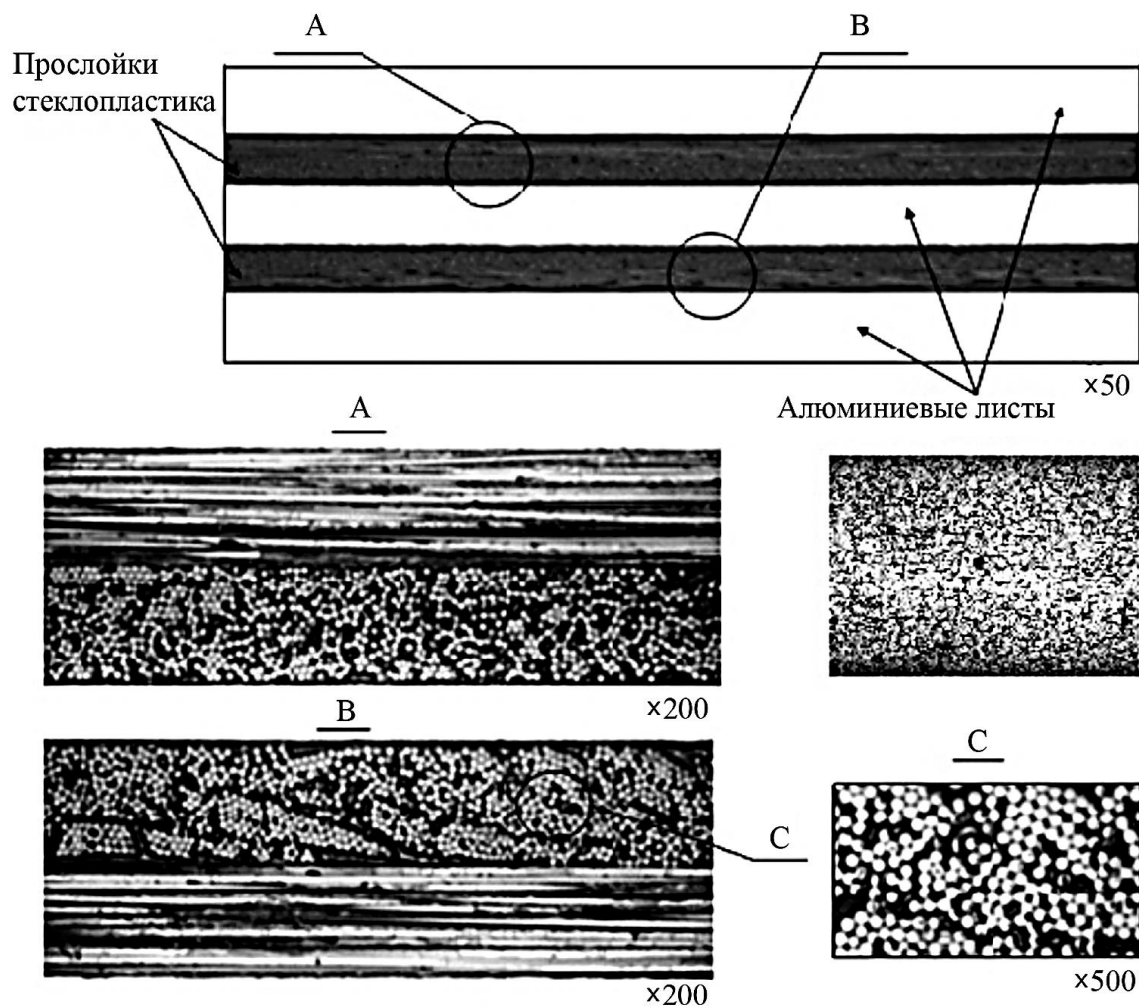


Рис. 1. Типичная микроструктура 1441-СИАЛ-3-1 пятислойного строения (3/2) с перекрестным армированием (0/90) слоя пластика

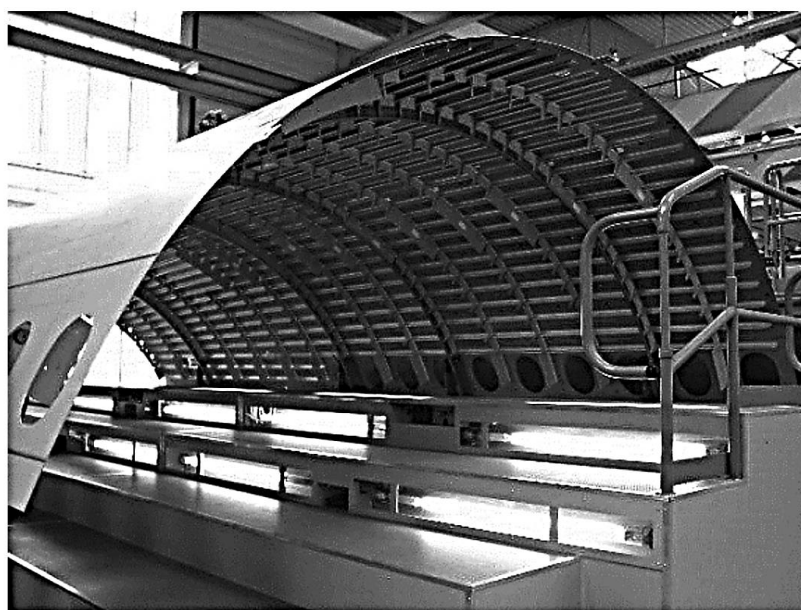


Рис. 2. Верхняя обшивка фюзеляжа самолета А-380 из материала GLARE

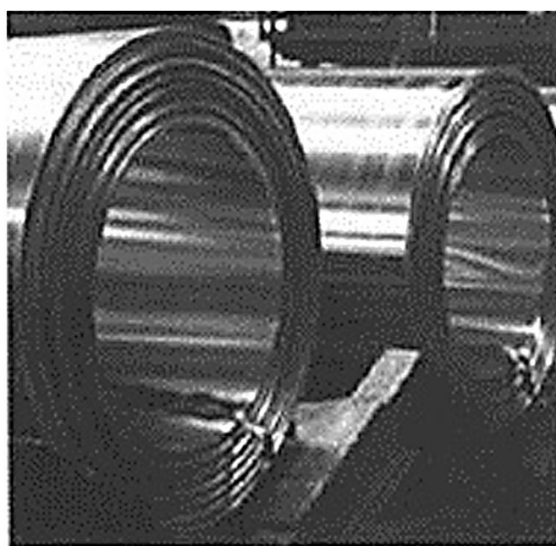
ВИАМом создан, запатентован и паспортизован, осваивается и рекомендуется конкурентоспособный СИАЛ на базе высоко-технологичного при прокатке высокомодульного ($E = 80$ ГПа) Al-Li-сплава 1441 пониженной плотности ($d = 2,6$ г/см³). Использование этого материала, условно обозначенного 1441-СИАЛ (1441-FML), приводит к дальнейшему повышению весовой эффективности, а так-же жесткости конструкций на ~5% .

Сплав 1441 системы Al-Cu-Mg-Li с добавкой Zr относится ко второму поколению алюминий-литиевых сплавов. Он отличается высокой технологичностью и позволяет получать холодной рулонной прокаткой тонкие листы требуемой толщины (до 0,3 мм) (рис. 3), которые рекомендуется применять для СИАЛов в состоянии T11 (после двухступенчатого старения по режиму 150°C, 4 ч + 170°C, 30 ч). Листы имеют повышенный предел текучести, хороший уровень долговечности при малоцикловой усталости (МЦУ) и скорости роста трещины усталости (СРТУ).

Плакированные (с двух сторон) и неплакированные листы габаритами (0,3...0,4)·1200·3000 мм освоены в ОАО «КУМЗ». Относительно тонкие плакированные листы 1441 (0,5...0,8 мм) около 15 лет используются в самолетах-амфибиях ТАНК им. Г.М. Бериева, что является хорошей основой для применения листов сплава 1441 в составе СИАЛов. Исследования показали, что тонкие листы из сплава 1441T11 имеют мелкозернистую ($d_{cp} \approx 30$ мкм), преимущественно рекристаллизованную структуру. Как и для других Al-Li-сплавов, для листов из сплава 1441 характерна обратная анизотропия – реальные прочностные свойства в поперечном направлении несколько выше (на ~10...20 МПа), чем свойства в долевом направлении.

Sheets (0,5–4,0 mm thickness)	
d, g/cm³	2,6
E, GPa	80
UTS, MPa	≥ 430
YTS, MPa	≥ 330
EI, %	≥ 7,0
K_c, MPa√m (Y _l =400 mm)	100
FCGR, dl/dN, mm/kcycles (ΔK=31 MPa√m)	1,4
LCF, kcycles (σ=157 MPa)	230

a



б

Рис. 3. Свойства листов сплава 1441 (а) и вид холоднокатаного рулона

Технология подготовки поверхности листов (анодное окисление, грунтовка) перед формованием 1441-СИАЛ близка к подготовке поверхности листов из традиционных алюминиевых сплавов типа Д16чАТ, В95пч/очАТ2. Процесс автоклавного формования можно проводить при повышенной температуре (170 °С вместо 120 °С в случае использования дуралюминов [2, 3]), что улучшает теплостойкость материала при эксплуатации.

Монослой препрега состоит из клеевого высокопрочного терморезистивного связующего, армированного на ~55–65 % об. стеклонаполнителями. Клеевое связующее обеспечивает монолитность слоистого материала – высокие адгезионные свойства на границах раздела алюминиевый лист – прослойка пластика, пластик – волокна наполнителя. В качестве стеклонаполнителя используются волокна (см. рис.1) диаметром 8...10 мкм в виде специальной кордной ткани или ровинга (что определяется назначением конструкции) из высоко-прочных высокомодульных стекол ВМП и ВМД со свойствами: $d = 2,55...2,58$ г/см³, $\sigma_b = 4500...5000$ МПа, $E = 90...92$ ГПа, $\pm l = (35...37) \oplus 107^\circ\text{C} - 1$ в интервале 0...350°С (что свидетельствует о большей совместимости при формовании с алюминиевыми листами стекловолокон, чем органо- и углеволокон).

Созданы и паспортизованы несколько вариантов композиций 1441-СИАЛ с различным армированием прослоек пластика: однонаправленные 100:1 % об. (СИАЛ-1-1) для стопперов, с перекрестным армированием в соотношении 50:50 % об. (СИАЛ-3-1 – равнопрочный), 70:30 % об. (СИАЛ-2-1), отвечающих условиям работы фюзеляжных обшивок и др.

Механические характеристики при статических и усталостных нагружениях определяются преимущественно по методикам (образцы, оборудование), принятым для алюминиевых конструкционных листов, из которых СИАЛы состоят более чем на 60 % об., в том числе обязательно на поверхности; СИАЛы рекомендуются для применения вместо монолитных алюминиевых листов.

Большой объем испытаний 1441-СИАЛ в сопоставлении со стандартным композитом GLARE был выполнен совместно с компанией AIRBUS в соответствии с ее методиками и стандартами АІТМ.

Плотность 1441-СИАЛ оптимальной структуры составляет d Н Н 2,35 г/см³, что на 5 % ниже плотности стандартного GLARE (d Н Н 2,48 г/см³).

Типичный уровень прочностных свойств при растяжении для базового равнопрочного СИАЛ-3-1 пятислойной структуры составляет 3/2 (3 алюминиевых листа + 2 прослойки стеклопластика): $\sigma_b = 600...650$ МПа, $\sigma_{0,2} = 270...290$ МПа; для однонаправленного СИАЛ-1-1 той же структуры: $\sigma_b = 1000...1100$ МПа, $\sigma_{0,2} = 300...350$ МПа.

Экспериментальные и расчетные данные показали, что прочностные и усталостные характеристики СИАЛов возрастают с уменьшением толщины алюминиевых и полимерных слоев, увеличением многослойности, а также с повышением степени армирования стекловолокнами.

Одним из главных преимуществ СИАЛов (в том числе 1441-СИАЛ на базе листов сплава 1441 и GLARE), определяющих живучесть и ресурс самолетных конструкций, является их чрезвычайно высокое сопротивление СРТУ, которые на порядок ниже, чем в монолитных алюминиевых листах (рис. 4): dl/dN составляет $< 0,2$ мм/цикл против $2,0$ мм/цикл при $\Delta K = 31$ МПа $\sqrt{м}$. Это подтвердили испытания типовых крупногабаритных листовых образцов различной ширины (до $B = 500$ мм) с центральным сквозным надрезом в виде отверстия и пропилом.

Возникающая у концентратора усталостная микротрещина при длине 1-2 мм прекращает практически свое развитие, так как позади кончика трещины в алюминиевых листах волокна остаются целыми и сдерживают длительно раскрытие трещины (рис. 5, а), а также снимают часть нагрузки с листов. Некоторым барьером для продвижения трещины служит связующее, как в клеевых конструкциях.

Установлено, что усталостное разрушение в стандартных образцах (30×200 мм) с центральным отверстием ($Kt = 2,6$) при испытаниях на малоцикловую усталость всегда зарождается около отверстия во внешних алюминиевых листах, а затем на связующем под трещиной образуется «псевдотрещина» треугольной конфигурации, приводящая к «тонкому» отслаиванию связующего (рис. 5, б). Это было выявлено после стравливания с поверхности алюминиевых листов.

Преимущество СИАЛов по усталостной долговечности сохраняется и в различных заклепочных соединениях (рис. 6), что очень важно, так как клепка является основным процессом соединения листовых деталей. Для СИАЛов предпочтительна прессовая клепка.

СИАЛы на базе листов 1441 характеризуются высокой коррозионной стойкостью. Прямыми стандартными испытаниями на общую коррозию установлено, что СИАЛы сохраняют показатели механических свойств на уровне исходных значений после пребывания в искусственных камерах тепла и влаги (при влажности 98 % и $T = 80$ °С) и солевого тумана (имитирующей приморскую атмосферу при 5 % NaCl), не имеют расслоений после 3-летней натурной экспозиции в условиях Геленджика (приморская зона) и Москвы (промышленная зона). Высокая коррозионная стойкость СИАЛа подтверждается тем, что, несмотря на некоторое ускорение роста трещины усталости в агрессивной коррозионной среде, СРТУ остается невысокой (см. рис. 4).

Все это объясняется низким влагонасыщением стеклянных волокон [11], хорошей адгезионной прочностью межфазных границ раздела

(алюминиевые листы – пластик, волокна – клеевое связующее), а также антикоррозионными покрытиями алюминиевых листов (анодно-окисными, грунтовкой, плакирующим слоем).

Еще одна важная особенность СИАЛов заключается в том, что они обладают повышенной огнестойкостью. Это позволяет использовать их в качестве противопожарных перегородок и облицовок багажных отсеков [12].

Проведенные испытания специальных композиций СИАЛов на лабораторной установке (образец 200·200 мм) и на установке в ГосНИИГА (образец 410·610 мм) в соответствии с требованиями Авиационных правил

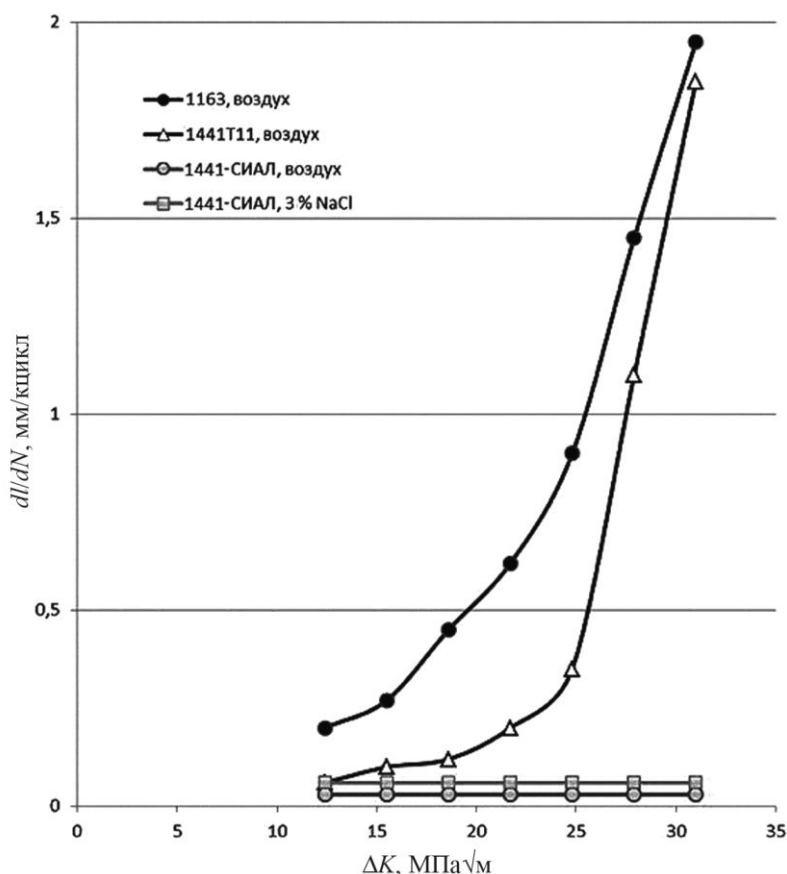


Рис. 4. Зависимость скорости роста трещины усталости в 1441-СИАЛ и монолитных листах от размаха коэффициента интенсивности напряжений (образец 140×420 мм, $\sigma_{max} = 118$ МПа, $f = 5$ Гц, $R = 0,1$)

показали, что СИАЛы позволяют на порядок (с 1,5 мин до 15 мин при 1100 °С) увеличить время проникновения пламени, сохранить жесткость конструкции и тем самым увеличить время эвакуации пассажиров и грузов. Существенно повышенное сопротивление и отсутствие сквозного

прогорания объясняется двумя обстоятельствами: наличием стекловолокон (температура плавления ~ 1700 °С) и расслоением материала. Установлен следующий механизм противодействия пламени: внешние тонкие алюминиевые листы быстро (примерно через 20с) прогорают, следующие за ними армирующие стеклянные волокна в составе пластика создают барьер огню. Эпоксидная клеевая матрица слоя пластика подвергается термодеструкции, вызывая образование газообразных продуктов и практически полное расслоение материала, что позволяет проходить воздуху через промежуточные слои, действуя как дополнительный изолирующий эффект от пламени.

Отчет по данной работе оформляется в реферативной форме с приведением таблиц сравнительных свойств традиционных алюминиевых сплавов типа Д16чАТ, В95пч/очАТ2 и слоистых алюмопластиков.

. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2

АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВЫЕ СПЛАВЫ В АВИАСТРОЕНИИ

(2 часа)

Цель работы. Изучение особенностей алюминий-литиевых сплавов их преимущества, разновидности, маркировка, состав, свойства, применение их в конструкциях летательных аппаратов.

Общие сведения.

Алюминий-литиевые сплавы пониженной плотности

1420 – среднепрочный, устойчивый к коррозии, с высоким модулем упругости, свариваемый сплав пониженной плотности ($\rho = 2470$ кг/м³; $E = 78$ ГПа; $\sigma_b = 420\text{--}450$ МПа; $\sigma_{0,2} = 270\text{--}300$ МПа; 9–10 %).

Сплав предназначен для использования в конструкции самолётов (сварные герметичные отсеки, окантовки иллюминаторов, компоненты кабины). Сплав эффективно используется для изготовления штамповок вместо сплава АК-6 в связи с пониженной (на 10 %) плотностью, повышенными характеристиками усталости и коррозионной стойкости, а также высоким модулем упругости. Сплав широко применялся в

клепанных фюзеляжах палубных штурмовиков вертикального взлета ЯК-36 и ЯК-38; в виде штамповок в пассажирском самолете ЯК-42; в сварных топливных баках и сварной кабине пилота истребителя МиГ-29М; в конструкциях самолётов Су-27 и Ту-204, вертолёт Ми-26Т.

1424 – среднепрочный, устойчивый к коррозии свариваемый сплав пониженной плотности с высоким модулем упругости ($\rho = 2540 \text{ кг/м}^3$; $E = 80 \text{ ГПа}$; $\sigma_B = 430\text{--}460 \text{ МПа}$; $\sigma_{0,2} = 290\text{--}350 \text{ МПа}$) и характеристиками вязкости разрушения, устойчив к трещинам. Освоено серийное производство листов, пресованных профилей, разработаны технологии сварки ($\sigma_{\text{в.св.}} = 0,8\sigma_B$) и изготовления деталей сложной конфигурации в режиме сверхпластичности (способности сплава очень сильно деформироваться при растяжении при повышенной температуре и контролируемой скорости деформации).

Рекомендуется для клёпанных и сварных конструкций самолётов (обшивка и внутренний набор фюзеляжа, сварные элементы конструкций), обеспечивает снижение массы на 10-20% по сравнению со сплавами **1163**, **1933** за счет высокой удельной прочности.

1441 – высокотехнологичный, среднепрочный с высоким модулем упругости сплав ($\sigma_B = 410\text{--}430 \text{ МПа}$; $E = 80 \text{ ГПа}$; $\rho = 2540 \text{ кг/м}^3$) позволяет получать из него плакированные и не плакированные листы толщиной до 0,3 мм. Установлено, что скорость роста трещин усталости в листах сплава **1441-Т1** в коррозионной среде (3,5 %-ный раствор NaCl) при низких частотах нагружения ($f = 0,01 \text{ Гц}$) сохраняет низкие значения, сопоставимые со скоростью роста усталостных трещин в листах сплава Д16чТ. Освоено промышленное производство листов с различной регламентированной плакировкой, пресованных профилей и плит. Рекомендуется для силовых элементов планера (обшивок фюзеляжа, стрингерного набора), работающих в любых климатических условиях (до 130°C). Листы из сплава **1441** длительно и успешно применяются в

конструкциях обшивки гидросамолетов Бе-103 и Бе-200 ОАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева».

В-1461-Т1 – высокопрочный, устойчивый к коррозии, свариваемый сплав пониженной плотности, с повышенным модулем упругости ($\rho = 2630 \text{ кг/м}^3$; $E = 79,5 \text{ ГПа}$; $\sigma_B = 40\text{--}560 \text{ МПа}$; $\sigma_{0,2} = 490\text{--}510 \text{ МПа}$).

Освоено производство листов, плит и прессованных полуфабрикатов.

Рекомендуется для клёпаных и сварных конструкций авиакосмической техники (обшивка и силовой набор планера, элементы конструкций), обеспечивает снижение массы на 8–15 % и работоспособность конструкций в широком интервале температур.

В-1469-Т1 – высокопрочный, устойчивый к коррозии свариваемый сплав пониженной плотности ($\rho = 2670 \text{ кг/м}^3$; $E = 78\text{--}80 \text{ ГПа}$; $\sigma_B = 580\text{--}600 \text{ МПа}$; $\sigma_{0,2} = 540\text{--}560 \text{ МПа}$; $\delta = 8 \%$; $\sigma_{B,cb.}/\sigma_B \geq 0,6$).

Сплав технологичен при литье и обработке давлением, что позволяет получать из него все виды полуфабрикатов, в том числе листы холодной рулонной прокатки, которые свариваются всеми видами сварки.

Освоено промышленное производство листов толщиной 1,2–6,0 мм и прессованных профилей. Рекомендуется для элементов, работающих на сжатие длительно в любых климатических условиях (до 150°C) – верхние поверхности крыла, лонжероны, балки, стрингеры.

Сплавы **В-1461**, **В-1469** могут применяться взамен сплава **В95пч** для силового набора планера самолетов. Рациональное использование их в авиационной технике может обеспечить снижение массы деталей и узлов на 10 % в клёпаной и на 20 % в сварной конструкции.

Сводка механических свойств сплавов этой группы дана в таблице

Таблица. Механические свойства сплавов пониженной плотности

Сплав	Вид полуфабриката	σ_B	$\sigma_{0,2}$	E , ГПа	δ , %	K_{Ic} , МПа $\sqrt{м}$	ρ , кг/м ³
		МПа					
1420	Штамповки	420– 450	270- 300	78	9–10	38	$2,47 \times 10^3$
1424	Листы, плиты	430- 460	290- 350	80	6	-	$2,54 \times 10^3$
	Профили						
1441	Листы, плиты	410- 430	305- 355	80	5	31	$2,54 \times 10^3$
	Профили						
В-1461- Т1	Листы, плиты	540- 560	490- 510	79,5	-	-	$2,63 \times 10^3$
	Профили						
В-1469- Т1	Листы, плиты	580- 600	540- 560	78-80	8	35	$2,67 \times 10^3$
	Профили						

Отчет по данной работе оформляется в реферативной форме с приведением примеров использования алюминий-литиевых сплавов и обоснование их использования в конструкциях летательных аппаратов. В табличной форме приводится сравнительный анализ свойств алюминий-литиевых сплавов и традиционных алюминиевых деформируемых сплавов.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №3

ВЫБОР ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы. Обоснование и выбор материала в зависимости от условий эксплуатации детали.

Общие сведения.

Общий закон машиностроения заключается в создании машин и аппаратов с наименьшими затратами (умственных и физических) при выполнении необходимых функциональных задач. Выбор необходимых для этого материалов также подчиняется этому закону. После выбора материала определяется технологический метод изготовления деталей машин. В первую очередь это определяется масштабами производства (единичное, серийное, массовое). Также учитывается наличие оборудования, инструментов, их состояние и взаимосвязь с другими предприятиями и т.д.

При выборе материала детали учитывая вышеизложенное, в первую очередь выбор основывается на механических свойствах детали. После удовлетворения предъявляемым требованиям самым значимым является стоимость материала. Сложность этой задачи заключается в том, что выбрав дешёвый материал, можно с помощью термической обработки повысить его механические свойства до свойств дорогих материалов. В этом случае правильный выбор процессов термической обработки имеет очень большое значение.

Задача 1. В каких отраслях промышленности перспективно применение титана?

Задача 2. Какой термической обработке можно подвергнуть алюминиевые сплавы системы-Al-Cu (3%-Cu+97% Al)?

Задача 3. После искусственного старения алюминиевых сплавов как изменяется их прочность ?

Задача 4. Конструкции из дюралюминия соединяются заклёпками также из дюралюминия. При получении соединений расклёпыванием заклёпки в каком состоянии должны быть: 1) закаленные, 2) закаленные и естественно состаренные, 3) через 3-4 часа после закалки.

Задача 5. Почему магниевые сплавы плохо деформируются?

Задача 6. В оцинкованном железе каким образом цинк предохраняет железо от коррозии?

Задача 7. Из какого материала должны изготавливаться контакты трансформаторов большой мощности, чтобы противостоять дуговой эрозии: 1-медь; 2-алюминий, 3-вольфрам, 4- пористый вольфрам, насыщенный медью?

Задача 8- Определите вид связи частиц в полимерных материалах:

1-ковалент; 2-полярный; 3-ковалентная внутри макромолекулы; 4- полярная внутри макромолекулы.

Задача 9 В чем принципиальная разница процесса кристаллизации металлов и полимеров?

Задача 10. В чем принципиальная разница температуры кристаллизации металлов и полимеров?

Задача 11. Из морозостойкой резины (-20°C) изготовили ремень, для ременной передачи на большой скорости. Через определенное время при температуре 0°C из-за хрупкости ремня передача вышла из строя. В чем причина?

Задача 12. Какой полимерный материал можно использовать в качестве стойкого конструкционного материала?

Задача 13. Какие пластмассы используются для подшипников: 1-капрон, 2-фторопласт; 3-фторопласт-4.

Пример: Задача 3. После искусственного старения алюминиевых сплавов как изменяется их прочность ?

Старение алюминиевых сплавов

Старение сплавов серии бxxx производят для повышения механических свойств алюминиевых профилей. Степень этого повышения свойств зависит от типа сплава и условий старения. Эти условия различаются для:

- естественного старения, которое происходит “само собой” при комнатной температуре, и
- искусственного старения, которое проводят при повышенных температурах, около 160-200 °С.

Прочность сплавов серии бxxx прямо связана с их способностью сопротивляться движению дислокаций в ходе деформирования. При приложении к материалу напряжений в нем образуются и двигаются дислокации. С увеличением напряжений количество и плотность дислокаций,двигающихся в материале, возрастает до тех пор, пока, наконец, материал не разрушается.

Движение дислокаций тормозится из-за присутствия частиц Mg_2Si и поэтому прочность состаренного алюминиевого сплава возрастает. Размеры и плотность этих частиц контролируются параметрами старения. Небольшое количество мелких частиц β'' - Mg_2Si мало могут сделать, чтобы остановить дислокации, которые двигаются через материал, но когда их много они препятствуют движению дислокаций и это повышает прочность материала.

Если же частицы вырастают слишком большими (β' - Mg_2Si и β - Mg_2Si), их становится слишком мало из-за ограниченного содержания Mg и Si в алюминии. В этом случае дислокации легко обходят эти частицы и прочность материала снижается.

Это демонстрирует схематический график типичного искусственного старения на рисунке ниже.



Термическая обработка алюминиевого сплава 6060 (АД31)

Пик прочностных свойств достигается при большом количестве мелких частиц β'' -Mg₂Si. Для сплавов бxxx типичными параметрами искусственного старения являются температура 170 °C при выдержке 8 часов или 185 °C при выдержке 6 часов.

Рекомендуемые скорости и способы охлаждения профилей из сплавов бxxx

Сплавы		Минимальная скорость охлаждения, градус/мин	Сплошные профили толщиной до 10 мм	Сплошные профили толщиной более 10 мм
AA, EN	ГОСТ 4784			
6060	АД31	50	На спокойном воздухе или вентиляторами	Водовоздушное
6063	АД31	60	Вентиляторами	
6061	АД33	300	Водовоздушное	Водяное спрейерное
6082	АД35	300		

Для выполнения практической работы решается задача по заданию руководителя.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТАЛЕЙ

Цель работы. Изучение влияния процессов термической обработки на структуру и свойства углеродистых сталей.

Общие сведения.

Термическая обработка - это совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения, проводимых в определенной последовательности с определенной скоростью. Целью процессов термообработки является изменение свойств сплавов за счет изменения структуры.

Термической обработке подвергаются слитки, отливки, полуфабрикаты, сварные соединения детали машин, инструменты.

Все процессы термообработки делятся на предварительные и заключительные.

Предварительные виды термообработки: отжиг и нормализация, заключительные: закалка, отпуск, старение.

В качестве примеров изучения влияния термической обработки были выбраны стали: Ст40, Ст40Х и У12 (состав указан в табл. 1).

Образцы представляли собой цилиндры высотой 15мм, диаметром 15. Для структурных исследований готовили поверхность шлифованием, полировкой и травлением спиртовым раствором «царской водки» (1 часть азотной кислоты и 3 части соляной кислоты). Структуру исследовали на металлографическом микроскопе МИМ-7.

Для измерения микротвердости использовали прибор микротвердомер ПМТ-3. Испытание на твердость по сравнению с другими видами механических испытаний имеет ряд преимуществ. Во-первых, это экономичный и практичный метод исследования. Во-вторых, для данного испытания не требуется изготавливать специальные образцы.

В-третьих, размеры отпечатка настолько малы, что не портят поверхности детали.

Универсальной пропорциональности между макро- и микротвердостью нет. Однако приблизительное соотношение все же имеется, так для нагрузки 50-100гс зависимость между макротвердостью HV и микротвердостью Н_μ отвечает выражению $HV=(0.7-0.8)H_{\mu}$. А для перевода твердости по Викерсу в другие единицы существуют таблицы. В таблице 1 приведены химсоставы рассмотренных марок сталей.

Таблица 1

Химический состав в % материала

Марка стали	C	Si	Mn	Cr
У12	1,1-1,29	0,17 - 0,33	0,17 - 0,33	до 0,2
40	0,37 – 0,45	0,17 - 0,37	0,5 – 0,8	до 0,25
40X	0,36 – 0,44	0,17 - 0,37	0,5 – 0,8	0,8 - 1,1

Сначала была исследована исходная структура всех образцов. Исходные структуры сталей соответствуют равновесной структуре, указанной на стандартной диаграмме железо-углерод. Для инструментальной стали У12 это перлит + цементит, для сталей 40 и 40X это перлит + феррит. Твердость для сталей в исходном состоянии составила: У12=62HRC (микротвердость (Н_μ) составила 2300МПа), сталь 40=47 HRC (Н_μ=1570 МПа), сталь 40X =51 HRC (Н_μ=1670МПа).

Твердость инструментальной стали выше, чем углеродистый вследствие равновесной структуры — твердость цементита значительно выше, чем твердость феррита. Твердость стали 40X выше, чем у стали 40 за счет легированного хромом феррита.

Дальше все стали были подвергнуты отжигу — для сталей 40 и 40X были выбран полный отжит с режимом обработки: для стали 40 –

температура 800⁰С, для стали 40Х -850⁰С, время выдержки 30 минут; для стали У12 — выбрали неполный отжиг: температура 750⁰С, время выдержки 30 минут. Во всех случаях применили медленное охлаждение с печью. Для заэвтектоидных сталей (У12) полный отжиг, как правило, не применяют, чтоб избежать формирование грубой цементитной сетки, которая заметно снижает механические свойства стали.

После описанной обработки в стали У12 в аустените остается большое число нерастворившихся частиц цементита, которые служат центрами кристаллизации во время распада аустенита. В результате образуется структура зернистого перлита (сферодита, который состоит из ферритной матрицы с включениями цементита) (рис. 1 а). Зернистый перлит обладает меньшей твердостью. Эта структура приводит сталь к более устойчивому состоянию, снижает твердость и прочность, снимает внутренние напряжения и улучшает обрабатываемость стали. Твердость несколько снизилась 60HRC (Hц =2000МПа), что характерно для отожженных структур.

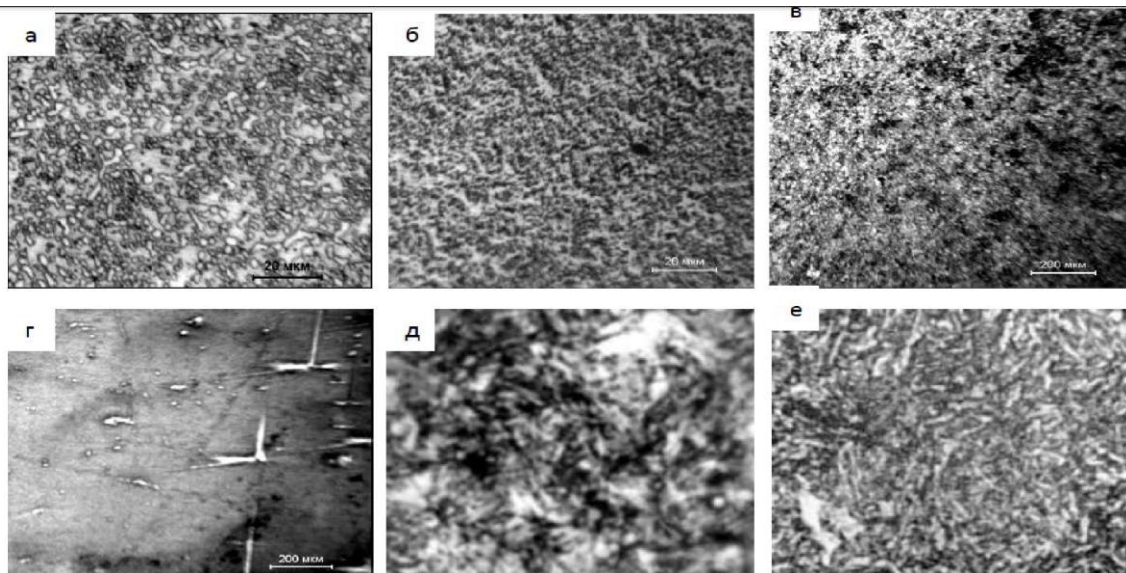


Рис. 1. Структура шей после термической обработки: а) отжиг У12, б) отжиг ст40, в) отжиг ст40Х, г) отжиг ст40Х(нетравленный образец), д) закатка У12, е) отпуск У12.

Отожженные стали 40 и 40X имеют схожие структуры - феррит - перлит (рис 1б, в), только в стали 40X еще наблюдаются карбиды хрома. Частицы хрома особенно заметны на нетравленной поверхности (рис. 1г). Твердость у этих сталей: после отжига также понизилась: для стали 40 = 8 HRC ($H_{\mu}=970$ МПа), для стали 40X = 43 HRC ($H_{\mu} = 1350$ МПа).

Оптимальный режим нагрева и отжига для заэвтектоидных сталей составляет $A_{C1} = (30-50^{\circ})$, т.е. для У12 — $700-780^{\circ}\text{C}$. При этом после закалки имеем мелкое зерно, обеспечивающее наилучшие механические свойства стали У12.

Нагрев и выдержка стали У12 при температуре 850°C перед закалкой приводит к росту зерна и ухудшению механических свойств стали после термической обработки.

Поэтому для закалки мы взяли ту же температуру, что и для отжига 750°C , выдержали 30 мин. и быстро охладили в воде. Структура после закалки — мартенсит с цементитной фазой (рис. 1 д).

При таком нагреве перлит полностью превращается в аустенит, а часть вторичного цементита остается не растворенной, структура состоит из аустенита и цементита. После охлаждения со скоростью больше критической аустенит превращается в мартенсит. Структура закаленной стали представляет собой пересыщенный твердый раствор углерода в железе, что вызывает сильные внутренние напряжения. Вследствие этого атомная решетка искажается, превращаясь из кубической в тетрагональную, а сталь приобретает хрупкость и легко разрушается при ударных нагрузках.

Структура закаленной стали состоит из мартенсита и цементита. Наличие в структуре закаленной заэвтектоидной стали кроме мартенсита еще и цементита повышает твердость и износостойкость стали ($H_{\mu} = 3580$ МПа).

Для стали У12 также провели высокий отпуск при температуре 400°С в течении 4 часов. Структура стали после закалки и высокого отпуска — сорбит отпуска (рис. 1е). микротвердость после отпуска уменьшилась и составила 2800 МПа.

Задание: Выбрать режимы термической обработки для Стали 45, У10 и привести в отчете.

ГЛОССАРИЙ

Термин	Значение на русском языке	Значение на английском языке
Алюминий	Алюминий — элемент 13-й группы периодической таблицы химических элементов, третьего периода, с атомным номером 13. Относится к группе лёгких металлов.	Aluminum is an element of the 13th group of the periodic table of chemical elements, the third period, with atomic number 13. It belongs to the group of light metals.
Вязкость разрушения	Вязкость разрушения — это относительное повышение растягивающих напряжений в устье трещины при переходе её от стабильной к нестабильной стадии роста. Вязкость разрушения тесно связана с показателями прочности материала. Увеличение прочности сопровождается снижением пластичности и вязкости разрушения	Fracture toughness is a relative increase in tensile stresses at the mouth of a crack during its transition from a stable to an unstable growth stage. Fracture toughness is closely related to the strength of the material. An increase in strength is accompanied by a decrease in ductility and fracture toughness.
Модуль упругости	Модуль упругости — общее название нескольких физических величин, характеризующих способность твёрдого тела упруго деформироваться при приложении к нему силы	Elastic modulus is the general name for several physical quantities that characterize the ability of a solid to deform elastically when a force is applied to it
Предел прочности	— механическое напряжение, выше которого происходит разрушение материала. Иначе говоря, это пороговая величина,	Strength limit - mechanical stress, above which material destruction occurs. In other words, this is a threshold

	превышая которую механическое напряжение разрушит некое тело из конкретного материала.	value, exceeding which mechanical stress will destroy a certain body made of a specific material.
Коррозионная стойкость	Коррозионная стойкость — способность материалов сопротивляться коррозии, определяющаяся скоростью коррозии в данных условиях. Для оценки скорости коррозии используются как качественные, так и количественные характеристики.	Corrosion resistance - the ability of materials to resist corrosion, which is determined by the rate of corrosion in a given environment. Both qualitative and quantitative characteristics are used to assess the corrosion rate.
Керамика	(др.-греч. κέραμος — глина) — изделия из неорганических материалов (например, глины) и их смесей с минеральными добавками,	(other Greek: κέραμος - clay) - products from inorganic materials (e.g. clay) and their mixtures with mineral additives.
Полимер	вещества, состоящие из «мономерных звеньев», соединённых в длинные макромолекулы.	substances consisting of "monomer units" connected into long macromolecules.
Пластмасса	материалы, основой которых являются синтетические или природные высокомолекулярные соединения (полимеры).	materials based on synthetic or natural macromolecular compounds (polymers).
Композит	многокомпонентные материалы, состоящие, как правило, из пластичной основы (матрицы), армированной наполнителями, обладающими высокой прочностью, жёсткостью и т. д.	multicomponent materials, consisting, as a rule, of a plastic base (matrix) reinforced with fillers with high strength, stiffness, etc.
	Химически простое вещество (а также сплав), обладающее особым блеском, ковкостью,	A chemically simple substance (and also an alloy) with a special luster, ductility, good thermal conductivity and electrical

Металл	хорошей теплопроводностью и электропроводностью.	conductivity.
Сплав	Система, состоящая из металлов и неметаллов, и обладающая металлическими свойствами.	A system composed of metals and non-metals with metallic properties
Структура	Понятие описывающее детали строения металлов и сплавов.	The concept that describes the details of the structure of metals and alloys.
Матрица	<i>это компонент, непрерывный во всем объеме конструкционного материала.</i>	it is a component that is continuous throughout the entire volume of the structural material.
Композиционный материал	Композиционный материал (композит , от латинского compositio - составление) - представляет собой, сложную многокомпонентную искусственную структуру, состоящую из матрицы (<u>связующего</u>) и <u>армирующего наполнителя</u> , с четко разделяющей их границей, при этом полученный материал характеризуется свойствами, которых нет ни у одного, взятого в отдельности, используемого компонента и использует преимущества каждого из них.	Composite material (composite, from the Latin compositio - composing) - is a complex multicomponent artificial structure consisting of a matrix (binder) and a reinforcing filler, with a clearly separating boundary, while the resulting material is characterized by properties that none of the materials taken separately, used component and takes advantage of each of them.
Армирующий элемент	<i>это прерывистый, разъединенный в объеме композиции материал. Термин «армирующий» означает «введенный в материал с целью изменения его свойств» (не обязательно «упрочняющий»).</i>	it is a discontinuous material, separated in the volume of the composition. The term "reinforcing" means "introduced into a material to change its properties" (not necessarily "reinforcing").

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по конструкционным материалам: Справочник/ Б.Н. Арзамасов, Т.В. Соловьева, С.А. Герасимов и др.; Под ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 640 с.: ил.
2. Конструкционные материалы в самолетостроении/А.Г. Моляр, А.А. Коцюба, А. С. Бычков, О.Ю. Нечипоренко – К.: КВИЦ, 2015. – 400 с.
3. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов / Г.М. Гуняев, В.В. Кривонос, А.Ф. Румянцев, Г.Ф. Железина. – М.: Журнал «Конверсия в машиностроении», № 4, 2004 г.
4. Р.Х. Сайдахмедов, Қ.К. Қодирбекова Yangi materiallar. Т.: “Fan va texnologiyalar.” 2015., 141б.
5. В.Н. Климов, Д.М. Козлов. Современные авиационные конструкционные сплавы. Учеб.пособие. Самара., 2017. 46с.
6. *Братухин А.Г. Современные авиационные материалы: технологические и функциональные особенности.* М. АвиаТехИнформ XXI век. 2001г. 418 с.илл.
7. Inagaki & Kang, Materials Science and Engineering of Carbon: Fundamentals, 2nd Edition, Elsevier 2014
8. Callister William D., Materials science and engineering, Wiley and Sons UK, 2015
9. T Fischer, Materials Science for Engineering Students, 1st Edition, Elsevier 2008
10. Materials Science and Technology, W.F. Smith, MacGrawHill, 4 International Ed., 2004.
11. R.A. Higgins - Materials for engineers and technicians. 2006.
12. Meyers-Chawla - Mechanical Behavior of Materials 2nd ed 2009

13. Hua Zhao. Advanced direct injection combustion engine technologies and development. Volume 1: Gasoline and gas engines. USA. Woodhead Publishing Limited, 2010.

14. Hua Zhao. Advanced direct injection combustion engine technologies and development. Volume 2: Diesel engines. USA. Woodhead Publishing Limited, 2010.

15. Maximino Manzanera. Alternative Fuel. Croatia. InTech, 2011.

16. The Renewable Energy Home Handbook: Insulation & energy saving, Living off-grid, Bio-mass heating, Wind turbines, Solar electric PV generation, Solar water heating, Heat pumps, & more. Lindsay Porter. 2015, Veloce Publishing

17. Richard Folkson, Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance. Woodhead Publishing Limited, 2015

18. Гуляев, А.П., Гуляев, А.А. Металловедение: Учебник для вузов / А.П. Гуляев, А.А. Гуляев, 7-е изд., перераб. и доп. М, ИД Альянс, 2011. – 644 с.

19. Материаловедение: учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др. Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 648 с.

20. Материаловедение и технология металлов: учебник для вузов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др. М.: Высш. шк., 2002. – 638 с.

21. Лахтин, Ю.М., Леонтьева, В.П. Материаловедение: учебник для вузов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева, М.: Альянс, 2011. – 448 с.

Интернет ресурсы:

1. <http://www.ziyonet.uz>
2. <http://www.edu.uz>
3. <http://www.infocom.uz>

4. <http://www.press-uz.info>
5. <http://www.fueleconomy.gov>
6. Информационный интернет-ресурс
«Авиационное материаловедение - Всё для студента» <https://www.twirpx.com/>
7. Информационный интернет-ресурс «Металлургический портал» – <https://metallplace.ru/>