

УДК 620.22.-419:669.71
620.22.004:629.7

Ромашко И.М., Лагуткин А.Н., Лускань Ю.В., Иванова О.В., Нечипоренко О.Ю.
ГП "АНТК им. О.К. Антонова". Украина, Киев

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОНСТРУКЦИЯХ САМОЛЕТОВ "АН"

Анотація

Представлені результати досліджень багатонавантажених та функціональних елементів конструкцій з металевих композиційних матеріалів (МКМ) і біметалів різноманітних структурних виконань. Дана оцінка ефективності композиційних структур з МКМ і біметалів в порівнянні з конструкціями, що виконані з традиційних сплавів.

Abstract

The results of the investigations of the aircraft construction s high-loaded and functional element from metallic composite materials (MCM) and bimetals of the different structured performances are presented. It is given estimation to efficiency of the composite construction from MCM and bimetals in contrast with construction executed from traditional materials.

Для повышения весовой эффективности, ресурса и надежности самолетов "АН" большое значение уделяется композиционным материалам (КМ) на полимерной и металлической матрицах. Композиционные материалы на металлической матрице (МКМ) обладают значительным потенциалом применения в легких конструкциях, демонстрируя высокий уровень удельной прочности и жесткости, усталостной долговечности, хорошую износостойкость и отличные характеристики при повышенных температурах по сравнению с традиционно применяемыми сплавами. Эти материалы исследуются и применяются при изготовлении самолетов, космических аппаратов, ракет и

двигателей, обеспечивая значительное снижение массы конструкций [1-11].

С использованием борных и углеродных волокон ВИАМ разработаны и паспортизированы высокомодульные, высокопрочные МКМ с алюминиевой матрицей. Ведутся работы по реализации уникально высокой прочности нитевидных кристаллов карбида кремния в МКМ. В табл. 1 приведены сравнительные свойства МКМ и широко применяемых в авиационной промышленности титановых сплавов и стали.

Казалось бы, материаловедение сделало большой шаг вперед, позволяющий в 2-3 раза повысить прочностные и жесткостные характеристики конструкционных материалов. Однако при освоении производства элементов конструкций и деталей сложной формы возникли проблемы, связанные с их обработкой. Все это наряду с анизотропией волокнистых структур, а также высокой стоимостью армирующих наполнителей, позволило найти им применение только в отдельных отраслях. В последнее десятилетие широкое развитие получили МКМ, упрочненные относительно дешевыми порошковыми частицами карбида кремния (SiC) и некоторыми кристаллами. Эти МКМ по сравнению с КМ волокнистой структуры обладают невысокой стоимостью, способностью к механической обработке и формообразованию, изотропностью физико-механических характеристик. Фирмы, разрабатывающие такие материалы, находятся в США, Японии, Англии и в России [3-6].

В зависимости от расположения компонентов в МКМ практический интерес представляют несколько групп

Таблица 1

Свойства металлических композиционных материалов в сравнении с алюминиевыми, титановыми сплавами и стали

Материал	Свойства									
	γ	σ_b	$E \cdot 10^3$	σ_B^{400}	σ_{-1}	a_n	σ_{-1}^L	МЦУ	σ_n/γ	E/γ
	г/см ³	МПа				Дж/см ²	МПа		усл. ед. (км)	
ВКА-2	2,6	1300	235	950	650	30	180	650	50	8000
ВКУ-1	2,25	820	230	800	300	10	60	580	36	10000
ВКМ-1	2,15	1300	220	800	500	40	-	700	60	12300
КАС-1А	4,74	1500	117	950	480	80	280	520	33	2470
Д16	2,78	420	72	-	80	20	400	150	15	2590
ВТ-22	4,5	1270	115	800	500	25	1110	650	28	2490
30ХГСА	7,85	1100	200	920	300	46	1060	500	14	2550

Примечание: ВКА-2 – боралюминий с 50% борного волокна; ВКУ-1 – углслюминий с 45% углеродного волокна; ВКМ-1 – магниевый бор с 50% борного волокна; КАС-1А – сталслюминий (40% проволоки ВНС-9); Д16 – алюминиевый сплав; ВТ-22 – титановый сплав; 30ХГСА – сталь.

материалов, которые исследовались применительно к самолетам "АН".

БОРАЛЮМИНИЕВЫЕ КМ. Среди волокнистых МКМ более широко исследуются боралюминиевые КМ. В настоящее время уже определились вполне конкретные области их применения. Конструкционная эффективность боралюминиевых КМ определяется высокими удельными характеристиками прочности и жесткости, более высоким сопротивлением усталостному разрушению по сравнению с традиционными материалами [1–7].

Применительно к элементам конструкций опробованы различные варианты структур боралюминиевых материалов. Разработаны технологические процессы изготовления профилей и труб из листовых заготовок с использованием методов гибки и сварки. Так, например, из боралюминиевых материалов изготавливают элементы конструкций типа трубчатых подкосов, балок и ряд других конструкций, в составе которых использованы одношовные сварные трубы, Z- и П-образные профили и листы. В качестве матриц использовались алюминиевые сплавы АД1 или АД33, а плакировка выполнялась из сплавов АД33, Д16 или Д20. В таких МКМ объемное содержание волокон составляет от 15 до 55%.

Эффективность применения боралюминиевых КМ показана на примере изготовления трубчатых подкосов шасси (рис. 1).

По разработанной технологии изготовления конструкции из МКМ и с оптимизацией структуры материала обеспечено снижение ее веса до 60% по сравнению с аналогичной конструкцией, выполненной из стали 30ХГСА. В конструкции использованы трубчатые элементы, полученные из боралюминиевых листов методом гибки с последующей сваркой продольного шва трубы. Соединение труб из КМ (1 на рис. 1, б) с титановыми законцовками (2 на рис. 1, б) выполнено диффузионной сваркой.

При статических и повторно-статических испытаниях на растяжение–сжатие подкосов из КМ разрушающие

нагрузки для конструкций превышали расчетные в 1,5–2,0 раза. После усталостных испытаний остаточная прочность материала труб при осевом растяжении составила 780–880 МПа, а при сжатии – 740–800 МПа (исходная прочность КМ при растяжении составляла 1250–1287 МПа). Установлено, что наиболее высокая прочность КМ реализуется в комбинированных соединениях. Коррозионно-усталостные испытания образцов раскосов подтвердили высокую работоспособность элементов диффузионного соединения боралюминиевых труб с законцовкой из титанового сплава.

На примере изготовления боралюминиевых балок, работающих в условиях сложного нагружения (одновременное действие растяжения–сжатия, изгиба и кручения), показана возможность применения сварных П-образных профилей, изготовленных из листов КМ (рис. 2).

Выполненный комплекс работ по оптимизации геометрических и структурных параметров листов КМ позволил разработать технологические процессы изготовления профилей швеллерного сечения. При этом соединение полос из КМ (1 на рис. 2, в) выполнялось аргонодуговой сваркой (2 на рис. 2, в–г), а соединение профилей из КМ (3 на рис. 2, б) с титановыми законцовками (4 на рис. 2, б) – методом диффузионной сварки (5 на рис. 2, б). Применение КМ в данной конструкции позволило снизить ее вес на 50% и увеличить ресурс по сравнению с аналогичной конструкцией из стали 30ХГСА.

Проведенный комплекс лабораторных и стендовых испытаний конструкций различного типа из боралюминиевых КМ позволил опробовать КМ в трубчатых подкосах шасси самолета АН-124 "Руслан". При этом снижении веса подкосов составило около 60%. Трубчатые раскосы шасси и балки швеллерного сечения из боралюминия внедрены в конструкциях самолета АН-70, что обеспечило снижение их веса на 100 кг.

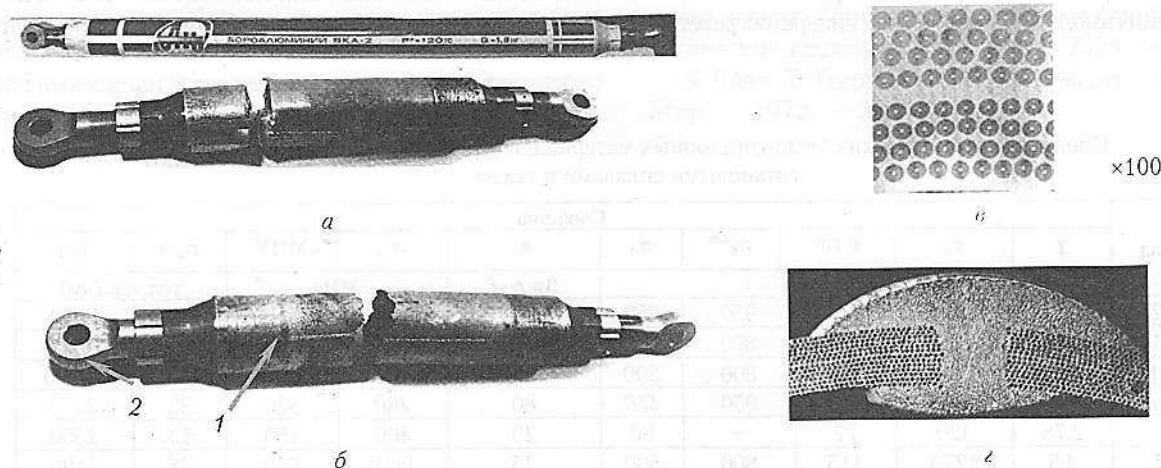


Рис. 1. Характер разрушения образцов боралюминиевых подкосов после статических испытаний (а, б);
микроструктура образца трубы (в);
макροструктура сварного соединения трубчатого элемента (г).
1 – труба из КМ; 2 – титановая законцовка.

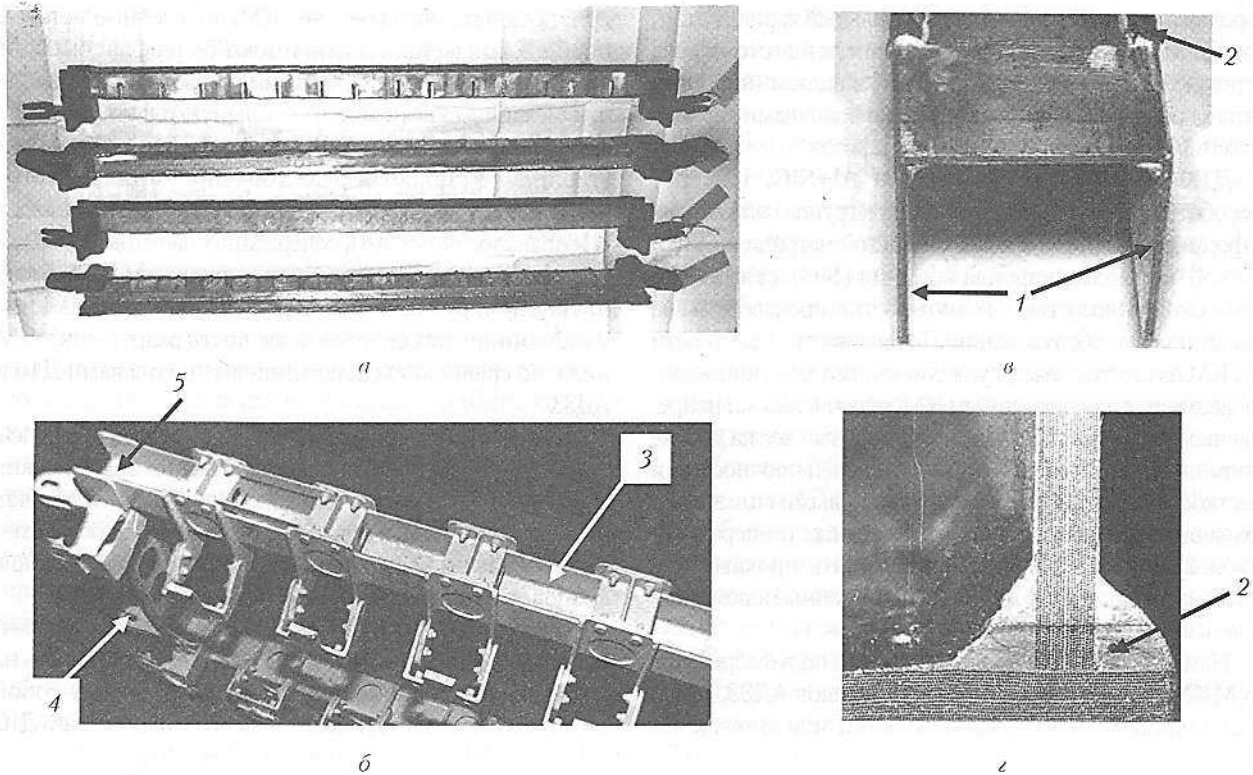


Рис. 2. Конструкция балки из боралюминия:

а – боралюминиевый профиль с титановыми законцовками; б – профиль в сборке; в – фрагмент сечения сварного профиля; г – макроструктура сварного соединения.
 (1 – полосы из КМ; 2 – аргодуговая сварка; 3 – профили из КМ; 4 – титановые законцовки; 5 – место соединения диффузионной сваркой)

С учетом результатов проведенных исследований определена группа перспективных элементов конструкций, в составе которых эффективно могут быть использованы МКМ с непрерывными волокнами. В зависимости от типа конструкции и структуры КМ и других особенностей экономия веса может составлять от 15 до 60%, при одновременном улучшении технологичности обработки материала (гибки, сварки). На рис. 3 показана перспективная

конструкция плоского подкоса из КМ, предназначенного взамен штамповки из стали. Соединение законцовок, состоящих из титанового сплава (1 на рис. 3, а), с полосами из КМ (2 на рис. 3, а) выполнено диффузионной сваркой, а соединение листов КМ с алюминиевой вставкой – сваркой плавлением.

Проведенный комплекс исследований по волокнистым МКМ на алюминиевой матрице позволил рассматривать

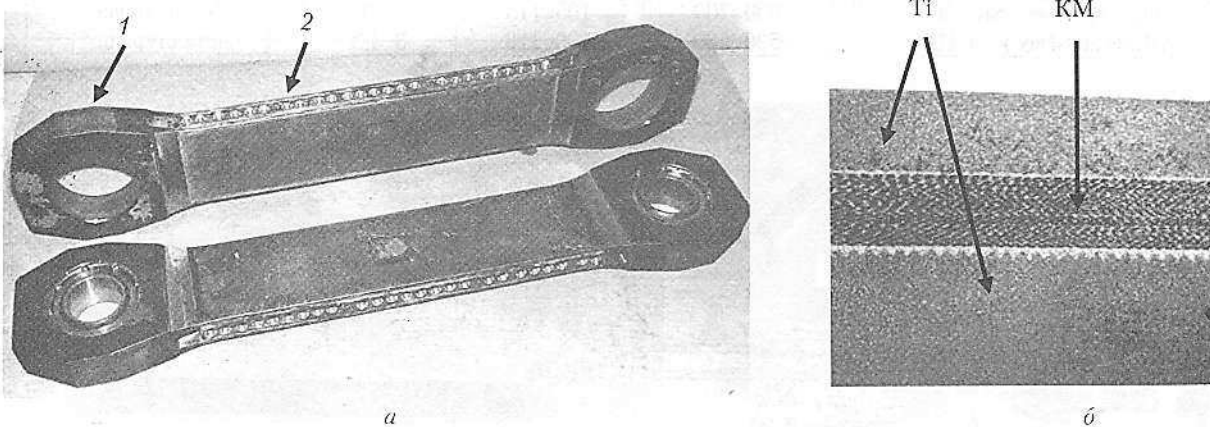


Рис. 3. Конструкция плоского подкоса из боралюминия (а) и макроструктура диффузионного соединения полос из КМ с титановой законцовкой (б)
 1 – титановая законцовка; 2 – полоса из КМ

боралюминиевый материал как модельный вариант этого класса МКМ. Среди других материалов этого класса перспективными считаются МКМ на алюминиевой и титановой матрице с более дешевыми волокнами карбида кремния, оксида алюминия или графита.

ДЕФОРМИРУЕМЫЕ МКМ Al+SiC. Интерес разработчиков авиационной техники к группе изотропных деформируемых МКМ на алюминиевой матрице, армированной частицами карбида кремния (SiC), связан с их невысокой стоимостью и возможностью производства на традиционном оборудовании. По прочности и жесткости эти МКМ находятся между существующими алюминиевыми сплавами и высокопрочными МКМ, упрочненными непрерывными волокнами. Они имеют удельный вес на уровне алюминиевых сплавов, обладают большей прочностью и жесткостью по сравнению с алюминиевыми сплавами и сохраняют свои свойства при повышенных температурах (табл. 2). Такие МКМ можно прессовать, прокатывать, ковать и сваривать, так же как и традиционные алюминиевые полуфабрикаты [3, 8–10].

Нами исследованы опытные образцы полуфабрикатов из МКМ на основе алюминиевых сплавов АД33, Д16 и др., содержащие от 15 до 40 об. % частиц или нитевидных

кристаллов карбида кремния. МКМ, полученные методом порошковой металлургии, имеют более равномерное распределение частиц SiC и, таким образом, более стабильные механические свойства и большую пластичность по сравнению с МКМ, полученными по литейной технологии (табл. 3). Усталостная долговечность для МКМ – АД33+20 об. % HKSiC несколько выше, чем для сплава Д16 и аналогичных МКМ, содержащих частицы SiC. Скорость роста усталостной трещины в таких МКМ независимо от типа армирующего наполнителя в 3–5 раз выше, чем у алюминиевых сплавов, а вязкость разрушения МКМ ниже по сравнению с алюминиевыми сплавами Д16 и АД33.

При изготовлении деталей из прессованных профилей, труб и прутков МКМ проводилась оценка технологических свойств, а именно: операции холодной обработки; гибки, подсежки профилей, а также операции горячей обработки металлов давлением; свободнойковки и формообразование концов труб для подкосов (рис. 4).

Свариваемость МКМ оценивали при контактной точечной сварке и плавнении. Установлено, что прочность на срез сварной точки для сочетаний МКМ между собой несколько выше, чем для аналогичных сочетаний сплава Д16.

Таблица 2

Свойства МКМ (Д16+20% вес. частиц SiC) в сравнении с высокопрочными алюминиевыми и титановыми сплавами

МКМ, сплав	Свойства						
	γ , г/см ³	σ_B , МПа	E, ГПа	δ , %	КТР $\alpha \cdot 10^6, 1/К$	σ_B/γ , км	E/ γ , км
Д16+20% (вес.)SiC	2,9	650	107	3	17	22,4	3800
Д16	2,7	420	72	10	23	16	2700
В95	2,78	520	72	24	23	19	2700
ВТ6-С	4,5	1050	120	7	20	24	2600

Таблица 3

Механические свойства исследуемых МКМ, содержащих нитевидные кристаллы или частицы карбида кремния

Состав МКМ	σ_B , МПа	E, ГПа	δ , %	Технология изготовления
Д16+20% HKSiC	650–700	100–110	1–3	Литейная
АД33+20% HKSiC	550–600	100–110	2–4	
Д16+20%(вес) SiCHK	630–700	105–115	2–3	Порошковая металлургия
АД33+20%(вес) SiCHK	530–580	100–110	3–4,3	

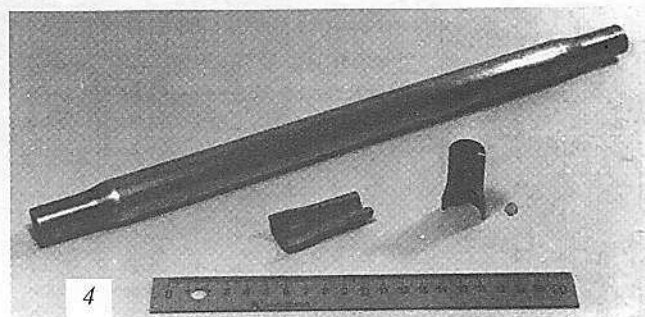
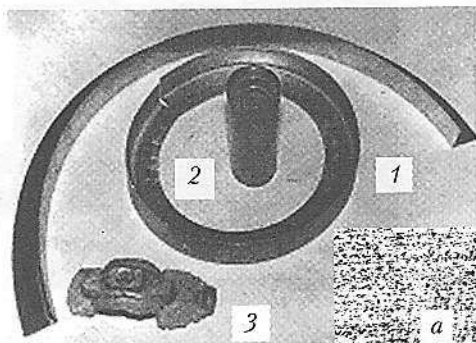


Рис. 4. Детали, полученные из МКМ Al+SiC (20% об.) методом гибки из профиля (1), механической обработкой (2), горячей штамповкой (3) и формообразованием концов труб (4), микроструктура МКМ (а)

Это связано с тем, что жесткость КМ выше, поэтому вероятность разрушения сварной точки путем отрыва уменьшается. Проведенные работы подтвердили возможность выполнения указанных операций для практического использования при обработке заготовок из МКМ.

Оценка свойств МКМ этой системы показала пригодность таких материалов для изготовления элементов авиационных конструкций, а также необходимость совершенствования технологии изготовления материалов.

БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ. К классу МКМ условно относятся биметаллические и многослойные материалы (состоящие из двух и более составляющих), обладающие комплексом необходимых свойств, которые невозможно получить на традиционно применяемых материалах. Применение таких материалов позволяет улучшить весовые характеристики, повысить надежность и долговечность изделий и разработать принципиально новые конструкции и технологии их изготовления [10, 11]. Свойства применяемых биметаллических материалов в конструкциях самолетов представлены в табл. 4.

Биметаллические листы Д16+ВТ1-0 нашли применение в обшивках низа фюзеляжа, перегородках, накладках, балках, контейнерах и др. деталях. Этот биметалл получают совместной прокаткой листовых заготовок из титана ВТ1-0 и алюминиевого сплава Д16. Толщина плакирующего слоя ВТ1-0 не превышает 0,3 мм на листах толщиной 0,8–2,5 мм. Материал используется для элементов конструкций, подверженных повышенному износу и воздействию коррозионно-активных сред.

Биметаллические материалы на основе алюминия АД1, плакированного медью М1 (лист АПМ-2 и пруток ПАМ) используются в конструкциях шинопроводов бортовых систем самолетов АН-124 и АН-70 (рис. 5).

Выбор биметаллических материалов обусловлен конструктивными и технологическими требованиями к шинопроводам бортовых систем. Конструктивные требования обусловлены тем, что электрошина из биметалла по своим электрическим характеристикам должна соответствовать медной шине, но при этом иметь меньший вес и быть более коррозионноустойчивой. Толщина плакирующего слоя меди составляет 0,2–0,3 мм, что обеспечивает требуемую электропроводность и минимальные радиуса изгиба электрошин.

Листовой биметаллический материал на основе алюминия АД1, плакированный сталью 12Х18Н10Т, опробован в элементах конструкций, подверженных повышенному износу и воздействию коррозионноактивных сред. Толщина плакирующего слоя стали составляет не менее 0,17 мм в листах толщиной 1,0–2,5 мм.

Среди других биметаллических материалов перспективными считаются композиции на основе алюминиевых сплавов, а именно: 01420+ВТ1-0, Амг6+ВТ1-0, Д16+ОТ4 и др.

Выводы.

МКМ уже нашли практическое применение в авиакосмической технике, однако некоторые из них еще находятся в стадии разработки и требуют дальнейших исследований,

Механические свойства биметаллических материалов, применяемых в самолетах "АН"

Таблица 4

Биметалл (полуфабрикат)	Толщина плакировки(мм)	Свойства		
		σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Д16+ВТ1-0 (лист)	0,25 (ВТ1-0)	450	320	12,0
АД1+М1 (АПМ-2) (лист)	0,25 (М1)	120	90	16,0
А5Е+М1Р (ПАМ) (пруток - \varnothing 8-10 мм, шина -5x15)	0,25-0,35	100	90	25,0
АД1+12Х18Н10Т (лист)	0,17 (12Х18Н10Т)	100	-	20,0

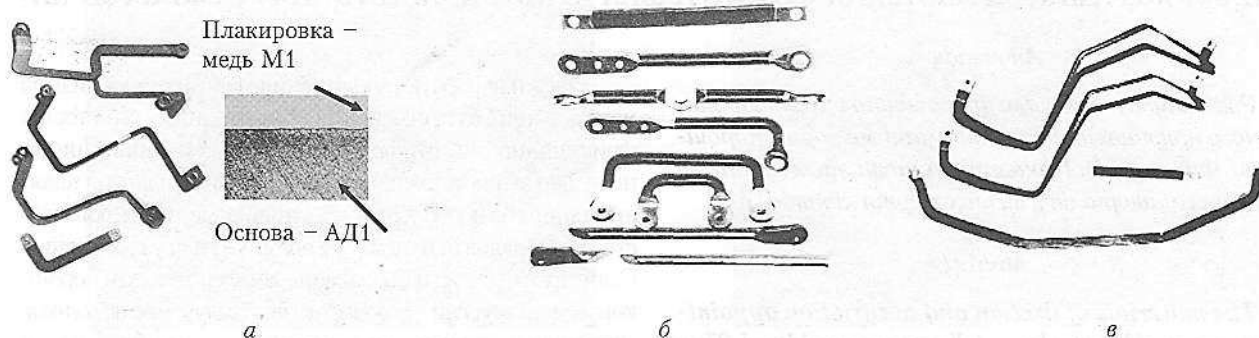


Рис. 5. Электрошины, полученные из биметалла алюминий-медь из листа (а), прутка (б) и полосы прямоугольного сечения (в)

начиная с методов структурного анализа и до способов их изготовления.

Накопленный опыт изготовления грубчатых элементов и других конструкций из боралюминия подтверждает высокую весовую эффективность использования МКМ в силовых конструкциях. Исследования показали, что существуют резервы для весового совершенствования стержневых и других конструкций в самых МКМ, которые имеют большие разбросы несущей способности, а также в металлических законцовках, вес которых может достигать до 30–40% от общего веса конструкций. Уменьшить весовые затраты можно совершенствованием структуры МКМ и применением законцовок из МКМ на алюминиевой матрице, содержащих частицы карбида кремния.

Исследования показали, что разнообразные МКМ могут найти применение в конструкциях самолетов при условии разработки эффективной по стоимости технологии их производства, и в случае, если МКМ, армированные непрерывными волокнами, будут конкурентноспособными с ПКМ типа углепластика, а МКМ, армированные частицами, конкурентно-способными с алюминиевыми сплавами.

Для достижения приоритетного направления в производстве конструкций из МКМ необходимо совершенствовать традиционные технологии обработки металлов, накапливать базу данных по свойствам различных классов МКМ, разрабатывать новые методы конструирования деталей, испытывать модельные образцы и натурные конструкции в реальных условиях эксплуатации.

Литература

1. *Перевод КМЗ №3152.* Создание композиционных материалов с металлической матрицей – мечта конструкторов / Перевод с англ. В. П. Репало – К.: КМЗ. – 1991. – 7 с.: ил.

2. *Перевод КМЗ №3153.* Композиционные материалы с металлической матрицей – материалы будущего / Перевод с англ. В. П. Репало. – К.: КМЗ. – 1991. – 20 с.: ил.

3. *Конструкции* из металлических композиционных материалов. / Под общ. ред. Г.А. Кривога. – К.: Техника. – 1992. – 223 с.

4. *Салибеков С.Е., Строганова В.Ф.* Современное состояние и перспективы развития композиционных материалов с металлической матрицей. // *МиТОМ.* – 1984. – №8. – С. 2–8.

5. *Изготовление* и механические характеристики композиционного материала с алюминиевой матрицей, армированного волокнами бора или карбида кремния. Перевод с англ. – К. – 1989. – 4 с.

6. *Достижение* в области КМ.: Сборник научных трудов под редакцией Дж. Пиатти. Перевод с англ. – М.: Металлургия, 1982. – 304 с.

7. *Композиционные материалы* в машиностроении. / П.П. Филиповский, Т.В. Грудина, А.Б. Сапожникова и др. – К.: Техника, 1990. – 340.

8. *Л.Р. Вишняков, Н.П. Ониськова, И.М. Ромашко* и др. Технологическое освоение композиционного материала системы Al-SiC // *Технология легких сплавов.* – 1996. №3. – С. 64–69.

9. *Л.Р. Вишняков, Н.П. Ониськова, И.М. Ромашко, А.И. Грибков.* Влияние механического легирования на свойства порошковых металлокомпозиций системы Al-SiC // *Порошковая металлургия.* – 1997. – №11/12. – С. 38–43.

10. *Зарипин Ю.Л.* и др. Производство композиционных материалов обработкой давлением: Справочник. Ю.Л. Зарипин и др. – М.: Металлургия. – 1991. – 349 с.

11. *Король В.К., Гильденгорн М.С.* Основы технологии производства многослойных металлов. – М.: Металлургия. – 1970. – 238 с.

УДК 620.22.004:629.7
621.762:669

Моляр А.Г., Нечипоренко О.Ю., Семенченко В.П., Ромашко И.М.
ГП "АНТК им. О.К. Антонова". Украина, Киев

МЕТАЛЛОКЕРАМИКА ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ САМОЛЕТОВ "АН"

Анотація

Розглянуті матеріали фрикційного та антифрикційного призначення, що отримані методом порошкової металургії. Показані області застосування вказаних матеріалів у вузлах тертя літаків "АН".

Abstract

The materials of friction and antifriction appointments received by powder metallurgy are considered. They are shown application of the specified materials in friction assembly for airplanes "AN".

Надежная работа узлов трения машин и механизмов невозможна без применения современных материалов фрикционного и антифрикционного назначения. Применительно к триботехнике порошковая металлургия является одним из наиболее перспективных методов производства материалов (т.н. металлокерамики) для узлов трения. Стандартная схема изготовления деталей методом порошковой металлургии включает в себя получение порошков металлов и сплавов, их дополнительную обработку и смешивание, прессование порошковой пихты с целью получения заготовок заданной формы и размеров, спекание