

УДК 620.18:620.17

## **ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМ АРМИРОВАНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЛИСТОВЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ МКМ А1-В, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ НИХ**

Александра Игоревна Степанова

*Студенка 5 курса*

*кафедра «Материаловедение»*

*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана*

*Научные руководители: Ю. А. Быков<sup>(1)</sup>, О. П. Баженова<sup>(2)</sup>,*

*<sup>(1)</sup> доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение»,*

*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана*

*<sup>(2)</sup> ФГУП «НПО им. С. А. Лавочкина»*

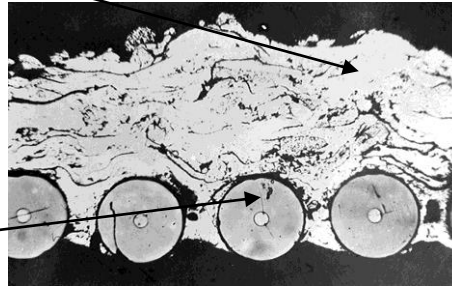
Улучшение весовых характеристик изделий ракетно-космической техники невозможно без применения в конструкциях материалов с более совершенными эксплуатационными свойствами. Металлические композиционные материалы (МКМ), армированные высокопрочными и высокомодульными волокнами, обладают высокой конкурентоспособностью по сравнению с традиционными материалами, используемыми в данной области. Уникальные свойства МКМ связаны с возможностью достижения высоких значений прочности, упругости в сочетании с малой плотностью. Важной особенностью этих материалов является возможность регулирования механических свойств путем выбора соответствующей схемы армирования, исходя из требований к конструкциям, в которых он применяется. Одной из наиболее перспективных, для создания элементов конструкций летательных аппаратов, считается композиция алюминий – борные волокна. Отличительным признаком композитов этого класса является тот факт, что они одинаково эффективно работают в условиях приложения, как растягивающих, так и сжимающих нагрузок. Поэтому, с точки зрения проектировщика и конструктора, этот материал является незаменимым при создании ферменных высоконагруженных конструкций, длинномерных штанг, крупногабаритных платформ для установки приборов различного назначения, тубусов телескопов и целого ряда других агрегатов космических аппаратов.

Оценка свойств композита должна быть произведена на образцах, изготовленных по одной технологии и с соблюдением тех же термомеханических параметров изготовления, что и предполагаемые элементы конструкции. Область исследования характеристик материала должна быть также взаимосвязана с условиями эксплуатации конструкции. Поэтому настоящая работа достаточно полно охватывает почти все основные виды испытаний листов из МКМ А1-В с разными схемами армирования в диапазоне температур от 20 до 250 °С.

Листы из МКМ А1-В изготавливаются методом горячей прокатки пакета монолент-полуфабрикатов, представляющих собой однослойные композиционные материалы с матрицей из алюминиевого сплава АМг6. Монолента-полуфабрикат изготавливается методом плазменного напыления матрицы на вращающийся барабан с намотанными на

него с заданным шагом волокнами бора. Микроструктура моноленты в разрезе показана на рис. 1.

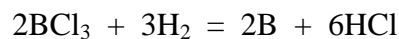
Алюминий АМг6  
(плазменное напыление)



Волокно бора Ø140мкм

Рис. 1. Микроструктура моноленты (поперечное сечение)

Борные волокна получают осаждением бора из газовой фазы на нагретую до температуры 1100-1200°C поверхность вольфрамовой нити диаметром от 12.5 до 16 мкм. Осаждение бора путем восстановления его из трихлорида бора протекает в среде водорода по реакции:



Волокна не токсичны, взрывобезопасны, не выделяют в окружающую среду вредных паров и газов.

Шаг укладки волокна составляет 0,18 мм. В процессе получения монолент используются волокна бора без защитных покрытий, плазменное напыление матрицы осуществляется на воздухе. Полученная матрица имеет пористую структуру, толщина моноленты-полуфабриката после изготовления равна 0,31 мм с разнотолщиной 0,07мм, а толщина монослоя после прессования в многослойной листовой заготовке составляет  $0,16 \div 0,18$  мм.

Применение процесса плазменного напыления матрицы на поверхность намотанных на оправку волокон преследует одновременно две цели:

- закрепление (фиксация положения) уложенного волокна;
- предварительное распределение волокна в матрице.

При сборке пакетов различных схем армирования между слоями моноленты прокладываются слои из алюминиевой фольги АД1 толщиной 20 мкм. На наружные поверхности пакетов в виде плакировочных слоев укладываются слои той же самой фольги, но уже толщиной 50 мкм. При ортогональной схеме армирования фольга внутри пакета монолент необходима для гарантированного исключения возможности дробления волокон, а в однонаправленной структуре - для соблюдения одинаковых условий (в сравнении с ортогональной схемой) изготовления и взаимодействия волокон бора с матрицей, а также уменьшения разницы значений объемной доли волокон для различных структур армирования. Кроме того, при уменьшении объемной доли волокон, прочностные характеристики материала в поперечном направлении и при сдвиге возрастают и становятся более стабильными.

Технологический процесс изготовления изделий из металлокомпозита Al-B должен обеспечивать:

- заданное упорядоченное распределение волокон бора в алюминиевой матрице;
- заданное объемное соотношение между волокном и матрицей;
- прочную связь по границе «волокно – матрица»;

- отсутствие значительных потерь свойств исходных компонентов;
- получение монолитного материала без пор, трещин и расслоений;
- получение изделия требуемой формы.

В общем виде технология получения изделий из бороалюминия, разработанная в России, включает:

- изготовление монослойного полуфабриката в виде слоя однонаправленных волокон, уложенных с определенным шагом и скрепленных матричным сплавом, нанесенным с помощью плазменного напыления;
- раскрой полуфабриката на карточки требуемой формы;
- сборку многослойной заготовки изделия путем выкладки монослоев полуфабриката;
- горячее прессование многослойной заготовки.

Горячее прессование многослойной заготовки изделия производится в следующем режиме:  $T = 450-540^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 50-70 \text{ МПа}$ ,  $t = 10-40 \text{ мин}$ . Указанные пределы технологических параметров являются оптимальными, поскольку обеспечивают наиболее высокий уровень прочностных характеристик бороалюминия, что было подтверждено экспериментально.

Выбор таких параметров обусловлен следующим:

- температура прессования должна обеспечивать достаточную пластичность матричного материала, способствующую его распределению и уплотнению, а также диффузионную сварку, как между отдельными монослоями полуфабриката, так и между волокнами и алюминиевой матрицей. Одновременно температура прессования не должна быть высока настолько, чтобы в процессе прессования прошло заметное химическое взаимодействие между алюминиевой матрицей и борными волокнами, приводящее к деградации волокон;
- продолжительность прессования определяется скоростями деформации матричного сплава и протекания диффузионных процессов в матричном сплаве и по границе раздела волокно-матрица и, следовательно, зависит от величины температуры прессования. Чем выше температура прессования, тем меньше его продолжительность и наоборот;
- величина давления прессования должна обеспечивать пластическое течение матричного сплава и, тем самым, образование физического контакта между слоями полуфабриката, а также между волокнами и матрицей в прессуемой заготовке. Причем выбраны величины, близкие к нижнему порогу, поскольку увеличение давления прессования не оказывает влияния на протекание диффузионных процессов, но в то же время требует применения более мощного оборудования и повышает вероятность механического повреждения волокон.

Микроструктура листа после горячего прессования многослойной заготовки приведена на рис. 2.

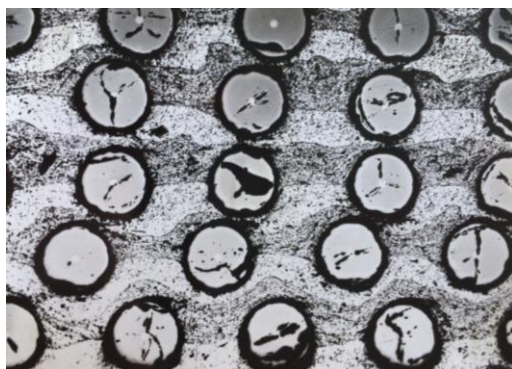


Рис. 2. Микроструктура листа МКМ


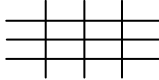
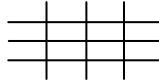
Монослойный полуфабрикат представляет собой, в основном, механическое соединение волокон и матричного сплава и требует дальнейшей обработки в части уплотнения матричного сплава и образования прочной диффузионной связи между волокном и матрицей. Раскрой полуфабриката на карточки прямоугольной формы, которые требуются для изготовления листов, производится вручную с помощью специального ножа-резака. Сборка из карточек многослойных заготовок изделия осуществляется также вручную.

Бороалюминиевые листы-карточки имеют размеры  $400 \times 400 \times h$  мм, где  $h$  – варьируемая толщина листа. Заготовка листа осуществляется путем последовательной укладки карточек в виде пакета по заданной схеме. Многослойный пакет затем помещают между обогреваемыми плитами прессы и подвергают горячему прессованию. В опытах используют не менее 9 образцов каждого типа укладки карточек.

При изготовлении однонаправленных бороалюминиевых листов типа А толщиной 1 мм заготовка содержит 6 слоев полуфабриката. Сборка карточек заготовки производится так, чтобы волокна во всех карточках были ориентированы в одном направлении. Получение однонаправленных бороалюминиевых листов типа В толщиной 1,2 мм осуществляется аналогично, но многослойная заготовка листа содержит 7 слоев полуфабриката. Многослойные заготовки листов с ортогональным армированием типа С и типа D содержат по 8 слоев полуфабриката, что обеспечивает после прессования толщину листов около 1,35 мм. Сборка листов типа С осуществляется так, чтобы волокна всех смежных слоев были ориентированы во взаимно перпендикулярных направлениях относительно друг друга. При изготовлении листов типа D два внутренних слоя помещаются посередине, так чтобы волокна были ориентированы параллельно, а волокна шести наружных слоев – перпендикулярно относительно них. Различные типы листов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Типы листов

Схема армирования	Обозначения листов	Толщина листа $h$ , мм	Количество слоев, шт	Направление укладки волокон
	А	1	6	Однонаправленное армирование

	B	1.2	7	Однонаправленное армирование
	C	1.35	8	Последовательное ортогональное армирование
	D	1.35	8	Ортогональное армирование, распределенное по зонам

При испытаниях на растяжение используются образцы типа «лопатки» размерами 15x120xh мм для создания условий равномерного нагружения образцов и их разрушения в рабочей части (рис. 3). База испытаний составляет 10 мм. Предел прочности при растяжении  $\sigma_{в,раст}$ , МПа, определяют по формуле:

$$\sigma_{в,раст} = \frac{F_{max}}{b \cdot h}$$

где  $F_{max}$  – максимальная нагрузка, предшествующая разрушению образца, Н;  
**b** – ширина образца, мм;  
**h** – толщина образца, мм.

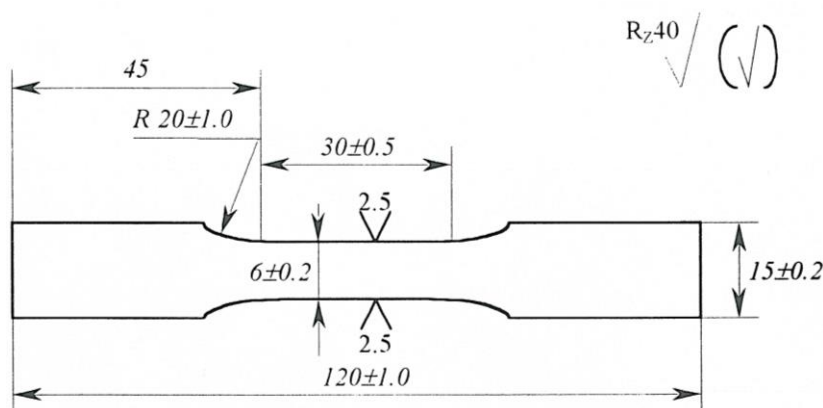


Рис. 3. Образец для испытаний на предел прочности при растяжении

Для определения предела прочности при сжатии как однонаправленного композиционного материала АI-B, так и при ортогональном армировании применяют образцы в виде полосы прямоугольного сечения размером 20x60xh мм (рис. 4). База испытаний составляет 4 мм. Предел прочности при сжатии  $\sigma_{в,сж}$ , МПа, определяют по формуле:

$$\sigma_{в,сж} = \frac{F_{max}}{b \cdot h}$$

где  $F_{max}$  – максимальная нагрузка, предшествующая разрушению образца, Н;  
**b** – ширина образца, мм;  
**h** – толщина образца, мм.

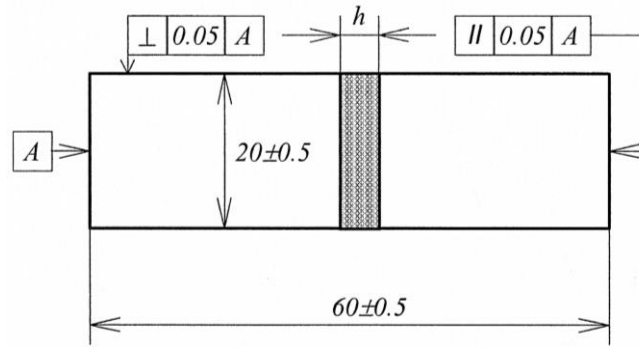


Рис. 4. Образец для испытаний на предел прочности при сжатии

Для проведения уточненного прочностного расчета цилиндрического элемента особый интерес представляет задача определения экспериментальным путем необходимых для этого расчета механических характеристик, а именно:

- $E_{сж}$  – модуля упругости при сжатии;
- $\tau_B$  – прочность на сдвиг.

С этой целью был специально изготовлен плоский лист D со схемой армирования, идентичной схеме армирования цилиндрического элемента. Образцы для определения модуля упругости при сжатии  $E_{сж}$  выглядят аналогично образцам, применяемым для определения предела прочности при сжатии, но имеют длину 120 мм. Модуль упругости при сжатии  $E_{сж}$ , МПа, определяют по формуле:

$$E = \frac{\Delta F_{сж} l}{b \cdot h \Delta l} = \frac{\Delta F_{сж}}{b \cdot h} \frac{1}{\Delta \varepsilon_{сж}}$$

где  $\Delta F_{сж}$  – приращение нагрузки, Н;

$l$  – база тензометра, мм;

$\Delta l$  – изменение базы тензометра (деформация мерной базы) при изменении нагрузки на  $\Delta F_{сж}$ , мм;

$\frac{\Delta l}{l} = \Delta \varepsilon_{сж}$  – изменение относительной деформации образца при изменении нагрузки на  $\Delta F_{сж}$ , мм;

$b$  – ширина образца, мм;

$h$  – толщина образца, мм.

При испытании на сдвиг образцы должны иметь форму полосок размерами  $8 \times 80 \times h$  мм с надрезами толщиной 0,3 мм на противоположных сторонах, смещенными по длине образца на расстояние, равное базе испытаний (8 мм). Чертеж образца представлен на рис. 5. Предел прочности при сдвиге для МКМ А1-В,  $\tau_B$ , МПа, определяют по формуле:

$$\tau_B = \frac{F_{max}}{l \cdot h}$$

где  $F_{max}$  – максимальная нагрузка, предшествующая разрушению образца, Н;

$l$  – расстояние между прорезями на образце, мм;

$h$  – толщина образца, мм.

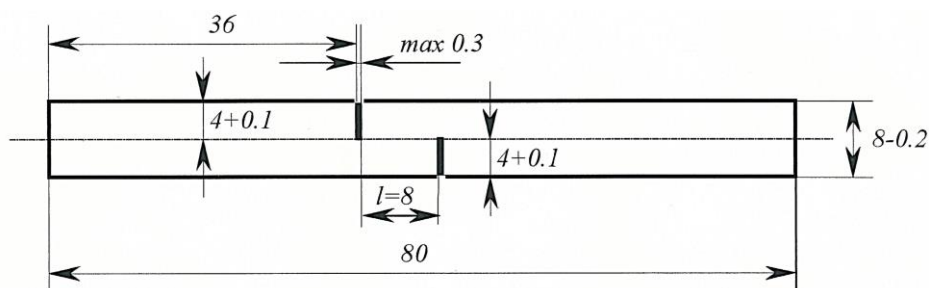


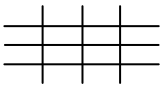
Рис. 5. Образец для испытаний на предел прочности при сдвиге

При однонаправленной схеме армирования все волокна по периметру окружены материалом матрицы, и разрушение от сдвига происходит именно по этой прослойке. Поэтому можно считать, что разрушающие напряжения сдвига близки по своей величине по всем направлениям в плоскости, перпендикулярной оси волокна, то есть предельные напряжения сдвига в плоскости образца равны разрушающим межслоевым напряжениям. Это же допущение можно принять и для материала с ортогональной схемой армирования, где соседние слои также разделены алюминиевой матрицей.

Усредненные опытные данные приведены в сводных таблицах. В табл. 2 даны свойства КМ в направлении укладки волокон. Если ортогональная схема армирования - то направление также вдоль волокон, расположенных на внешних поверхностях образцов. Экспериментальные характеристики материалов в перпендикулярном направлении приведены в табл. 3. Испытания образцов проводятся при нормальной ( $20^{\circ}\text{C}$ ) и повышенной (до  $250^{\circ}\text{C}$ ) температурах. При нахождении упругих свойств максимальная предельная температура составляет величину  $230^{\circ}\text{C}$ , для температуры  $250^{\circ}\text{C}$  приведенные в таблицах упругие свойства получают экстраполяцией.

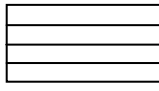
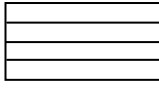
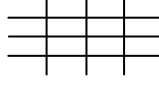
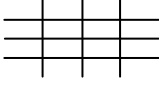
Таблица 2. Свойства композита вдоль волокон

Тип листа, толщина, мм	Предел прочности $\sigma_{в, раст}$ МПа	Предельная деформация $\epsilon_{раст}$ %	Модуль упругости $E_{сж}$ ГПа	Предел прочности $\sigma_{в, сж}$ МПа	Прочность на сдвиг $\tau_{в}$ МПа	Температура испытаний, $T, ^{\circ}\text{C}$
 тип А; $h=1,0$ мм	1120	0,515	236	1820	108	20
	1017	0,546	233	1710	86	150
	901	0,647	223	-	-	230
	850	0,690	216	1350	41	250
 тип В; $h=1,2$ мм	1154	0,552	254	2505	139	20
	1070	0,576	245	2020	103	150
	980	0,666	226	-	-	230
	940	0,710	219	1540	47	250
 тип С; $h=1,35$ мм	501	0,450	181	1100	-	20
	481	0,507	176	970	-	150
	403	0,609	169	-	-	230
	355	0,645	166	780	-	250

 тип D; h=1,35 мм	838	0,87	189	1540	-	20
--	-----	------	-----	------	---	----

Анализ полученных характеристик вдоль волокон для различных структур армирования показывает, что предельные деформации близки друг другу (исключение – лист типа D, что требует дополнительных исследований). Предельные деформации находятся в диапазоне 0,5÷0,7 %. Это указывает на то, что определяющим являются деформации разрушения волокон уложенных в направлении нагрузки. Значения предельной деформации растут с увеличением температуры (на 30÷35 %), а снижение величины модулей упругости достигает при этом 10-15%. Отмечается падение продольной прочности с ростом температуры также на 20÷30 %. Прочность ортогональной структуры, примерно, в 2 раза ниже однонаправленной. Прочность сдвига при температуре 250<sup>0</sup>С падает, примерно, в 2,5 раза по сравнению с его величиной при температуре 20<sup>0</sup>С.

Таблица 3. Свойства композита поперек волокон

Тип листа, толщина, мм	$\sigma_{в, раст}$ , МПа	$\epsilon_{сж}$ , %	$E_{сж}$ , ГПа	$\sigma_{в, сж}$ , МПа	T, <sup>0</sup> С
 тип А; h=1,0 мм	97	0,100	162	255	20
	89	0,160	145	216	150
	63	0,247	112	-	230
	51	0,290	100	117	250
 тип В; h=1,2 мм	109	0,111	171	288	20
	96	0,178	153	231	150
	72	0,263	121	-	230
	62	0,320	110	129	250
 тип С; h=1,35 мм	472	0,515	177	1040	20
	463	0,560	174	920	150
	387	0,665	162	-	230
	340	0,695	155	720	250
 тип D; h=1,35 мм	321	0,537	149	630	20

Величина пределов прочности в композитах с ортогональной структурой примерно в 2 раза ниже, чем с однонаправленной схемой армирования. Для однонаправленных листов типа А, В закономерности изменения свойств в поперечном направлении те же, что вдоль волокон. У более толстых листов все деформативно-прочностные характеристики выше (на 5÷10 %). У листов типа С свойства поперек волокон на 5÷10 % ниже, чем вдоль волокон. Это важный факт, который указывает на то, что порядок укладки слоев по толщине листа оказывает влияние на жесткостные и

прочностные характеристики материала. У листа D, модуль упругости меньше, чем и у однонаправленных листов в поперечном направлении.

Выполненные исследования показали, что металлические композиционные материалы системы «алюминий – борное волокно» сочетают в себе очень высокие значения прочности и жесткости, что делает их перспективными материалами для использования в высоконагруженных конструкциях, работающих при повышенных (до 200-250 °С) температурах.

## Литература

1. Под ред. *Любина Дж., Геллера Б.Э.*, пер. с англ. Геллера. А.Б., Гельмонта М.М. Справочник по композиционным материалам. - М.: Машиностроение, 1988. – 448 с.
2. *Гардымов Г.П., Мешков Е.В., Пчелинцев А.В., Лапманов Г.П., Афанасьев Ю.А.* Композиционные материалы в ракетно-космическом аппаратостроении. – М.: СпецЛит, 1999. – 270 с.
3. *Мэттьюз Ф., Ролингс Р.* Композитные материалы. Механика и технология. – М.: Техносфера, 2004. – 408с.
4. *Krishan K. Chawla, Nikhilesh Chawla.* Metal Matrix Composites. – USA, NY, Heidelberg: Springer, 2006. – 401 p.
5. *Karl U. Kainer.* Metal Matrix Composites: Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering. USA: John Wiley & Sons, 2006. – 330 p.