

## **Исследование характеристик металлофторопласта различных производителей для элементов авиационных конструкций**

*Государственное предприятие «АНТОНОВ»*

Проведен комплекс исследований металлофторопластовой ленты иностранных производителей на соответствие требованиям нормативно-технической документации (НТД), принятой в отечественном авиастроении. Опробована технология изготовления и проведены испытания металлофторопластовых втулок. Дана оценка полученным результатам исследований и испытаний.

**Ключевые слова:** металлофторопластовая лента, макро- и микроструктура, испытания по Эриксену, свертные втулки.

### **Введение**

В узлах трения современных самолетов широко применяются подшипниковые вкладыши из металлофторопласта. Металлофторопласт представляет собой композиционный материал, состоящий из плакированной медью стальной подложки, на поверхности которой напечен пористый слой порошка оловянистой бронзы, пропитанный составом на основе политетрафторэтилена (фторопласта) с наполнителем [1]. Применение наполнителя (металлических порошков, графита, дисульфида молибдена и др.) обусловлено большим тепловым расширением и незначительной теплопроводностью политетрафторэтилена [2]. Стальная подложка металлофторопластового композиционного материала обеспечивает механическую прочность, а бронзовый промежуточный слой – прочное соединение твердого смазочного материала с подложкой. Пористая бронза улучшает теплопроводность подшипника, снижая температуру на опорной поверхности [3].

Подшипниковые вкладыши из металлофторопластовых ленточных материалов (МФЛ) сохраняют высокую работоспособность до температуры 250 °С [1]. Пара трения политетрафторэтилен-металл характеризуется малым коэффициентом трения, высокой химической стойкостью и антиадгезионными свойствами [2].

Применение импортной металлофторопластовой ленты в отечественном авиастроении связано с отсутствием собственного производства МФЛ в Украине. Высокие требования к качеству металлофторопластовой ленты, влияющему на ресурсные характеристики авиационных деталей, обусловили необходимость проведения исследований МФЛ различных производителей с точки зрения возможности применения их продукции в элементах конструкции современных самолетов.

### **Материалы и методики исследования**

В данной работе выполнены исследования характеристик металлофторопластовой ленты производства ООО «Промснабкомплект» (Россия), МФЛ марок DU и DP4 (поставщик – Словакия), а также МФЛ марки MU итальянского производителя на соответствие их требованиям Производственной инструк-

ции ФГУП «ВИАМ» по методам входного контроля МФЛ и Технических условий ТУ 37.002.0063-84 (далее оба документа – НТД). Указанные Технические условия распространяются на МФЛ производства ООО «Промснабкомплект», а исследование характеристик МФЛ других производителей по этим же ТУ 37.002.0063-84 дало возможность проведения их сравнительного анализа.

Контроль качества спекания бронзовых гранул, толщины бронзового и антифрикционного фторопластового слоев, качества заполнения пор напеченного бронзового слоя антифрикционной фторопластовой композицией выполняли на трех шлифах в нетравленном виде от каждого образца МФЛ методом металлографии на оптическом микроскопе Neophot-32 при 100-, 200- и 500-кратном увеличении.

Контроль прочности припекания пористого бронзового и фторопластового слоев, а также штампуемости ленты проводили методом вытяжки сферической лунки (по Эриксену) пуансоном радиусом 10 мм при диаметре матрицы 27 мм на образце размером 100x100 мм. Выдавливание производили со стороны стальной основы (подложки) до появления в ней трещины. При этом отслоение бронзового слоя от стальной основы и фторопластового слоя от бронзовых гранул не допускаются. При контроле штампуемости глубина лунки должна быть не менее 10,2 мм (ГОСТ 10510-80).

Определение химического состава материала стальных подложек выполняли методом спектрального анализа на приборе SA-2000 производства LECO. Спектрометр SA-2000 представляет собой систему для определения послойного химического состава твердых токопроводящих материалов с помощью атомно-эмиссионного анализа.

Определение толщины покрытия (плакировки) на стальной подложке проводили методом капли с применением растворов № 2 и № 30 из табл. 7 по ГОСТ 9.302-88. Погрешность метода капли составляет 30 %.

Втулки из МФЛ изготавливали в штампах методом холодной гибки (свертывания) исходной заготовки в цилиндрическую оболочку с последующей калибровкой оболочки по внутреннему и наружному диаметрам, формованием фланца (для втулок с фланцем) и окончательной механической обработкой (подрезкой торцов, снятием фасок и т.п.)

Испытания свертных втулок из металлофторопласта выполняли в объеме периодических испытаний на соответствие требованиям ОСТ, принятого в авиастроении.

## **Результаты исследования**

### **1. МФЛ производства ООО «Промснабкомплект» (Россия)**

Объектом исследования являлись образцы металлофторопластовой ленты толщиной 1,1 и 1,6 мм производства ООО «Промснабкомплект». В табл. 1 представлены результаты измерений размерных параметров указанных образцов МФЛ и соответствующие требования по ТУ 37.002.0063-84.

По качеству спекания бронзового слоя микроструктура образца МФЛ толщиной 1,1 мм отличается от эталонов микроструктур, представленных в Производственной инструкции ФГУП «ВИАМ»: имеет место оплавление бронзовых гранул (рис. 1, а, б); структура с удовлетворительно спеченным бронзо-

вым слоем наблюдается лишь на отдельных участках образца (рис. 1, в); во фторопластовом слое обнаружены инородные включения (рис. 1, г).

Таблица 1  
Размерные параметры МФЛ производства ООО «Промснабкомплект»

МФЛ	Толщина, мм			
	МФЛ, общая	Омедненной основы	Бронзового слоя	Фторопластового слоя
Толщиной 1,1 мм	1,21; 1,17; 1,16	0,76; 0,75; 0,75	0,32; 0,35; 0,38	0,13; 0,07; 0,03
Требования по ТУ 37.002.0063-84	$1,10 \pm 0,05$	$0,8_{-0,12}$	не менее 0,30	не более 0,06
Толщиной 1,6 мм	1,63; 1,62; 1,66	1,25; 1,26; 1,26	0,33; 0,29; 0,27	0,05; 0,07; 0,13
Требования по ТУ 37.002.0063-84	$1,55 \pm 0,05$	$1,3_{-0,15}$	не менее 0,30	не более 0,06

В отличие от образца МФЛ толщиной 1,1 мм, качество спекания бронзового слоя на образце МФЛ толщиной 1,6 мм – удовлетворительное (рис. 2); микроструктура такого образца соответствует эталонам микроструктур в Производственной инструкции ФГУП «ВИАМ».

У исследуемых образцов МФЛ толщиной 1,1 и 1,6 мм проникновение фторопластовой композиции в поры между бронзовыми гранулами наблюдается по всей толщине напеченного бронзового слоя (рис. 1, 2), что свидетельствует об удовлетворительном заполнении пор фторопластовой композицией.

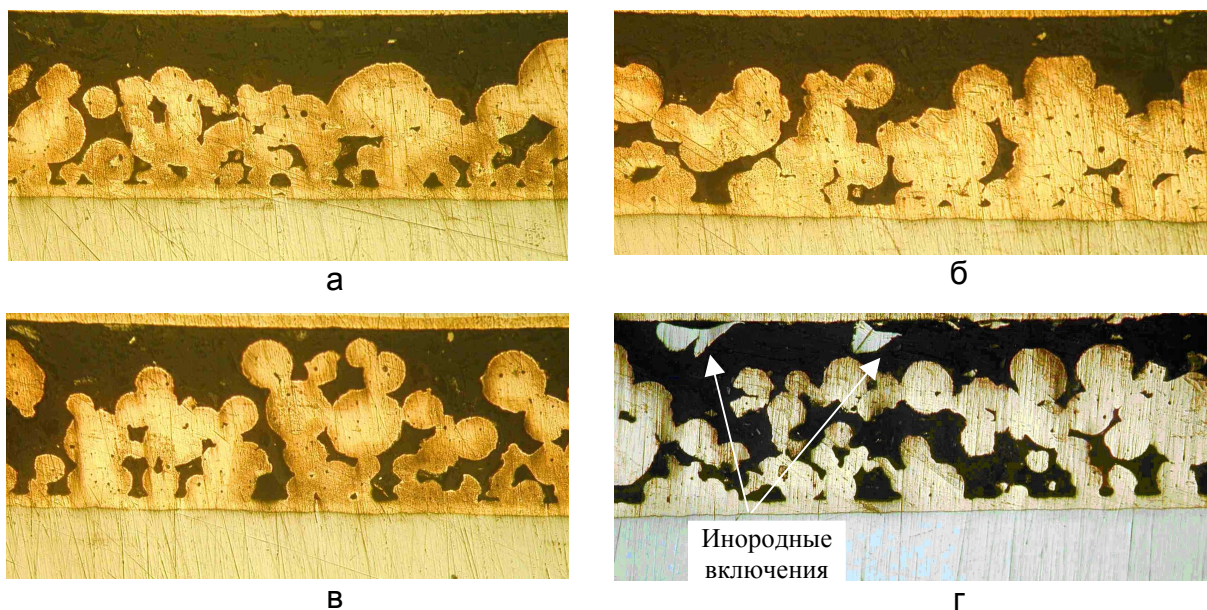


Рис. 1. Микроструктура образца МФЛ толщиной 1,1 мм с оплавленным бронзовым слоем (а, б), удовлетворительным спеканием (в) и инородными включениями во фторопластовом слое (г)

При определении прочности припекания пористого бронзового слоя методом выдавливания (по Эриксену) до образования трещины в стальной основе отслоение напеченного слоя от стальной омедненной основы у обоих исследуемых образцов МФЛ не происходило.



Рис. 2. Микроструктура образца МФЛ толщиной 1,6 мм

При контроле штампуемости на трех пробах от образца МФЛ толщиной 1,6 мм глубина лунок составила 10,50, 10,55 и 10,70 мм, что соответствует требованиям НТД. При контроле штампуемости образца МФЛ толщиной 1,1 мм глубина лунки на 2-х из 3-х проб была менее 10,20 мм (9,75 и 10,15 мм), что не допускается по требованиям НТД.

Результаты повторных металлографических исследований и испытаний по Эриксену образца МФЛ толщиной 1,1 мм на удвоенном количестве проб подтвердили наличие у него отклонений от требований НТД.

## 2. МФЛ марок DU и DP4

Объектом исследования являлись образцы МФЛ марок DU (антифрикционный слой черного цвета) и DP4 (антифрикционный слой красного цвета) толщиной 1,2, 1,7 и 2,7 мм.

Результаты контроля размерных параметров исследуемых образцов МФЛ в сравнении с аналогичными параметрами по ТУ 37.002.0063-84 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Размерные параметры МФЛ марок DU и DP4  
в сравнении с требованиями ТУ 37.002.0063-84

Марка МФЛ	Толщина, мм			
	МФЛ, общая	Омедненной основы	Бронзового слоя	Фторопластового слоя
МФЛ толщиной 1,2 мм				
DU	1,17; 1,19; 1,20	1,04; 1,05; 1,04	0,12; 0,12; 0,14	0,03; 0,02; 0,02
DP4	1,18; 1,20; 1,20	0,98; 1,0; 0,99	0,15; 0,15; 0,16	0,05; 0,05; 0,05
Требования по ТУ37.002.0063-84	1,10±0,05	0,8 <sub>-0,12</sub>	не менее 0,30	не более 0,06
МФЛ толщиной 1,7 мм				
DU	1,68; 1,69; 1,68	1,53; 1,53; 1,52	0,13; 0,14; 0,14	0,02; 0,02; 0,02
DP4	1,72; 1,70; 1,78	1,53; 1,51; 1,52	0,15; 0,16; 0,16	0,04; 0,03; 0,10
Требования по ТУ37.002.0063-84	1,55±0,05	1,3 <sub>-0,15</sub>	не менее 0,30	не более 0,06
МФЛ толщиной 2,7 мм				
DU	2,77; 2,78; 2,76	2,57; 2,58; 2,56	0,12; 0,15; 0,15	0,08; 0,05; 0,05
DP4	2,71; 2,68; 2,70	2,47; 2,48; 2,49	0,17; 0,18; 0,15	0,07; 0,02; 0,06
Требования по ТУ37.002.0063-84	2,60±0,05	2,3 <sub>-0,15</sub>	не менее 0,30	не более 0,06

Как следует из табл. 2, образцы МФЛ марок DU и DP4 имеют большую общую толщину, более тонкий бронзовый слой и меньшие средние размерные отклонения по сравнению с таковыми в ТУ 37.002.0063-84.

Микроструктура образцов МФЛ марок DU и DP4 (рис. 3) существенно отличается от эталонов микроструктур, представленных в Производственной инструкции ФГУП «ВИАМ». Если для традиционной МФЛ пористый слой представляет собой спеченные между собой в несколько рядов бронзовые гранулы (как, например, на рис. 2), то для исследуемых образцов МФЛ характерно неравномерное распределение сферических частиц бронзы в один ряд. При этом наблюдается как сплавление бронзовых гранул между собой, так и расхождение их друг от друга на расстоянии до 275 мкм (рис. 4).

На отдельных участках исследуемых образцов МФЛ имеет место неполное припекание бронзового слоя к медному подслою: отсутствует соединительная шейка между гранулами и медным подслоем (рис. 5).

Размер бронзовых гранул у всех исследуемых образцов МФЛ составляет 50-150 мкм, их средний размер - порядка 100 мкм. Для сравнения, в ТУ 37.002.0063-84 размер бронзовых гранул указан 63-160 или 63-224 мкм.

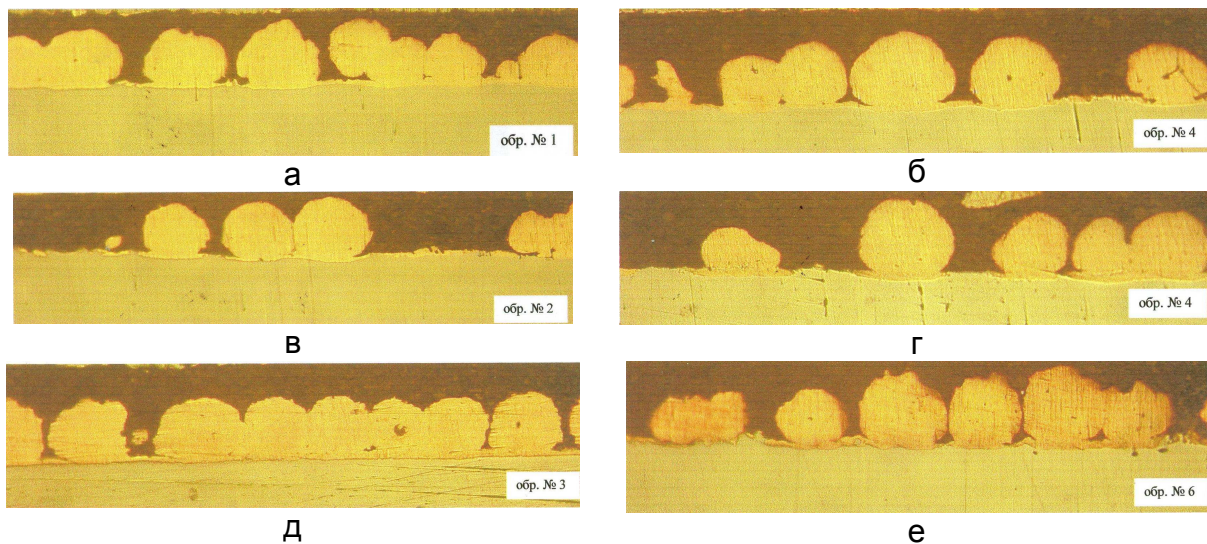


Рис. 3. Микроструктура образцов МФЛ марки DU толщиной 1,2 мм (а), 1,7 мм (б), 2,7 мм (в) и марки DP4 толщиной 1,2 мм (г), 1,7 мм (д), 2,7 мм (е)

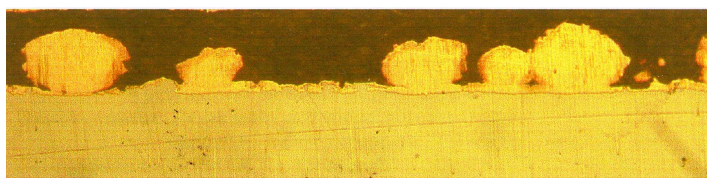


Рис. 4. Микроструктура образца МФЛ с неравномерным распределением частиц бронзы

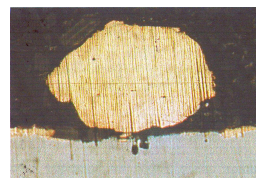


Рис. 5. Микроструктура МФЛ с некачественным спеканием бронзовой частицы

Медный подслоя (плакировка) на образцах МФЛ под антифрикционным слоем неравномерный: имеются участки, на которых он отсутствует (рис. 6, а). Толщина медного подслоя с обратной стороны стальной основы составляет около 3 мкм (рис. 6, б).

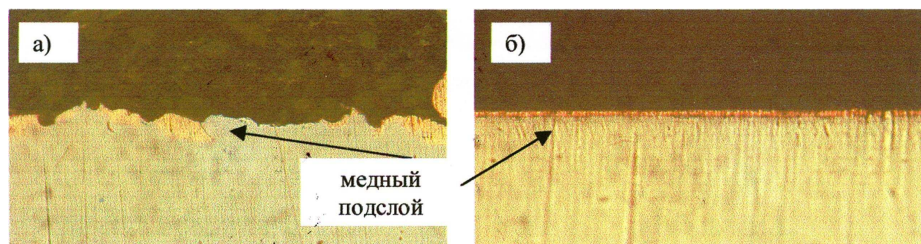


Рис. 6. Медная плакировка стальной основы МФЛ под антифрикционным слоем (а) и с обратной стороны стальной основы (б)

Для всех исследуемых образцов МФЛ характерно наличие несплошностей между медным подслоем и стальной основой (рис. 7).

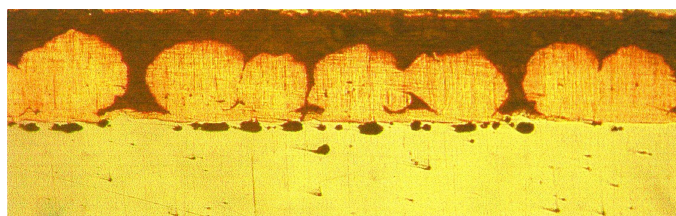


Рис. 7. Несплошности между медным подслоем и стальной основой на образцах МФЛ

На всех образцах МФЛ пустоты между бронзовыми частицами заполнены фторопластовой композицией.

При испытаниях по Эриксену (табл. 3) установлено, что все образцы МФЛ марки DU, а также образцы МФЛ марки DP4 толщиной 1,7 и 2,7 мм соответствуют требованиям НТД. Образец МФЛ марки DP4 толщиной 1,2 мм имеет глубину лунки 10,0 мм, что меньше требуемого значения. Типичный вид образцов после испытания по Эриксену представлен на рис. 8.

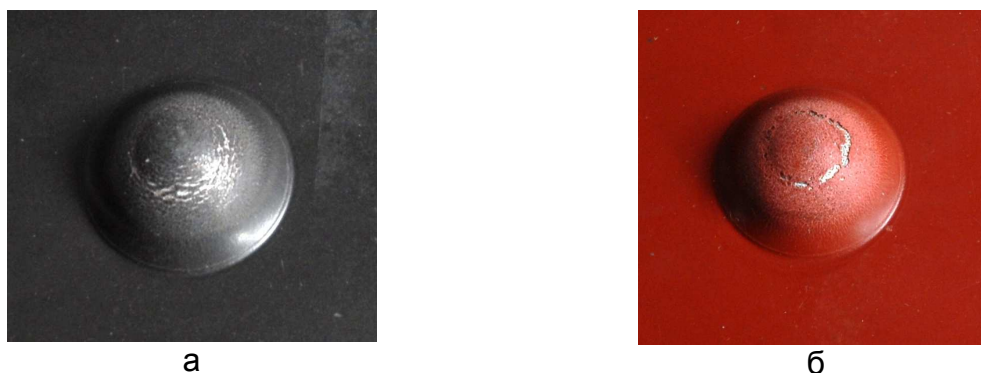


Рис. 8. Образцы МФЛ после испытания по Эриксену:  
а - МФЛ марки DU; б - МФЛ марки DP4

Таблица 3

Результаты испытаний по Эриксену образцов МФЛ марок DU и DP4

Марка МФЛ	Толщина МФЛ, мм	Глубина лунки, мм
DU	1,2	10,3
	1,7	11,1
	2,7	12,9; 13,1; 13,4
DP4	1,2	10,0
	1,7	11,2
	2,7	13,1; 13,6; 13,8

Согласно НТД несущая основа МФЛ представляет собой биметаллическую стальную ленту марок 08кп или 10кп. Результаты спектрального анализа материала стальной основы МФЛ марок DU и DP4, а также химический состав стали марок 08кп и 10кп по ГОСТ 1050-88 представлены в табл. 4. Как видно, материал стальной основы исследуемых образцов не соответствует ни стали марки 08кп по содержанию кремния и марганца, ни стали марки 10кп по содержанию углерода и марганца.

Таблица 4

Химический состав материала основы МФЛ марок DU и DP4  
и стали марок 08кп и 10кп

Марка МФЛ	Толщина МФЛ, мм	Химический состав, %					
		Fe	C	Si	Mn	S	P
DU	1,2	основа	0,06	0,025	0,20	0,005	0,008
	1,7	основа	0,06	0,025	0,20	0,005	0,008
	2,7	основа	0,06	0,035	0,21	0,005	0,006
DP4	1,2	основа	0,06	0,025	0,20	0,005	0,008
	1,7	основа	0,06	0,035	0,21	0,005	0,006
	2,7	основа	0,06	0,035	0,21	0,005	0,006
Сталь 08кп* ГОСТ 1050-88		основа	0,05- 0,12	не более 0,03	0,25- 0,50	не более 0,04	не более 0,035
Сталь 10кп** ГОСТ 1050-88		основа	0,07- 0,14	не более 0,07	0,25- 0,50	не более 0,04	не более 0,035

\* Cr не более 0,10%;    \*\* Cr не более 0,15%.

Для опробования технологии изготовления свертных втулок использовали образцы МФЛ марок DU и DP4 толщиной 1,2 мм. Были изготовлены свертные втулки с внутренним диаметром 20 мм как с фланцем (рис. 9), так и без фланца. В первом случае высота втулок была 25 мм, во втором - 10 мм. При визуальном осмотре рабочей поверхности втулок царапины, забоины, выкрашивания гранул бронзы и отслоения бронзового слоя не наблюдались.

Поскольку микроструктура исследуемых образцов существенно отличается от таковой для традиционной МФЛ, то представляют интерес результаты испытаний свертных втулок без фланца из МФЛ толщиной 1,2 мм марок DU и DP4 (по 20 шт.), проведенные в соответствии требованиями ОСТ.

Испытания на устойчивость при воздействии циклического изменения температур указанных втулок прошли без замечаний. В процессе испытаний на остаточную деформацию втулок замечаний также не имелось. При испытаниях втулок на назначенный ресурс коэффициент трения в начале испытаний составлял 0,071, в конце испытаний - 0,065, что ниже нормы. Износ втулок составил в среднем 0,001-0,020 мм, что также ниже нормы.



Рис. 9. Свертные втулки с фланцем из МФЛ марок DU и DP4 толщиной 1,2 мм

Таким образом, проверка качества свертных втулок без фланца из МФЛ толщиной 1,2 мм марок DU и DP4 в объеме периодических испытаний показала их соответствие требованиям ОСТ, принятого в авиастроении.

### 3. МФЛ марки МУ

Объектом исследования являлся образец МФЛ марки МУ толщиной 1,55 мм. Установлено, что толщина бронзового слоя и омедненной основы на образце МФЛ марки МУ соответствует требованиям ТУ 37.002.0063-84. При этом средние отклонения по указанным параметрам МФЛ марки МУ меньше, чем допускаемые отклонения по ТУ 37.002.0063-84 (табл. 5).

Таблица 5

Размерные параметры МФЛ марки МУ

Марка МФЛ	Толщина, мм			
	МФЛ, общая	Омедненной основы	Бронзового слоя	Фторопластового слоя
МУ	1,61; 1,62; 1,59	1,23; 1,25; 1,22	0,33; 0,30; 0,32	0,05; 0,07; 0,05
Требования по ТУ 37.002.0063-84	1,55±0,05	1,3 <sub>-0,15</sub>	не менее 0,30	не более 0,06

Микроструктура МФЛ марки МУ показана на рис. 10. Наблюдается соединение гранул между собой и с медным подслоем, что свидетельствует об удовлетворительном припекании бронзового слоя.

Исследуемый образец характеризуется качественным спеканием бронзовых гранул: между гранулами имеется пористость, отсутствуют оплавление гранул и их оплавление между собой (рис. 11, а).



Размер бронзовых гранул составляет 50-200 мкм, их средний размер - порядка 100 мкм. Для сравнения, в ТУ 37.002.0063-84 размер бронзовых гранул указан 63-160 или 63-224 мкм.

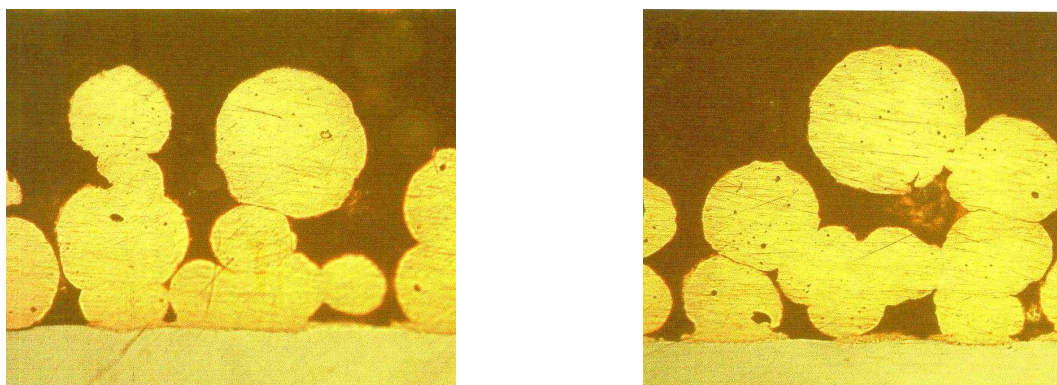


Рис. 10. Микроструктура МФЛ марки МУ

Поры между гранулами заполнены фторопластовой композицией по всей толщине припеченного бронзового слоя. Однако во фторопластовом слое обнаружены пустоты сферической формы диаметром около 75 мкм (рис. 11).

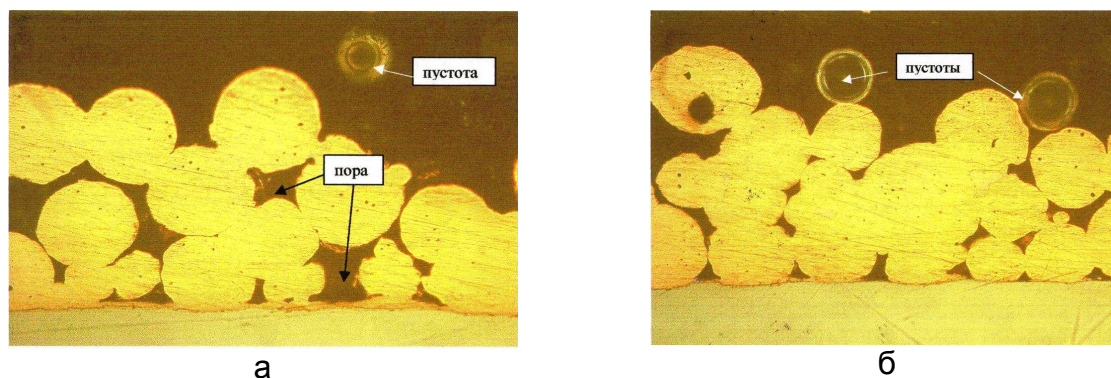


Рис. 11. Микроструктура образца МФЛ марки МУ с качественным спеканием бронзовых гранул (а) и пустотами во фторопластовом слое (а, б)

Подслой меди на стальной основе под антифрикционным слоем - неравномерный: имеются участки, на которых он отсутствует (рис. 12). Толщина подслоя составляет 4-10 мкм.

На обратной стороне образца МФЛ визуально наблюдается слой медного цвета, однако на поперечном шлифе он не обнаружен. При проведении исследования методом капли установлено, что на этой поверхности имеется покрытие олова толщиной 0,56 мкм с нанесенным на него покрытием меди толщиной 0,6 мкм.

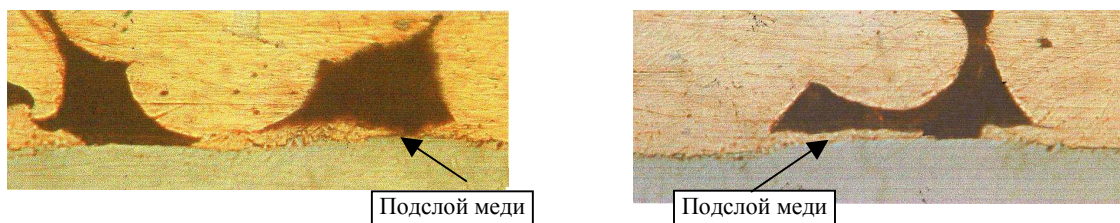


Рис. 12. Микроструктура омедненной стальной основы под антифрикционным слоем на образце МФЛ марки МУ

При испытании образца МФЛ марки МУ по Эриксену (рис. 13) глубина лунки составила 10,6 мм, что соответствует требованиям НТД.



Рис. 13. Образец МФЛ марки МУ после испытания по Эриксену

Результаты спектрального анализа материала стальной основы МФЛ марки МУ представлены в табл. 6. Установлено, что по химическому составу материал основы МФЛ марки МУ соответствует стали марки 05кп (ГОСТ 1050-88), при этом следует отметить, что сталь такой марки не указана в отечественных НТД в качестве материала основы.

Таблица 6  
Химический состав материала основы МФЛ марки МУ и стали марки 05кп

Материал	Химический состав, %				
	Fe	C	Si	Mn	Cr
Стальная основа МФЛ марки МУ	основа	0,03	0,02	0,25	0,03
Сталь 05кп ГОСТ 1050-88	основа	не более 0,06	не более 0,03	не более 0,40	не более 0,10

Из образца МФЛ марки МУ были изготовлены свертные втулки с фланцем с внутренним диаметром 20 мм и высотой 25 мм (рис. 14). На рабочей поверхности втулок забоины, царапины, выкрашивания гранул бронзы и отслоения бронзового слоя визуально не наблюдались.

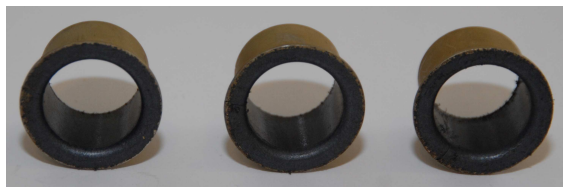


Рис. 14. Свертные втулки с фланцем из МФЛ марки МУ

### Выводы

Проведенные исследования образцов МФЛ различных производителей показали наличие у них некоторых отклонений от требований НТД, принятых в отечественном авиастроении, что накладывает определенные ограничения на применение таких МФЛ в элементах авиационных конструкций.

Среди рассмотренных образцов наиболее полно соответствуют требованиям НТД МФЛ толщиной 1,6 мм производства ООО «Промснабкомплект» и МФЛ марки МУ.

Не смотря на нетипичную структуру МФЛ марок DU и DP4, заслуживают внимания положительные результаты периодических испытаний по программе ОСТ металлофторопластовых втулок из указанной МФЛ.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Равлик Т.А., Заровой Д.В., Базилевскому А.Г., Косян С.В., Романив Л.М. и Кондаурову А.А. за участие в проведении исследований.

### Список литературы

1. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / В.Д. Зозуля, Е.Л. Шведков, Д.Я. Ровинский, Э.Д. Браун; Отв. ред. И.М. Федорченко. АН УССР. Ин-т проблем материаловедения. – 2-е изд. – Киев: Наук. думка, 1990. – 264 с.
2. Порошковая металлургия. Спеченные и композиционные материалы: пер. с нем. / под ред. В. Шатта. - М. : Металлургия, 1983. - 520 с.
3. Гаркунов Д.Н. Триботехника: Учеб. для студентов вузов. – 2-е изд. - М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.

**Рецензент:** д.т.к. проф., зав. каф. Я.С. Карпов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 10.06.2013

## **Дослідження характеристик металофторопласту різних виробників для елементів авіаційних конструкцій**

Проведено комплекс досліджень металофторопластової стрічки іноземних виробників на відповідність вимогам нормативно-технічної документації (НТД), прийнятої у вітчизняному авіабудуванні. Випробувана технологія виготовлення та проведені випробування металофторопластових втулок. Надана оцінка отриманим результатам досліджень та випробувань.

**Ключові слова:** металофторопластова стрічка, макро- і мікроструктура, випробування за Еріксоном; скручені втулки.

## **Researches of the metal-fluoroplast behaviours from different manufacturers for aircraft construction's elements**

The complex of researches of the metal-fluoroplastic tapes on conformity to requirements of the normative-technical documentation accepted in domestic aircraft construction is lead. The manufacturing techniques are tested and tests of the metal-fluoroplastic bushings are lead. The estimation is given to the received results of the researches and tests.

**Keywords:** metal-fluoroplastic tape; macro- and microstructure; Ericson test; twisted bushings.