

УДК 621.762:669

Бычков С.А., Лавренко И.Г., Нечипоренко О.Ю., Ромашко И.М., Младинов С.Д.  
Государственное предприятие «АНТОНОВ». Украина, г. Киев

## СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МФЛ НОВЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ САМОЛЕТОВ

*Представлены результаты исследований и испытаний металлофторопластовой ленты зарубежных производителей, выполненные в соответствии с требованиями нормативно-технической документации (НТД), принятой в авиационной промышленности. Показаны перспективные разработки фторопластосодержащих материалов на стальной, алюминиевой, титановой и бронзовой основах как альтернативы традиционной металлофторопластовой ленты.*

Ключевые слова: металлофторопластовая лента; макро- и микроструктура; испытание по Эриксену; металлофторопластовая втулка; покрытие из наполненного фторопласта

### Введение

Антифрикционная металлофторопластовая лента (МФЛ) используется для изготовления свертных втулок, применяемых в качестве подшипников скольжения в узлах трения самолетов, в которых смазка не может применяться или ее подача затруднена. МФЛ представляет собой многослойный материал, состоящий из покрытой медью стальной основы, на одну из поверхностей которой напечен слой порошковой бронзы, пропитанной составом на основе фторопласта с наполнителем (рис. 1, б).

В связи с отсутствием собственного производства МФЛ в Украине возникла проблема выбора импортной МФЛ для отечественного авиационного строительства. Необходимость исследования характеристик МФЛ различных производителей, с точки зрения возможности применения ее в узлах трения самолетов, обусловлена высокими требованиями к качеству МФЛ, влияющему на ресурсные характеристики и надежность авиационных деталей.

Следует отметить, что рассмотренные металлофторопластовые ленты (МФЛ) зарубежных производителей изготовлены на основе из углеродистой стали, в связи с чем возникает серьезная проблема коррозионного повреждения антифрикционных втулок из таких МФЛ в узлах трения самолетов. Решить указанную проблему можно как за счет применения имеющейся на рынке МФЛ на основе из нержавеющей стали, так и разработки новых фторопластосодержащих материалов на основе коррозионно-стойких сплавов как альтернативы традиционной МФЛ.

### Методы исследований и испытаний

Исследование характеристик МФЛ проводили в соответствии с требованиями Технических условий

ТУ 1-92-95-84 и Производственной инструкции по методам входного контроля МФЛ (ПИ), приняты в авиационной промышленности (далее – НТД).

Контроль размерных параметров, качества спекания бронзовых гранул и заполнения пор напеченного бронзового слоя фторопластовой композицией выполняли на трех шлифах в нетравленном виде от каждого образца МФЛ методом металлографии на оптическом микроскопе Neophot-32.

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 100×100 мм. Выдавливание проводили со стороны стальной основы (подложки) до появления в ней трещины. При этом глубина лунки (рис. 2) должна быть не менее 10,2 мм, при толщине стальной основы свыше 2,0 мм – не менее 11 мм.

Определение химического состава материала подложек на соответствие маркам стали 08КП, 10КП и 12Х18Н10Т, указанным в НТД в качестве материала стальной основы МФЛ, выполняли методом спектрального анализа на приборе SA-2000 производства ЛЕСО.

Определение толщины покрытия (плакировки) на стальной подложке проводили методом капли с применением растворов № 2 и № 30 из таблицы 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 Отраслевого стандарта (ОСТ), принятого в авиастроении.

### МФЛ производства ООО «Промснабкомплект» (Россия)

Объект исследования – образцы МФЛ толщиной 1,1 и 1,6 мм, изготовленные по ТУ 37.002.0063-84. Размерные параметры указанных образцов МФЛ, проверенные на соответствие требованиям ТУ 1-92-95-84, представлены в табл. 1.

(рис. 1, в). Качество спекания бронзового слоя на образце МФЛ толщиной 1,6 мм – удовлетворительное (рис. 1, з); микроструктура образца соответствует эталонам микроструктур в ПИ.

У исследуемых образцов МФЛ проникновение фторопластовой композиции в поры между бронзовыми гранулами наблюдается по всей толщине напеченного бронзового слоя.

При испытании по Эриксену (рис. 2) отслоение напеченного слоя от стальной основы и фторопластового слоя от бронзовых гранул на исследуемых образцах МФЛ не происходило. Глубина лунок у образца МФЛ толщиной 1,6 мм составила

Таблица 1

Размерные параметры МФЛ производства ООО «Промснабкомплект»

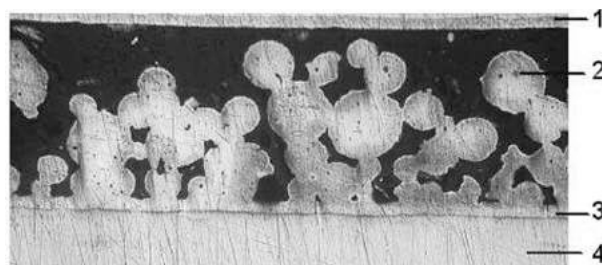
МФЛ	Толщина, мм			
	МФЛ, общая	Омедненной основы	Бронзового слоя	Фторопластового слоя
Толщиной 1,1 мм	1,16–1,21	0,75–0,76	0,32–0,38	0,03–0,13
Требования по ТУ 1-92-95-84	1,10±0,05	0,75 <sub>-0,05</sub>	0,35±0,05	0,04±0,02
Толщиной 1,6 мм	1,62–1,66	1,25–1,26	0,27–0,33	0,05–0,13
Требования по ТУ 1-92-95-84	1,60±0,05	1,25 <sub>-0,05</sub>	0,35±0,05	0,04±0,02

Микроструктура образца МФЛ толщиной 1,1 мм отличается от эталонов микроструктур в ПИ: имеет место оплавление бронзовых гранул (рис. 1, а); структура с удовлетворительно спеченным бронзовым слоем наблюдается только на отдельных участках образца (рис. 1, б); во фторопластовом слое обнаружены инородные включения

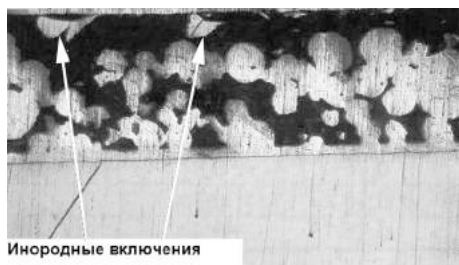
10,5–10,7 мм, что соответствует требованиям НТД. У образца МФЛ толщиной 1,1 мм глубина двух из трех лунок была менее 10,2 мм (9,75 и 10,15 мм). Результаты повторных металлографических исследований и испытаний по Эриксену образца МФЛ толщиной 1,1 мм на удвоенном количестве проб подтвердили наличие отклонений от требований НТД.



а



б



в



з

Рис. 1. Микроструктура образцов МФЛ толщиной 1,1 мм с оплавленным бронзовым слоем (а), удовлетворительным спеканием (б), инородными включениями во фторопластовом слое (в) и толщиной 1,6 мм с удовлетворительным спеканием (з) (ООО «Промснабкомплект»). 1 – фторопласт с наполнителем; 2 – бронзовые гранулы; 3 – медный подслоя (плакировка); 4 – стальная основа (× 100)

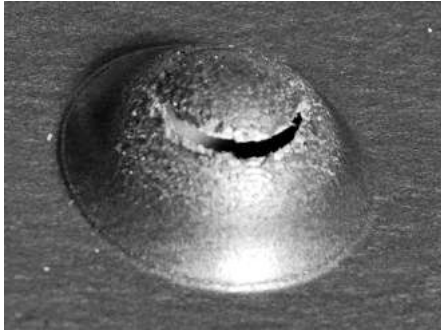
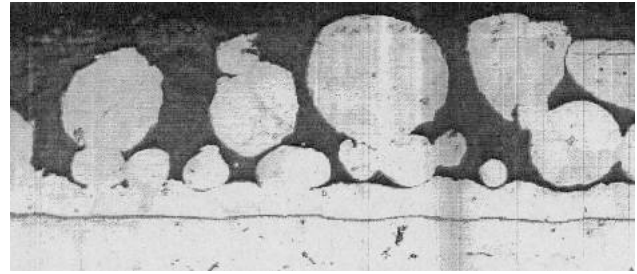


Рис. 2. Типичный вид образцов МФЛ после испытания по Эриксену

### МФЛ производства ООО «Фторопласт» (Россия)

Объект исследования – образцы МФЛ толщиной 1,6 и 2,6 мм, изготовленные по ТУ 5112-015-00136678-95. Размерные параметры указанных образцов МФЛ, проверенные на соответствие требованиям ТУ 1-92-95-84, представлены в табл. 2.



а



б

Рис. 3. Микроструктура образцов МФЛ толщиной 1,6 мм (а) и 2,6 мм (б) (ООО «Фторопласт») (× 100)

Таблица 2

Размерные параметры МФЛ производства ООО «Фторопласт»

МФЛ	Толщина, мм			
	МФЛ, общая	Омедненной основы	Бронзового слоя	Фторопластового слоя
Толщиной 1,6 мм	1,60	1,28–1,30	0,27–0,29	0,03
Требования по ТУ 1-92-95-84	1,60±0,05	1,25 <sub>-0,05</sub>	0,35±0,05	0,04±0,02
Толщиной 2,6 мм	2,65	2,26–2,32	0,30–0,32	0,02–0,03
Требования по ТУ 1-92-95-84	2,60±0,05	2,25 <sub>-0,05</sub>	0,35±0,05	0,04±0,02

У образца МФЛ толщиной 1,6 мм отсутствует соединение бронзовых гранул между собой и с медным подслоем (рис. 3, а); у образца МФЛ толщиной 2,6 мм припекание бронзового слоя к медному подслою – удовлетворительное (рис. 3, б). По качеству спекания бронзового слоя и заполнения пор фторопластом исследуемые образцы соответствуют требованиям НТД.

При испытании по Эриксену глубина лунок у образцов МФЛ толщиной 1,6 мм составила 11,2–11,3 мм, толщиной 2,6 мм – 11,5–11,6 мм, что соответствует требованиям НТД. При этом отслоение бронзового слоя от стальной основы и фторопластового слоя от бронзовых гранул на исследуемых образцах не происходило.

### МФЛ производства ООО «ОСТАЛЬ» (Россия)

Объект исследования – МФЛ толщиной 1,1, 1,6 и 2,6 мм, изготовленные по ТУ 1-92-95-84. Размерные

параметры указанных образцов МФЛ, проверенные на соответствие требованиям ТУ 1-92-95-84, представлены в табл. 3.

Образцы МФЛ характеризуются удовлетворительным припеканием бронзового слоя: наблюдается соединение гранул между собой и с медным подслоем. По качеству спекания бронзовых гранул образцы МФЛ соответствуют требованиям НТД; отсутствует оплавление гранул, их сплавление между собой, имеется пористость.

На отдельных участках образцов МФЛ толщиной 1,1 и 2,6 мм наблюдаются поры, прилегающие к омедненной стальной основе, незаполненные фторопластовой композицией, что допускается требованиями НТД. Образец МФЛ толщиной 1,6 мм имеет качественное заполнение пор фторопластовой композицией.

При испытании по Эриксену глубина лунок у образца МФЛ толщиной 1,1 мм составила 11,4–11,6 мм, толщиной 1,6 мм – 11,4–11,8 мм, тол-

Таблица 3

**Размерные параметры МФЛ производства ООО «ОСТАЛЬ»**

МФЛ	Толщина, мм			
	МФЛ, общая	Омедненной основы	Бронзового слоя	Фторопластового слоя
Толщиной 1,1 мм	1,14–1,15	0,75	0,35–0,38	0,02–0,04
Требования по ТУ 1-92-95-84	1,10±0,05	0,75 <sub>-0,05</sub>	0,35±0,05	0,04±0,02
Толщиной 1,6 мм	1,63–1,67	1,25–1,31	0,30–0,37	0,02
Требования по ТУ 1-92-95-84	1,60±0,05	1,25 <sub>-0,05</sub>	0,35±0,05	0,04±0,02
Толщиной 2,6 мм	2,62–2,65	2,21–2,27	0,35–0,38	0,02–0,03
Требования по ТУ 1-92-95-84	2,60±0,05	2,25 <sub>-0,05</sub>	0,35±0,05	0,04±0,02

щиной 2,6 мм – 13,3–13,6 мм, что соответствует требованиям НТД. Во всех случаях отслоение бронзового слоя от стальной основы и фторопластового слоя от бронзовых гранул отсутствовало.

**МФЛ от поставщика ООО «НМ Group» (Россия)**

Объект исследования – образцы МФЛ толщиной 1,5 и 2,5 мм, размерные параметры которых проверены на соответствие требованиям ТУ 1-92-95-84 (табл. 4).

щиной 2,5 мм наблюдается оплавление спеченной структуры (рис. 4, б).

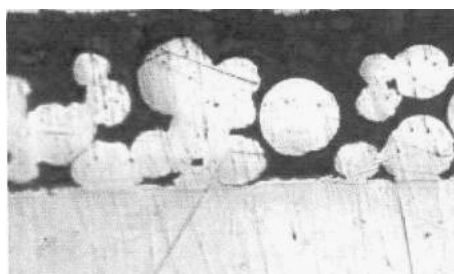
При испытании по Эриксену глубина лунки для образца МФЛ толщиной 1,5 мм составила 10,7 мм, толщиной 2,5 мм – 12,1–2,3 мм, что соответствует требованиям НТД. При этом отслоение напеченного слоя от стальной основы и фторопластового слоя от бронзовых гранул на образцах не происходило.

По химическому составу (Fe – основа; С – 0,04–0,05 %; Si – 0,025–0,027 %; Mn – 0,35–0,37 %) материал основы образцов МФЛ практически соответствует стали марки 08КП.

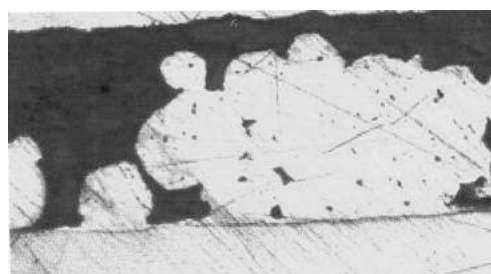
Таблица 4

**Размерные параметры МФЛ производства ООО «Промснабкомплект»**

МФЛ	Толщина, мм			
	МФЛ, общая	Омедненной основы	Бронзового слоя	Фторопластового слоя
Толщиной 1,5 мм	1,50	1,22–1,24	0,22–0,26	0,02–0,04
Требования по ТУ 1-92-95-84	1,60±0,05	1,25 <sub>-0,05</sub>	0,35±0,05	0,04±0,02
Толщиной 2,5 мм	2,45–2,51	2,10–2,23	0,22–0,26	0,02
Требования по ТУ 1-92-95-84	2,60±0,05	2,25 <sub>-0,05</sub>	0,35±0,05	0,04±0,02



а



б

**Рис. 4.** Микроструктура образцов МФЛ толщиной 1,5 мм (а) и 2,5 мм (б) (ООО «НМ Group») (× 100)

Образец МФЛ толщиной 1,5 мм характеризуется качественным припеканием бронзового слоя к омедненной основе и качественным спеканием бронзовых гранул (рис. 4, а). У образца МФЛ тол-

**МФЛ марок DU и DP4 (Словакия)**

Объект исследования – образцы МФЛ марок DU (антифрикционный слой черного цвета) и DP4

Размерные параметры МФЛ производства ООО «ОСТАЛЬ»

МФЛ	Толщина, мм			
	МФЛ, общая	Омедненной основы	Бронзового слоя	Фторопластового слоя
DU толщиной 1,2 мм	1,17–1,20	1,04–1,05	0,12–0,14	0,02–0,02
DP4 толщиной 1,2 мм	1,18–1,20	0,98–1,0	0,15–0,16	0,05
Требования по ТУ 1-92-95-84	1,1±0,05	0,75 <sub>-0,05</sub>	0,35±0,05	0,04±0,02
DU толщиной 1,7 мм	1,68–1,69	1,52–1,53	0,13–0,14	0,02
DP4 толщиной 1,7 мм	1,70–1,78	1,51–1,53	0,15–0,16	0,03–0,10
Требования по ТУ 1-92-95-84	1,60±0,05	1,25 <sub>-0,05</sub>	0,35±0,05	0,04±0,02
DU толщиной 2,7 мм	2,76–2,78	2,56–2,58	0,12–0,15	0,05–0,08
DP4 толщиной 2,7 мм	2,68–2,71	2,47–2,49	0,15–0,18	0,02–0,07
Требования по ТУ 1-92-95-84	2,60±0,05	2,25 <sub>-0,05</sub>	0,35±0,05	0,04±0,02

(антифрикционный слой красного цвета) толщиной 1,2, 1,7 и 2,7 мм, размерные параметры которых проверены на соответствие требованиям ТУ 1-92-95-84 (табл. 5).

Микроструктура образцов МФЛ марок DU и DP4 отличается от эталонов микроструктур в ПИ (рис. 5). Для образцов МФЛ характерно неравномерное распределение бронзовых гранул в один ряд. При этом наблюдается как сплавление бронзовых гранул между собой, так и расположение их друг от друга на расстоянии до 275 мкм (рис. 6). На отдельных участках исследуемых образцов имеет место неполное припекание бронзового слоя к медному подслою: отсутствует соединительная шейка между гранулами и медным подслоем.

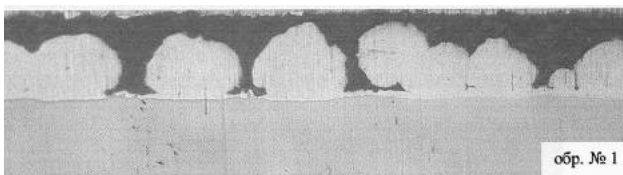


Рис. 5. Типичная микроструктура образцов МФЛ марок DU и DP4 (Словакия) (× 100)

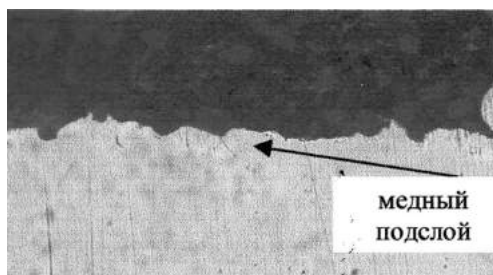
Размер бронзовых гранул у образцов МФЛ марок DU и DP4 составляет 50–150 мкм, их средний размер – порядка 100 мкм (согласно ТУ 1-92-95-84 для изготовления бронзового слоя используются сферические гранулы с диаметром частиц 63–160 мкм).

У всех образцов заполнение пор напеченного бронзового слоя фторопластовой композицией – удовлетворительное.

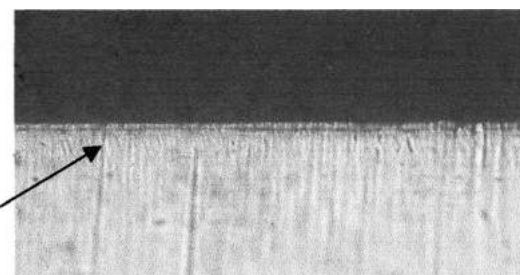
Медный подслоя (плакировка) на образцах МФЛ под антифрикционным слоем неравномерный: имеются участки, на которых он отсутствует (рис. 7, а). Толщина медного подслоя на обратной стороне стальной основы составляет около 3 мкм (рис. 7, б). Для всех образцов МФЛ марок DU и



Рис. 6. Микроструктура образца МФЛ марки DU с неравномерным распределением бронзовых гранул (Словакия) (× 100)



а



б

Рис. 7. Микроструктура омедненной стальной основы образцов МФЛ марок DU и DP4 под антифрикционным слоем (а) и с обратной стороны стальной основы (б) (Словакия) (× 500)

DP4 характерно наличие несплошностей между медным подслоем и стальной основой (рис. 8).

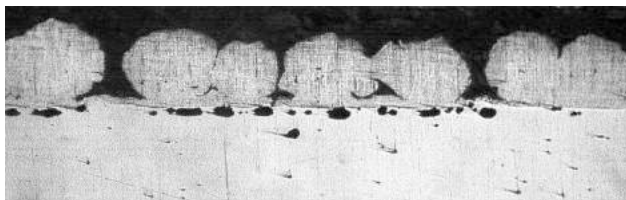


Рис. 8. Несплошности между медным подслоем и стальной основой на образцах МФЛ марок DU и DP4 (Словакия) ( $\times 100$ )



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

ресурс коэффициент трения в начале испытаний составил 0,071, в конце испытаний – 0,065, что ниже нормы. Износ втулок составил в среднем 0,001–0,020 мм, что также ниже нормы.

### МФЛ марки МУ (Италия)

Объект исследования – образец МФЛ марки МУ толщиной 1,55 мм, размерные параметры которого проверены на соответствие требованиям ТУ 1-92-95-84 (табл. 6)

Исследуемый образец характеризуется удовлетворительным припеканием бронзового слоя (наблюдается соединение бронзовых гранул между собой и с медным подслоем) и качественным спеканием бронзовых гранул (между гранулами имеется пористость, отсутствуют их оплавление и сплавление между собой). Однако во фторопластовом слое обнаружены пустоты сферической формы диаметром около 75 мкм (рис. 10).

Размер бронзовых гранул составляет 50–200 мкм, их средний размер – порядка 100 мкм (согласно ТУ 1-92-95-84 для изготовления бронзового

Таблица 6

### Размерные параметры МФЛ марки МУ (Италия)

МФЛ	Толщина, мм			
	МФЛ, общая	Омедненной основы	Бронзового слоя	Фторопластового слоя
Толщиной 1,55 мм	1,59–1,62	1,22–1,25	0,30–0,33	0,05–0,07
Требования по ТУ 1-92-95-84	$1,6 \pm 0,05$	$1,25_{-0,05}$	$0,35 \pm 0,05$	$0,04 \pm 0,02$

По результатам испытаний по Эриксену все образцы МФЛ марки DU, а также образцы МФЛ марки DP4 толщиной 1,7 и 2,7 мм соответствуют требованиям НТД. У образца МФЛ марки DP4 толщиной 1,2 мм глубина лунки составила 10 мм, что меньше требуемого значения. Во всех случаях отслоение бронзового слоя от стальной основы и фторопластового слоя от бронзовых гранул отсутствовало.

По химическому составу (Fe – основа; C – 0,06 %; Si – 0,25–0,35 %; Mn – 0,20–0,21 %; S – 0,005 %; P – 0,006–0,008 %) материал основы образцов МФЛ приближается к стали марки 08КП.

Из МФЛ марок DU и DP4 толщиной 1,2 мм были изготовлены свертные втулки с внутренним диаметром 20 мм без фланца и с фланцем (рис. 9). При визуальном осмотре рабочей поверхности втулок царапины, забоины, выкрашивания бронзовых гранул и отслоения бронзового слоя не наблюдались.

Испытания на остаточную деформацию и устойчивость при воздействии циклического изменения температур свертных втулок без фланца прошли без замечаний. При испытаниях втулок на назначенный

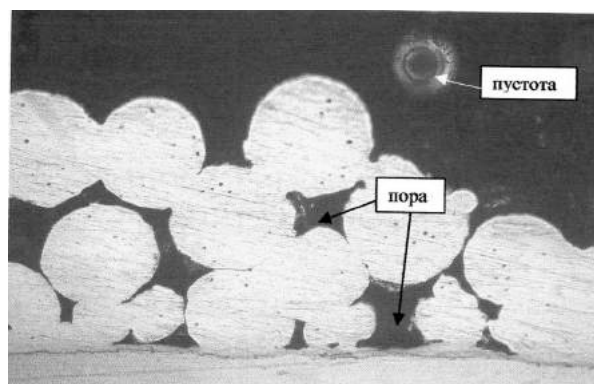


Рис. 10. Микроструктура образца МФЛ марки МУ (Италия) ( $\times 200$ )

слоя используются сферические гранулы с диаметром частиц 63–160 мкм).

Подслой на стальной основе под антифрикционным слоем – неравномерный: имеются участки, на которых он отсутствует (рис. 11). На обратной стороне образца МФЛ визуально наблюдается слой медного цвета. 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.

По химическому составу (Fe – основа; С – 0,03 %; Si – 0,02 %; Mn – 0,25 %; Cr – 0,03 %) материал основы МФЛ соответствует стали марки 05КП, однако сталь такой марки не указана в НТД в качестве материала основы.

При испытании по Эриксену образца МФЛ марки МУ глубина лунки составила 10,6 мм, что соответствует требованиям НТД. При этом отслоение бронзового слоя от стальной основы и фторопластового слоя от бронзовых гранул отсутствовало.

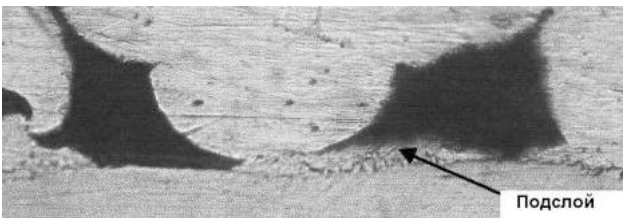


Рис. 11. Микроструктура плакированной стальной основы под антифрикционным слоем на образце МФЛ марки МУ (Италия) (× 500)



Рис. 12. Свертные втулки с фланцем из МФЛ марки МУ (Италия)

Из исследуемого образца МФЛ марки МУ были изготовлены свертные втулки с фланцем с внутренним диаметром 20 мм и высотой 25 мм (рис. 12).

На рабочей поверхности втулок забоины, царапины, выкрашивания гранул бронзы и отслоения бронзового слоя визуалью не наблюдались.

### МФЛ марки SF-1 (Китай)

Объект исследований – образцы МФЛ марки SF-1 толщиной 1,6 и 2,6 мм, размерные параметры которых проверены на соответствие требованиям ТУ 1-92-95-84 (табл. 7).

Исследуемые образцы МФЛ марки SF-1 характеризуются удовлетворительным припеканием бронзового слоя (наблюдается соединение гранул между собой и медным подслоем) и качественным спеканием бронзовых гранул (отсутствует оплавление гранул, сплавление их между собой, наблюдается пористость) (рис. 13). При этом бронзовый слой представляет собой неравномерное распределение бронзовых гранул (рис. 14).

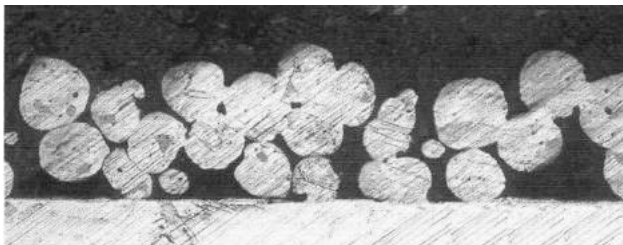
Фторопластовая композиция проникает в поры между гранулами не по всей толщине напеченного слоя. На отдельных участках имеются поры, прилегающие к стальной основе, не заполненные фторопластовой композицией (рис. 15), что допускается НТД.

Толщина медной плакировки стальной основы под антифрикционным слоем у образца МФЛ толщиной 1,6 мм составляет порядка 4–10 мкм (рис. 16, а), толщиной 2,6 мм – порядка 10–18 мкм (рис. 16, в), на обратной стороне – 4–6 и 6–24 мкм, соответственно (рис. 16, б, г).

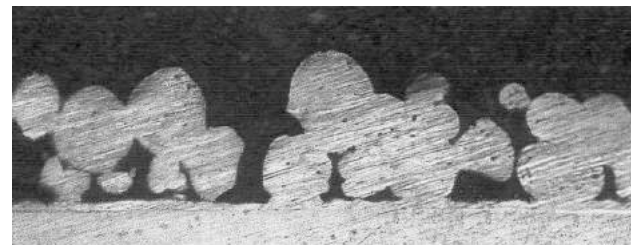
Таблица 7

### Размерные параметры МФЛ марки SF-1 (Китай)

МФЛ	Толщина, мм			
	МФЛ, общая	Омедненной основы	Бронзового слоя	Фторопластового слоя
Толщиной 1,6 мм	1,60–1,62	1,27–1,28	0,27–0,29	0,04–0,06
Требования по ТУ 1-92-95-84	1,60±0,05	1,25 <sub>-0,05</sub>	0,35±0,05	0,04±0,02
Толщиной 2,6 мм	2,59–2,64	2,27–2,30	0,25–0,27	0,07
Требования по ТУ 1-92-95-84	2,60±0,05	2,25 <sub>-0,05</sub>	0,35±0,05	0,04±0,02



а



б

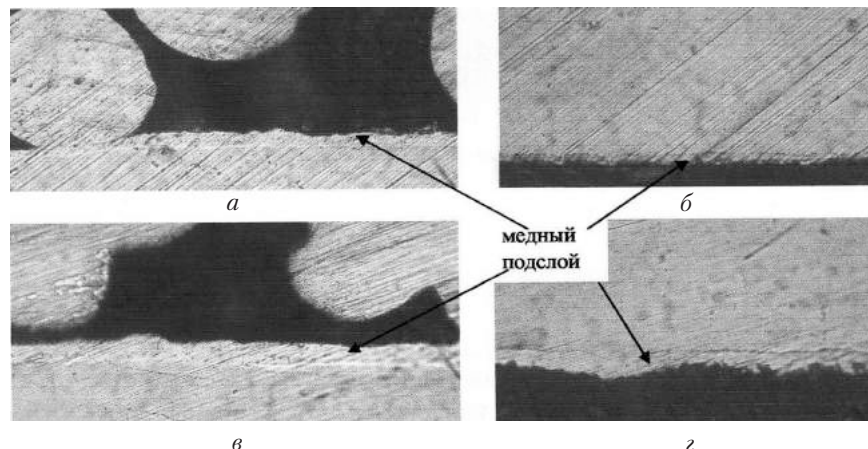
Рис. 13. Микроструктура образцов МФЛ марки SF-1 толщиной 1,6 (а) и 2,6 мм (б) (Китай) (× 100)



**Рис. 14.** Микроструктура образца МФЛ марки SF-1 толщиной 2,6 мм с неравномерным распределением бронзовых гранул (Китай) ( $\times 100$ )



**Рис. 15.** Микроструктура образца МФЛ марки SF-1 толщиной 1,6 мм с порами, незаполненными фторопластом (Китай) ( $\times 500$ )



**Рис. 16.** Микроструктура омедненной стальной основы образцов МФЛ марки SF-1 толщиной 1,6 мм (*а, б*) и 2,6 мм (*в, г*): *а, в*) под антифрикционным слоем; *б, г*) на обратной стороне стальной основы (Китай) ( $\times 500$ )

При испытании по Эриксену глубина лунки у образца МФЛ марки SF-1 толщиной 1,6 мм составила 11,3 мм, толщиной 2,6 мм – 13,75 мм, что соответствует требованиям НТД. Отслоение напеченного слоя от стальной основы и фторопластового слоя от бронзовых гранул на исследуемых образцах МФЛ не происходило.

#### Новые металлофторопластовые материалы

##### МФЛ марки DU(н) на основе из нержавеющей стали (Словакия)

Объект исследования – образцы МФЛ марки DU(н) толщиной 1,2 мм и 2,7 мм на основе из нержа-

вующей стали, размерные параметры которых проверены на соответствие требованиям ТУ 1-92-95-84, принятых в авиастроении (табл. 8).

Микроструктура исследуемых образцов МФЛ марки DU(н) отличается от эталонов типовых микроструктур, представленных в Производственной инструкции по методам входного контроля МФЛ (ПИ).

На отдельных участках исследуемых образцов МФЛ марки DU(н) имеет место некачественное спекание бронзового слоя: отсутствует соединительная шейка между бронзовыми гранулами, имеется оплавление бронзовых гранул и их сплавление между собой (рис. 17).

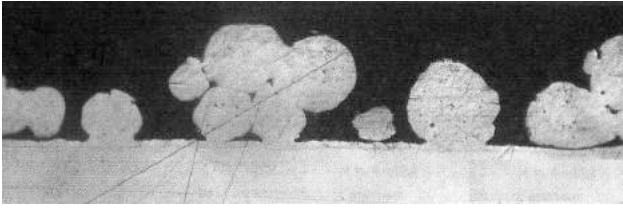
Бронзовый слой представляет собой неравномерное распределение гранул. При этом наблюдается

Таблица 8

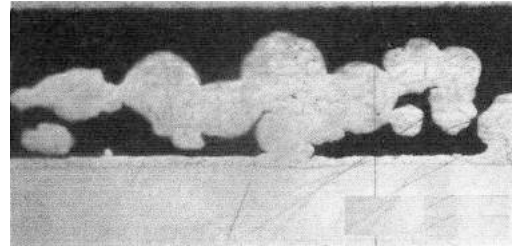
Размерные параметры МФЛ марки DU(н)

МФЛ	Толщина, мм			
	МФЛ, общая	Омедненной основы	Бронзового слоя	Фторопластового слоя
Толщиной 1,2 мм	1,17–1,22	0,90–0,93	0,24–0,25	0,03–0,05
Требования по ТУ 1-92-95-84	1,1 $\pm$ 0,05	0,75 $_{-0,05}$	0,35 $\pm$ 0,05	0,04 $\pm$ 0,02
Толщиной 2,7 мм	2,63–2,66	2,41–2,44	0,14–0,16	0,05–0,09
Требования по ТУ 1-92-95-84	2,60 $\pm$ 0,05	2,25 $_{-0,05}$	0,35 $\pm$ 0,05	0,04 $\pm$ 0,02





а

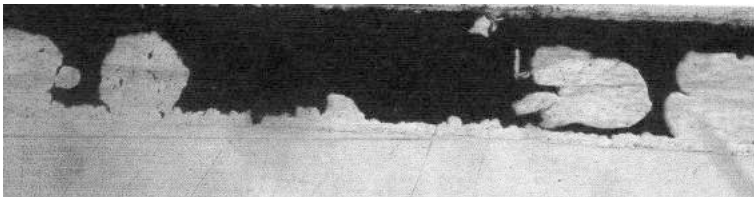


б

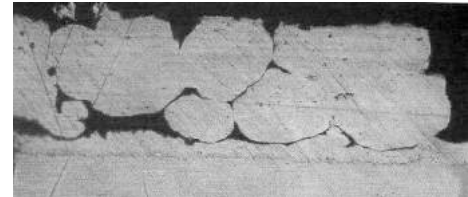
**Рис. 17.** Микроструктура образца МФЛ марки DU(н) толщиной 1,2 мм с некачественным спеканием бронзового слоя (а) и оплавлением бронзовых гранул (б) (Словакия) ( $\times 100$ )

как сплавление бронзовых гранул, так и расположение их друг от друга на расстоянии до 360 мкм у образца МФЛ толщиной 1,2 мм и до 580 мкм у образца МФЛ толщиной 2,7 мм (рис. 18). Следует отметить, что бронзовый слой у МФЛ толщиной 2,7 мм тоньше, чем у МФЛ толщиной 1,2 мм. Однако, в отличие от последней, у МФЛ толщиной 2,7 мм выкрашивание бронзовых гранул из фторопластовой композиции не наблюдается. Размер бронзовых гранул у исследуемых образцов МФЛ составляет 50–150 мкм, их средний размер – порядка 130 мкм (согласно ТУ 1-92-95-84 для изготовления бронзового слоя используются сферические гранулы с диаметром частиц 63–160 мкм).

Локально на образцах МФЛ марки DU(н) имеет место неприпекание бронзового слоя к медному подслою, что выражается в отсутствии соединительной шейки между гранулами и медным подслоем (рис. 19).



**Рис. 18.** Микроструктура образца МФЛ марки DU(н) толщиной 2,7 мм с неравномерным распределением бронзовых гранул (Словакия) ( $\times 100$ )



**Рис. 19.** Микроструктура образца МФЛ марки DU(н) толщиной 2,7 мм с неприпеченным бронзовым слоем (Словакия) ( $\times 200$ )

По качеству заполнения пор фторопластовой композицией образцы МФЛ марки DU(н) соответствуют требованиям ПИ. Фторопластовая композиция покрывает вершины бронзовых гранул и заполняет пустоты между ними. Причем у МФЛ толщиной 2,7 мм наблюдается большее количество фторопласта.

Толщина медного подслоя (плакировки) у образца МФЛ толщиной 1,2 мм под антифрикционным слоем составляет порядка 30 мкм, на обратной стороне стальной основы – 10–12 мкм; у образца МФЛ толщиной 2,7 мм – 20 мкм и 8–12 мкм, соответственно.

При испытаниях по Эриксену отслоение напеченного слоя от стальной основы и фторопластового слоя от бронзовых гранул на исследуемых образцах МФЛ не происходило. Глубина лунки для образца МФЛ толщиной 1,2 мм составила 10,4 мм, что соответствует требованиям НТД. Для образца МФЛ толщиной 2,7 мм глубина лунки составила 10,6 мм при норме 11,0 мм согласно НТД.

По результатам спектрального анализа материал подложки образцов МФЛ марки DU(н) (Fe – основа; С – 0,03–0,04 % ; Si – 0,45–0,48 % ; Mn – 1,08–1,59 % ; Cr – 17,0–17,2 % ; Ni – 8,6–8,8 % ; Mo – 0,07–0,12 %) близок к нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632–72), которая, согласно ПИ, может применяться в качестве материала основы МФЛ.

Из МФЛ толщиной 1,2 мм опробована технология изготовления свертных втулок с фланцем с внутренним диаметром 6 мм, из МФЛ толщиной

2,7 мм – с внутренним диаметром 40 мм. В первом случае еще на этапе промежуточных переходов произошло отслоение фторопластового слоя как по фланцу, так и по высоте втулки (рис. 20), в связи с чем окончательно в размер такие втулки не изготавливались. При визуальном осмотре свертных втулок с фланцем диаметром 40 мм из МФЛ толщиной 2,7 мм наблюдалась качественная адгезия фторопластового слоя в цилиндрической части втулки, однако на плоской поверхности фланца и локально на радиусном переходе также произошло его отслоение (рис. 21).



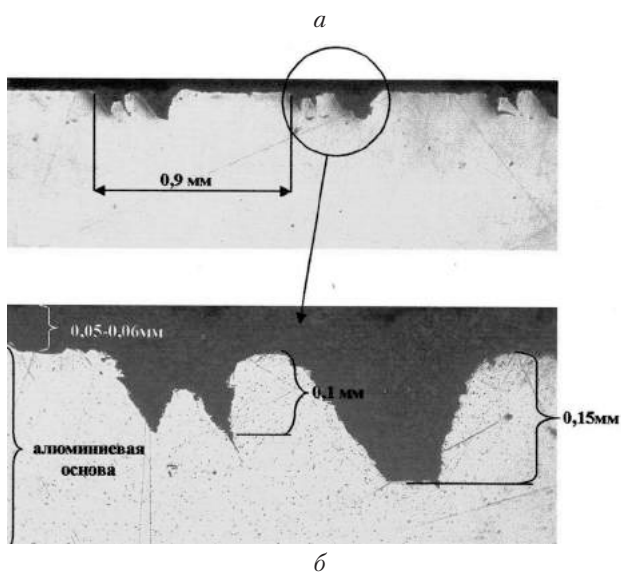
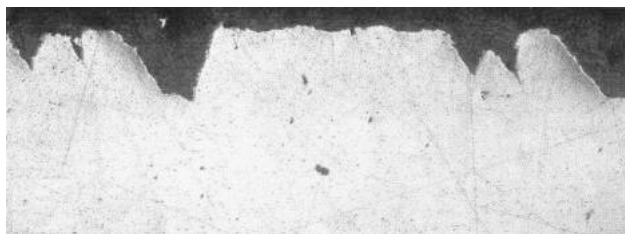
**Рис. 20.** Заготовки свертных втулок с фланцем с внутренним диаметром 6 мм из МФЛ марки DU(н) толщиной 1,2 мм (Словакия)



**Рис. 21.** Свертные втулки с фланцем с внутренним диаметром 40 мм из МФЛ марки DU(н) толщиной 2,7 мм (Словакия)

### Металлофторопластовый материал на основе алюминиевого сплава АМг-3М (Институт проблем материаловедения НАН Украины)

Объект исследования – листовый образец металлофторопластового материала на основе алюминиевого сплава АМг-3М, разработанного в ИПМ НАН Украины. В отличие от традиционной МФЛ в исследуемом материале отсутствует напеченный бронзовый слой. Алюминиевая основа имеет периодически повторяющийся рельеф с неровностями глубиной 0,1 и 0,15 мм, сформированный механической обработкой, за счет которого обеспечивается адгезия фторопластового слоя к подложке (рис. 22). Общая



**Рис. 22.** Микроструктура металлофторопластового материала на основе алюминиевого сплава АМг-3М: а)  $\times 100$  (а); б)  $\times 50$  (ИПМ НАН Украины)

толщина образца составляет 1,7 мм, алюминиевой основы – 1,64–1,65 мм, фторопластового слоя – 0,05–0,06 мм.

При визуальном осмотре свертных втулок без фланца с внутренним диаметром 20 мм, изготовленных из исследуемого материала, царапины и забоины, а также отслоение фторопластового слоя не наблюдались (рис. 23).



**Рис. 23.** Свертные втулки без фланца из металлофторопластового материала на основе из алюминиевого сплава АМг-3М (ИПМ НАН Украины)

### Металлофторопластовые материалы на основе титанового сплава ВТ1-0 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т (ГП «АНТОНОВ», Институт проблем материаловедения НАН Украины)

В ГП «АНТОНОВ» совместно с ИПМ НАН Украины разработана технология изготовления листовых образцов металлофторопластового материала на основе из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и титанового сплава ВТ1-0 с покрытием на основе наполненного фторопласта (наполнитель – бронзовый порошок, графит и дисульфид молибдена). При выборе материала подложки руководствовались требованиями ПИ, где нержавеющая сталь 12Х18Н10Т указана в качестве материала основы МФЛ. Выбор же сплава ВТ1-0 обусловлен тем, что он относится к титановым сплавам повышенной пластичности с пределом прочности в отожженном состоянии не более 60 кгс/мм<sup>2</sup>. Такие сплавы применяются в основном в виде листов, штамповка которых может осу-

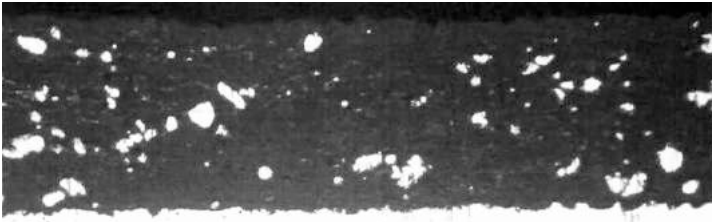


Рис. 24. Микроструктура образца металлофторопластового материала на основе из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с фторопластовым покрытием, содержащим бронзовый порошок и дисульфид молибдена ( $\times 100$ )

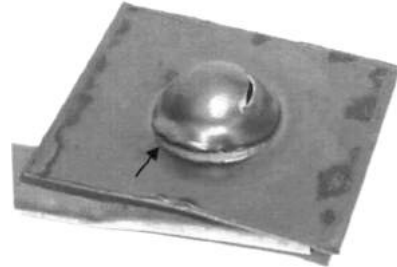


Рис. 25. Образец металлофторопластового материала, показанного на рис. 24, после испытаний по Эриксену (стрелкой показано отслоение покрытия)

существовать в холодном состоянии, что весьма существенно при изготовлении свертных втулок.

Подготовка подложки включает струйно-абразивную обработку поверхности под покрытие до шероховатости Rz 40–80 мкм для обеспечения адгезии покрытия с подложкой.

Микроструктура образца на основе стали 12Х18Н10Т с фторопластовым покрытием, содержащим в качестве наполнителя бронзовый порошок и дисульфид молибдена, представлена на рис. 24. Толщина покрытия составляет 0,32–0,43 мм при общей толщине образца порядка 1,65 мм.

Несмотря на хорошее заполнение фторопластовой композицией неровностей (шероховатости) на поверхности подложки, при испытании по Эриксену произошло отслоение покрытия (рис. 25). Глубина лунки составила 13,5–14,0 мм, что соответствует требованиям ПИ.

При изгибе такого образца на угол  $90^\circ$  как в сторону покрытия, так и в сторону стальной подложки, отслоение фторопластового покрытия от подложки не наблюдалось. При вырубке круглых элементов из образца отслоение фторопластового покрытия от подложки также не происходило.

### Цельные двухслойные фторопластсодержащие втулки (Институт проблем материаловедения НАН Украины)

Разработанная в ИПМ НАН Украины технология изготовления цельных фторопластсодержащих втулок является довольно простой и экономически эффективной, не требует специального оборудования и сложной оснастки. Суть технологии заключается в припекании гибкой пластины из наполненного фторопласта на внутреннюю поверхность трубчатой заготовки из стали марки 12Х18Н10Т (рис. 26).

Гибкие пластины из наполненного фторопласта изготавливали методом порошковой металлургии в пресс-форме для прессования пластин. В полость пресс-формы помещали стальную или титановую подложку, на которую насыпали смесь порошка фторопласта и наполнителя (порошок бронзы, графита или дисульфида молибдена). Пластины из наполненного фторопласта прессовали и спекали вместе с подложкой.

Припекание гибких пластин из наполненного фторопласта к внутренней поверхности трубчатых заготовок, предварительно подвергнутых струйно-абразивной обработке, выполняли в специальной оснастке.

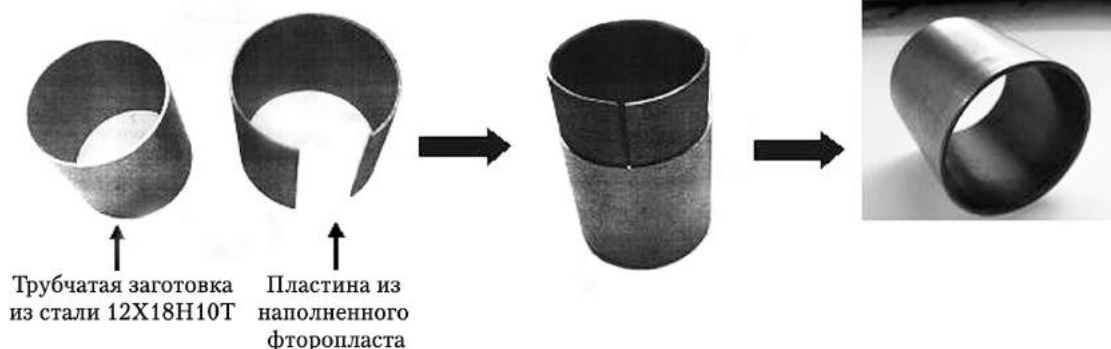


Рис. 26. Схематическое изображение последовательности изготовления двухслойной фторопластсодержащей втулки

### Спеченный бронзофторопластовый материал (ГП «АНТОНОВ», Институт проблем материаловедения НАН Украины)

Для изготовления втулок с внутренними и наружными поверхностями трения и деталей с винтовой поверхностью трения (гаек), работающих без смазки или в условиях ограниченной подачи смазки, в ГП «АНТОНОВ» совместно с ИПМ НАН Украины разработан и внедрен самосмазывающийся материал каркасного типа. Материал представляет собой композицию, состоящую из бронзовой основы с припеченным пористым каркасом из бронзового порошка, пропитанным суспензией фторопласта с добавлением графита. Детали из такого материала (рис. 27) работают в широком интервале температур (-60...+260 °С) и вибраций (до 35 Гц) при нагрузке до 100 МПа и скорости скольжения до 1 м/с. Применение самосмазывающегося бронзофторопластового материала в узлах трения самолетов обеспечивает надежность и стабильность их рабочих характеристик, снижение веса и габаритов, сокращение времени на регламентное обслуживание и предполетную подготовку самолетов.

Как дальнейшее развитие уже внедренного материала, представляют интерес спеченные бронзовые втулки, поры которых пропитаны наполненным



Рис. 27. Детали из спеченного самосмазывающегося материала на бронзовой основе с фторопластсодержащим антифрикционным слоем



Рис. 28. Антифрикционная бронзовая втулка, пропитанная наполненным фторопластом

фторопластом (рис. 28). Такие втулки не имеют бронзовой подложки и являются, по сути, аналогом рабочего слоя МФЛ. При их изготовлении из технологического цикла исключена операция «прессование». После спекания внутреннюю (рабочую) поверхность втулки калибруют до требуемого размера. При необходимости допускается механическая обработка наружной поверхности втулки.

### Антифрикционные покрытия на основе фторопласта для деталей из титановых сплавов со сферической поверхностью трения (ГП «АНТОНОВ», Институт проблем материаловедения НАН Украины)

Совместно с ИПМ НАН Украины в ГП «АНТОНОВ» разработана технология формирования антифрикционных покрытий на основе фторопласта, наполненного графитом. Такие покрытия предназначены для сферических поверхностей деталей из титановых сплавов, входящих в состав шарнирных компенсаторов воздушных систем самолетов (рис. 29).



Рис. 29. Антифрикционные покрытия на основе фторопласта, наполненного графитом

В процессе разработки технологии исследовали несколько вариантов подготовки рабочей поверхности деталей: струйно-абразивная обработка до шероховатости Rz 40–80 мкм; плазменное напыление бронзового порошка марки БрО-10; нанесение объемной стальной сетки марки СВС.

Компенсаторы, содержащие сферические детали с разработанными антифрикционными покрытиями, испытывали на прочность и ресурсные характеристики. При входном контроле и в процессе ресурсных испытаний до разрушения все компенсаторы были герметичными. После соответствующей наработки циклов при температуре 240 °С все антифрикционные покрытия, независимо от способа предварительной подготовки поверхности сферы, сохранили высокую адгезию к основе. При этом компенсаторы, у которых покрытие было нанесено на рабочую поверхность сферы после ее струйно-абразивной обработки, имели большую наработку циклов при ресурсных испытаниях.

**Выводы**

При исследовании МФЛ зарубежных производителей установлены незначительные отклонения их по размерным и структурным параметрам от требований НТД, принятой в авиастроении, что обусловлено тем, что такие МФЛ предназначены для производства элементов конструкций в других отраслях промышленности. Исследованные МФЛ могут быть рекомендованы для применения в узлах трения самолетов при условии положительных результатов испытаний втулок на соответствие требованиям Отраслевого стандарта, принятого в авиастроении, и обеспечения технологии изготовления втулок.

Потребность в коррозионно-стойких антифрикционных втулках для авиастроения можно обеспечить как за счет использования имеющихся МФЛ на основе из нержавеющей стали, так и разработки новых фторопластсодержащих материалов на основе нержавеющей стали, алюминиевых и титановых сплавов. Окончательное заключение об использовании втулок из новых металлофторопластовых материалов в узлах трения самолетов может быть сделано только после их периодических испытаний по программе Отраслевого стандарта, принятого в авиастроении.

Спеченные бронзовые втулки, пропитанные наполненным фторопластом, являются наиболее перспективным материалом для замены втулок из МФЛ с точки зрения служебных характеристик (аналог рабочего слоя МФЛ, коррозионная стойкость, отсутствие стыка), экономичности за счет простоты технологии (отсутствие операции прессования и свертки, одновременное спекание втулок различного типоразмера) и обеспечения независимости от поставщиков МФЛ.

Эффективность применения антифрикционных покрытий из наполненного фторопласта на подвижных соединениях (компенсаторах) титановых трубопроводов самолета обусловлена возможностью снижения веса трубопроводов за счет упрощения конструкции компенсаторов при условии сохранения их надежности, герметичности и обеспечения необходимого ресурса.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ГП «АНТОНОВ» Равлик Т.А., Зарвной Д.В., Базилевскому А.Г., Косян С.В. и Романив Л.М., а также сотрудникам ИПН НАН Украины д.т.н., профессору Вишнякову Л.Р. и к.т.н. Ненахову А.В. за участие в проведении исследований и предоставленные материалы.

*Bychkov S.A., Lavrenko I.G., Nechyporenko O.Yu., Romashko I.M., Mladynov S.D.*  
ANTONOV, State-owned Enterprise. Ukraine, Kiev

**QUESTION STATE AND PROSPECTS OF THE METAL-FLUOROPLASTIC APPLICATION FROM NEW MANUFACTURERS IN THE FRICTION UNITS OF AIRCRAFT**

*Results of researches and tests of the metal-fluoroplastic tapes from foreign manufacturers executed according to requirements of normative-technical documentation accepted in aircraft construction are presented. Perspective development of the materials with fluoroplastic on the steel, aluminium, titanium and bronze bases as alternatives of the metal-fluoroplastic tapes are shown.*

*Keywords:* metal-fluoroplastic tape; macro- and microstructure; Ericson test; metal-fluoroplastic bush; coating from filled fluoroplastic.