

ВЛИЯНИЕ МАРКИ БРОНЗЫ НА СВОЙСТВА СТАЛИ 30ХГСН2А ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ ЛЕГИРОВАНИИ

Д.А. Козлов, В.В. Овчинников



**КОЗЛОВ
Дмитрий
Александрович**

Аспирант МГИУ. Область научных интересов — материаловедение, применение методов электроискрового легирования и ионной имплантации для создания поверхностных слоев металлических сплавов с требуемыми свойствами. Автор 12 научных публикаций.

Введение

В настоящее время в различных конструкциях ответственного назначения применяются высоконагруженные пары трения скольжения, состоящие из вала и цилиндрической втулки, для изготовления которых используют конструкционные стали типа 30ХГСН2А. Снижение коэффициента трения достигается использованием бронзового покрытия, которое наносят на внутреннюю и торцевую поверхности втулки.

Для нанесения слоя бронзы на деталь из стали 30ХГСН2А перспективно применение концентрированных потоков энергии, к числу которых относится электроискровое легирование (ЭИЛ) [13]. Преимуществами этого метода являются: возможность нанесения на обрабаты-

ваемую поверхность компактным электродом токопроводящих материалов, достаточно высокая прочность сцепления наносимого слоя с материалом основы, низкая энергоемкость процесса, простота технологических операций. В то же время данный метод обладает и рядом недостатков, сдерживающих его широкое внедрение в промышленное производство: небольшая толщина наносимого слоя, низкая автоматизация процесса обработки, отсутствие необходимой информации о выборе параметров процесса, закономерностях формирования



**ОВЧИННИКОВ
Виктор
Васильевич**

Доктор технических наук, профессор, академик Международной академии информатизации, ведущий специалист по сварке ФГУП «Российская самолетостроительная корпорация «МиГ». Основное направление научной работы — методы и технологические средства получения качественных сварных соединений при изготовлении ответственных конструкций из высокопрочных алюминиевых сплавов. Автор 250 научных работ, в том числе 87 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

макро- и микроструктуры поверхностных слоев материала, подвергнутого электроискровому воздействию.

Целью данной работы являлось исследование влияния параметров режима ЭИЛ на толщину слоя покрытия и влияние марки применяемой бронзы на свойства стали 30ХГСН2А.

Методика нанесения покрытия и методы испытаний

Электроискровую обработку осуществляли на серийно выпускаемой установке ЕЛФА-512 с энергией импульса 0,06–0,10 Дж, в состав которой входит генератор электроискровых импульсов и устройство, осуществляющее вращение детали, а также продольное перемещение электрода вибрационной головки относительно оси вращения.

Для осуществления процесса в автоматическом режиме и улучшения качества защиты металла в зоне нанесения покрытия установка ЕЛФА-512 была дополнительно оснащена специальной насадкой, изготовленной из органического стекла, для подачи аргона в зону электроискрового легирования. Конструкция насадки обеспечивает свободное перемещение ее корпуса в держателе в диапазоне рабочего хода 25 мм. Фиксация насадки в рабочем положении осуществляется пружиной, обеспечивающей необходимое усилие прижатия сопрягаемых деталей.

Для обработки торцевой поверхности деталей типа втулок установка ЕЛФА-512 была

укомплектована торцевым вращателем, позволяющим закреплять обрабатываемые детали и регулировать скорость перемещения электрода относительно поверхности детали.

Отработку режимов нанесения покрытия на стальную подложку методом электроискрового легирования проводили на образцах в виде втулок диаметром 18 мм и длиной 20 мм. Химический состав и механические свойства стали 30ХГСН2А представлены в табл. 1 и 2.

Образцы и детали перед ЭИЛ подвергали термической обработке, включающей закалку: нагрев до 900–910 °С, охлаждение в масле и отпуск при температуре 210–215 °С в течение 2–2,5 часов. Такой режим термической обработки позволяет получать значения твердости не менее 45 HRC.

Для создания антифрикционного покрытия на образцах стали 30ХГСН2А применялась бронза марок ВБр5М и БрАЖМц-10-3-1,5, химический состав которых представлен в табл. 3.

Испытания на растяжение и динамический изгиб проводили в соответствии с ГОСТ 6996-75 «Механические испытания металлов».

Коррозионные испытания в камере соляного тумана HSK-1000, в которой имитируются климатические условия субтропиков, осуществлялись согласно ГОСТ 9012-73 на цилиндрических образцах диаметром 50 мм и толщиной 1 мм. Бронзовое покрытие наносили с одной стороны образца.

Испытания на склонность к коррозионному растрескиванию проводили по ОСТ 1.90211-76

Таблица 1

Химический состав стали 30ХГСН2А, масс. %

C	Mn	Cr	Si	Ni	S	P
					не более	
0,27 – 0,35	0,5 – 0,8	0,25 – 0,50	0,17 – 0,37	1,5 – 2,0	0,25	0,25

Таблица 2

Механические свойства образцов из стали 30ХГСН2А

Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость a_H , Дж/см ³	НВ после обжига, не более
1650	1400	9	45	60	45

Таблица 3

Химический состав бронз БрАЖМц10-3-1,5 и ВБр5М

Марка бронзы	Химический состав, массовая доля, %													
	Основные компоненты					Примеси, не более								
	Cu	Al	Fe	Mn	P	Sn	Si	Pb	Zn	Ni	Sb	Cr	S	Сумма примесей
БрАЖМц10-3-1,5	осн.	9–11	2–4	1–2	-	0,1	0,1	0,03	0,5	-	-	-	-	0,75
ВБр5М	осн.	-	-	2,5–3,5	5,5*–6,5	-	-	0,03	0,5	0,5	0,01	0,05	0,01	1,1

Примечание. Допускается увеличение верхнего предела содержания фосфора до 7% и уменьшение нижнего предела содержания марганца до 2%.

«Стали высокопрочные. Метод ускоренного испытания на склонность к коррозионному растрескиванию».

Испытания на усталость стали 30ХГСН2А без покрытия и с покрытием проводились на цилиндрических образцах с диаметром рабочей части 7,5 мм при чистом изгибе с частотой 50 Гц на базе 10^7 циклов в соответствии с ГОСТ 52250–79.

Проведение испытаний на малоцикловую усталость осуществлялось согласно ГОСТ 23026–76 на машине TIRATE ST-2300 с частотой нагружения 8 циклов/мин на образцах типа II.

Металлографический анализ структуры поверхностных слоев после электроискрового легирования выполнен с помощью оптического металлографического микроскопа марки НЕОРНОТ-21 при увеличении 350–1000 раз.

Коэффициент трения определяли на лабораторной установке типа дисковой машины Барвела для кратковременных испытаний.

Испытания на износостойкость осуществлялись на универсальной испытательной машине КЕ-4. В процессе испытаний образец совершает возвратно-поступательное движение по контртелу со скоростью 0,132–0,135 м/мин. В качестве контртела использовался образец из стали 30ХГСН2А. На первом этапе испытания проводили притирку рабочих поверхностей в течение одного часа при равномерном контактном давлении $p_0=25$ МПа, создаваемом индентором на круговой площадке контакта диаметром 2 мм. В дальнейшем контактное давление дискретно увеличивали через каждый час рабо-

ты на 25 МПа до предельной величины 150 МПа.

После испытаний изучали состояние поверхности стали 30ХГСН2А с нанесенным на нее антифрикционным покрытием в зависимости от прилагаемой нагрузки.

Результаты испытаний и их обсуждение

При нанесении покрытия электроискровым методом варьировали величину рабочего тока импульса I в пределах 0,7–1,4 А и величину продольной подачи (продольное перемещение детали на один оборот) в пределах $n=0,5–1,8$ мм/об.

Анализ макрошлифов показал, что слой покрытия из бронзы формирующийся на поверхности образца из стали 30ХГСН2А, зависит от режима нанесения. Ток импульса оказывает заметное влияние на формирование покрытия: при значении тока импульса в пределах 0,7–0,8 А формируется слой бронзы толщиной $H=4–6$ мкм (рис. 1). При этом встречаются участки, на которых покрытие полностью отсутствует. Увеличение тока импульса I до 0,9–1,1 А сопровож-

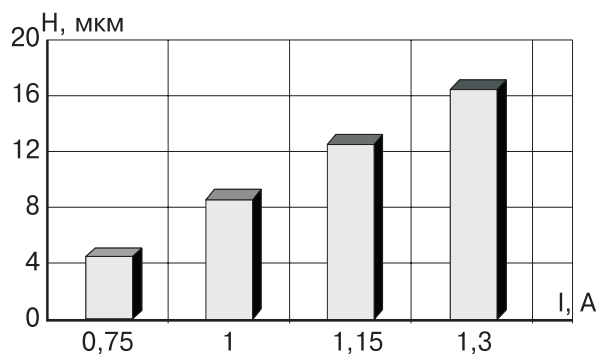


Рис. 1. Влияние тока импульса при ЭИЛ на толщину бронзового покрытия

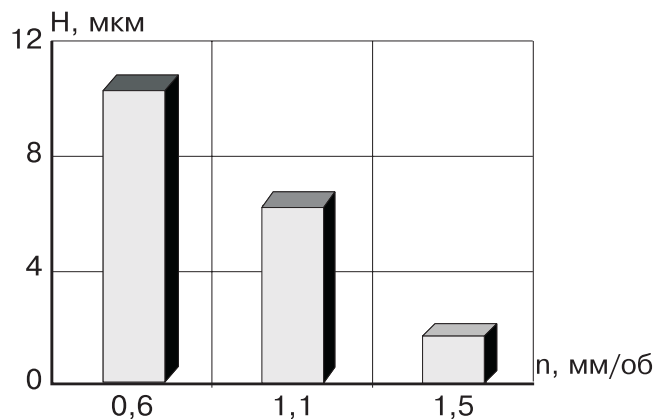


Рис. 2. Влияние величины продольной подачи образца на толщину бронзового покрытия

дается формированием слоя бронзы толщиной 8–10 мкм, при величине тока импульса 1,1–1,2 А наблюдаются участки с толщиной покрытия 12–14 мкм, а дальнейшее увеличение тока до 1,3–1,4 А сопровождается формированием слоя покрытия толщиной уже 15–18 мкм. Однако при этом, наряду с наличием участков со значительной толщиной покрытия, имеются участки с толщиной слоя бронзы в пределах 2–3 мкм. Таким образом, увеличение тока импульса до величин 1,3–1,4 А ухудшает качество обработки поверхности образца.

Увеличение продольной подачи детали приводит к снижению толщины слоя покрытия (рис. 2). При продольной подаче равной 0,5–0,9 мм/об толщина покрытия составляет 10–12 мкм, а при ее увеличении до значений 1,0–1,25 мм/об толщина слоя бронзы снижается до 6–7 мкм. Дальнейшее увеличение значений продольной подачи (более 1,5–1,6 мм/об) приводит к снижению толщины покрытия до значений 2–3 мкм с



Рис. 3. Микроструктура слоя бронзы ВБр5М на стали 30ХГСН2А при электроискровом легировании с величиной продольной подачи детали 1,6 мм/об (x500)

наличием участков, не имеющих покрытия (рис. 3).

Металлографические исследования показали, что после ЭИЛ участки поверхности образцов, оставшиеся без покрытия, становятся неровными, появляются углубления и выступы с отклонением от среднего уровня не менее, чем на ± 10 мкм. С целью получения равномерной толщины покрытия была применена обкатка поверхности образца после электроискрового легирования роликами. Установлено, что это приводит к утонению нанесенного слоя бронзы до толщины 4–12 мкм. Участки без покрытия после обкатки стальным роликом сохраняются там же, где они были до обкатки.

В процессе исследований было установлено, что при электроискровом легировании подложки из стали 30ХГСН2А электродами из бронз ВБр5М и БрАЖМц10-3-1,5 внешний вид получаемого покрытия существенно отличается. При использовании бронзы БрАЖМц10-3-1,5 покрытие имеет светло-золотистый цвет. В случае использования бронзы ВБр5М при ЭИЛ в воздушной атмосфере наблюдается формирование слоя темно-серого цвета, что, по-види-

Таблица 4

Содержание основных легирующих элементов в материале электродов и покрытий при электроискровом легировании в воздушной атмосфере

Образец		Химический состав, масс %						
		Al	Fe	Mn	P	Pb	Zn	Ni
БрАЖ Мц 10-3-1,5	электрод	10,2	3,4	1,6	-	0,03	0,5	-
	покрытие	10,1	3,3	1,55	-	0,01	0,45	-
ВБр5М	электрод	-	-	2,7	5,89	0,03	0,5	0,5
	покрытие	-	-	2,40	1,35	0,02	0,1	0,25

мому, связано с интенсивным окислением фосфора в электроискровом промежутке.

Результаты локального спектрального анализа содержания основных легирующих элементов в полученных покрытиях показали, что при ЭИЛ бронзой ВБр5М без защиты зоны обработки аргоном наблюдается существенное снижение содержания фосфора (табл. 4).

Применение в процессе электроискрового легирования бронзой марки ВБр5М специальной насадки позволяет устранить выгорание фосфора при расходе аргона 2–2,2 л/мин. В случае обработки деталей малого диаметра (диаметр детали меньше диаметра отверстия сопла, из которого поступает аргон) для улучшения защиты зоны электроискрового разряда от доступа воздуха целесообразно применять экран, расположенный с противоположной от сопла стороны (рис. 4).

Для выбора марки материала электрода при ЭИЛ решающим становится влияние нанесения покрытия из той или иной марки бронзы на механические свойства материала подложки, например при растяжении и динамическом изгибе.

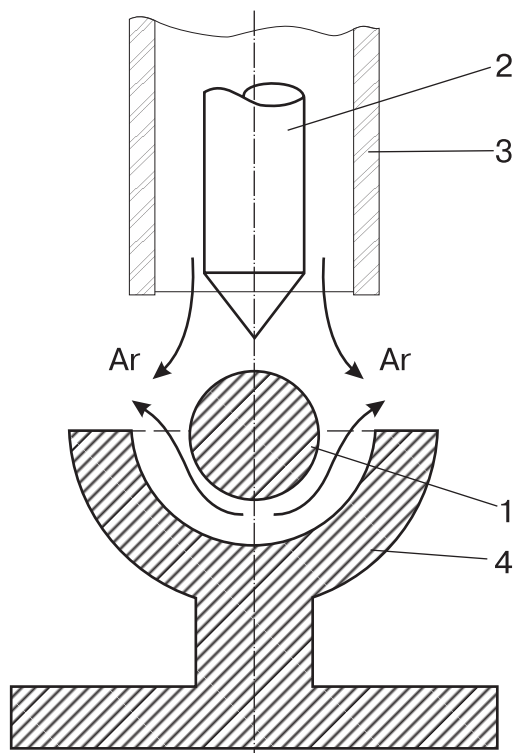


Рис. 4. Схема процесса электроискрового легирования деталей малого диаметра:

1 — деталь; 2 — электрод; 3 — сопло; 4 — экран;
Ar — аргон

Результаты сравнительных испытаний на растяжение и динамический изгиб образцов без покрытия и с покрытием представлены в табл. 5. Их анализ показывает, что бронзовое покрытие не оказывает влияния на механические свойства материала подложки. Предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, относительное поперечное сужение для стали 30ХГСН2А с бронзовым покрытием полностью соответствуют требованиям технической документации (ТУ 1-1-940-74).

Учитывая, что изделия авиационной техники, в которых применяются втулки с антифрикционным покрытием, эксплуатируются в различных климатических условиях, было изучено влияние электроискрового легирования на склонность высокопрочной стали 30ХГСН2А к общей коррозии и коррозионному растрескиванию.

Установлено, что нанесение на образцы покрытия из бронзы приводит к появлению пятен ржавчины через 45 дней при испытаниях в камере соляного тумана.

При испытаниях образцов на склонность к коррозионному растрескиванию напряжения, создаваемые в процессе деформирования образца, не превышали предела текучести материала. Критерием оценки склонности образцов к коррозионному растрескиванию служило время до появления трещин на образце.

Было показано, что покрытие увеличивает склонность высокопрочной стали 30ХГСН2А к коррозионному растрескиванию: минимальное время разрушения образцов с покрытием — 60 суток, со слоем из стали 30ХГСН2А — 32 дня. В то же время шлифованные контрольные образцы из 30ХГСН2А не разрушились даже по истечении 180 суток.

Уменьшение сопротивления коррозионному растрескиванию образцов из высокопрочной стали 30ХГСН2А с покрытием связано с возникновением в поверхностном слое в процессе ЭИЛ растягивающих напряжений. Для исключения этого явления необходимо создать на поверхности стали до нанесения покрытий остаточных сжимающих напряжений путем по-

Таблица 5

Влияние электроискрового легирования на механические свойства стали 30ХГСН2А

Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Снижение предела прочности, %	Относительное удлинение ψ , %	Ударная вязкость a_n при -70°C , Дж/см ²
Образцы без покрытия				
$\frac{1599 - 1610}{1605}$	$\frac{1395 - 1412}{1400}$	$\frac{8,5 - 9,2}{8,7}$	$\frac{40,8 - 45,2}{43,4}$	$\frac{65 - 70}{67}$
Образцы после ЭИЛ бронзой ВБр5М				
$\frac{1564 - 1570}{1574}$	$\frac{1370 - 1379}{1374}$	$\frac{9,2 - 10,0}{9,5}$	$\frac{41,3 - 45,7}{44,4}$	$\frac{70 - 75}{72}$
Образцы после ЭИЛ бронзой БрАЖМц10-3-1,5				
$\frac{1560 - 1577}{1566}$	$\frac{1315 - 1330}{1320}$	$\frac{9,3 - 10,4}{9,6}$	$\frac{44,1 - 45,1}{44,7}$	$\frac{65 - 75}{69}$
В соответствии с ТУ 1-1-940-74				
1500	1200	8,0	40	50

Таблица 6

Результаты испытаний на малоцикловую усталость образцов стали 30ХГСН2А

Максимальное напряжение цикла σ_{max}	Количество циклов до разрушения				
	Контрольные образцы	без алмазного выглаживания		с алмазным выглаживанием	
		ВБр5М	БрАЖМц 10-3,5-1,5	ВБр5М	БрАЖМц 10-3,5-1,5
$0,9\sigma_B$	9198	–	1514	–	8714
$0,8\sigma_B$	18176	9807	19489	11330	11089
$0,7\sigma_B$	>50000	13183	43455	24104	41568
$0,6\sigma_B$	–	33230	–	>50000	–
$0,55\sigma_B$	–	>50000	–	–	–

верхностного пластического деформирования.

Испытания на усталость стали 30ХГСН2А без покрытий и с покрытием показали, что нанесение покрытия из бронзы ВБр5М существенно снижает сопротивление усталости образцов из стали 30ХГСН2А. Так, образцы без покрытия не разрушались при испытаниях на базе 10^7 циклов при $\sigma_{max} = 500$ МПа. Образцы же, прошедшие процедуру электроискрового легирования, при этом же напряжении имели долговечность менее 10^5 циклов.

Данные испытаний на малоцикловую уста-

лость представлены в табл. 6. При этом часть образцов перед ЭИЛ была подвергнута алмазному выглаживанию. Из приведенных результатов видно, что образцы, покрытые бронзой БрАЖМц10-3,5-1,5, выдержали в 2–3 раза большее количество циклов до разрушения, чем образцы с покрытием из ВБр5М, что можно объяснить различной скоростью зарождения трещин (СЗТ), вызванной различием термоциклического воздействия при электроискровом легировании БрАЖМц-10-3,5-1,5 и ВБр5М на структуру поверхностного слоя материала об-

разцов и локальный уровень напряжений. Полученные результаты показали, что электроискровое легирование образцов стали 30ХГСН2А бронзами марок ВБр5М и БрАЖМц10-3-1,5 сопровождается снижением прочности при малоциклового усталости указанной стали. Этот фактор конструкторам необходимо учитывать при разработке высоконагруженных деталей, работающих в условиях трения скольжения. Из данных табл. 6 также следует, что алмазное выглаживание поверхности образцов перед нанесением покрытия не дает существенного увеличения значений малоциклового усталости.

Фрактографический анализ изломов и металлографические исследования выявили более крупные фрагменты микроструктуры в зоне зарождения трещины на образцах с покрытием из бронзы ВБр5М и большее расстояние между усталостными бороздками по сравнению с образцами с покрытием из бронзы БрАЖМц10-3,5-1,5.

Микроструктурные исследования образцов с покрытием из ВБр5М показали наличие сетки микротрещин в слое подложки, непосредственно контактирующим с покрытием (рис. 5), которая служит очагом зарождения макротрещин, приводящих к разрушению образцов при испытаниях на малоцикловую усталость.

Учитывая, что для рассматриваемых деталей типа втулок важными являются трибологические характеристики, на образцах с покрытием из бронзы ВБр5М и БрАЖМц10-3-1,5 были получены значения коэффициента трения, который определяли на образцах с покрытием в паре с диском из стали 30ХГСН2А. Полученные результаты представлены на рис. 6. Видно, что во всем диапазоне удельных нагрузок коэффи-



Рис. 5. Структура поверхностного слоя подложки стали 30ХГСН2А с сеткой микротрещин при ЭИЛ бронзой ВБр5М (x500)

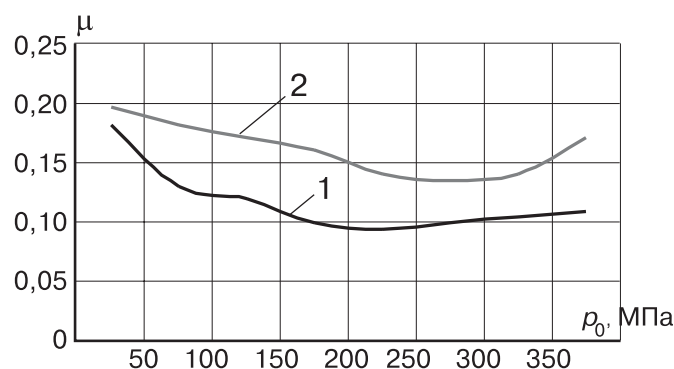


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения μ образцов с покрытием из бронз марок ВБр5М (1) и БрАЖМц10-3-1,5 (2) в паре со сталью 30ХГСН2А

циент трения образцов с покрытием из БрАЖМц10-3-1,5 выше, чем у образцов с покрытием из ВБр5М. При этом обе кривые характеризуются наличием минимальной величины коэффициента трения. Для образцов с покрытием из ВБр5М минимальные значения коэффициента трения наблюдаются при удельной нагрузке 200–250 МПа. У образцов с покрытием из БрАЖМц10-3-1,5 наименьшие значения коэффициента трения $\mu = 0,13–14$ имеют место при удельной нагрузке 250–300 МПа.

При испытании на износостойкость образцов после ЭИЛ установлено, что по мере увеличения времени испытаний интенсивность линейного изнашивания $\Delta \bar{d}$ (изменение диаметра образца, отнесенное к пути притирки) для образцов без покрытия существенно выше, чем у образцов с покрытием из бронзы ВБр5М (рис. 7). По-видимому, увеличение износостойкости связано с ролью слоя бронзы, который в процессе испытаний действует по механизму сухой смазки. В связи с этим обеспечивается залечивание рисок и бороздок, возникающих

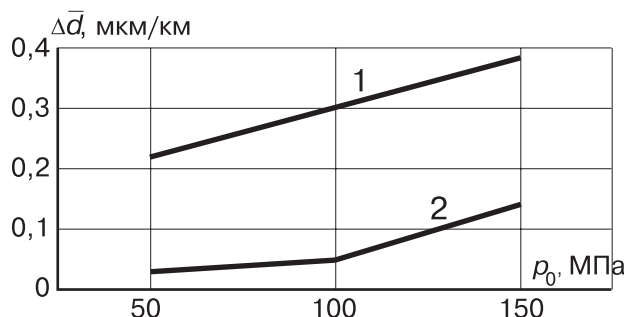


Рис. 7. Интенсивность линейного изнашивания образцов стали 30ХГСН2А без покрытия (1) и с покрытием из ВБр5М (2)



Рис. 8. Втулка из стали 30XГСН2А узла механизации крыла самолета МиГ-АТ, на торцевую и внутреннюю поверхности которой нанесено покрытие бронзы БрАЖМц10-3-1,5

на поверхности образца при испытаниях на износ.

На основании выполненных исследований предложен способ и режимы нанесения бронзового покрытия методом ЭИЛ на торцевую и внутреннюю поверхности втулок узлов механизации крыла самолета МиГ-АТ на модернизированной установке ЭЛФА-512М в автоматическом режиме. Для ЭИЛ следует использовать бронзу марки БрАЖМц10-3-1,5. Была изготовлена партия втулок (рис. 8), которые успешно прошли испытания и эксплуатацию на летательном аппарате.

Заключение

Проведенные исследования влияния параметров режима электроискрового легирования на свойства стали с покрытием из бронзы позволили определить не только изменение механических и усталостных свойств материала, но и выбрать рациональные технологические режимы.

1. Определены режимы процесса электроискрового нанесения покрытий из бронзы ВБр5М и БрАЖМц10-3-1,5 на поверхность деталей из стали 30XГСН2А на установке ЭЛФА-512М в автоматическом варианте обработки.

2. Показано, что для устранения выгорания фосфора при ЭИЛ деталей бронзой марки ВБр5М необходимо осуществлять процесс в инертном газе (аргоне).

3. Установлено, что покрытие, нанесенное электроискровым методом на основе бронзы,

не влияет на прочностные и пластические свойства стали 30XГСН2А. В то же время ЭИЛ бронзой приводит к снижению показателей малоциклового усталости образцов из стали 30XГСН2А.

4. На основе результатов исследований коэффициента трения и износа образцов после ЭИЛ для изготовления деталей, работающих при высоких нагрузках в условиях трения скольжения, с учетом данных механических испытаний можно рекомендовать к применению бронзу марки БрАЖМц10-3-1,5.

5. Проведенные работы по модернизации установки ЭЛФА-512М позволили автоматизировать процесс электроискрового легирования стальных деталей цилиндрической формы в виде втулки, как по внутренней, так и по торцевой поверхности.

Список литературы

1. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя при электроискровом легировании. – Владивосток: Дальнаука, 1985. – 223 с.
2. Мицкевич М.А., Гитлевич А.Е., Бакуто А.И. Динамика импульсного разряда в условиях его использования для электроискрового легирования // Электронная обработка. 1986. № 3. С. 22–25.
3. Химухин С.Н. Условия возникновения искрового процесса при низковольтной электроискровой обработке // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 1. С. 12–15.