

УДК 621.793

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ИЗНОСА И КОРРОЗИИ ЛИТЬЕВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ПРЕССФОРМ

© Борис Васильевич Бойцов, Леонид Николаевич Лесневский,
Михаил Александрович Ляховецкий, Юрий Владимирович Петухов,
Евгений Михайлович Прусс, Александр Евгеньевич Трошин,
Алексей Михайлович Ушаков

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования*

*«Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
МАИ»
fac2.mail.ru*

***Аннотация.** Рассмотрены возможности применения метода микродугового оксидирования (МДО) для повышения износостойкости и коррозионной стойкости рабочих поверхностей литьевых прессформ в производстве деталей из пластиков. С учётом анализа процессов, происходящих в прессформах, определены наилучшие свойства покрытий и режимы их формирования. Лабораторные испытания покрытий на изгиб, сжатие со сдвигом, износо- и термостойкость, а также испытания в составе литьевой прессформы в серийном производстве, подтвердили их надёжную работу в течение 10^5 циклов без повреждений.*

Значительный объём в современных высокотехнологичных изделиях машиностроения, и в том числе, в летательных аппаратах (ЛА) и их агрегатах, занимают детали, изготавливаемые из неметаллических материалов, к которым относятся пластические и модельные массы и резины.

Так, например, термопласты, основу большинства которых составляют полиэтилены, широко применяются для изготовления коррозионностойких труб, прокладок уплотнений, шлангов, корпусов баков для хранения и подачи топлива в камеру сгорания авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) [1,2]. Термореактивные пластмассы (реактопласты) используются для изготовления деталей с высокими электроизоляционными свойствами, длительно работающие при температурах до 200-250°C, так, например, термопласты типа стекловолоконитов используются для изготовления прессованием деталей электротехнического назначения, располагаемых вблизи горячих частей тех же авиационных двигателей. Специальные модельные массы применяются для изготовления литьевых моделей в технологии производства деталей по выплавляемым моделям, например, в изготовлении турбинных лопаток и др.

В производстве ЛА и их силовых элементов (элеронов, закрылков, ряда мелких деталей типа лючков, коробок и др.) используются стеклотекстолиты, принадлежащие числу наиболее прочных авиационных материалов. Широкий ассортимент и резинотехнических изделий (до 1000 и более различных типов и типоразмеров только в современном авиадвигателе). Он включает в себя как несущие нагрузки эластичные конструкции, такие как резиновые подвески, амортизаторы, буферы, так и разнообразные уплотнители подвижных (сальники, манжеты, клапаны, мембраны) и неподвижных (прокладочные кольца, шнуры и др.) контактов [3].

Гигантскими темпами развивается технология производства элементов летательных аппаратов из композиционных материалов (КМ) [4]. Наиболее распространенными КМ, составляющими примерно 80% объема всего применения, являются полимерные КМ,

позволяющие проводить замену металлических деталей, снижая массу изделий, обеспечивая экономию дефицитных металлов, снижение трудоемкости изготовления деталей и сокращение длительности производственных циклов.

Для формования деталей из неметаллических материалов используется прессование и литье под давлением. Наиболее напряжёнными режимными параметрами отличается литьевое прессование пластмасс [5], так этому процессу присущи более высокие удельные давления до 1500 кг/см^2 при температуре литьевого цилиндра литьевых машин до 300°C и выше в зависимости от применяемого материала.

Общим для перечисленных выше технологических процессов является наличие такого важного элемента технологической оснастки как прессформа, конструкция которой различна в разных техпроцессах и зависит от типа технологии переработки и используемого материала. Как правило, для изготовления форм используются высокоуглеродистые стали типа У8, У10 или легированные стали с большим содержанием хрома типа ШХ15, 12ХНЗА, Х12М, 2Х13 в России и Р-3, Р-4, Р-20, Н-13 и др. за рубежом.

По данным [5,6,7] срок службы прессформы, как правило, определяется стойкостью формообразующих деталей: пуансона и матрицы, и особенно, стойкостью зоны их смыкания (стыка), как наименее стойкой части формы. Деформация формы также как и износ этой зоны приводит к девиации размеров, "заваливанию" острых кромок и появлению на детали недопустимого облоя (гарта) в месте стыка пуансона и матрицы. На основе обобщения накопленного опыта переработки пластмасс на промышленном оборудовании [7], детальной статистики повреждений [8], а также с помощью модельных исследований, в ходе которых достаточно точно воспроизводятся условия реальной переработки [9,10,11], было установлено, что помимо коррозионного воздействия рабочие поверхности форм подвергаются таким основным механическим деформациям, как деформации сжатия, изгиба или сдвига, которые приводят к преждевременному износу (смятию) прежде всего области контакта (стыка), определяющему её ресурс.

В общем случае требования, предъявляемые к материалу форм со стороны разработчиков форм и их изготовителей различны [12]. Так для разработчика важны такие характеристики материала как сопротивление износу, сопротивление удару, сопротивление сжатию, высокая твердость (при температуре работы формы), сопротивление коррозии, теплопроводность. Для изготовителя же важны такие характеристики как обрабатываемость различными методами, стабильность размеров при тепловой обработке, свариваемость, гибкость в упрочнении различными методами.

Использование алюминиевых сплавов в производстве форм имеет достаточно невысокое место в рейтинге применяемых материалов и допускает ограниченное число "прессовок" [13]. Однако, в последние несколько лет сильно возросло применение алюминиевых сплавов для литейных форм, используемых в переработке пластмасс. Это стало возможным благодаря их довольно высокой теплопроводности и большей технологичности в процессах механической обработки.

Таким образом, если алюминиевые сплавы и имеют известные преимущества перед сталями, то без соответствующего упрочнения рабочих поверхностей формы, изготовленные из алюминиевых сплавов, будут значительно уступать стальным по надёжности и, особенно, ресурсу. Поэтому актуальной задачей использования алюминиевых сплавов в качестве конструкционных материалов для изготовления форм, является задача упрочнения и защиты с использованием покрытий рабочих поверхностей полуформ от износа при рабочих температурах и давлениях и агрессивном воздействии перерабатываемых неметаллических материалов.

Одними из перспективных методов формирования износостойких покрытий на алюминиевых сплавах являются методы плазмоэлектролитического осаждения (РЕД) оксидных покрытий, и среди них метод плазменно-электролитического оксидирования (РЕО) или микродугового оксидирования (МДО) [14]. Этот метод обеспечивает получение композиционного керамоподобного покрытия как из основного материала детали, так и из

компонентов электролита, объединяя в одном технологическом процессе модификацию поверхностного слоя детали (образца) и формирование покрытия.

Ресурс рабочих поверхностей алюминиевых деталей агрегатов двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, а также технологической оснастки, используемой при их изготовлении [15], обрабатываемых методом МДО, соизмерим с ресурсом хромированных поверхностей стальных деталей и карбидосодержащих покрытий, что делает этот метод весьма перспективным. Нанесение покрытий на установке МДО осуществляется с использованием анодно-катодных микродуговых разрядов, которые совмещают два процесса: микродугового оксидирования и «катодирования» на одном электроде (образце, детали), т.е. формирование покрытия на поверхности детали происходит при подаче высокого (до 1000 В) асимметричного переменного напряжения между (образцом) деталью 10 и ванной 9, заполненной электролитом (рис. 1).

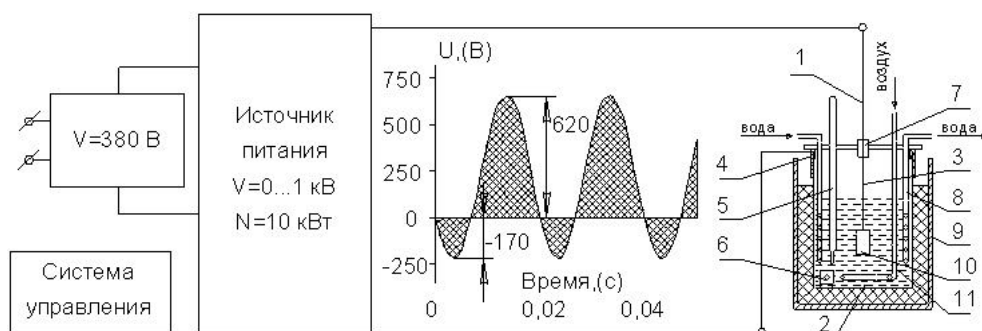


Рис.1. Схема установки МДО: 1-подвод потенциала к образцу; 2-электролит; 3-алюминиевый провод (подвес); 4-косынки фторопластовые; 5-термопара; 6-насос; 7-зажим; 8-змеевик теплообменника; 9-ванна электролитическая; 10-образец; 11-барбатёр.

По результатам настоящего исследования, в котором сравнивались физико-химические и эксплуатационные характеристики МДО покрытий на алюминиевых сплавах системы: Al-Cu-Mg, Al-Si-Mg и Al-Zn-Mg-Cu, таких как Д16Т, АЛ9, АК4-1, В-95, В96-Ц, с использованием методов планирования экспериментов [11] было установлено, что наилучшей обрабатываемостью методом МДО обладает сплав В-95. Кроме того, этот сплав по своим характеристикам отвечает наиболее напряжённым режимам литейного прессования рабочих поверхностей. Эти эксперименты и проведённый анализ позволили получить в оптимальном режиме: состав электролита $C_{\text{KOH}}=2,4$ г/л, $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=6$ г/л, плотность тока $j=16$ А/дм², температура электролита $T=30$ °С, время обработки $t=210$ мин следующие наилучшие параметры покрытия: скорость роста основного слоя покрытия $V_{\text{осн}}=0,5$ мкм/мин, микротвёрдость $\text{HV}_{0,1}=1370$ кг/мм², твёрдость по Супер-Роквелу 75НРТ15, количество электричества на единицу объёма основного слоя покрытия $q=190$ Кл/мм³, адгезия основного слоя покрытия $\sigma=630$ Кг/см². Исследования параметров и характеристик покрытий на образцах были проведены в соответствии методиками ISO и ГОСТ [16].

Толщина покрытия определялась двумя методами: методом токов Фуко и металлографическим методом. Для первого метода использовался прибор ВТ10НЦ в диапазоне измерения толщин от 0-200 мкм, с погрешностью ± 8 мкм. Эти измерения давали завышенные значения, что связано с тем, что в процессе микродугового оксидирования покрытие растёт внутрь металла (до 70% суммарной толщины покрытия), и граница металл - покрытие при этом приобретает значительную шероховатость до $R_z \approx 80-160$ мкм. Такую же шероховатость может иметь и внешний слой покрытия, что также влияет на точность измерения. Поэтому этот метод использовался для экспресс-оценок.

Измерения металлографическим методом проводились на металлографических шлифах, изготавливаемых традиционным способом, с помощью металлографического микроскопа ЕС МЕТАМ РВ-23 при увеличении 300^x и с помощью оптической схемы

прибора ПМТ-3, обеспечивающей увеличение 487^{\times} . Измерения проводились в прямом и отраженном свете с использованием светофильтров, особенно при измерении толщины основного износостойкого слоя МДО покрытия. Измерения показали, что толщина покрытия представляет собой традиционную трёхслойную систему, состоящую из подслоя (доли микрона), основного рабочего слоя и внешнего технологического слоя. В зависимости от режимных параметров и особенно времени обработки толщина покрытия составляла: основного рабочего слоя – от 17 до 55 мкм при суммарной толщине – от 45 до 80 мкм.

Твёрдость покрытия определялась по методу Супер - Роквелла с помощью прибора 2143 ТРС по шкале Т при внедрении стального шарика диаметром 1,588 мм под нагрузкой 15 кг, время выдержки под общей нагрузкой составляло 10 с. Для исследованных покрытий была получена твёрдость в диапазоне от 60 до 75 НРТ15 в зависимости от их толщины.

Микротвёрдость покрытия измерялась с помощью микротвердомеров модели ЛТСJ DM-400 (пирамида Кнуппа при нагрузке 100 г) на прямом поперечном (90°) и косом (угол от 3° до 6°) шлифах при нагрузке 0,981 Н. В последнем случае использовалась алмазная четырехгранная пирамида с квадратным основанием и углом 136° . Время нагружения пирамидки – 10 с и время выдержки под нагрузкой – 15 с. Проверка работы и калибровка микротвердомера производилась при измерении микротвердости монокристалла соли NaCl, погрешность при этом составляла 20 HV_{0,1}.

Для измерения микротвёрдости использовался также микротвердомер ПМТ-3. В этом случае из сплава В-95 был изготовлен образец в виде прямоугольного параллелепипеда со сторонами $63 \times 33 \times 10,5$. Глубокое полирование образца с покрытием позволило не только выявить тонкую, послойную структуру МДО-покрытия, но и провести измерения микротвёрдости основного и технологического слоёв. Результаты измерения микротвёрдости по длине образца и по слоям покрытий составили величины HV_{0,1} от 250 до 1370 кг/мм². Измерение микротвёрдости с использованием пирамиды Кнуппа дало максимальное значение 748Н, при этом микротвёрдость стали типа Р20 (2Х13), используемой в производстве прессформ равна 255,7Н.

Напряженность электрического пробоя покрытия определялась в соответствии на приборе УПУ-10, с помощью которого можно определять электрическую прочность, величину тока утечки в изоляции при постоянном и переменном напряжении от 0 до 10 кВ. Как показали эти измерения, величина тока утечки лежит в диапазоне $U_{пр}/h_{\square}$ от 11 до 19 В/мкм, сильно зависит от содержания щёлочи КОН в электролите и максимальна при $C_{кон}=8$ г/л.

Адгезия покрытий определялась по клеевой методике, усовершенствованной нами применительно к толстым покрытиям [17]. Испытания для каждого режима проводились на партии из 5+1 образцов, выполненных в форме диска диаметром $\varnothing 25$ и толщиной 4 мм, на универсальной испытательной машине электромеханического типа модели Autograf IS-10T фирмы Icshimadzo. В качестве клеев использовались: клей FM1000 American Cynamid Company и российский клей ВК 36Р, предельное усилие которых на разрыв примерно одинаковы и составляют ≈ 50 МПа.

Предварительные эксперименты по определению адгезии указали на значительный разброс получаемых значений прочности сцепления покрытий с подложкой, поэтому для определения оптимального (максимального) значения адгезии был реализован полный факторный эксперимент 2^4 [11] и определена зависимость адгезии от основных режимных параметров МДО (Таблице 1).

Таблица 1. Матрица планирования 2^4 и параметры покрытий

X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	h _Σ	h _{осн}	q _{осн}	V _{осн}	HV _{0,1}	HRT	σ _{осн}
⁰ С	г/л	А/дм ²	мин	мкм	мкм	Кл/мм ³	мкм/мин	кг/мм ²	Ед.	кг/см ²
30	3	5	180	31,3	18,2	297,3	0,101	1071,0	60,5	150
30	3	20	180	121,0	90,0	240,0	0,500	1267,0	68,8	595
30	1	20	180	127,3	89,7	240,9	0,499	1175,8	80,4	160

50	1	5	380	72,0	44,0	245,5	0,122	1093,5	64,3	250
30	1	5	180	36,3	27,3	198,5	0,152	956,3	55,0	270
50	3	5	360	76,0	53,0	203,8	0,147	1099,5	51,9	300
30	3	5	360	80,0	56,0	192,7	0,154	1227,5	53,5	310
50	3	20	180	151,0	92,0	235,0	0,511	1263,3	70,5	240
50	3	20	360	340,0	208,0	207,7	0,578	1072,0	80,0	90
30	1	5	360	68,0	63,0	171,4	0,175	1351,5	65,0	605
50	1	5	180	44,0	32,0	169,2	0,177	1003,0	62,4	390
30	1	20	360	300,0	204,0	211,8	0,567	1357,5	81,0	250
50	1	20	180	127,0	94,0	229,8	0,522	1059,0	70,6	190
50	3	5	180	43,0	35,0	154,3	0,194	842,5	64,1	350
50	1	20	360	195,4	167,5	264,0	0,465	1353,5	78,5	140
30	3	20	360	312,5	221,0	195,7	0,614	1179,5	77,5	80
40	2	12,5	270	132,6	95,0	213,2	0,352	1398,0	77,4	270

Была получена математическая модель зависимости величины адгезии как функции выбранных факторов, т.е. $\sigma_{\text{осн}}=f(C_{\text{кон}}, T, j, t)$, адекватность модели составила 92,76%. Максимальное значение адгезии основного слоя покрытия составило $\sim 600 \text{ кг/см}^2$. В качестве примера на рис. 2 и рис. 3 представлены поверхности отклика, показывающие зависимость адгезии от основных режимных параметров МДО процесса и концентрации щёлочи в электролите.

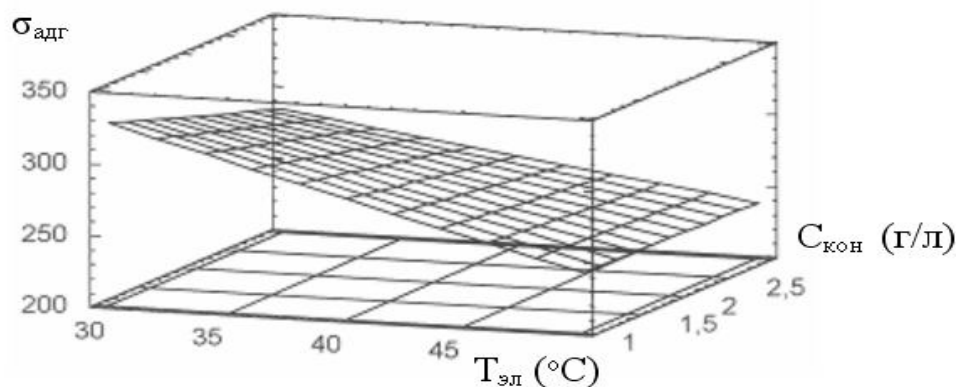


Рис. 2

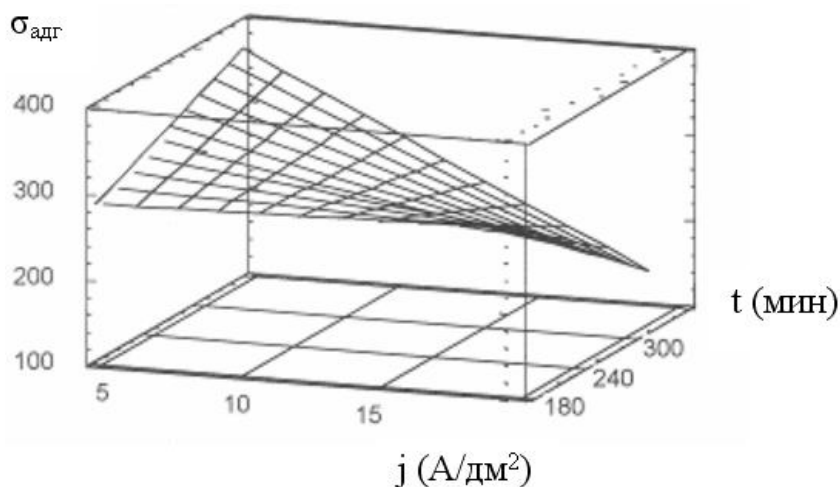


Рис.3

Анализ микроструктуры алюминиевого сплава проводился на металлографических шлифах с использованием микроскопа Nikon, модель FXA с увеличением 100^{\times} и 400^{\times} . Анализ показал, что сплав В-95 имеет микроструктуру, присущую упрочняемому горячекатанному алюминиевому сплаву, о чём свидетельствует удлинённая зернистая структура, а на всех покрытиях наблюдаются два отдельных слоя: наружный технологический пористый слой и внутренний плотный рабочий слой. Кроме того было установлено, что толщина оксидного покрытия остаётся неизменной как на плоских поверхностях, так и, что наиболее важно, на всех острых углах.

Фазовый анализ покрытий проводился на рентгеновском дифракционном анализаторе RIGACU, модели N/A с использованием $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ излучения с управлением работой дифракционного анализатора и математической обработкой результатов измерений с помощью РС. Согласно рентгеновским спектрам покрытия на сплаве В-95 состоят в основном из оксида алюминия (корунда), а также силикатов магния и алюминия.

Химический анализ исходного алюминиевого сплава и оксидного слоя образцов с МДО покрытием проводился с использованием сканирующего электронного микроскопа модели JEOL 8404, при чувствительности анализа 0,1 – 0,01% по массе и диаметре сканирующего пучка электронов ~ 1 мкм. Этот анализ позволил определить как состав исходного сплава, так и оксидного слоя. Было проведено линейное сканирование поперёк перехода оксид-металл и установлено, что покрытие в основном содержит оксид алюминия (90,0%).

Испытание на сжатие со сдвигом образца с покрытием было проведено в режиме циклического сжатия на электрогидравлической машине MTS, модель 810, США, оборудованной электронным силоизмерительным устройством, в специальном приспособлении при различной циклической нагрузке (от 38 до 152 МПа). Длительность испытаний составила 10^5 циклов при толщине покрытия 70 мкм. Величина остаточной деформации и износ кромки зоны контакта, смоделированной на образце с покрытием, определялись методом механической контактной профилометрии с использованием профилографа-профилометра 201 АО «Калибр». Осмотр и измерение поверхности образца проводился сначала после каждых 10^4 циклов и затем окончательно после 10^5 циклов. Изменений в размерах кромки образца при всех величинах нагрузки и длительности испытаний выявлено не было.

Испытания на изгиб образцов с покрытиями проводились на установке ЭД-100М, предназначенной для испытаний на многоцикловую усталостную прочность (рис.4).

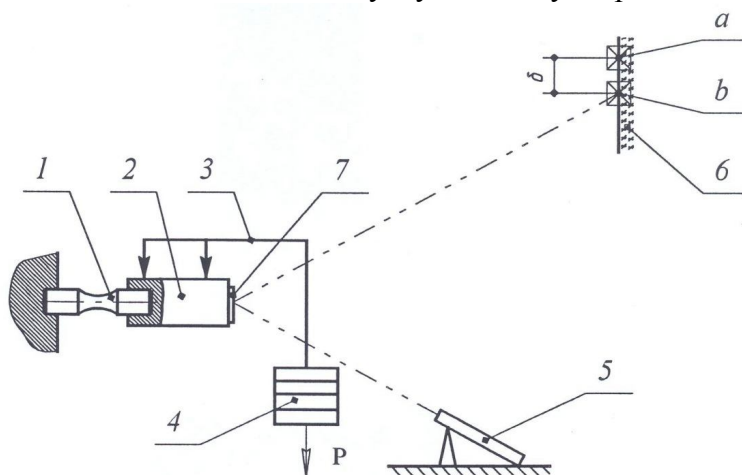


Рис.4 Схема установки ЭД-100М: 1-образец; 2-инерционная масса; 3-коромысло; 4-груз; 5-лазер; 6-экран; 7-зеркало; а - точка, характеризующая положение образца; б - точка, характеризующая положение образца при нагрузке P; δ-смещение луча лазера при нагрузке P.

Принцип работы установки основан на использовании режима автоколебаний подвижной части механического блока 2, прикладываемых к испытываемому образцу 1 от электромагнитного возбудителя при консольном изгибе образца в одной плоскости и по задаваемой программе. Данные измерений деформаций фиксировались приборами блока управления и контроля. Для увеличения точности задания амплитуды нагружения, и для тарировки установки, использовался маломощный лазер 5.

Было установлено, что в процессе усталостного нагружения в диапазоне ± 150 Мпа с частотой ~ 30 Гц на исследуемых образцах отсутствует отслаивание покрытия от основного материала. Было также установлено, что очаг зарождения усталостных трещин как у исходных (без покрытия), так и у образцов с покрытием находится на поверхности, и на период появления и развития усталостных трещин покрытие не влияет.

Износостойкость покрытий оценивалась с использованием машины трения и износа модели 371-88F-104-2 Falex, США, в соответствии со стандартом G77-5 ASTON. Схема испытаний показана на рис. 5.

Эта схема испытаний была выбрана потому, что позволила воспроизвести комбинацию циклических нагрузок и разгрузок на поверхности контакта близкую к реальной. В нашем случае плита с покрытием 2 нагружалась усилием 45 кг в течение 10 сек и затем разгружалась до 4,54 кг на 10 сек. Эта процедура повторялась 100 раз, что занимало по времени примерно 1 час испытаний. В то же время кольцо 4 из стали P20, с которым соприкасалась плита, вращалось с частотой 20 об/мин. Нагрузка сжатия на плиту в начале испытания (при усилии 45 кг) превышала 4200 кг/см^2 для линии контакта, падая затем примерно до 210 кг/см^2 по мере углубления линии контакта в пятне износа в течение первого часа. Большая часть испытаний проводилась, таким образом, при давлениях выше максимально прилагаемых к зоне запираания реальных литейных форм.

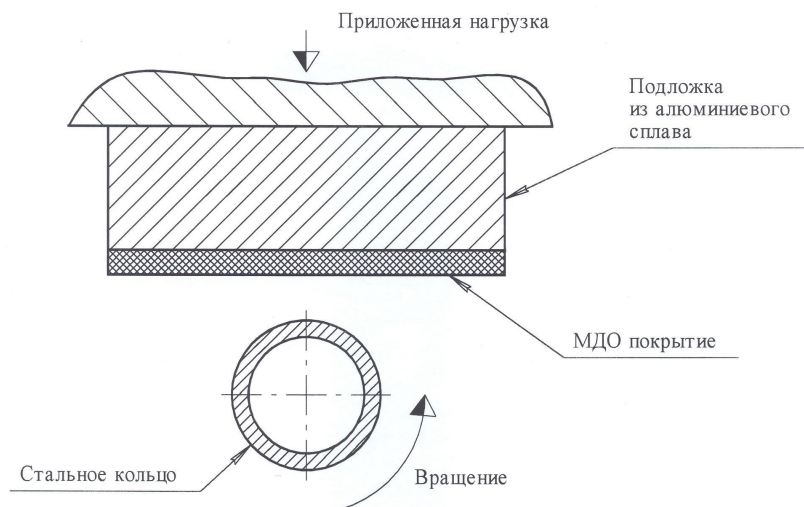


Рис.5. Схема испытаний на износостойкость

Из опыта эксплуатации литейных форм известно [11], что после 500.000 циклов (примерно 1 час испытаний) на этом режиме характерный износ для зоны контакта формы из стали P20 после 10^5 циклов составляет $\sim 0,025$ мм. После одного часа испытаний в идентичных условиях, все обработанные МДО образцы из сплава В-95 показали более чем в 3 раза большую износостойкость по сравнению с P20, т.е. величина износа составила 0,008 мм. Необработанный методом МДО алюминиевый сплав имел значительный износ, примерно в 3,5 раза превышающий износ для стали P20 в похожих условиях испытаний.

Термостойкость образцов с покрытиями определялась путём проведения термоциклических испытаний на специальной спроектированной и изготовленной установке [18], схема которой представлена на рис. 6.

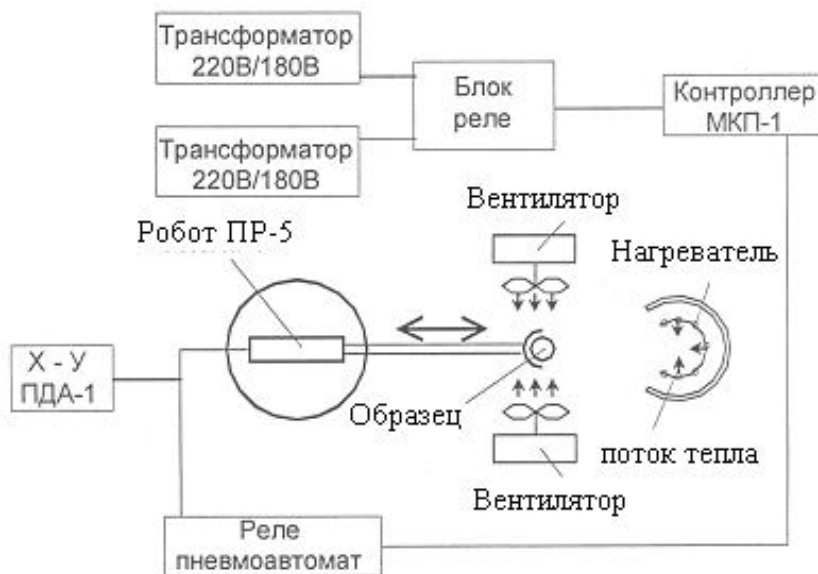


Рис.6. Схема установки испытаний на термостойкость

Образец представлял собой диск $\varnothing 35$ мм и толщиной 6 мм с покрытием, нанесённом на все его поверхности и закреплялся в схвате робота ПР-5. Робот с помощью программируемого манипулятора перемещал образец из зоны охлаждения (вентиляторы) в зону нагрева (6 ламп КГ-300-30), набирая требуемое количество циклов. На этой установке были проведены испытания 3-х образцов общим объёмом 10^5 циклов каждый. Режимы испытаний представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Режимы термоциклических испытаний образцов

№№ п/п	Tmax	Tmin	Время нагрева, с	Время охлад. с	Время цикла, с	J, А/дм ²	HRC	Кол-во циклов
1	210	87	20,8	47,2	68,0	7,0	22,0	10^5
2	208	84	37,9	45,5	83,4	16,7	17,5	10^5
3	204	87	29,8	41,2	71,0	15,8	12,5	10^5

Контроль состояния МДО покрытия проводился через определённое количество циклов (обычно через 10^4 циклов) путём измерения его твёрдости методом Роквелла с последующим визуальным осмотром зоны взаимодействия пирамиды с покрытием под микроскопом. Состояние покрытия считалось удовлетворительным, если не было видимых отслоений покрытия как в месте контакта пирамиды с покрытием, так и в остальных его частях. Было установлено, что в процессе испытаний и после 10^5 циклов цвет образцов и их твёрдость не менялись. Результаты термоциклических испытаний образцов с МДО покрытиями позволили установить, что в условиях по времени и температуре приближённых к реальным покрытие можно считать термостойким до величины 10^5 циклов.

Проведённые исследования МДО покрытия алюминиевого сплава В-95, а также результаты его использования для защиты контактной зоны прессформы в серийном производстве детали типа «вставка» в компании «Венчур», США [19] показали, что сплав В-95 с МДО покрытием не уступает по основным характеристикам традиционно используемому сплаву Р20 (2Х13). Учитывая преимущества механической обработки алюминиевых сплавов в производстве прессформ и их физические характеристики, улучшающие параметры литейного цикла, алюминиевые сплавы могут быть рекомендованы в качестве конструкционных материалов для изготовления прессформ с

обеспечением защиты их рабочих контактных поверхностей методом микродугового оксидирования.

Список литературы

1. Шпак Т.С. Неметаллические материалы. Пластмассы. Куйбышев: КуАИ, 1969. 98 с.
2. Резниченко В.И., Хомич В.И. Применение композиционных материалов. М.: ЦРДЗ, НВЦ Источник, 1992. 238 с.
3. Лепетов В.А. Резиновые технические изделия, Л. Химия, 1976. 440 с.
4. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов, М, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 516 с.
5. Injection Molding of Plastic Components. A Guide to Efficiency, Fault Diagnosis and Cure Book Company Limited, UK, 1968/. 167 p.
6. Mendes Morgan How to Make Injection Molds. Hauser Publishers, Munich Vienna New York, USA, 1986. 385 p.
7. Технологическая оснастка для переработки термопластов. Отраслевой каталог. М.: ЦНИИТЭ – строймаш, 1983. 384 с.
8. Drink H. Increasing Rationalization Reserves by Methodical Analysis of Weaknesses. Text of Lecture 7th Plastics Engineering Colloquium 20th and 21st March, 1974. 47 p.
9. Стамубргский Е.А., Бейль А.И., Карливан В.П., Беспалов Ю.А. Износ оборудования при переработке пластмасс М., Химия, 1985. 208 с.
10. Горюнов И.И. Пресс-формы для литья под давлением. Справочное пособие. Л., Машиностроение, 1973. 256 с.
11. Прусс Е.М. Диссертация. М., 2000. 169 с.
12. Weakley Sh., Zaluzec M. Surface Hardening of Aluminium Moulds Using Micro-Arc Oxidation, Technical Report, Manufacturing and Materials Research Laboratory, Ford Motor Company, 1996. 19 p.
13. Handbook of Plastic Materials and Technology. Edited by Irvin I. Rubin, Robinson Plastic Corporation, A Wiley-Interscience Publication John Wiley&Sons, Inc., New York, 1990. P. 1393-1399.
14. Николаев А.В., Марков Г.В., Пещевецкий Б.Н. Новое явление в электролизе. Известия СО АН СССР, Серия химических наук, вып. 5, № 12, 1977. с. 32-33.
15. Лесневский Л.Н., Прусс Е.М. Анализ и оценка перспектив использования алюминиевых сплавов при изготовлении форм для переработки пластмасс и резин//Вестник КГТУ им А.Н.Туполева, Казань, 2000, №20. С. 9-17.
16. Лесневский Л.Н., Прусс Е.М., Трошин А.Е., Тюрин В.Н., Черновский М.Н. Выбор методик, разработка и реализация испытаний образцов с МДО покрытиями: толщина, твёрдость, микротвёрдость, износ и трение. М.: МАИ, 199. 13 с. Деп. В ВИНТИ, шЗ.12.99, №3599-В99.
17. Лесневский Л.Н., Прусс Е.М., Трошин А.Е., Тюрин В.Н., Черновский М.Н. Исследование и разработка метода определения адгезии покрытий, полученных микродуговым оксидированием на алюминиевых сплавах. Препринт 99П1, Казань, изд-во КГТУ, 1999. 20 с.
18. Лесневский Л.Н., Прусс Е.М., Ушаков А.М. Выбор и разработка оборудования для термоциклических испытаний образцов с МДО покрытиями. М.: МАИ, 199. 13 с. Деп. В ВИНТИ, шЗ.12.99, №3597-В99.
19. Заключение «О результатах испытаний вставки с МДО покрытием в составе инъекционной формы в серийном производстве». Вице-президент «Венчур Инд. Инк.» , США, Ч. Маковски, 1999. 3 с.