

А.Н. Новиков

В.В. Жуков

**УПРОЧНЕНИЕ ВОССТАНОВЛЕННЫХ
ГОЛОВОК БЛОКОВ ЦИЛИНДРОВ
ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ
МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А.Н. Новиков, В.В. Жуков

**УПРОЧНЕНИЕ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ГОЛОВОК
БЛОКОВ ЦИЛИНДРОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ
СПЛАВОВ МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ**

Орел 2010

УДК 621.794.61:621.3.035.183]:621.785.5:621.431
ББК 30.61:31.365
Н73

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор кафедры
«Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»
Орловского государственного технического университета
А.С. Тарапанов,

доктор технических наук, профессор кафедры
«Автомобили и автомобильное хозяйство»
Тульского государственного университета
И.Е. Агуреев

Новиков, А.Н.

Н73 Упрочнение восстановленных головок блоков цилиндров из
алюминиевых сплавов микродуговым оксидированием:
монография / А.Н. Новиков, В.В. Жуков. – Орел: ОрелГТУ,
2010. – 84 с.

ISBN 978-5-93932-249-2

В монографии приведены сведения о микродуговом оксидировании, как одном из перспективных способов упрочнения восстановленных деталей машин из алюминиевых сплавов. Приведена краткая характеристика алюминиевых сплавов, применяемых в транспортном и сельскохозяйственном машиностроении. На основании теоретических расчетов обоснована необходимая толщина МДО-покрытий. Представлены результаты исследований влияния условий МДО на физико-механические свойства покрытий, сформированных на восстановленных деталях машин из алюминиевых сплавов, а также технологический процесс упрочнения восстановленной головки блока цилиндров ДВС. Рассмотрены вопросы утилизации электролитов при МДО.

Предназначена научным работникам, преподавателям, аспирантам и студентам вузов, инженерно-техническим работникам машиностроительных и ремонтных предприятий.

УДК 621.794.61:621.3.035.183]:621.785.5:621.431
ББК 30.61:31.365

ISBN 978-5-93932-249-2

© ОрелГТУ, 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1.	АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ТРАНСПОРТНОМ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ	7
Глава 2.	СПОСОБЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В РЕМОНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ	13
Глава 3.	МИКРОДУГОВОЕ ОКСИДИРОВАНИЕ – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ СПОСОБ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН	17
Глава 4.	ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ МДО- ПОКРЫТИЙ НА ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	21
	4.1 Толщина МДО-покрытий	21
	4.1.1 Теоретическое обоснование необходимой толщины МДО-покрытия	21
	4.1.2 Исследование влияния условий формирования на толщину МДО-покрытия	32
	4.2 Микротвердость МДО-покрытий	40
	4.3 Хрупкость МДО-покрытий	43
	4.4 Прочность сцепления МДО-покрытий	45
	4.5 Сквозная пористость МДО-покрытий	50
	4.6 Коррозионная стойкость МДО-покрытий.....	57

4.7 Долговечность электролита.....	62
Глава 5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ.....	65
5.1 Технологический процесс упрочнения привалочной плоскости головки блока цилиндров двигателя ЗМЗ-513 при восстановлении	65
5.2 Вопросы экологии технологии микродугового оксидирования.....	73
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	75
ЛИТЕРАТУРА.....	76

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей задачей, стоящей перед транспортным и агропромышленным комплексами является обеспечение высокой надежности узлов и агрегатов транспортных и технологических машин и оборудования.

В условиях старения автотранспортного парка, многократного удорожания машин и запасных частей проблема технического оснащения промышленного и сельскохозяйственного производства не может быть решена только за счет увеличения поступления новой техники. Большая роль в этом отводится эффективному использованию имеющегося парка машин, постоянному поддержанию его готовности за счет технического обслуживания, а также развитию и совершенствованию технологических процессов их ремонта.

Важнейшим резервом в повышении технической готовности является обеспечение предприятий автотранспортного и агропромышленного комплексов запасными частями за счет восстановления изношенных деталей. В современных транспортных и сельскохозяйственных машинах все шире применяются детали из алюминиевых сплавов, которые обладают высокими тепло- и электропроводностью, стойкостью против коррозии и хорошими технологическими свойствами, но имеют невысокую износостойкость. В связи с этим восстановление деталей машин, изготовленных из алюминиевых сплавов, является очень актуальным в последние годы. Однако применяемые в настоящее время технологические процессы восстановления деталей не всегда удовлетворяют современным требованиям.

Научные исследования и опыт ремонтных предприятий показали, что в последние годы наметилась тенденция использования упрочняющих технологий, которые позволяют повысить износостойкость деталей и соединений в несколько раз.

Одним из перспективных способов повышения долговечности деталей машин является их поверхностное упрочнение микродуговым оксидированием (МДО). Этот способ позволяет получать покрытия, характеризующиеся высокими эксплуатационными свойствами (коррозионной и износостойкостью). Повышение коррозионной и износостойкости при восстановлении

деталей увеличивает ресурс машин и является перспективным направлением развития ремонтного производства.

В исследованиях Федорова В.А., Маркова Г.А., Снежко Л.А., Гордиенко П.С., Малышева В.Н., Великосельской Н.Д., Эпельфельда В.Н., Магуровой Ю.В., Батищева А.Н., Новикова А.Н., Чавдарова А.В. и многих других показана перспективность этого способа, позволяющего получать износостойкие, коррозионностойкие оксидные покрытия, наиболее полно удовлетворяющие требованиям ремонтного производства.

В настоящей работе изложены результаты исследований, направленные на разработку технологии упрочнения способом МДО восстановленных электродуговой металлизацией деталей транспортных и сельскохозяйственных машин из алюминиевых сплавов.

Глава 1. АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ТРАНСПОРТНОМ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

В современных машинах и оборудовании все шире применяют детали из легких сплавов, обладающих большой относительной прочностью и технологичностью изготовления. В настоящее время по объему производства и потребления алюминий и его сплавы занимают второе место в мире после стали [1,2]. Расширение применения алюминиевых сплавов – это долговременная тенденция, которая будет определять не только текущую, но и дальнейшую перспективу объема и сфер использования благодаря ценному комплексу механических, физических и химических свойств. Важным свойством алюминиевых сплавов является их высокая теплопроводность (в 3...4 раза выше стали), что очень важно для таких деталей как поршни, головки и блоки цилиндров. Высокая коррозионная стойкость алюминиевых сплавов позволяет применять их для производства узлов и деталей транспортных и сельскохозяйственных машин, работающих в условиях воздействия агрессивных сред. Кроме того, отливки из алюминиевых сплавов, получаемых литьем под давлением и в кокиль, могут иметь сплошную форму и меньшие припуски на обработку, чем чугунные [1,2,3]. Мировым опытом доказано, что применение алюминиевых сплавов эффективно во многих отраслях промышленности, т. к. значительно снижается масса конструкций, машин, аппаратов (плотность алюминия составляет 2,6...2,8 г/см³, что почти втрое меньше плотности стали), повышаются долговечность и грузоподъемность транспорта, уменьшаются на 10...15% эксплуатационные расходы [1-4].

По способу получения деталей алюминиевые сплавы можно разделить на две группы:

- деформируемые;
- литейные.

Границей между этими видами сплавов является предел насыщения твердого раствора при эвтектической температуре. Сплавы, лежащие за пределами насыщения и имеющие в структуре эвтектику, являются литейными. Эвтектика образуется во многих сплавах, в которых содержание легирующих элементов больше предельной растворимости в алюминии. В связи с этим содержание

легирующих элементов в литейных сплавах выше, чем в деформируемых (таблица 1.1). Небольшие добавки магния в пределах 0,2 – 0,5 % делают литейные сплавы способными к естественному и искусственному старению.

Сплавы, лежащие до предела насыщения, обладающие высокой пластичностью в нагретом состоянии и хорошо поддающиеся горячей обработке давлением, являются деформируемыми.

Деформируемые сплавы используются для изготовления различных полуфабрикатов (прокаткой, штамповкой, прессованием). Литейные сплавы применяются для изготовления деталей методом литья.

Таблица 1.1 Химический состав деформируемых и литейных алюминиевых сплавов, применяемых для изготовления деталей машин

Марка сплава	Состав сплава					
	Si	Cu	Mg	Mn	Ni	Zn
1	2	3	4	5	6	7
Деформируемые сплавы						
АМц	0,6	0,1	0,2	1,3	-	0,1
АМг2	0,4	0,1	2,4	0,4	-	0,2
АМг5	0,5	0,1	5,3	0,5	-	0,2
АМг6	0,4	0,1	0,3	0,7	-	0,2
ФД31	0,5	0,1	0,5	0,1	-	0,2
АК4	0,8	2,3	1,6	-	1	-
АК6	1	2,2	0,6	0,7	-	-
АК8	0,9	4,4	0,6	0,7	-	-
Литейные сплавы						
Система Al-Si-Mg						
АК12	12	-	-	-	-	-
АК9ч	9	-	0,25	0,4	-	-
АК7ч	7	-	0,3	-	-	-
АК7	7	-	0,35	-	-	-

Окончание таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6	7
Система Al-Si-Cu						
AK5M	5	1,25	0,5	-	-	-
AK12M2MгH	12	2,25	1	0,45	-	1
AK8M	8	1,25	0,4	0,4	-	-
AK5M7	5,5	7	0,35	-	-	-
AK12MMгH	12	1,1	1	-	-	1
Система Al-Cu						
AM5	-	4,8	-	0,8	-	-
Система Al-Mg						
AMг7	1	-	7	-	-	-
AMг11	1	-	12,8	-	-	-
AMг10ч	-	-	10	-	-	-
Система Al + прочие компоненты						
AK7Ц9	7	-	0,2	-	-	-
AЦ4Mг	0,3	0,2	1,8	0,4	-	4

Деформируемые сплавы подразделяют на упрочняемые и не упрочняемые термической обработкой.

Сплавы типа Al-Mg и Al-Mg-Mn термически не упрочняются. Сплавы типа Al-Mg-Si термически упрочняются. Характерной особенностью деформируемых сплавов типа Al-Cu-Si-Mn является повышение прочности в результате старения.

К литейным алюминиевым сплавам предъявляются такие требования, как высокая жидкотекучесть, сравнительно небольшая усадка, малая склонность к образованию горячих трещин и пористости в сочетании с хорошими механическими свойствами.

Для изготовления деталей машин находят применение как литейные (таблица 1.2), так и деформируемые алюминиевые сплавы, однако предпочтение пока отдается первым.

Литейные алюминиевые сплавы в соответствии с ГОСТ 1583-93 делятся на следующие группы (таблица 1.1):

1. Сплавы на основе системы Al-Si-Mg.

Сплавы АК12, АК9ч, АК7ч, АК7пч и АК8л отличаются высокими литейными свойствами и герметичностью, а также удовлетворительной коррозионной стойкостью. Обрабатываемость их резанием в термически обработанном состоянии удовлетворительная; могут длительно работать при температуре 150...200 °С.

2. Сплавы на основе системы Al-Si-Cu.

Сплавы АК5М, АК8М, АК6М2 и АК9М2 обладают пониженной коррозионной стойкостью, а АК12ММгН и АК12М2МгН отличаются повышенной жаропрочностью (рабочая температура до 300 °С).

3. Сплавы на основе системы Al-Cu.

Сплавы АМ5 и АМ4,5Кл обладают пониженными литейными свойствами и коррозионной стойкостью, однако хорошо обрабатываются резанием.

4. Сплавы на основе системы Al-Mg.

Сплавы АМг5К, АМг5Мц, АМгбл, АМг7, АМг10 и АМг11 обладают высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, растворах хлористых солей, щелочах и агрессивных средах на основе азотной кислоты. Они хорошо обрабатываются резанием и полируются, но отличаются невысокими литейными свойствами.

5. Сплавы на основе системы Al + прочие компоненты.

Сплавы АК7Ц9, АЦ4Мг могут работать при температуре до 150 °С, сочетают в себе высокую прочность с удовлетворительными литейными свойствами, которые лучше, чем у сплавов системы Al-Mg. Они отличаются также высокой коррозионной стойкостью и хорошей свариваемостью.

Таблица 1.2 Применение литейных алюминиевых сплавов для изготовления деталей транспортных и сельскохозяйственных машин

МАРКА СПЛАВА	Назначение
1	2
АК12	Тонкостенные детали сложной конфигурации, работающие при ударных нагрузках (корпусные детали, кронштейны, крышки, рычаги, детали электроаппаратуры и другие), шкивы, ползуны, планшайбы, роторы вентиляторов
АК9ч	Крупные детали сложной формы, несущие статические и ударные нагрузки (картеры, блоки и головки блоков цилиндров двигателей внутреннего сгорания, крышки механизмов распределительных шестерен, корпусные детали унифицированных конических и цилиндрических редукторов сельскохозяйственных машин, корпуса коробок передач легковых автомобилей, шкивы)
АК7ч	Корпуса водяных и масляных насосов высокого давления, шестеренных гидромоторов, термостаты, тормозные барабаны
АК12ММгН АК12М2МгН	Поршни двигателей внутреннего сгорания
АК7Ц9	Корпуса шестеренных насосов типа НШ-К и гидромоторов типа ГМШ
АК9М2	Крышки гидрораспределителей, поджимные и подшипниковые обоймы шестеренных насосов типа НШ-К и гидромоторов ГМШ, корпуса карбюраторов, дросселей, топливных и масляных насосов, тормозные колодки
АЦ4Мг	Тормозные цилиндры

Одной из наиболее ответственных и ресурсообеспечивающих деталей автомобильного двигателя внутреннего сгорания является головка блока цилиндров (ГБЦ), так как от ее технического состояния

зависит долговечность работы двигателя.

В настоящее время отечественными и зарубежными машиностроительными предприятиями при изготовлении головок блока ДВС используется широкая номенклатура алюминиевых сплавов.

Примерное использование литейных алюминиевых сплавов применяемых для изготовления головок блоков цилиндров приведено в таблице 1.3.

Таблица 1.3 Алюминиевые сплавы, применяемые для изготовления головок блока цилиндров ДВС

<i>Марка сплава</i>	Назначение
<i>1</i>	<i>2</i>
<i>АКЗМ</i>	Головки блоков отечественных двигателей воздушного охлаждения
<i>АК9ч</i>	Головки блоков двигателей водяного охлаждения отечественных автомобилей ГАЗ-3307, ЗИЛ-4331, легковых автомобилей ГАЗ, ВАЗ, АЗЛК
<i>АК5М</i>	
<i>АК7ч</i>	
<i>АК14В</i>	
<i>АК12ММГН</i>	
<i>АК9</i>	Головки блоков четырехцилиндрового двигателя английской фирмы Hillman.
<i>АМГ5К</i>	Головки блоков двигателей воздушного охлаждения Tatra-603
<i>Сплав 390</i>	Головки блоков американского шестицилиндрового двигателя воздушного охлаждения Chevrolet-Corvaир
<i>LM25</i>	Головки блоков восьмицилиндрового V-образного двигателя английского автомобиля Rover.
<i>GK-АlSi6Cu4</i>	Головки блоков двигателей автомобилей немецких концернов BMW, Volkswagen
<i>G-АlSi12</i>	
<i>GK-АlSi6Cu4</i>	

Важнейшей задачей, стоящей перед транспортным комплексом является обеспечение высокой надежности узлов и агрегатов транспортных и технологических машин и оборудования.

Глава 2. СПОСОБЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В РЕМОНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

В настоящее время в ремонтном производстве применяются следующие способы восстановления деталей машин из алюминиевых сплавов: аргонодуговая наплавка, наплавка намораживанием, восстановление полимерными композициями, газодинамическое напыление, плазменная металлизация, электродуговая металлизация и др.

Аргонодуговая наплавка.

Наплавка – это процесс нанесения слоя металла плавлением посредством установления межатомных связей между восстанавливаемой поверхностью и наплавляемым материалом [6-9]. Для восстановления головок блока из алюминиевых сплавов применяют электродуговую наплавку неплавящимся (вольфрамовым) электродом в среде аргона [9,10]. В качестве наплавляемого материала используют присадочную проволоку как правило из того же материала, что и ГБЦ.

Аргонодуговой наплавке присущ ряд недостатков, таких как значительные термические воздействия на деталь, способствующие образованию растягивающих внутренних напряжений, которые приводят в последствии к деформации плоскости прилегания, а так же низкая производительность восстановления [11,12].

Наплавка намораживанием.

Одной из разновидностей наплавки является наплавка намораживанием [5,13]. Головку блока погружают в кокиль с расплавом алюминиевого сплава и сообщают колебания в горизонтальной плоскости одновременно с качательными движениями. В результате более низкой температуры детали расплав постепенно кристаллизуется («намораживается») на поверхности восстанавливаемой головки блока. Недостатком способа является то, что, несмотря на внешнюю простоту, данный способ имеет весьма узкие интервалы изменения технологических параметров, при которых получается качественный слой твердого сплава заданной толщины.

Восстановление композиционными материалами.

Сущность восстановления привалочной плоскости ГБЦ композиционными материалами заключается в нанесении на плоскость полимерных композиций с последующей термообработкой [5,13,14]. Данный метод позволяет восстанавливать детали многократно.

Основным недостатком способа является низкая коррозионная стойкость покрытия.

Газодинамическое напыление.

Газодинамическое напыление представляет собой процесс нанесения покрытий, включающий в себя нагрев сжатого газа, подачу его в сверхзвуковое сопло и формирование в этом сопле сверхзвукового воздушного потока, подачу в этот поток порошкового материала, ускорение этого материала в сопле сверхзвуковым потоком воздуха и направление его на поверхность обрабатываемого изделия [15].

В качестве порошковых материалов используются порошки металлов, сплавов или их механические смеси с керамическими порошками. При этом путем изменения режимов работы оборудования можно наносить металлические покрытия требуемых составов. Изменением режимов можно также менять пористость и толщину напыляемого покрытия.

Недостатком способа является невысокая адгезия, низкая производительность и высокая стоимость применяемого оборудования, высокий уровень шума.

Плазменная металлизация.

При плазменной металлизации расплавление присадочного материала, диспергация и разгон частиц осуществляется благодаря тепловым и динамическим свойствам плазменной струи [5,16,17,18,19]. В поток нагретого газа вводится присадочный материал. Образующиеся расплавленные частицы материала выносятся потоком горячего газа из сопла и напыляются на поверхность детали. В качестве плазмообразующего газа обычно используется аргоно-азотная смесь, в качестве транспортирующего – аргон. К достоинствам способа можно отнести высокую адгезию напыленного слоя с основой, которая обеспечивается благодаря термической активации поверхности основы, что приводит к образованию химических связей.

Недостатком способа является возможность нанесения

покрытия толщиной только до 2,5мм. Учитывая, что припуск на механическую обработку составляет до 20% от толщины напыленного слоя, после обработки толщина покрытия составляет до 2,0мм. Таким образом, способ не обеспечивает 100% восстановления привалочных плоскостей головок цилиндров ДВС, так как максимальный износ достигает 3,3мм.

Электродуговая металлизация.

Электродуговая металлизация представляет собой процесс, при котором металл расплавляется электрической дугой и затем струей сжатого воздуха наносится на поверхность восстанавливаемой головки блока [13,20]. Дуговая металлизация имеет ряд преимуществ, связанных в первую очередь с возможностью повышения производительности процесса за счет использования больших сил тока. При использовании в качестве электродов проволок из двух различных металлов можно получить покрытия из их сплавов. Восстанавливаемая головка блока с поверхности не проплавляется, и температура ее повышается не более чем на 100...150°C, поэтому не происходит коробления и нарушения термообработки. Для электродуговой металлизации изношенных поверхностей деталей из алюминиевых сплавов применяется присадочная проволока, подбор которой ведется в зависимости от химического состава сплава, из которого изготовлена деталь, эксплуатационного назначения рабочих поверхностей, характера и размера дефектов.

Существующие способы восстановления головок блоков из алюминиевых сплавов не всегда обеспечивают их долговечную работу. Повышения коррозионной стойкости восстановленных деталей можно добиться применением способов поверхностного упрочнения.

Развитие технических способов упрочнения поверхностей деталей привело к созданию упрочняющих технологий, главной задачей которых является получение поверхностных слоев с достаточной коррозионно- и износостойкостью, прочностью, а также другими характеристиками, позволяющими обеспечить высокие эксплуатационные показатели машин и механизмов [21-23]. Развитие науки и техники привело к созданию целого ряда технологических способов поверхностного упрочнения, основанных на использовании источников с высокой концентрацией энергии (вакуумное, ионно-плазменное нанесение покрытий, лазерная обработка и др.) [24-29]. Однако нанесение покрытий выше перечисленными способами

далеко не всегда удовлетворяет тем противоречивым требованиям, которые предъявляются к износостойким материалам. Очень часто оказывается недостаточной их адгезия с основой или невысокие прочностные характеристики самого покрытия. Дефицитность применяемых для нанесения покрытий материалов, а также дорогое и сложное оборудование ограничивают их применение в ремонтном производстве. Необходимо отметить, что в настоящее время перспективным направлением развития упрочняющей технологии является нанесение композиционных покрытий, содержащих и сочетающих в себе свойства нескольких различных компонентов [30-32].

Для упрочнения головок блока цилиндров из алюминиевых сплавов работающих в условиях коррозионного воздействия, эффективны керамические покрытия [29,32]. Они характеризуются высокими уровнями точек плавления, прочностью на сжатие, сохраняющейся при высоких температурах, а также стойкостью к окислению. Наряду с перечисленными свойствами они обладают адгезионной прочностью, стойкостью к термоударам и вибрациям. Наиболее широкое распространение для нанесения композиционных керамических покрытий получили газотермическое напыление [11,27,30,33,34] и электрохимические методы, в частности электроосаждение композиционных электрохимических покрытий [35-37]. Суть данного метода заключается в том, что вместе с металлом из гальванической ванны на детали осаждаются различные неметаллические частицы: карбиды, оксиды, бориды, сульфиды и т.д. Включения этих материалов сильно изменяют свойства покрытий, а главное увеличивают их коррозионную стойкость. Для восстановления и упрочнения деталей из алюминиевых сплавов также применяют метод анодирования [36,37].

Вышеперечисленные методы повышения коррозионной и износостойкости головок блока из алюминиевых сплавов, работающих в условиях агрессивных сред, обеспечивают надежную и долговечную работу поверхностей, однако их применение в ремонтном производстве сдерживается сложностью и высокой стоимостью необходимого оборудования, недостатками, присущими каждому из вышеперечисленных способов, а также соображениями экономического характера.

Глава 3. МИКРОДУГОВОЕ ОКСИДИРОВАНИЕ – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ СПОСОБ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В последние годы успешно развивается, в частности в ремонтном производстве, технология микродугового оксидирования (МДО) [38-42]. Способ позволяет получать новый поверхностный модифицированный слой, характеризующийся высокими физико-механическими характеристиками и высокой коррозионной стойкостью. Сущность МДО заключается в том, что образование защитного оксидного покрытия происходит в условиях, когда под действием высокого напряжения, прикладываемого между металлическим корпусом электрохимической ванны и погруженными в электролит обрабатываемыми изделиями, на их поверхности возникают мигрирующие точечные микроплазменные разряды. В результате на поверхности детали образуется стабильная кристаллическая модификация оксида алюминия [43-45].

Способ МДО является результатом развития традиционного анодирования, т.е. электрохимического окисления анода в электролите, но отличается от него как по режимам нанесения, так и по свойствам получаемых покрытий и имеет перед ним ряд преимуществ: не требуется специальная предварительная подготовка обрабатываемой поверхности; возможность получать толстые (до 400 мкм) без применения сложного холодильного оборудования; их высокая твердость и износостойкость, регулируемая пористость, экологическая чистота самого процесса и его продукта [46,47].

Механизм микродуговых процессов, протекающих на электродах в электролите, слабо изучен, но в общих чертах суть явления можно представить следующим образом [48,49]. В процессе оксидирования в безыскровом режиме рост оксидной пленки осуществляется за счет диффузии ионов через оксид. На поверхности металла образуется оксидная диэлектрическая пленка, которая приводит к уменьшению электрического тока до его утечки и прекращению процесса при постоянном напряжении.

При повышении значения напряжения между деталью и электролитом в диэлектрически слабых местах наблюдается искровой разряд, что приводит к образованию низкотемпературной плазмы, из-за реакции с которой в оксидную пленку внедряются частицы электролита. Оксид металла, образующийся в месте искры,

увеличивает толщину диэлектрического слоя, после чего происходит смещение разряда к более тонким соседним участкам. Из-за обилия «слабых» мест пробой, сопровождаясь звуковыми эффектами, возникают практически одновременно по всей поверхности оксидируемого изделия. Рост диэлектрического слоя приводит к увеличению напряжения (рисунки 3.1, 3.2).

При дальнейшем увеличении напряжения искры сменяются микродугами. Переход в микродуговой режим сопровождается смещением объемного заряда вглубь покрытия, в результате чего микроплазменные разряды перестают достигать границы металл-оксид, рост оксидного слоя осуществляется за счет диффузии ионов металла сквозь оксидные слои в зону объемного заряда и встречного движения анионов [46]. Дальнейший рост покрытия осуществляется повышением напряжения.

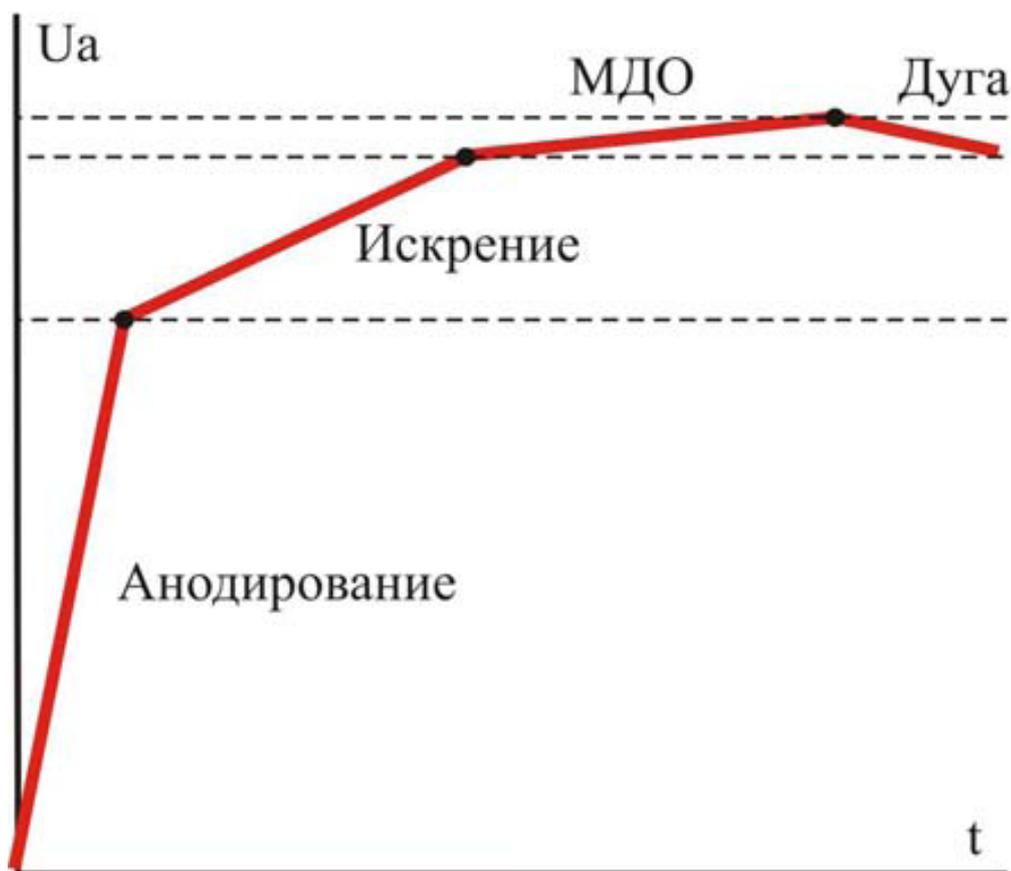
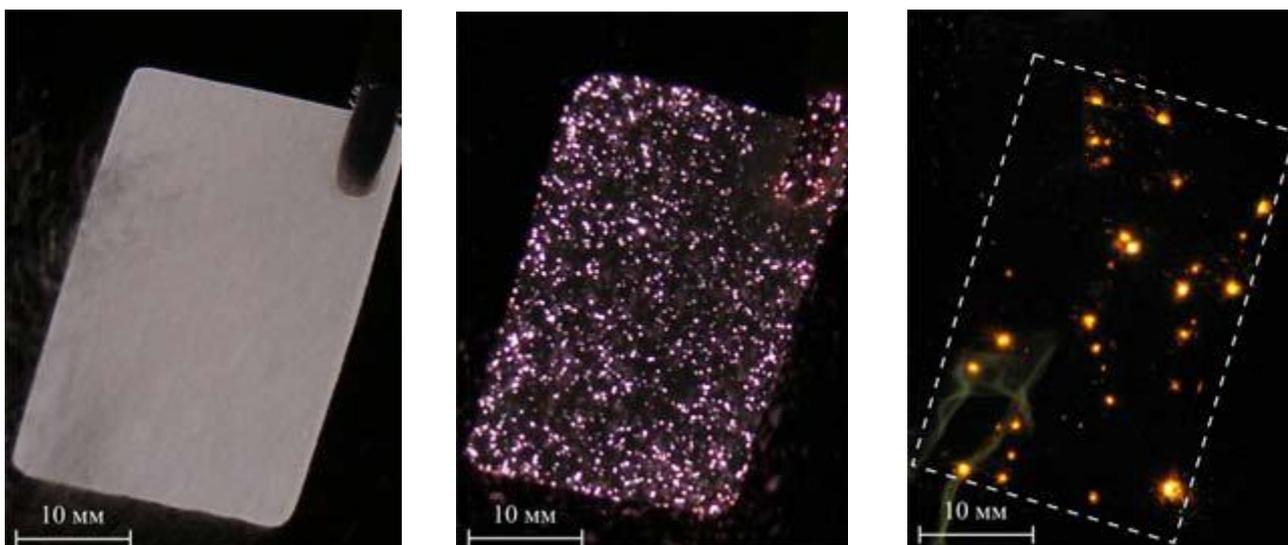


Рисунок 3.1 Полная формовочная кривая процесса МДО.



а) б) в)

Рисунок 3.2 . Поверхность образцов на разных стадиях процесса МДО: а) анодирование, б) искрение, в) МДО.

Для каждой конкретной комбинации металла и электролита МДО осуществляется в различной области значений напряжения и тока. После достижения предельного значения напряжения микродуговые разряды сменяются дуговыми, что приводит к образованию кратеров, проникающих до поверхности металла и приводящих к разрушению покрытия.

В зависимости от химического состава сплава, режимов МДО и компонентов электролита на деталях из алюминиевых сплавов формируются сложные по фазовому составу покрытия, включающие в себя высокотемпературные модификации α - и γ -оксиды Al_2O_3 , фазы муллита $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ и другие сложные соединения в переходном слое между покрытием и металлом [50,51]. Такие покрытия, сформированные из щелочного электролита, можно рассматривать как композиционные, в которых оксиды Al_2O_3 являются упрочняющей фазой. Микротвердость таких покрытий достигает 20...25 ГПа [45,52].

Поскольку покрытия, нанесенные способом МДО по своей структуре и составу близки к керамическим материалам и обладают высокими теплоизоляционными свойствами и устойчивы к тепловому удару до $2500^\circ C$ они могут быть использованы в качестве жаростойких и теплозащитных, несмотря на то, что коэффициент термического расширения SiO_2 составляет $7,5 \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, Al_2O_3 – $8,8 \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, муллита $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ – $5,3 \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, а алюминиевых сплавов $22,9 \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ [53-56]. Прочность сцепления с основой

(адгезия), получаемых способом МДО покрытий, достигает 350 МПа, что дает возможность применять их при больших контактных нагрузках. Однако, при большой концентрации жидкого стекла (более 60...70 г/л) в электролите их адгезия становится менее 20 МПа [46,47]. Износостойкость покрытий, полученных способом МДО на рациональных режимах, сравнима с материалами на основе карбида вольфрама. Кроме того, МДО-покрытия обладают высокой коррозионной стойкостью, что определяется малой пористостью и химической инертностью самого покрытия [46,57].

Метод находится в состоянии развития и в настоящее время выделился в самостоятельное направление. Проведенные рядом авторов исследования МДО на алюминиевых сплавах позволили подобрать оптимальные электролиты и установить рациональные режимы оксидирования [38-52]. Однако способ еще недостаточно изучен, особенно применительно к упрочнению плоскостей головок блоков цилиндров, изготовленных из литейных алюминиевых сплавов и восстановленных электродуговой металлизацией.

Глава 4. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ МДО-ПОКРЫТИЙ НА ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

4.1 Толщина МДО-покрытий

4.1.1 Теоретическое обоснование необходимой толщины МДО-покрытия

При работе двигателя головки блоков цилиндров подвергаются воздействию больших знакопеременных нагрузок и высоких температур. При этом термические напряжения в головке намного превышают механические напряжения [58]. Центральная зона тарелок впускных клапанов имеет температуру 400°C, а выпускных – 800°C. Температура направляющих втулок выпускных клапанов достигает 400°C. Температура стенок камеры сгорания в нижней части достигает 350°C. Привалочная плоскость ГБЦ подвергается температурным изменениям, так как температура в рубашке охлаждения 90°C [9,10].

Формируемое в процессе МДО покрытие по своим физико-механическим свойствам резко отличается от материала подложки. При повышении температуры возникают термические напряжения (рисунок 4.1), что связано с различием в термическом коэффициенте линейного расширения (ТКЛР) материалов покрытия и подложки, в материале подложки возникают сжимающие напряжения, а в покрытии – растягивающие.

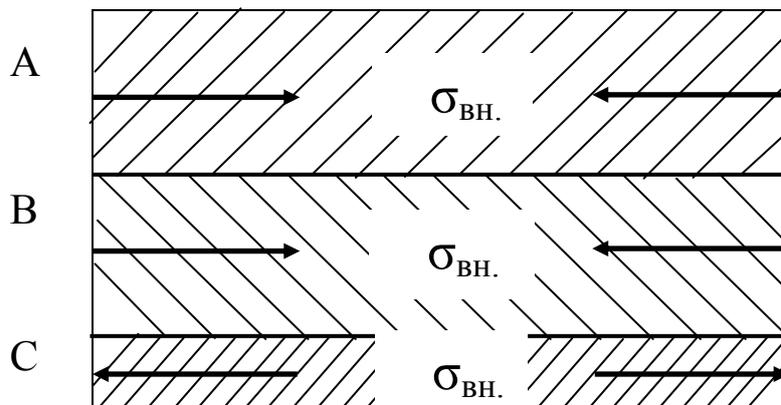


Рисунок 4.1 Термические напряжения трехслойной системы:

А – головка блока, В – металлизационный слой, С – МДО-покрытие

Математические расчеты зависимости напряжений вызываемых различием ТКЛР алюминиевой подложки и МДО-покрытия от изменения температуры проводили исходя из условий работы двигателя.

Для проведения расчетов примем следующие допущения. Металлизационный слой значительно толще покрытия, поэтому принимаем $\sigma_{вн.м.} \approx \sigma_{вн.о.}$. Различие между ТКЛР материала основы и металлизационного слоя незначительны, следовательно, принимаем $\alpha_m \approx \alpha_o$.

С учетом всех принятых допущений рассматриваемое соединение можно считать как плоскую двухслойную систему (рисунок 4.2).

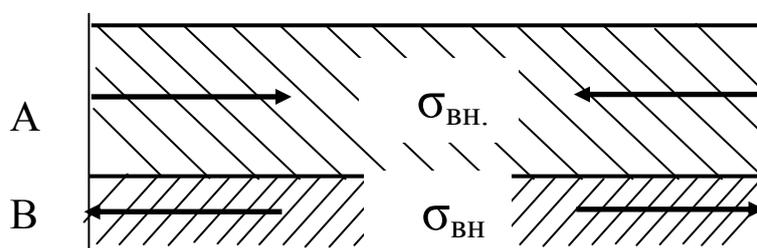


Рисунок 4.2 Термические напряжения двухслойной системы:

А – материал основы, В – материал покрытия.

Для расчета оптимальной толщины покрытия необходимо рассчитать действующие в покрытии напряжения. Для этого представим часть покрытия привалочной плоскости ГБЦ, моделируемой круглой пластиной постоянного сечения с отверстием (рисунок 4.3).

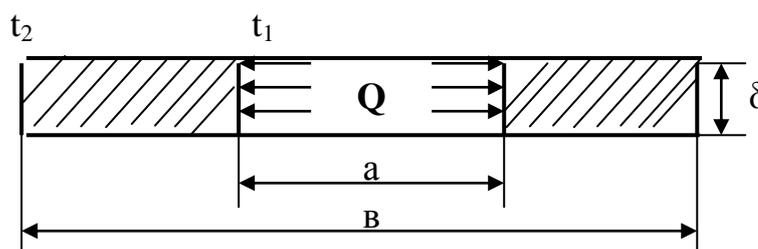


Рисунок 4.3 Схема моделирования:

a – диаметр камеры сгорания, м;

b – диаметр окружности, описывающий стенки камеры сгорания, м;

δ – толщина покрытия, м;

Q – тепловой поток в камере сгорания, Дж/с см;

t_1, t_2 – температура на внутренней и внешней стороне стенки камеры сгорания соответственно, °С.

При определении напряжений и деформаций в неравномерно нагретой пластине используют уравнения равновесия, упругости и совместности:

1) Уравнение равновесия представляет собой условие равновесия элемента пластины, которое может быть записано в виде [59]:

$$\frac{d}{dr} \cdot \sigma_r + (\sigma_\theta - \sigma_r) \cdot \frac{1}{r} = 0, \quad (4.1)$$

где σ_r – радиальные напряжения в пластине, Па;

σ_θ – окружные напряжения в пластине, Па;

r – переменный радиус, м.

Рассмотрим круглую пластину нагруженную напряжениями $\sigma_{r\theta}$, σ_{ra} (рисунок 4.4).

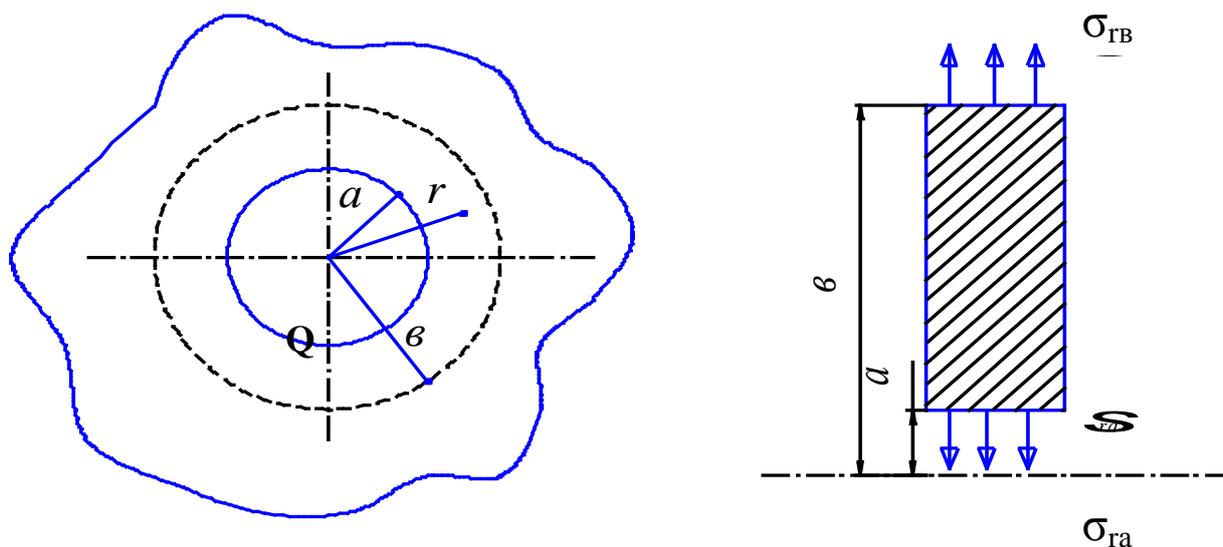


Рисунок 4.4. Нагруженная круглая пластина с отверстием.

В уравнении равновесия имеем две неизвестные величины σ_r, σ_θ .

2) Закон Гука-Дюамеля-Неймана [59] связывает напряжения возникающие в пластине с деформациями $\epsilon_r, \epsilon_\theta$. Где $\epsilon_r, \epsilon_\theta$ – соответственно радиальная и окружная деформации в покрытии,

моделируемом круглой пластиной с отверстием:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} \cdot \left(\sigma_r - \mu \sigma_\theta \right) \cdot \alpha \cdot \Delta t, \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} \cdot \left(\sigma_\theta - \mu \cdot \sigma_r \right) \cdot \alpha \cdot \Delta t, \quad (4.3)$$

где E – модуль Юнга I-го рода, Па;

μ – коэффициент Пуассона покрытия;

α – коэффициент термического расширения материала покрытия, $1/^\circ\text{C}$;

Δt – изменение температуры на данном радиусе диска r , $^\circ\text{C}$.

3) Уравнения связывающие деформации с напряжениями:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}, \quad (4.4)$$

где u – радиальное перемещение точки в пластине.

Подставляя (4.4) в формулы (4.2), (4.3), а затем, выражая напряжения через деформации, получим:

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \left(\frac{du}{dr} + \mu \cdot \frac{u}{r} \right) - \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta t}{1-\mu}, \quad (4.5)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \left(\frac{u}{r} + \mu \cdot \frac{du}{dr} \right) - \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta t}{1-\mu} \quad (4.6)$$

Подставляя формулы (2.5), (2.6) в уравнение равновесия (2.1) получим дифференциальное уравнение относительно радиального перемещения точки в пластине u . Поскольку за неизвестные принимаем напряжения, то при решении задачи необходимо воспользоваться условиями совместности деформаций. Эти условия основаны на соотношении [59]:

$$\frac{d}{dr} \cdot \left(\frac{u}{r} \cdot r \right) = \frac{du}{dr}, \quad (4.7)$$

или

$$\frac{d}{dr} \cdot \left(\varepsilon_\theta \cdot r \right) = \varepsilon_r. \quad (4.8)$$

Учитывая формулы (4.2), (4.3) получаем уравнение совместности в напряжениях:

$$\frac{d}{dr} \cdot \left\{ r \cdot \left[\frac{1}{E} \cdot \left(\sigma_\theta - \mu \cdot \sigma_r \right) \cdot \alpha \cdot \Delta t \right] \right\} = \frac{1}{E} \cdot \left(\sigma_r - \mu \sigma_\theta \right) \cdot \alpha \cdot \Delta t \quad (4.9)$$

Таким образом имеем уравнение равновесия (4.1) и уравнение совместности в напряжениях (4.9), то есть два уравнения с двумя

неизвестными напряжениями σ_r, σ_θ :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d}{dr} \cdot \left\{ r \cdot \left[\frac{1}{E} \cdot (\sigma_\theta - \mu \cdot \sigma_r) \right] \cdot \alpha \cdot \Delta t \right\} &= \frac{1}{E} \cdot (\sigma_r - \mu \sigma_\theta) \cdot \alpha \cdot \Delta t \\ \frac{d}{dr} \cdot (\sigma_r \cdot h) - (\sigma_\theta - \sigma_r) \cdot \frac{h}{r} &= 0 \end{aligned} \right. ,$$

где распределение температуры для данной модели считаем заданным.

Рассмотрим пластину постоянной толщины с постоянными параметрами упругости и известной температурой в камере сгорания при следующих граничных условиях:

$$\sigma_r(b) = \sigma_{rb}, \quad \sigma_r(a) = \sigma_{ra}, \quad (4.10)$$

где σ_{rb}, σ_{ra} – заданные напряжения в материале покрытия, определяемые по формулам:

$$\sigma_{ra} = \frac{E_n \cdot \varepsilon}{1 - \mu} = \frac{E_n \cdot (\alpha_o - \alpha_n) \cdot t_1}{1 - \mu}; \quad (4.11)$$

$$\sigma_{rb} = \frac{E_n \cdot \varepsilon}{1 - \mu} = \frac{E_n \cdot (\alpha_o - \alpha_n) \cdot t_2}{1 - \mu}; \quad (4.12)$$

где E_n – модуль упругости покрытия;

ε – деформация покрытия;

α_o, α_n – коэффициент термического расширения материала основы и покрытия соответственно;

μ – коэффициент Пуассона покрытия;

t_1, t_2 – температура на поверхности привалочной плоскости ГБЦ в процессе эксплуатации на границах дна стенки камеры сгорания.

Подставляя формулы (4.9), (4.10) в формулы (4.5), (4.6) будем иметь:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_{rb} \cdot \frac{b^2}{b^2 - a^2} \cdot \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) - \sigma_{ra} \cdot \frac{a^2}{b^2 - a^2} \cdot \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) + \\ &+ E \cdot \left[\theta \cdot \frac{b^2}{b^2 - a^2} \cdot \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) - \theta \right]; \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{rv} \cdot \frac{b^2}{b^2 - a^2} \cdot \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \sigma_{ra} \cdot \frac{a^2}{b^2 - a^2} \cdot \left(1 + \frac{b^2}{r^2}\right) + E \cdot \left[\theta \cdot \frac{b^2}{b^2 - a^2} \cdot \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) + \theta \cdot \alpha \cdot \Delta t \right], \quad (4.14)$$

$$\text{где } \theta = \frac{1}{r^2} \cdot \int_a^r r \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot dr \quad (4.15)$$

4) Определение закона распределения температуры в покрытии.

Для определения распределения температуры в покрытии принимаем следующую расчетную схему (рисунок 4.5).

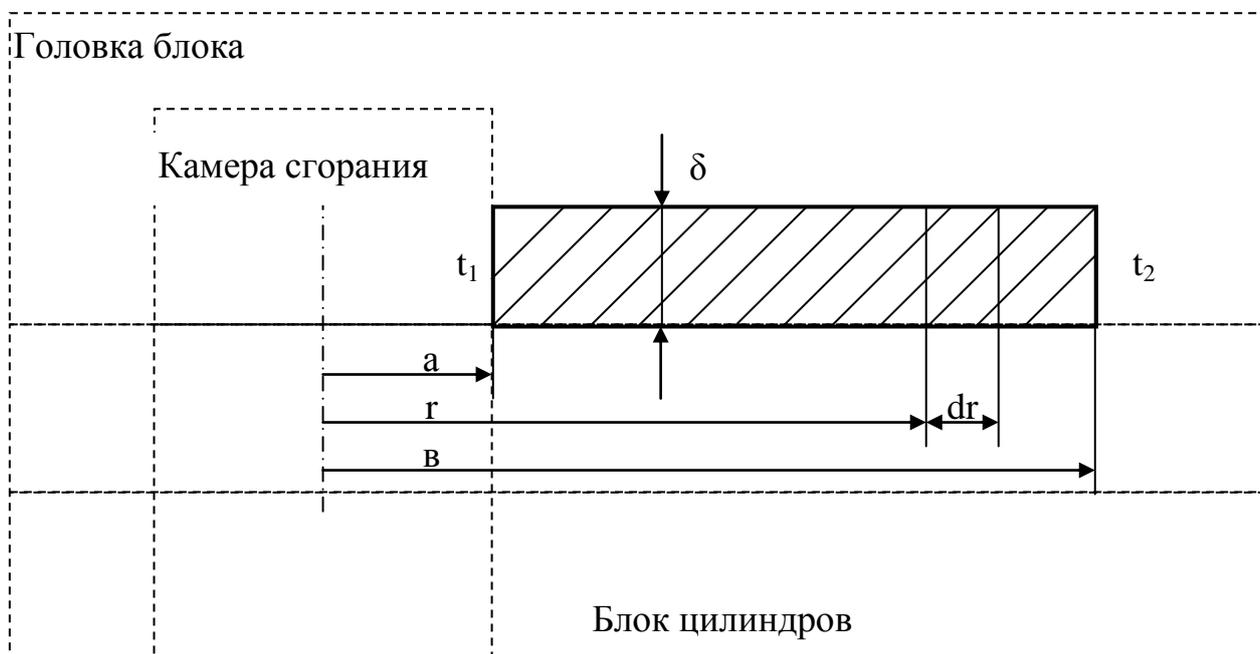


Рисунок 4.5 Расчетная схема определения распределения температуры: t_1 , t_2 – температура на поверхности привалочной плоскости ГБЦ в процессе эксплуатации на границах дна стенки камеры сгорания, δ – толщина покрытия, a – диаметр камеры сгорания, b – диаметр окружности, описывающий стенки камеры сгорания, r – переменный радиус.

При стационарном режиме, согласно закону Фурье [59] имеем:

$$Q(r) = -2 \cdot \pi \cdot r \cdot \delta \cdot \lambda \cdot \frac{dt}{dr}, \quad (4.16)$$

где λ – коэффициент теплопроводности;

δ – толщина покрытия.

Дифференцируя (4.16) по r найдем:

$$\frac{dQ}{dr} = -2 \cdot \pi \cdot \delta \cdot \lambda \cdot \left(r \cdot \frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{dt}{dr} \right) \quad (4.17)$$

С другой стороны согласно закону Ньютона-Рихмана [59]:

$$\frac{dQ}{dr} = 4 \cdot \pi \cdot r \cdot \alpha \cdot t, \quad (4.18)$$

где α – коэффициент теплоотдачи.

Сравнивая (4.17) и (4.18) получим дифференциальное уравнение стационарного поля распределения температуры в покрытии:

$$\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dt}{dr} - \frac{2 \cdot \alpha}{\delta \cdot \lambda} \cdot t = 0 \quad (4.19)$$

Полученное уравнение (4.19) представляет собой модифицированное дифференциальное уравнение Бесселя, при выводе которого предполагалось, что тепловой поток распространяется только по радиальной координате (рисунок 4.5) $Q(r)$ поскольку считаем, что толщина покрытия δ весьма мала по сравнению с радиальным ее размером $\mathbf{b} - \mathbf{a}$, то есть $\mathbf{b} - \mathbf{a} \gg \delta$.

$$\text{Полагая } \frac{2\alpha}{\lambda\delta} = m^2 \text{ и } m = \frac{z}{r} \quad (4.20)$$

уравнение (2.19) преобразуем к виду:

$$m^2 \cdot \frac{d^2 t}{dz^2} + \frac{m^2}{z} \cdot \frac{dt}{dz} - m^2 \cdot t = 0, \quad (4.21)$$

разделив на m^2 , получим

$$\frac{dt}{dz} + \frac{1}{z} \cdot \frac{dt}{dz} - t = 0 \quad (4.22)$$

Общее решение известно [60]:

$$t = C_1 I_0(z) + C_2 K_0(z), \quad (4.23)$$

где $I_0(z)$ и $K_0(z)$ – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода нулевого порядка;

C_1 и C_2 – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий.

$$t = t_1 \text{ при } z = ma$$

$$t = t_2 \text{ при } z = mb$$

$$\left. \begin{aligned} t_1 &= C_1 \cdot I_0 \cdot (ma) + C_2 \cdot K_0 \cdot (ma) \\ t_2 &= C_1 \cdot I_0 \cdot (mb) + C_2 \cdot K_0 \cdot (mb) \end{aligned} \right\} \quad (4.24)$$

Решаем систему алгебраических уравнений методом Крамера [60]:

$$D = \begin{vmatrix} I_0(ma) & K_0(ma) \\ I_0(mb) & K_0(mb) \end{vmatrix} = I_0(ma) \cdot K_0(mb) - I_0(mb) \cdot K_0(ma)$$

$$D_1 = \begin{vmatrix} t_1 & K_0(ma) \\ t_2 & K_0(mb) \end{vmatrix} = t_1 \cdot K_0(mb) - t_2 \cdot K_0(ma)$$

$$D_2 = \begin{vmatrix} I_0(ma) & t_1 \\ I_0(mb) & t_2 \end{vmatrix} = t_2 \cdot I_0(ma) - t_1 \cdot I_0(mb)$$

Следовательно:

$$C_1 = \frac{D_1}{D} = \frac{t_1 \cdot K_0(mb) - t_2 \cdot K_0(ma)}{I_0(ma) \cdot K_0(mb) - I_0(mb) \cdot K_0(ma)}, \quad (4.25)$$

$$C_2 = \frac{D_2}{D} = \frac{t_2 \cdot I_0(ma) - t_1 \cdot I_0(mb)}{I_0(ma) \cdot K_0(mb) - I_0(mb) \cdot K_0(ma)} \quad (4.26)$$

Таким образом, используя обозначение $z = m \cdot r$, распределение температуры принимает вид:

$$t(r) = C_1 \cdot I_0(mr) + C_2 \cdot K_0(mr), \quad (4.27)$$

где постоянные C_1 и C_2 определяются из формул (4.25), (4.26).

5) Определение распределения температуры и напряжений в покрытии по радиусу r .

В расчетах приняты следующие значения величин:

$\alpha_0 = 22,9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ [55] – коэффициент термического расширения материала основы;

$\alpha_n = 8,8 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ [53] – коэффициент термического расширения материала покрытия;

$E_n = 3,9 \cdot 10^4$ МПа [56] – модуль упругости покрытия;

$\mu = 0,28$ [52] – коэффициент Пуассона покрытия,

$\lambda = 26,7$ Дж/(с см $^\circ\text{C}$) [53] – коэффициент теплопроводности покрытия;

$\alpha = 0,014$ Вт/(м² $^\circ\text{C}$) [53] – коэффициент теплоотдачи покрытия;

$[\sigma_{\text{рп}}] = 260$ МПа [56] – предел прочности на растяжение покрытия,

$t_1 = 350^\circ\text{C}$ – температура на внутренней стороне стенки камеры сгорания;

$t_2 = 90^\circ\text{C}$ – температура на внешней стороне стенки камеры сгорания;

$a = 92$ мм – диаметр камеры сгорания,

$b = 110$ мм – диаметр окружности, описывающий стенки камеры сгорания

Задаваясь значением m , исходя из условия прочности, рассчитаем распределение температуры и напряжений в покрытии (рисунки 4.6, 4.7, 4.8, 4.9).

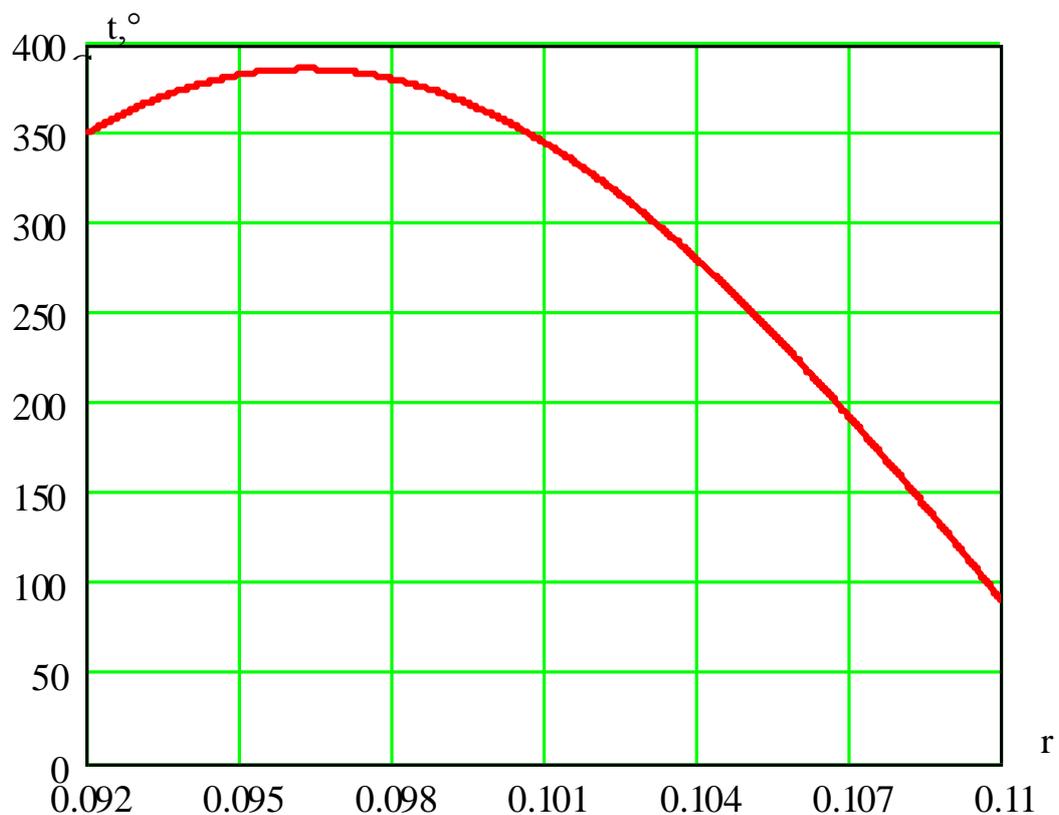


Рисунок 4.6 Распределение температуры t в покрытии по радиусу r .

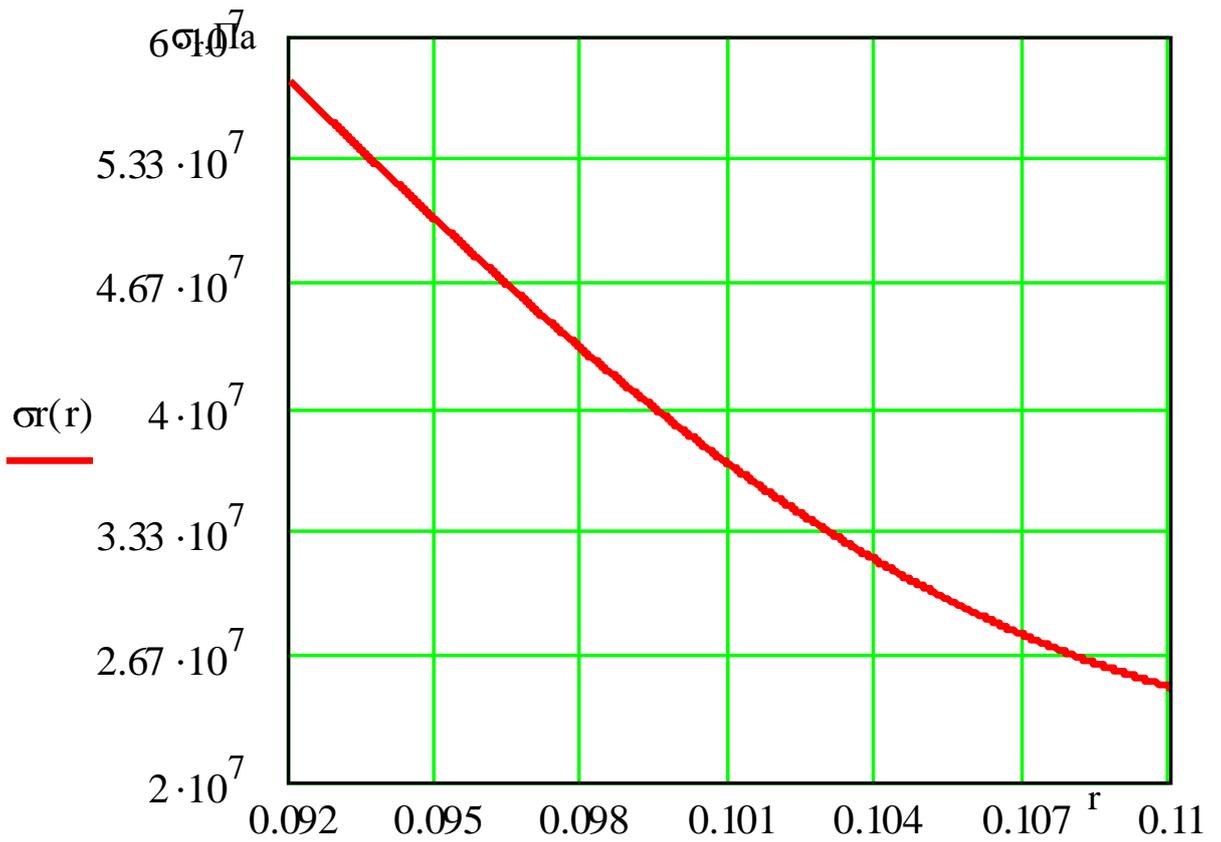


Рисунок 4.7 Распределение радиальных напряжений σ_r в покрытии по радиусу r .

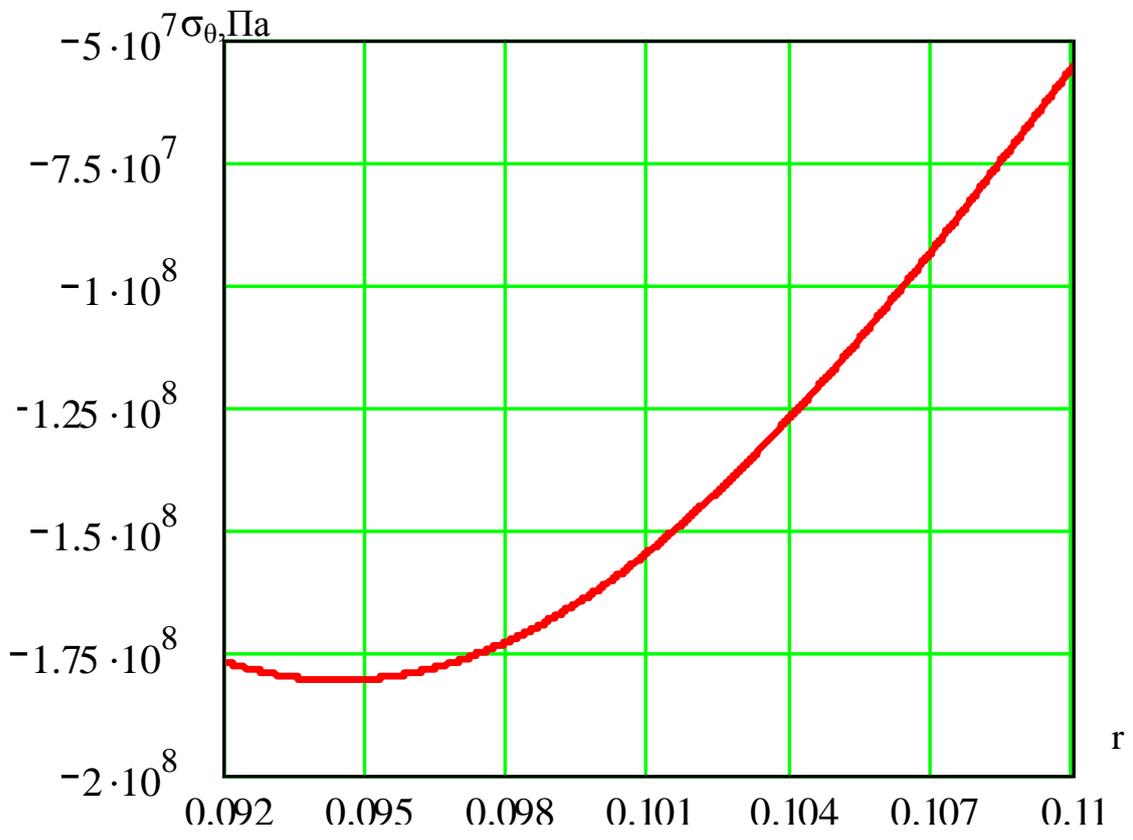


Рисунок 4.8 Распределение окружных напряжений σ_θ , в покрытии по радиусу r .

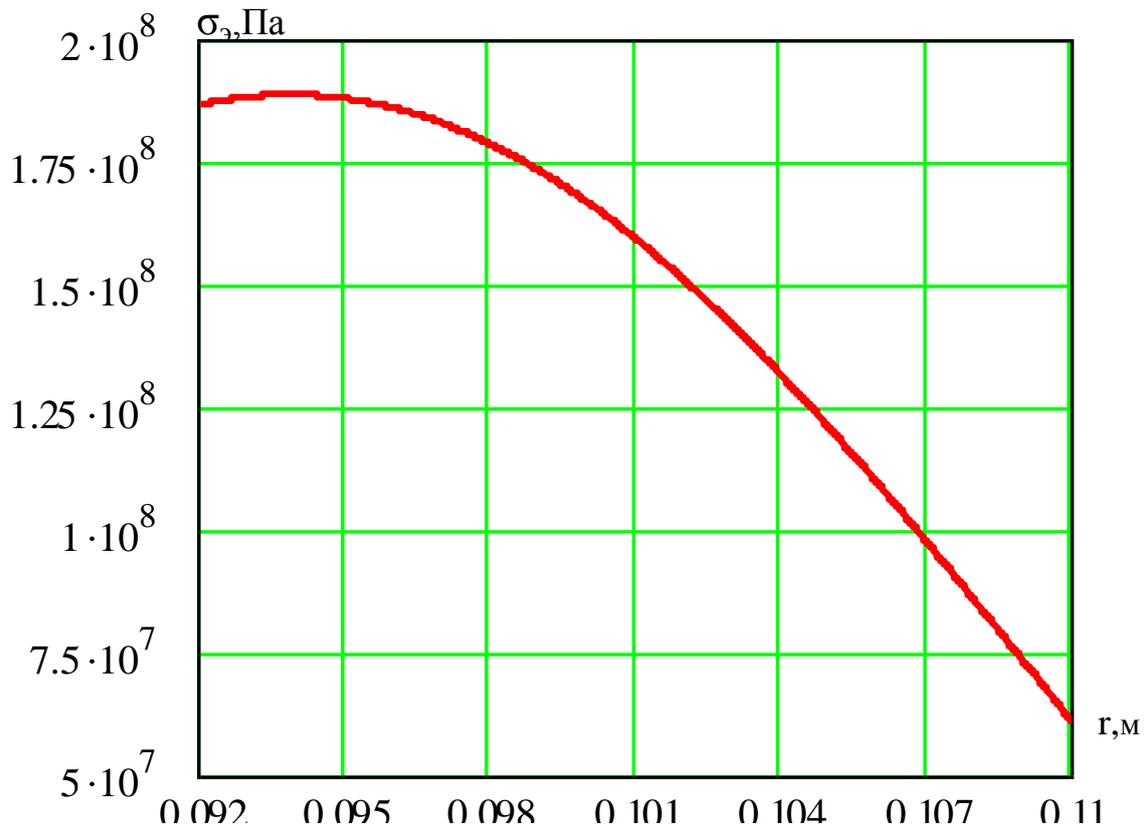


Рисунок 4.9 Распределение суммарных напряжений σ_r в покрытии по радиусу r .

Исходя из полученного решения поставленной задачи с учетом всех допущений, которые были приняты в ходе решения, толщину покрытия найдем из условия прочности:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2} \leq \frac{\sigma_p}{n} \quad (4.28)$$

Из результата расчета максимальное напряжение $\sigma_{\text{экв}} = 188$ МПа, следовательно коэффициент запаса прочности будет равен:

$$n = \frac{\frac{\sigma_p}{n}}{\sigma_{\text{экв}}} = \frac{260}{188} = 1,38$$

Толщину покрытия найдем из выражения (4.20):

$$\delta = \frac{2 \cdot \alpha}{\lambda \cdot m^2} = \frac{2 \cdot 0,014}{26,7 \cdot 10^{-6} \cdot 1000^2} = 0,0001 \text{ м.}$$

Итак, в результате расчета, при максимальных напряжениях в покрытии $\sigma_{экр} = 188$ МПа, его оптимальная толщина $\delta = 0,1$ мм. При этом коэффициент запаса прочности $n = 1,38$.

В технических условиях на восстановление деталей с упрочнением покрытиями полученными МДО, как правило, указана минимально допустимая их толщина. Поэтому на механическом участке бракованными будут детали с отсутствующим полностью или частично припуском на механическую обработку.

При использовании ЭДМ износ компенсируется. Припуск на механическую обработку (фрезерование) составит 0,1 мм [61].

При МДО алюминиевых сплавов образующиеся покрытия, полученные в силикат-содержащем электролите можно условно разделить на три основных слоя. Внешний рыхлый (технологический) обогащен алюмосиликатами и характеризуется высокой шероховатостью, а также невысокой твердостью и износостойкостью. Основной слой (рабочий) состоит в основном из корунда и обладает высокой твердостью, плотностью, износостойкостью и минимальной пористостью. В зоне соединения металла и покрытия образуется тонкий переходный слой. В процессе эксплуатации происходит постоянное осыпание частиц рыхлого слоя покрытия. Поэтому припуск на механическую обработку покрытия (шлифование) составит 0,02 мм, что достаточно для удаления рыхлой части покрытия.

Следовательно, толщина сформированного покрытия с учетом припуска под механическую обработку будет не менее 0,12 мм.

4.1.2 Исследование влияния условий формирования на толщину МДО-покрытия

Получаемые способом МДО покрытия, определяются в первую очередь условиями их формирования. Покрытия, полученные в силикат-содержащем электролите можно условно разделить на три основных слоя (рисунок 4.10) Внешний рыхлый (технологический) толщиной 30-100 мкм обогащен алюмосиликатами и характеризуется высокой шероховатостью, а также невысокой твердостью и износостойкостью. Основной слой (рабочий) толщиной 150-250 мкм состоит в основном из корунда и обладает высокой твердостью, плотностью, износостойкостью и минимальной пористостью. В зоне соединения металла и покрытия образуется тонкий переходный слой толщиной 3-5 мкм. [43,46,47,50].



- ▶ наружный технологический слой
- ▶ основной рабочий слой
- ▶ переходный слой
- ▶ материал основы

Рисунок 4.10 Структура МДО-покрытия, 1000^x

Формирование покрытий на нанесенных ЭДМ сплавах проводили на следующих режимах: плотность тока 10...30 А/дм²; продолжительность обработки 1...3 часа; температура электролита 15...17⁰С; состав электролита: 1...7 г/л КОН; 2...18 г/л Na₂SiO₃.

В процессе эксплуатации происходит постоянное осыпание частиц рыхлого слоя покрытия, что негативно сказывается на ресурсе детали. Поэтому в наших исследованиях анализ формирования основного упрочненного слоя проводили после удаления рыхлой части покрытия, которая считалась удаленной после стабилизации размеров образца. Последнее происходило при достижении основного износостойкого слоя покрытия. Перед измерениями образцы шлифовали наждачной бумагой до удаления рыхлого слоя покрытия, а затем полировали шлифовальной бумагой с постепенным переходом от крупнозернистой к мелкозернистой. Время шлифования на бумаге каждой марки не превышало 30...40 секунд. При переходе от одного номера шлифовальной бумаги к другой поверхность освобождали от пыли и меняли направление движения на 90⁰. Окончательное полирование поверхности проводили на фетровом круге субмикророшклом АСМ5/0,5/0,1 ГОСТ 9.206-80 в течение 2...3 минут. За толщину покрытия принимали среднюю величину из 20 измерений после исключения аномальных значений в выборке.

Толщину сформированного слоя покрытия на образцах контролировали неразрушающим методом по ГОСТ 9.302-88 при помощи вихретокового толщиномера ВТ-201. Данный метод измерения основан на регистрации взаимодействия собственного электромагнитного поля преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимым этим преобразователем в детали и зависящих от электрофизических и геометрических параметров основного металла и покрытия. Относительная погрешность измерения составляла не более $\pm 5\%$.

Результаты исследований показали, что толщина покрытия зависит от состава электролита, плотности тока и продолжительности оксидирования и практически не зависит от марки нанесенных ЭДМ сплавов (рисунок 4.11), поэтому результаты проведенных исследований представлены по полученным средним значениям, независимо от марки нанесенного ЭД

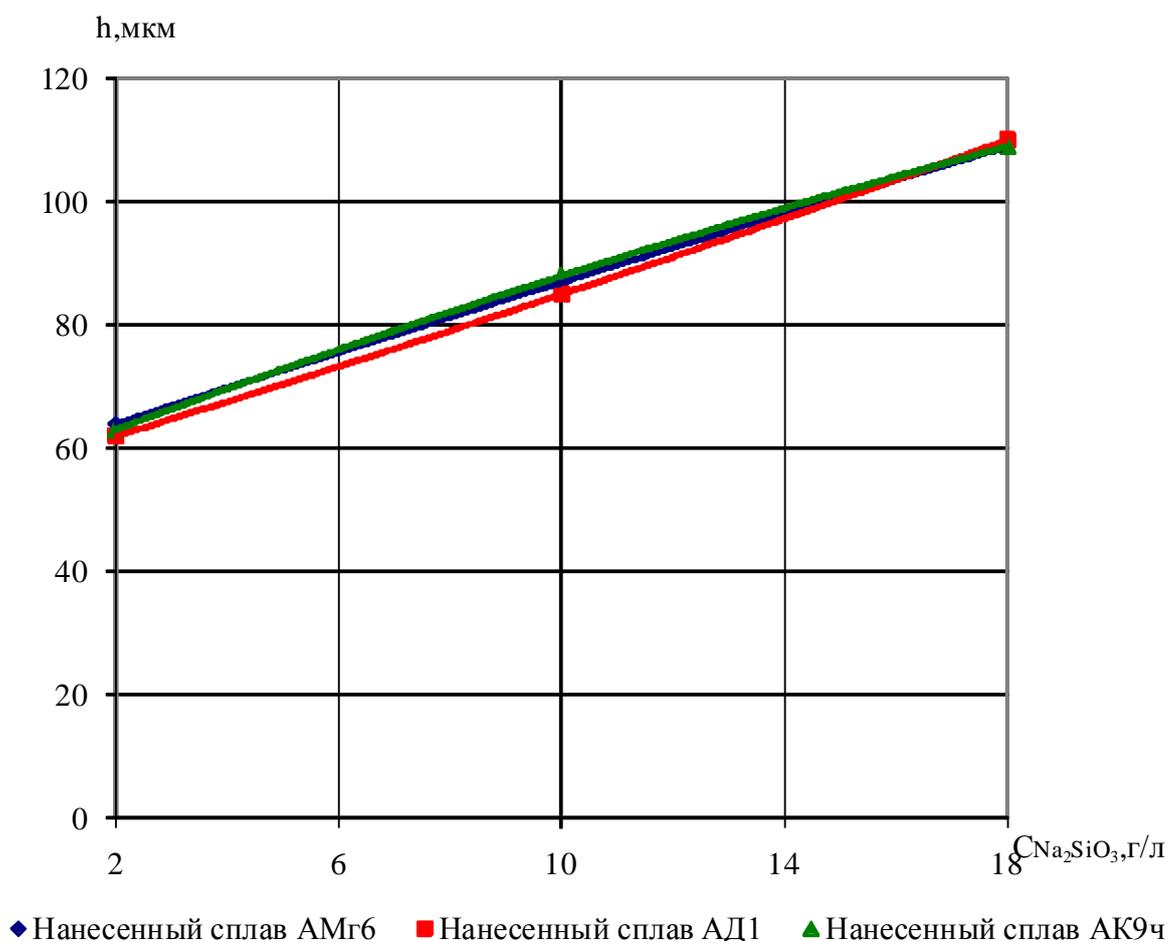


Рисунок 4.11 Влияние концентрации Na_2SiO_3 на толщину покрытия сформированного на нанесенных ЭДМ сплавах. Режимы: $C_{кон}=3$ г/л, $D_T=20$ А/дм², $T=1,5$ ч.

Увеличение концентрации КОН в электролите от 1 до 3 г/л при постоянных остальных параметрах МДО приводит к более глубокому проникновению внутреннего упрочненного слоя в основу напыленного сплава, увеличивая толщину внешнего упрочненного и рыхлого слоев покрытия (рисунки 4.12, 4.13 и 4.14). Очевидно, это объясняется тем, что за счет более интенсивного растравливания поверхности оксидируемого металла в процессе формирования покрытия участвует большее количество химических элементов. Однако, при увеличении концентрации КОН свыше 3 г/л толщину упрочненного и рыхлого слоев покрытия начинают уменьшаться. Видимо, это объясняется тем, что дальнейшее увеличение концентрации КОН повышает скорость растворения покрытия электролитом. При концентрации КОН 10...12 г/л МДО вообще не выходит на режим. При концентрации КОН менее 1 г/л электролит имеет низкую рассеивающую способность, получение толстых равномерных покрытий затруднено [43,46].

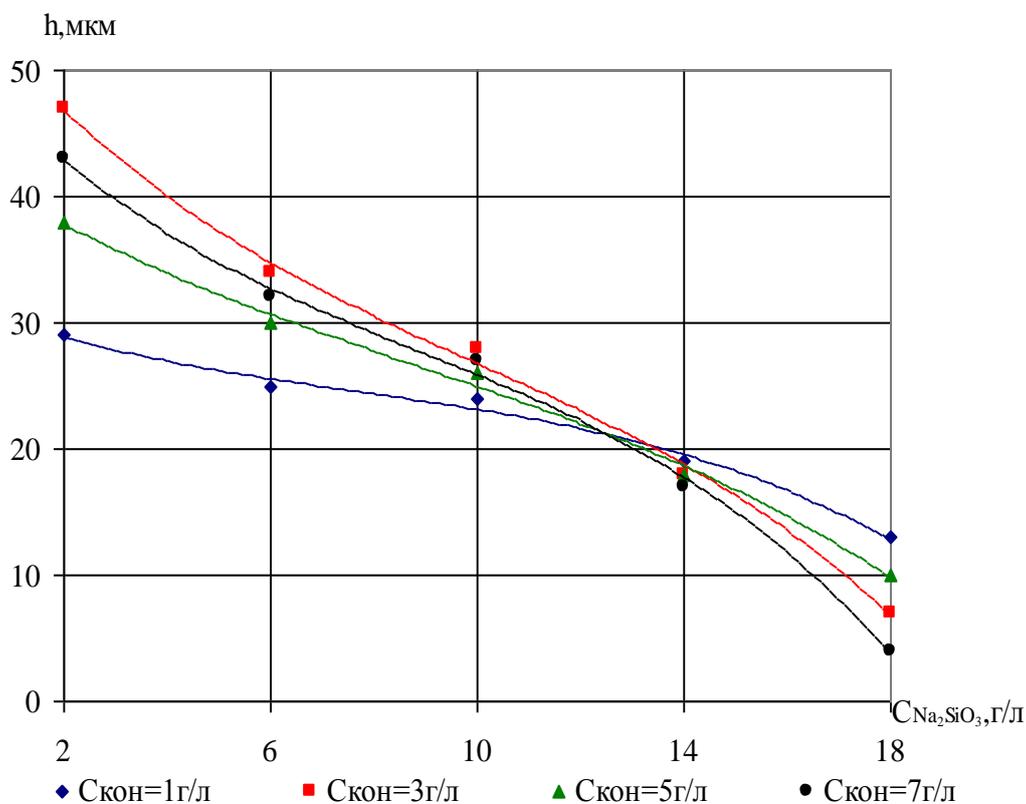


Рисунок 4.12 Влияние концентрации Na_2SiO_3 на толщину внутреннего упрочненного слоя покрытия сформированного на нанесенных ЭДМ сплавах. Режимы: $D_T=20 \text{ А/дм}^2$, $T=1,5 \text{ ч}$.

С увеличением концентрации в электролите Na_2SiO_3 при постоянных остальных параметрах МДО происходит уменьшение глубины проникновения внутреннего упрочненного слоя в основу, а толщины внешнего упрочненного и рыхлого слоев покрытия увеличиваются (рисунки 4.12, 4.13 и 4.14). Увеличение толщины происходит за счет компонентов натриевого жидкого стекла, а именно катионов SiO^- , которые под действием микродуговых разрядов входят в состав покрытия [43,46,50,62]. При увеличении концентрации Na_2SiO_3 свыше 18 г/л внутренний упрочненный слой практически не образуется. Очевидно, это связано с тем, что натриевое жидкое стекло создает на поверхности образца из алюминиевого сплава труднорастворимую пленку, препятствующую травлению металла. Это нарушает нормальное протекание МДО. Данное обстоятельство также способствует очень быстрому переходу микродуговых разрядов в дуговые, что в свою очередь приводит к порче и последующему разрушению покрытия. Вышесказанное согласуется с исследованиями других авторов, которые отмечали, что с увеличением концентрации Na_2SiO_3 в электролите внутренний упрочненный слой уменьшается [41,61]. Увеличение концентрации Na_2SiO_3 свыше 18 г/л значительного влияния на толщину внешнего упрочненного слоя покрытия не оказывает, однако, рыхлый слой увеличивается.

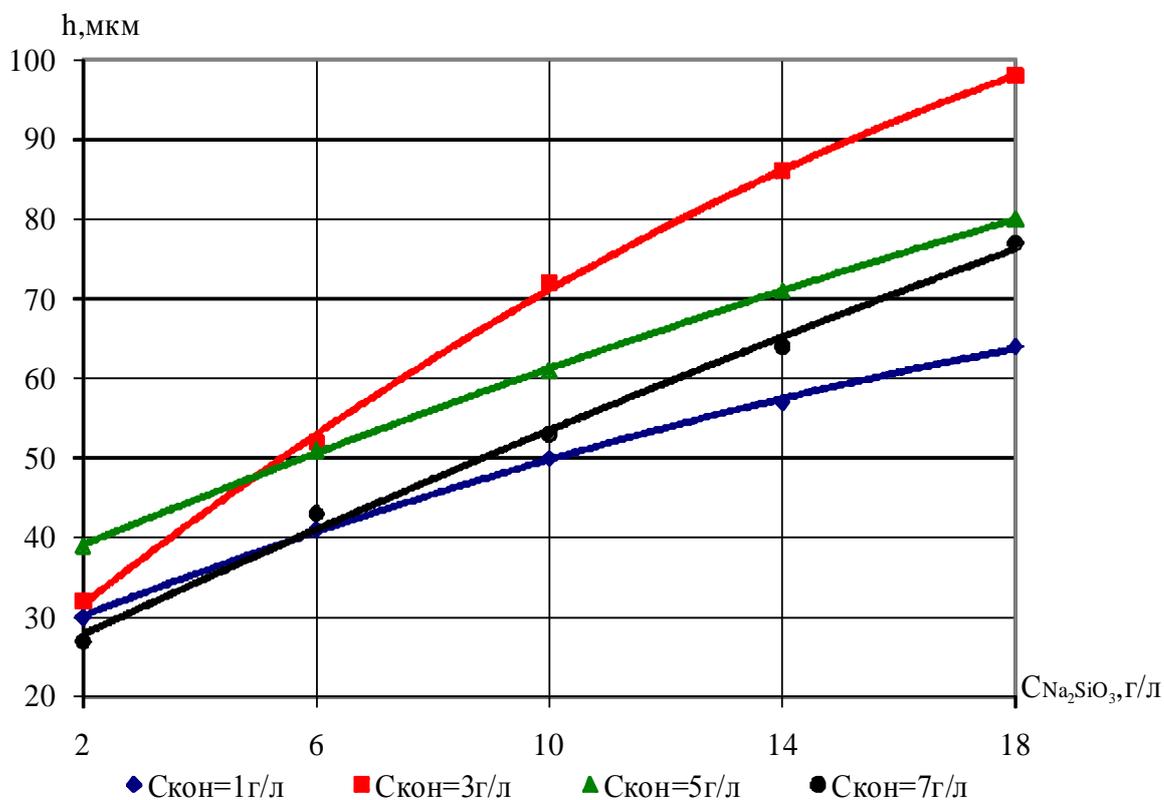


Рисунок 4.13 Влияние концентрации Na_2SiO_3 на толщину внешнего упрочненного слоя покрытия сформированного на нанесенных ЭДМ сплавах. Режимы: $D_T=20 \text{ А/дм}^2$, $T=1,5 \text{ ч}$.

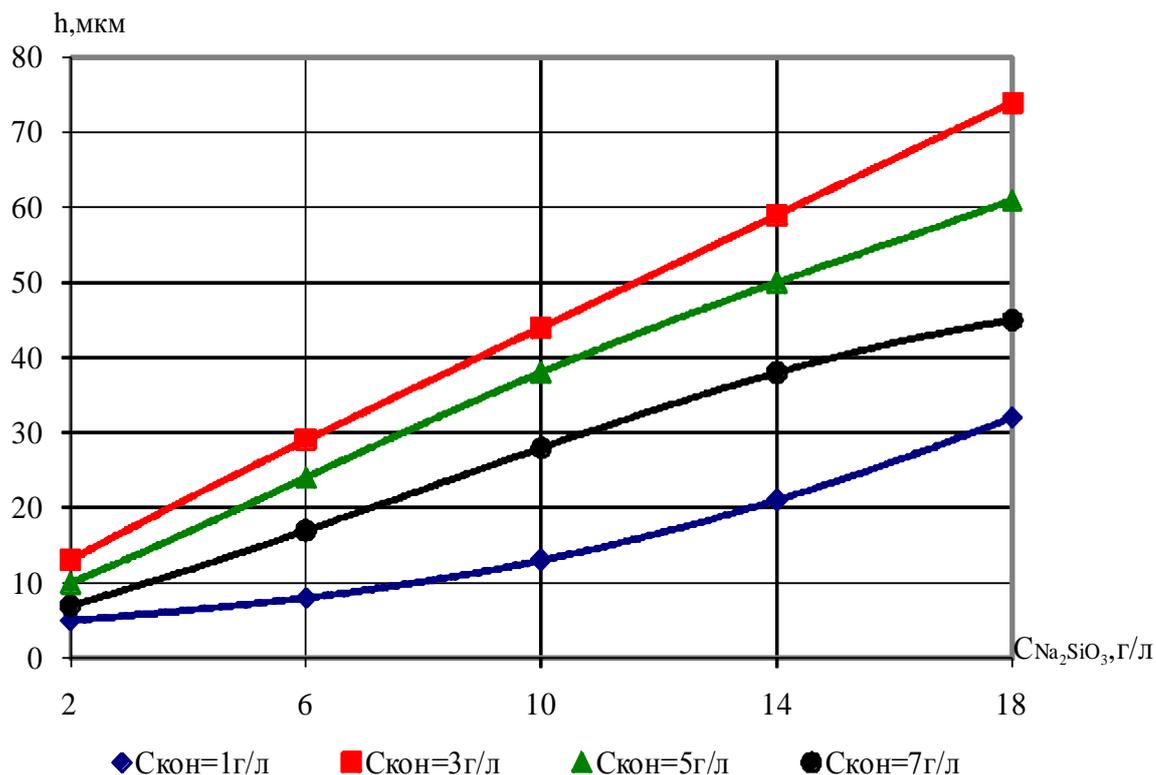


Рисунок 4.14 Влияние концентрации Na_2SiO_3 на толщину рыхлого слоя покрытия сформированного на нанесенных ЭДМ сплавах. Режимы: $D_T=20 \text{ А/дм}^2$, $T=1,5 \text{ ч}$.

Повышение плотности тока при постоянных других факторах МДО приводят к увеличению толщины каждого из слоев покрытия. (рисунок 4.15). Это способствует более интенсивному протеканию МДО, за счет увеличения числа микрозарядов и, соответственно, ускорению окисления металла [62,63,64]. Однако экспериментальным путем установлено, что увеличение тока свыше 25 А/дм^2 приводит к снижению прочностных свойств упрочненного слоя, особенно поверхностных его слоев, а свыше 35 А/дм^2 микродуговые разряды сменяются дугowymi и покрытие разрушается. Это вероятно можно объяснить тем, что более мощные разряды «выбивают» из покрытия оксиды алюминия и других металлов, входящих в состав напыляемых сплавов.

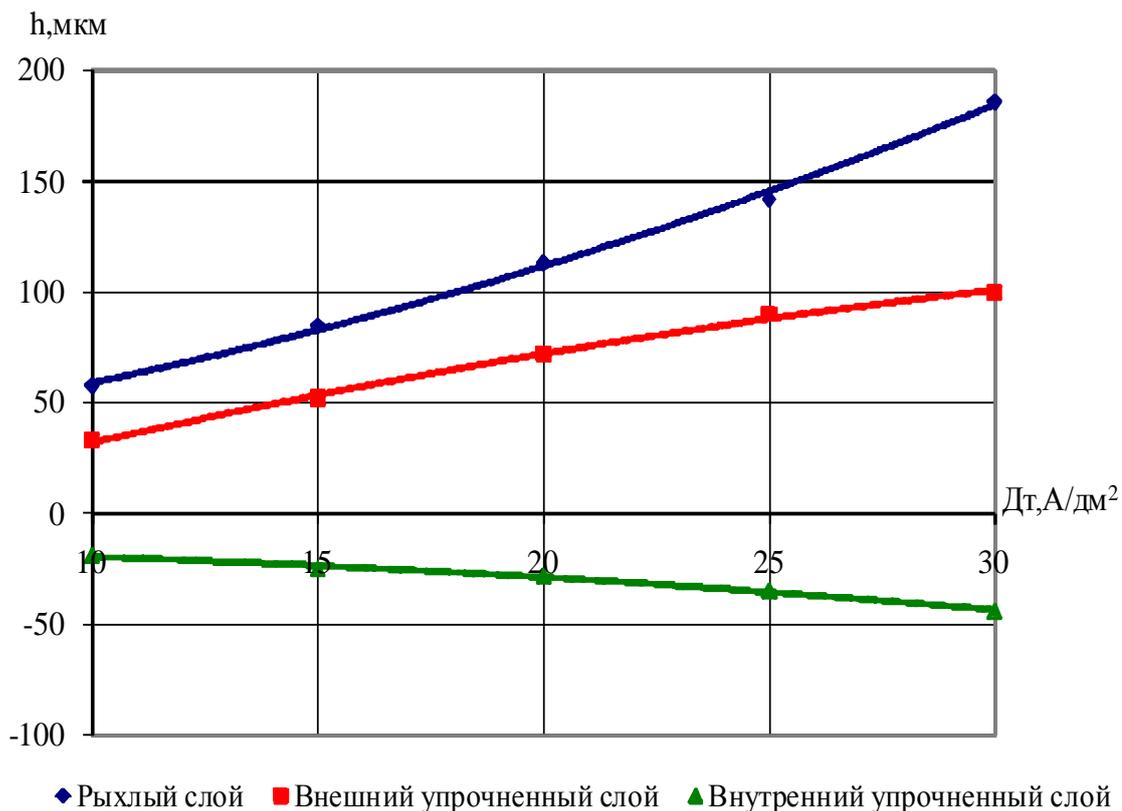


Рисунок 4.15 Влияние плотности тока D_T на толщину покрытия сформированного на нанесенных ЭДМ сплавах. Режимы: $T=1,5$ ч, $C_{\text{KOH}}=3$ г/л, $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=10$ г/л.

Можно также предположить, что увеличение плотности тока и соответственно мощности микродуговых разрядов может привести к появлению значительного количества парообразной фазы, которая разрыхляет оксидное покрытие, особенно его внешний упрочненный слой [57,68].

Проведение МДО при плотностях тока ниже 10 А/дм^2 нерационально с технологической точки зрения, так как для получения требуемой толщины необходимы большие затраты времени.

Увеличение продолжительности оксидирования при неизменных остальных параметрах приводит к росту толщины каждого из слоев покрытия (рисунок 4.16). Следует отметить, что увеличение продолжительности оксидирования свыше 2 часов существенного влияния на упрочненный слой не оказывает, увеличивая рыхлый слой покрытия.

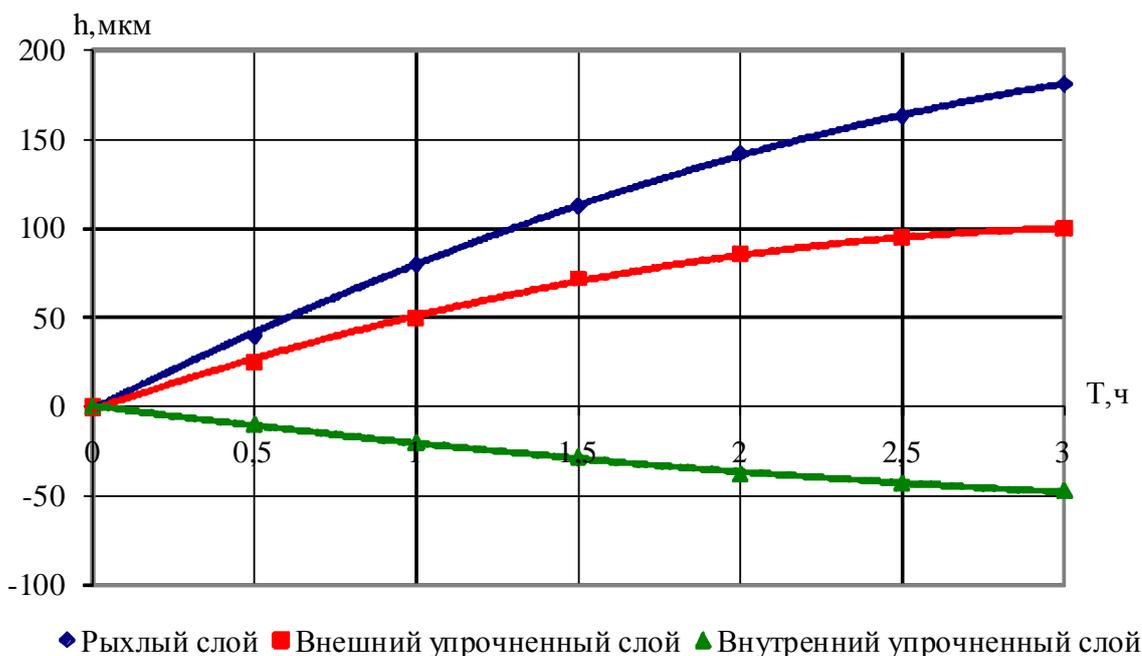


Рисунок 4.16 Влияние продолжительности оксидирования на толщину покрытия сформированного на нанесенных ЭДМ сплавах. Режимы: $D_T=20 \text{ А/дм}^2$, $T=1,5 \text{ ч}$, $C_{\text{KOH}}=3\text{г/л}$, $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=10\text{г/л}$.

Учитывая то, что минимально необходимая толщина упрочненного слоя покрытия, необходимая при работе детали до 350°C должна быть не менее $0,12 \text{ мм}$, то для упрочнения поверхностей деталей из алюминиевого сплава АК9ч, восстановленных электродуговой металлизацией можно рекомендовать следующие режимы:

- | | |
|--|-------------------------------------|
| 1. Состав электролита, г/л: | КОН – 2,8...3,2 |
| | Na_2SiO_3 – 10...12 |
| 2. Плотность тока, А/дм^2 : | 20...25 |
| 3. Продолжительность оксидирования, ч: | 1,4...1,6 |

При вышеуказанных параметрах МДО, получают толщину упрочненного слоя покрытия не менее $0,12 \text{ мм}$.

При этом внутренний (от действительного размера детали) упрочненный слой составит $0,025...0,035 \text{ мм}$, а внешний – $0,075...0,085 \text{ мм}$.

4.2 Микротвердость МДО-покрытий

Микротвердость, являющуюся одной из важнейших характеристик, определяющих физико-механические свойства покрытий, измеряли на приборе ПМТ-3М согласно ГОСТ 9.450-76. Нагрузка на шток микротвердомера составляла 100г [51,52,65]. Погрешность при измерении контрольного отпечатка составляла не более 0,3 мкм.

Вдавливание алмазной пирамиды проводили перпендикулярно к поверхностному слою покрытия. Перед измерениями образцы шлифовали наждачной бумагой до удаления рыхлого слоя покрытия, полировали, а затем травили в ортофосфорной кислоте в течении 30 с. Твердость H_{μ} определяли с помощью электронно-вычислительного устройства, входящего в комплект микротвердомера.

Влияние концентрации КОН в электролите при постоянных остальных параметрах МДО на изменение микротвердости упрочненного слоя представлено на рисунке 4.17. С увеличением концентрации КОН от 1 до 3 г/л микротвердость формируемого покрытия возрастает. Зависимость микротвердости покрытий от концентрации КОН имеет экстремум, который соответствует концентрации 3 г/л. Очевидно, это объясняется тем, что содержание гидроксида калия влияет на агрессивность электролита, которая выражается в более сильном растравливании поверхности оксидируемого металла и вовлечении в формирование покрытия большего количества химических элементов, входящих в его состав. Однако повышение концентрации КОН более 3 г/л приводит к снижению микротвердости формируемого упрочненного слоя. Видимо это объясняется тем, что наличие в электролите избытка щелочи приводит к изменению состава и структуры коллоидных мицелл, которые являются исходными частицами для формирования покрытия.

Увеличение концентрации жидкого стекла Na_2SiO_3 в электролите при постоянных остальных параметрах МДО приводит к снижению микротвердости покрытия (рисунок 4.18).

Это связано с тем, что в структуре покрытия преобладающими становятся фазы муллита $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2$ и оксида кремния SiO_2 . Это находит подтверждение в исследованиях других авторов [54,61,63]. При содержании в электролите Na_2SiO_3 более 18 г/л образуется непрочное, рыхлое покрытие, которое легко стирается наждачной бумагой.

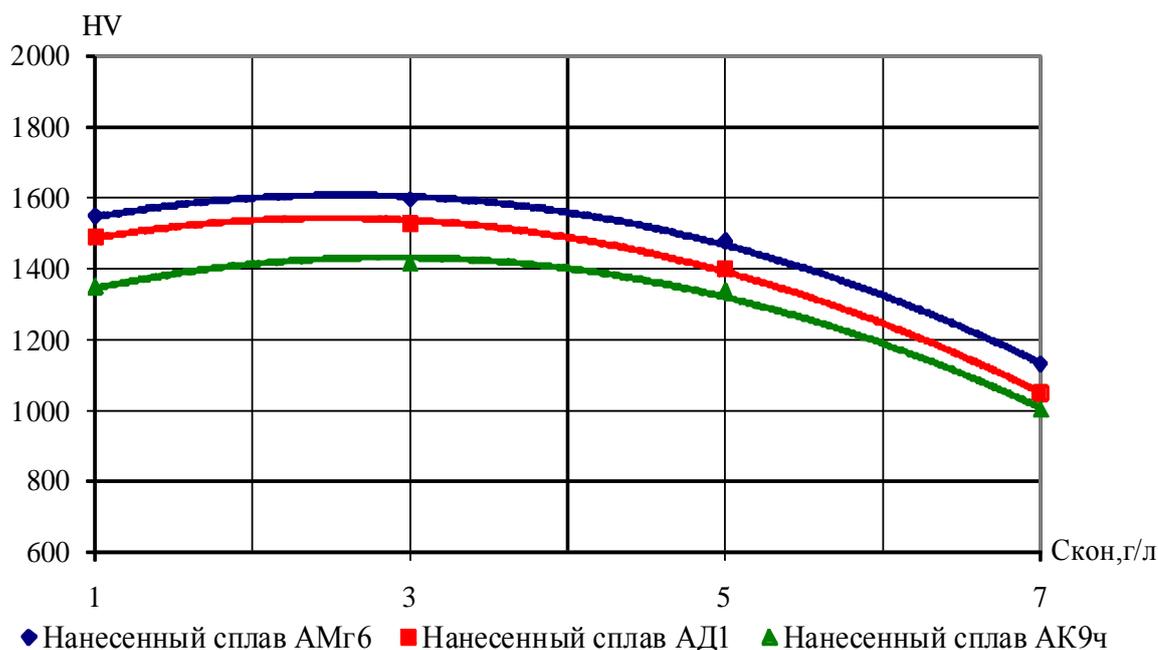


Рисунок 4.17 Влияние концентрации КОН на микротвердость покрытия сформированного на нанесенных ЭДМ сплавах. Режимы: $D_T=20\text{А/дм}^2$, $T=1,5\text{ч}$, $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=10\text{г/л}$.

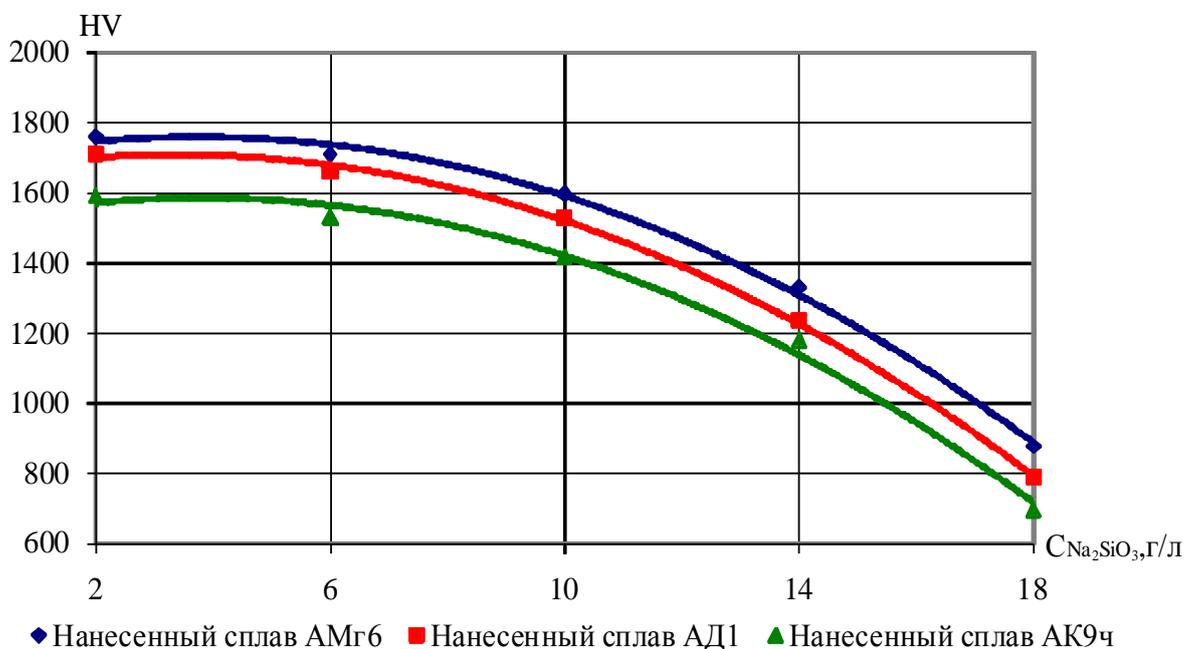


Рисунок 4.18 Влияние концентрации Na_2SiO_3 на микротвердость покрытия сформированного на нанесенных ЭДМ сплавах. Режимы: $D_T=20\text{ А/дм}^2$, $T=1,5\text{ ч}$, $C_{\text{КОН}}=3\text{г/л}$.

Оценивая влияние плотности тока на микротвердость формируемых покрытий при постоянных остальных параметрах МДО необходимо отметить, что с повышением плотности тока микротвердость возрастает (рисунок 4.10).

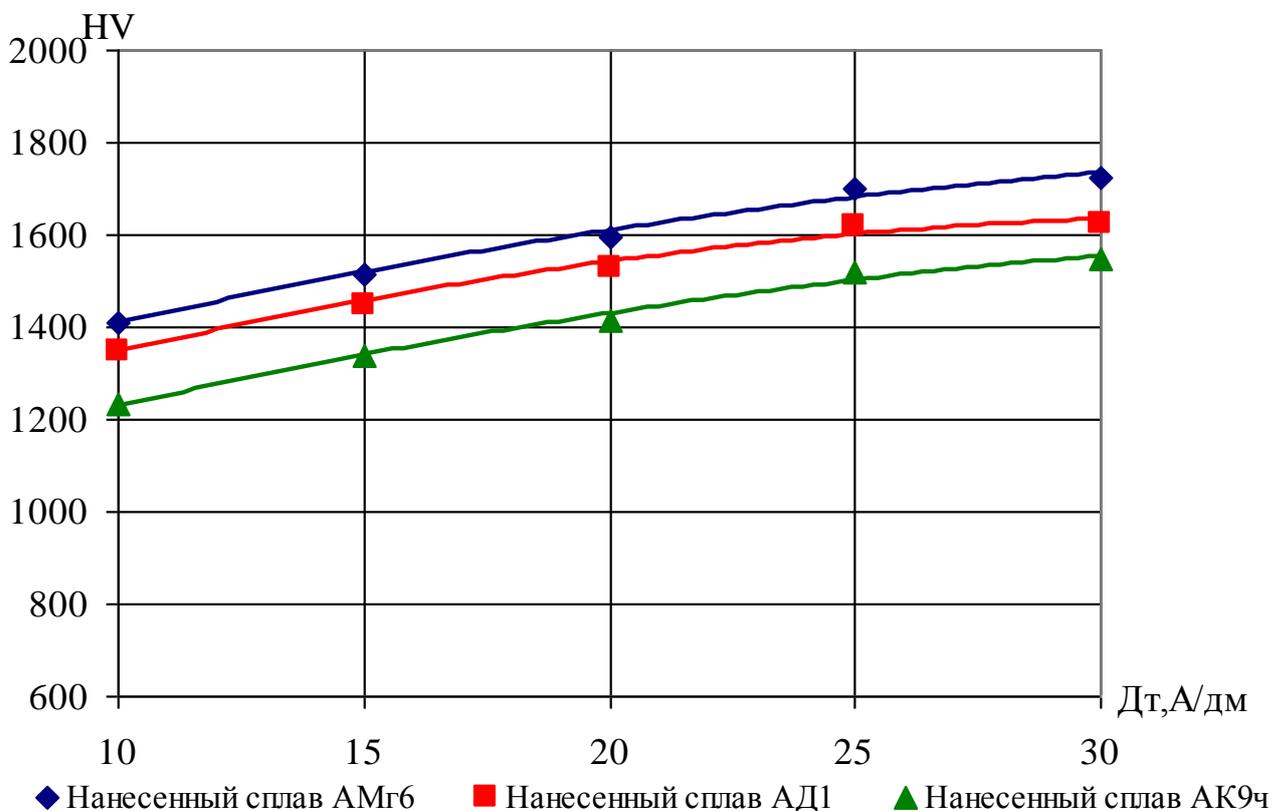


Рисунок 4.19 Влияние плотности тока на микротвердость покрытия сформированного на нанесенных ЭДМ сплавах. Режимы: $T=1,5$ ч, $C_{\text{KOH}}=3$ г/л, $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=10$ г/л.

Повышение плотности тока от 10 до 25 А/дм² приводит к более интенсивному протеканию процесса, что связано с увеличением числа микродуговых разрядов, которые, перекрывая друг друга, интенсивнее сплавляют стенки разрядных каналов. Это, в свою очередь, приводит к повышению температуры формирующегося покрытия, образовавшийся гидроксид алюминия при взаимодействии с КОН, обезвоживаясь, образует термодинамически устойчивый корунд, повышая микротвердость. При увеличении плотности тока до 25...30 А/дм² микротвердость покрытий возрастает незначительно. Кроме того, увеличение плотности тока более 30 А/дм² может привести к переходу процесса в дуговой режим. Это связано с порчей и последующим разрушением покрытия.

На основании вышесказанного можно заключить, что варьируя концентрацией компонентов электролита и плотностью тока, микротвердость покрытий, сформированных способом МДО, можно

изменять в широких пределах (600...1800 НV). Это дает возможность применять их для упрочнения поверхностей деталей из алюминиевых сплавов, восстановленных электродуговой металлизацией, которые работают в различных условиях.

4.3 Хрупкость МДО-покрытий

Формирование МДО-покрытий в силикат содержащих щелочных электролитах приводит к некоторому упрочнению поверхности алюминиевых сплавов, однако, сами покрытия склонны к хрупкому разрушению. МДО-покрытия оказывают слабое сопротивление деформации подложки и растрескиваются в местах перегибов [46,66,67].

Относительную хрупкость покрытий, сформированных способом МДО, определяли на специальном приборе конструкции Н.Д. Томашова [68].

Степень эластичности покрытий определяли по углу изгиба до момента появления коротких (1...2 мм) трещин на поверхности образца. Появление первичной трещины наблюдалось с помощью оптического устройства, входящего в комплект прибора.

Испытания на приборе конструкции Н.Д. Томашова [68] показали, что хрупкость покрытий практически не зависит от плотности тока и концентрации щелочи КОН (рисунки 4.20, 4.21)

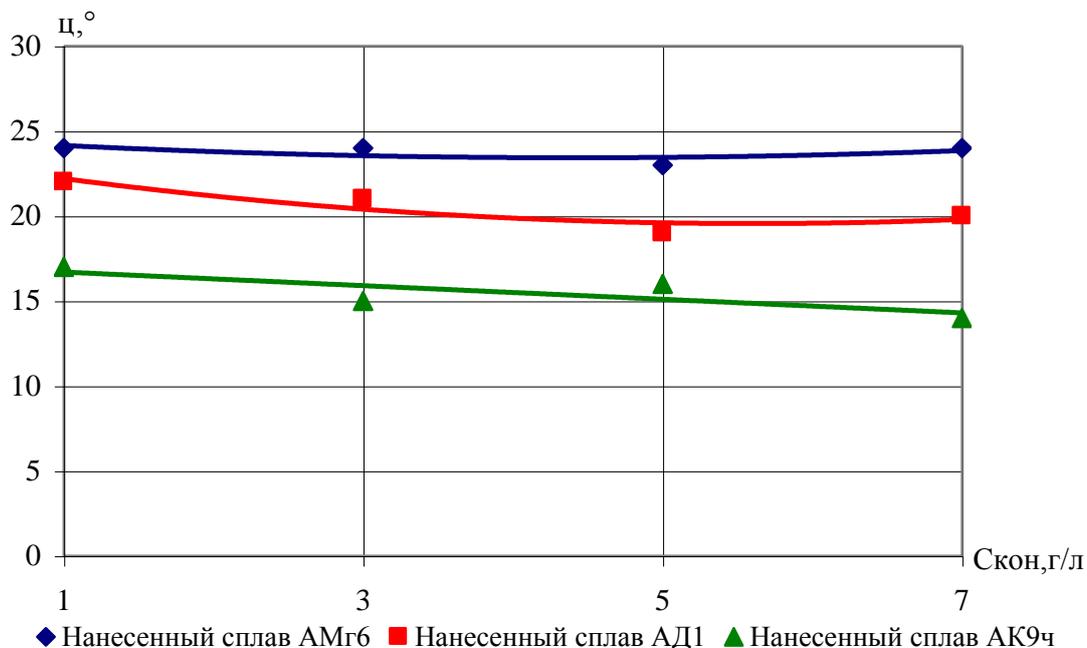


Рисунок 4.20 Влияние концентрации КОН на хрупкость покрытия сформированного на нанесенных ЭДМ сплавах. Режимы: $D_T=20$ А/дм², $T=1,5$ ч, $C_{Na_2SiO_3}=10$ г/л.

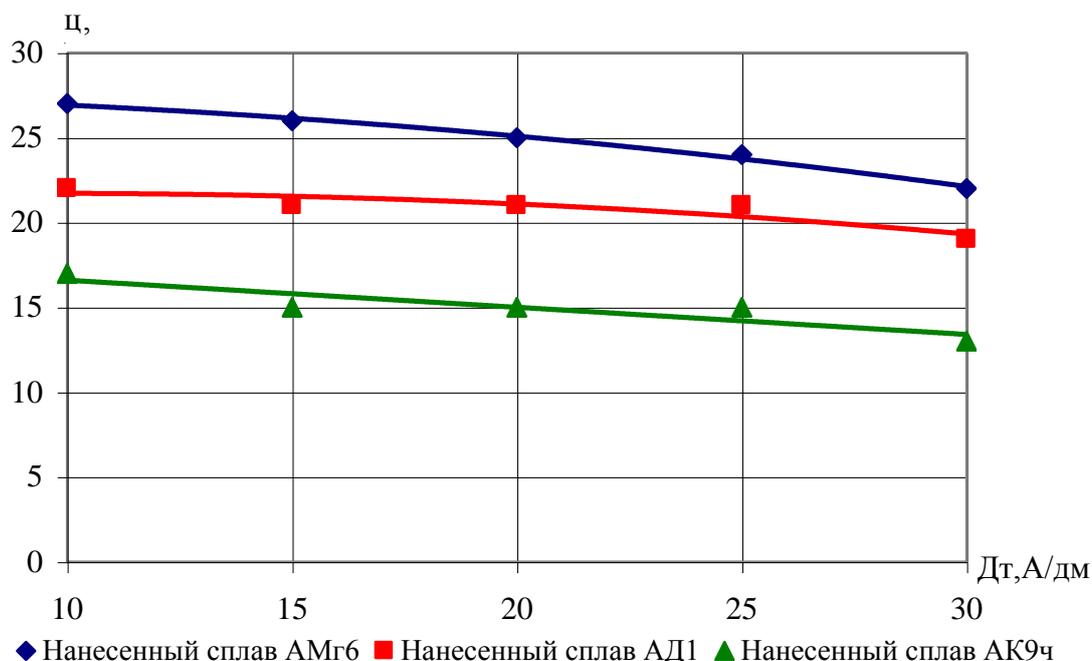


Рисунок 4.21 Влияние концентрации D_T на хрупкость покрытия сформированного на нанесенных ЭДМ сплавах. Режимы: $C_{\text{КОН}}=3\text{г/л}$, $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=10\text{г/л}$, $T=1,5$ ч.

Оценивая влияние концентрации жидкого стекла Na_2SiO_3 можно отметить, что с ее увеличением хрупкость возрастает (рисунок 4.22).

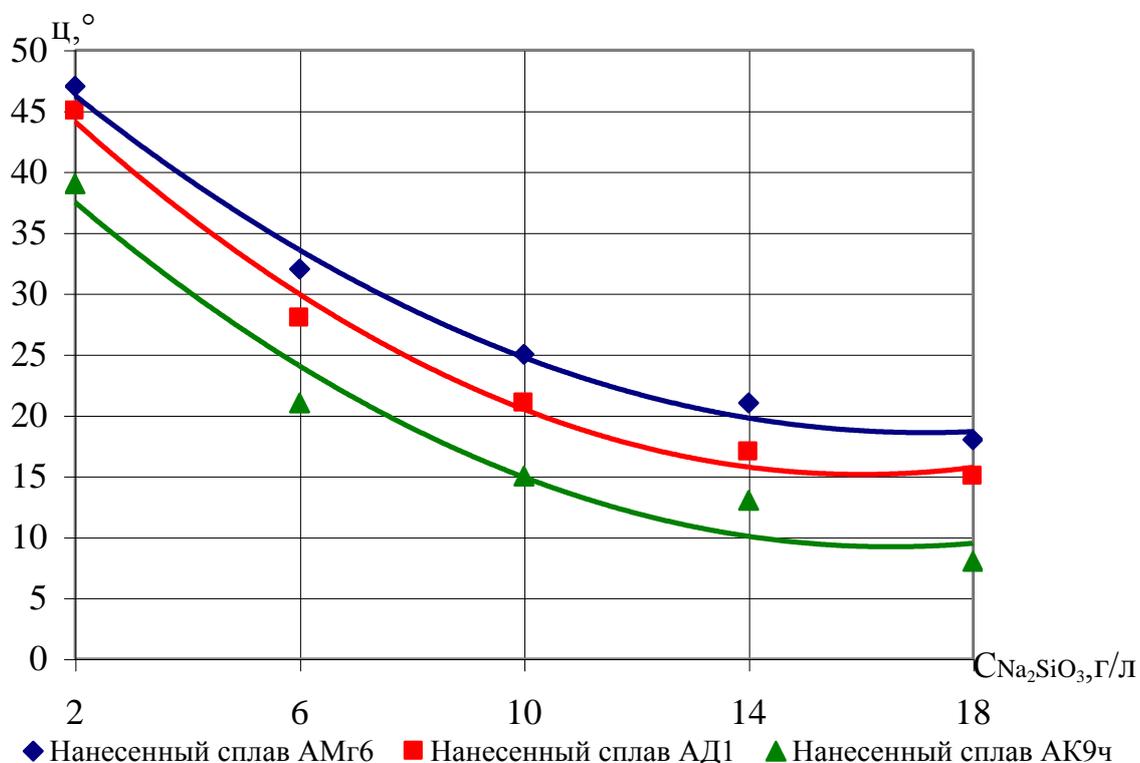


Рисунок 4.22 Влияние концентрации Na_2SiO_3 на хрупкость покрытия сформированного на нанесенных ЭДМ сплавах. Режимы: $D_T=20 \text{ A/дм}^2$, $T=1,5$ ч, $C_{\text{КОН}}=3\text{г/л}$.

Это связано с тем, что в структуре покрытия преобладающими становятся хрупкие фазы муллита $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2$ и оксида кремния SiO_2 [66,67].

Наибольшая хрупкость наблюдается на покрытиях сформированных на нанесенном ЭДМ сплаве АК9ч, поскольку в нем содержится большое количество кремния.

4.4 Прочность сцепления покрытий

Одной из характеристик, определяющих эксплуатационные свойства покрытий, является их сцепляемость с основой.

Оценка прочности сцепления покрытий, сформированных способом МДО, с основой проводилась методами нагрева и изменения температур по ГОСТ 9.302-88. Они основаны на различии физико-механических свойств покрытия и металла.

Метод нагрева. Образец с покрытием нагревают до температуры 200°C , выдерживают в течении 1 часа и охлаждают на воздухе.

Метод изменения температур. Образец с покрытием нагревают до температуры 200°C , выдерживают в течении 15 минут и быстро охлаждают погружением в воду с температурой от 15 до 25°C . Суммарное количество циклов нагрева и охлаждения составляло 100.

Испытания проводили на образцах, изготовленных из сплава АК9ч, с напыленными сплавами АМг6, АД1 и АК9ч. Перед проведением испытаний из них готовили поперечные шлифы [69,70]. Для получения шлифов образцы с покрытиями разрезали на две половины. Затем половинки устанавливали в стальное кольцо и заливали эпоксидной смолой. После затвердения смолы образцы обрабатывали шлифовальной бумагой с постепенным переходом от крупнозернистой к мелкозернистой. Время шлифования на бумаге каждой марки не превышало 30...40 секунд. При переходе от одного номера шлифовальной бумаги к другой поперечный шлиф освобождали от пыли и меняли направление движения на 90° . Окончательное полирование поверхности проводили на фетровом круге субмикророшкком АСМ5/0,5/0,1 ГОСТ 9206-80 в течение 2...3 минут. Для получения отчетливой границы между покрытием и основным металлом полученный шлиф подвергали травлению в ортофосфорной кислоте в течение 30 секунд. В течение всего процесса подготовки шлифа, а также перед травлением и после него

поперечный срез образца промывали водой и спиртом, после чего сушили фильтровальной бумагой.

Исходя из условий эксплуатации микрошлифы стягивали специальными стяжками с усилием 78 Нм.. Для нагрева образцов использовались лабораторная электропечь SNOL 58/350 с автоматическим регулятором температуры. Чтобы точно определить момент прогрева образцов до заданной температуры, в печи был установлен образец – свидетель с термопарой. После каждого цикла нагрева и охлаждения проводили визуальный осмотр образцов на наличие вздутий или отслаивания покрытий. Исследование изменений в переходном слое на наличие микротрещин между покрытием и металлом проводили на исследовательском микроскопе Axioskop 2 MAT после каждых 4 циклов испытаний.

Микроструктурный анализ металлизационных покрытий до обработки микродуговым оксидированием (рисунок 4.23) показал, что границы между частицами металла в покрытии толстые, чёткие; между частицами покрытия имеются поры; в среднем пористость в покрытии 11 - 13% [71,72]. Поэтому представляется целесообразным провести исследование сцепляемости покрытий, сформированных способом МДО, с напыленным слоем металла.

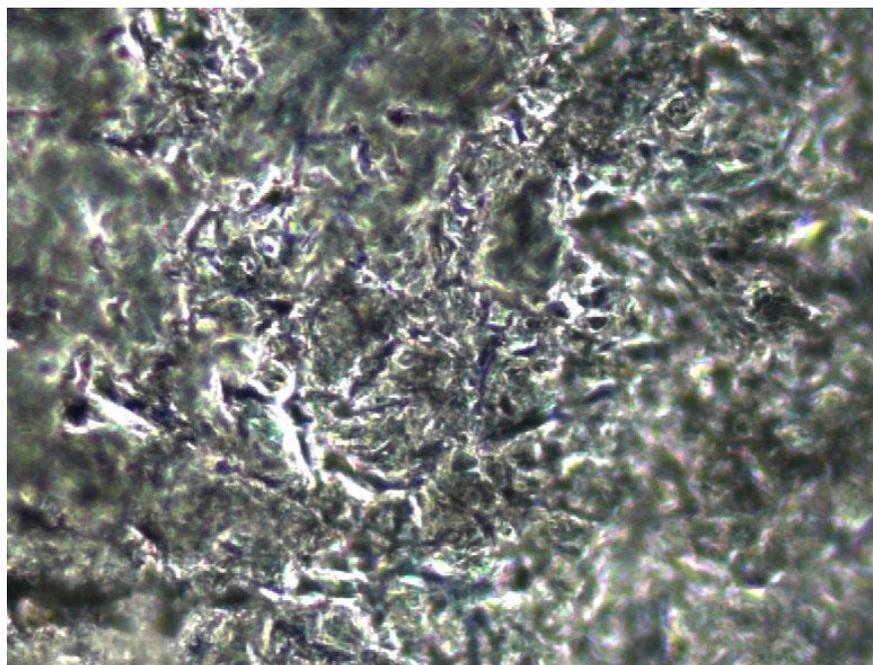


Рисунок 4.23 Поперечный шлиф образца с металлизационным покрытием сплавом АМг6, 500^х.

Благодаря травлению металла при оксидировании переходный слой покрытия, проникая в образовавшееся при электродуговой металлизации поры, способствует улучшению сцепляемости за счет увеличения площади контакта между покрытием и напыленным сплавом. При этом наблюдается эффект заполнения сложных приповерхностных пор материалом покрытия.

В результате проведенных качественных исследований по двум методам (нагрева и изменения температур) можно отметить, что на контролируемой поверхности вздутий и отслаиваний не наблюдалось независимо от режимов МДО (рисунки 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 и 4.29). Высокая адгезия обусловлена сцеплением так называемого «анкерного типа» [43,46,47]. Это происходит в результате частичного оплавления и перемешивания покрытия и его основы, возникающего в процессе МДО.

Данный вид покрытий может быть рекомендован для упрочнения восстановленных электродуговой металлизацией изношенных деталей из алюминиевых сплавов, работающих в условиях повышенных температур, таких как головки блоков цилиндров, а также других крупных деталей сложной формы.

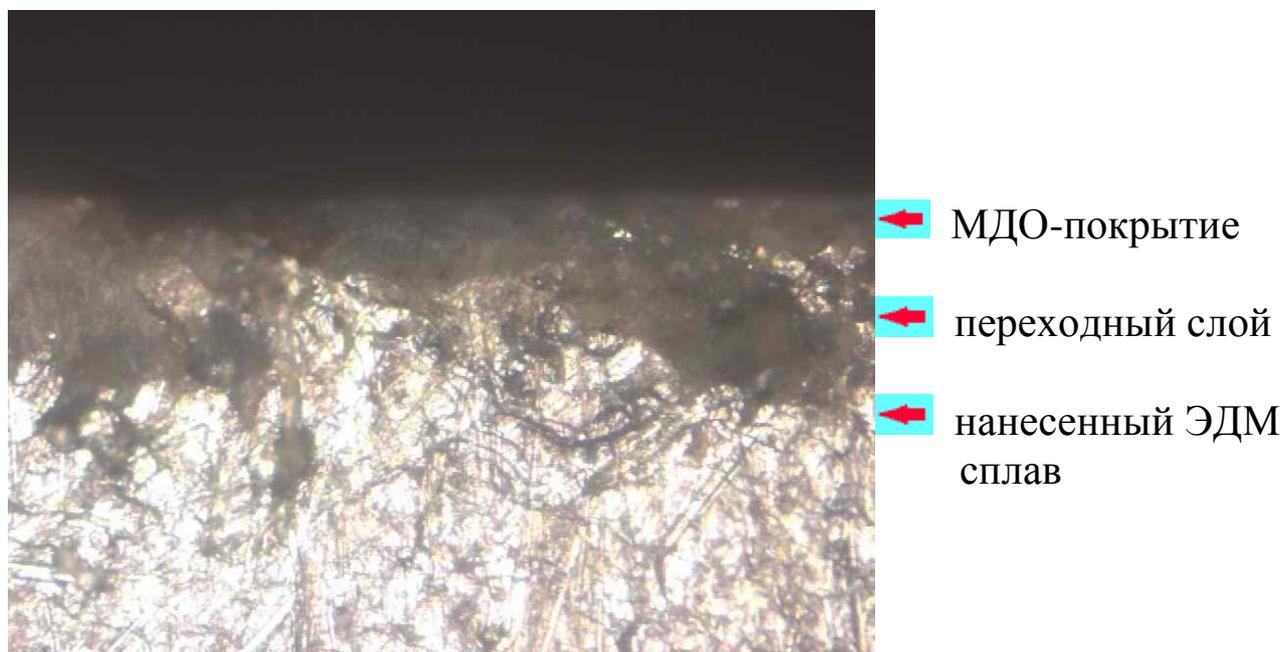
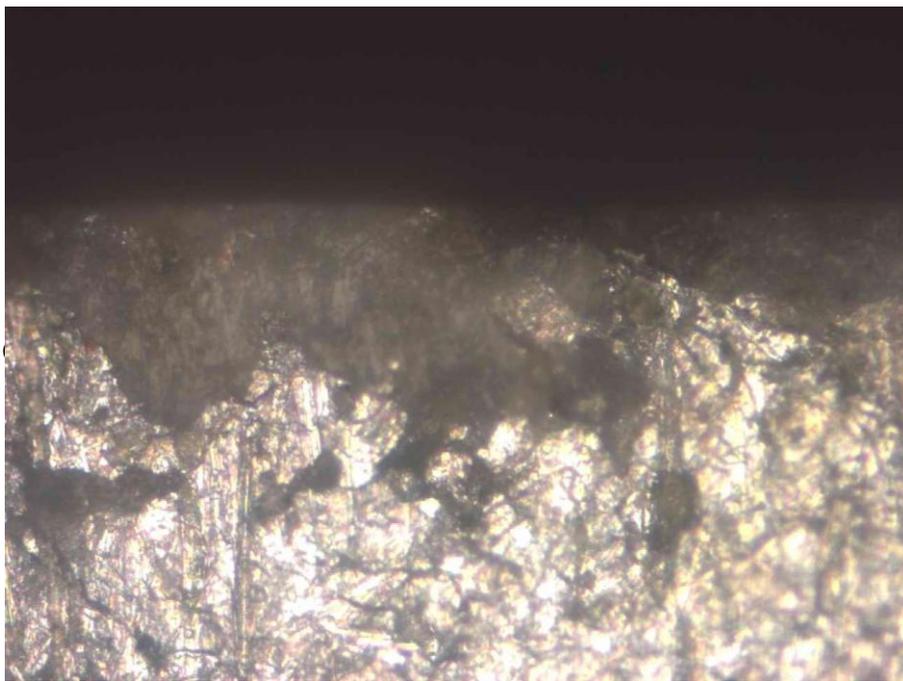


Рисунок 4.24 Поперечный шлиф образца с покрытием сформированным на нанесенном ЭДМ сплаве АМг6 после проведения испытаний по методу нагрева, 200^х.



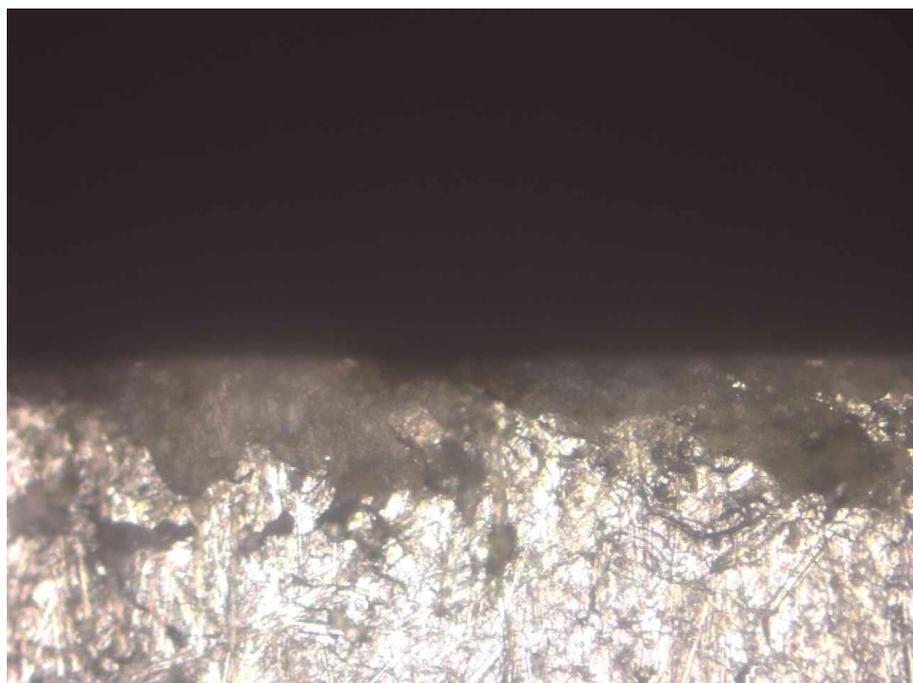
- ← МДО-покрытие
- ← переходный
- ← нанесенный
ЭДМ
сплав

Рисунок 4.25 Поперечный шлиф образца с покрытием сформированным на нанесенном ЭДМ сплаве АМг6 после проведения испытаний по методу изменения температур, 200^{\times} .



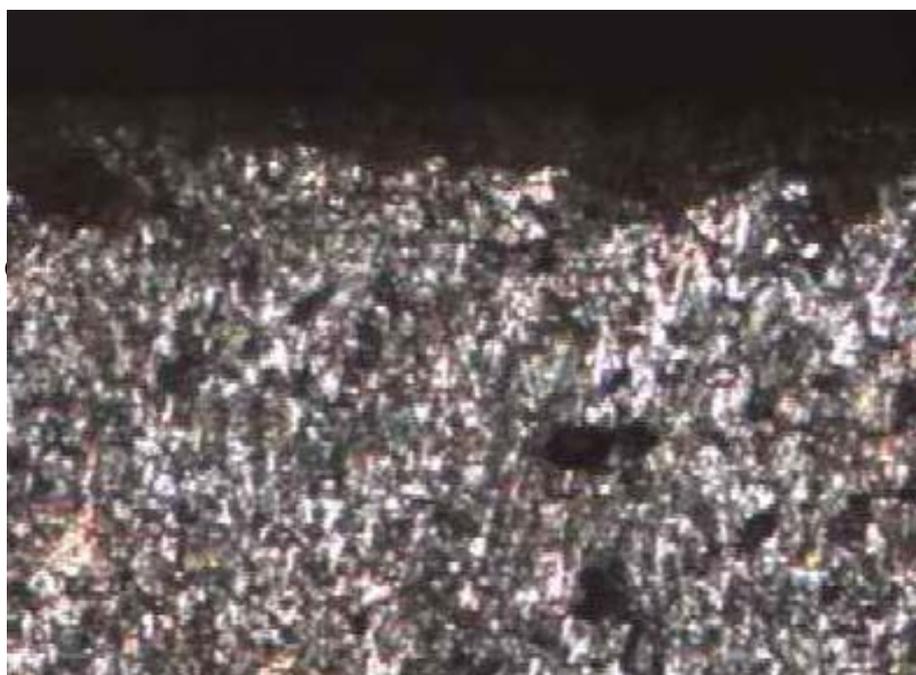
- ← МДО-покрытие
- ← переходный
- ← нанесенный
ЭДМ
сплав

Рисунок 4.26 Поперечный шлиф образца с покрытием сформированным на нанесенном ЭДМ сплаве АД1 после проведения испытаний по методу нагрева, 200^{\times} .



← МДО-покрытие
← переходный
← нанесенный
ЭДМ
сплав

Рисунок 4.27 Поперечный шлиф образца с покрытием сформированным на нанесенном ЭДМ сплаве АД1 после проведения испытаний по методу изменения температур, 200^{\times} .



← МДО-покрытие
← переходный
← нанесенный
ЭДМ
сплав

Рисунок 4.28 Поперечный шлиф образца с покрытием сформированным на нанесенном ЭДМ сплаве АК9ч после проведения испытаний по методу нагрева, 200^{\times} .

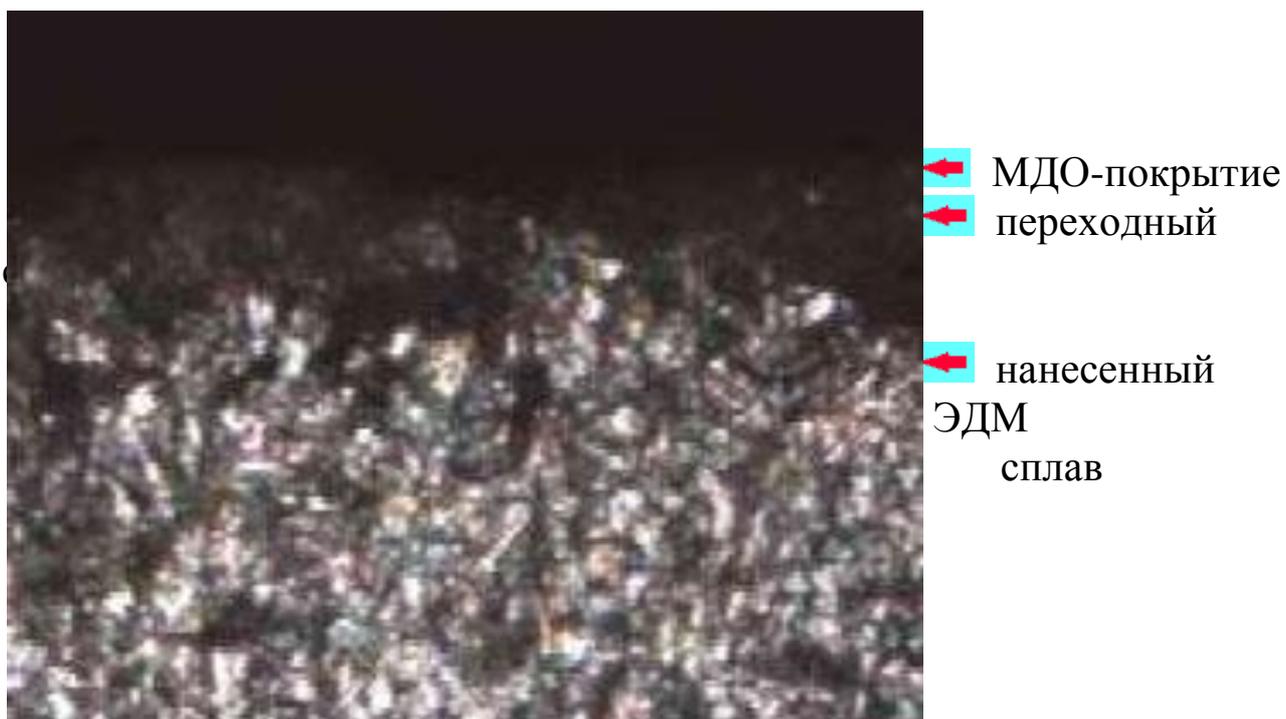


Рисунок 4.29 Поперечный шлиф образца с покрытием сформированным на нанесенном ЭДМ сплаве АК9ч после проведения испытаний по методу изменения температур, 200^x.

4.5 Сквозная пористость МДО-покрытий

Коррозионная стойкость МДО-покрытий определяется, прежде всего, химической инертностью самого покрытия и его сквозной пористостью. Анализ химических свойств материала основы и покрытия, а это, в основном оксиды алюминия и кремния [43,50], показал, что с достаточной степенью активности основные компоненты покрытия способны взаимодействовать только с плавиковой кислотой. Тогда основным показателем коррозионнозащитной способности покрытий будет их сквозная пористость [73,74]. Поэтому исследование сквозной пористости покрытий, сформированных способом МДО, представляет значительный интерес.

Определение сквозной пористости покрытий, сформированных способом МДО, в зависимости от параметров электролита, плотности тока и различных напыленных сплавов определяли по ГОСТ 9.302-88. Данный метод основан на взаимодействии металла основы с реагентом в местах пор с образованием окрашенных соединений.

После оксидирования образцы промывали в холодной проточной воде, затем погружали на 30 с. в теплый (35-40°С) раствор

едкого натра (20 г/л) и 1 мин. в раствор осветления (азотная и плавиковая кислоты 1:1). Приготовленные таким образом образцы помещали на 5 мин. в раствор, содержащий 20 г/л сернокислой меди и 20 мл/л соляной кислоты. Промытые и просушенные образцы с участками розовых пятен контактно выделившейся меди исследовали под микроскопом Axioskop 2 MAT ($\times 5$; 10)

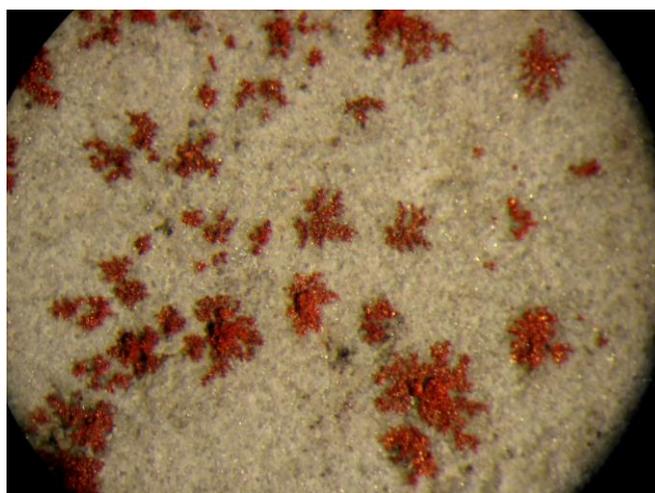
Среднее число пор (N_{cp}) вычисляли по формуле:

$$N_{cp} = \frac{N_{об}}{S}, \quad (4.29)$$

где $N_{об}$ – суммарное число пор на контролируемой поверхности;
 S – площадь контролируемой поверхности, $см^2$.

Внешний вид поверхности образцов после исследования сквозной пористости представлен на рисунке 4.30.

Анализируя влияние состава электролита на сквозную пористость МДО-покрытия, при неизменных остальных параметрах, можно отметить, что при увеличении концентрации КОН с 1 до 3 г/л пористость возрастает незначительно, однако дальнейшее повышение концентрации приводит к резкому ее росту (рисунок 4.31). Очевидно, это связано с тем, что в структуре напыляемых сплавов имеются легирующие компоненты, вблизи зерен которых, с повышением концентрации щелочи, происходит интенсивное травление. Увеличение концентрации Na_2SiO_3 в электролите до 11 г/л приводит к снижению пористости на всех напыленных сплавах (рисунок 4.32). Очевидно оксиды кремния входящие в покрытие и имеющие меньшую температуру плавления «залечивают» возникающие при формировании МДО-покрытия поры. Дальнейшее повышение концентрации Na_2SiO_3 приводит к резкому повышению сквозной пористости покрытий. Это связано с дальнейшим внедрением катионов SiO^- в покрытие и при увеличении плотности тока приводит к росту кристаллов покрытия. При этом искровые разряды возникают на большем расстоянии друг от друга, не успевая сплавлять границы образующихся кристаллов [46].



а)

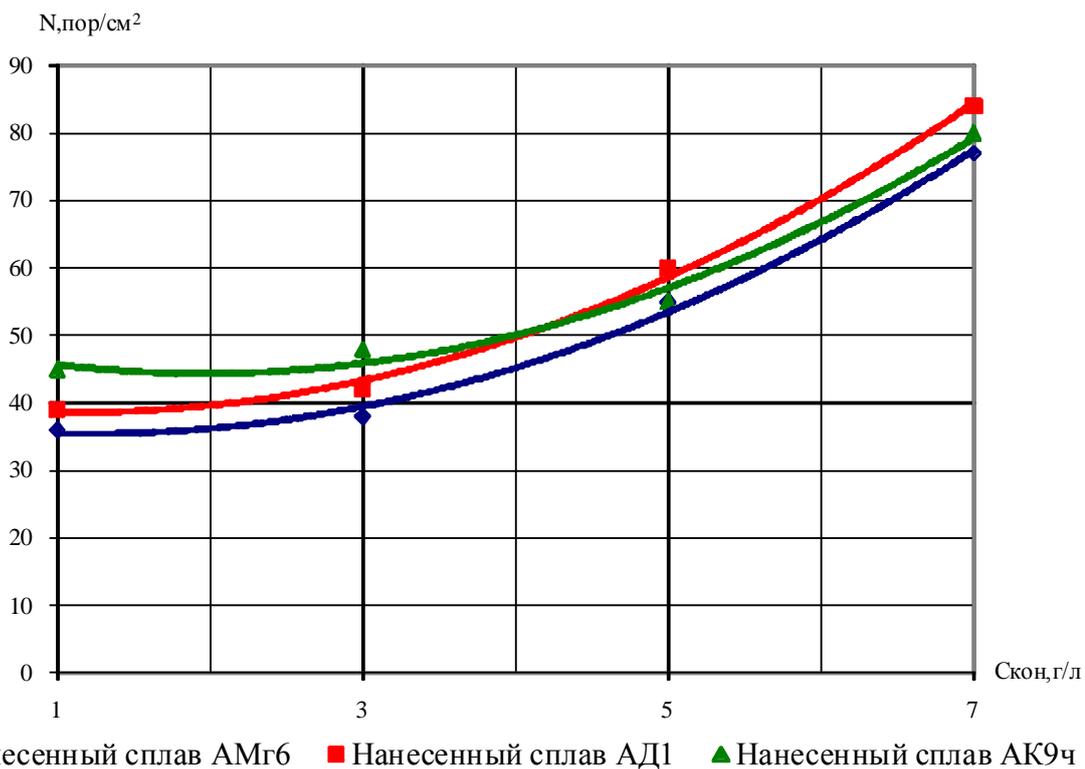


б)



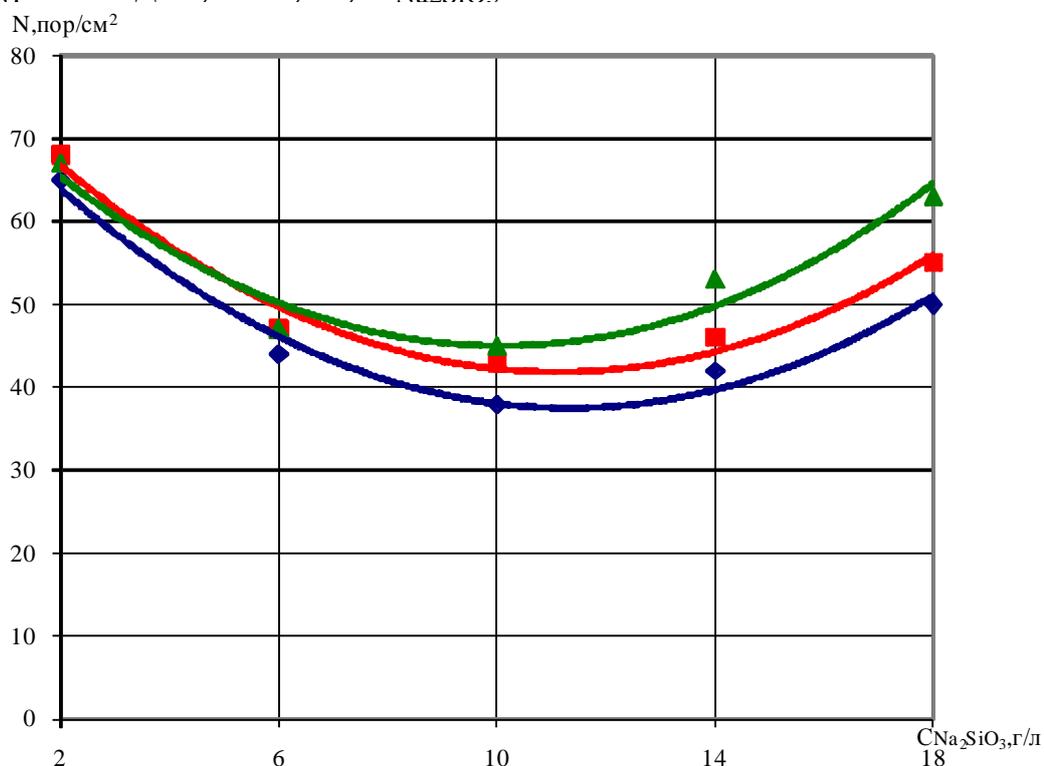
в)

Рисунок 4.30 Поверхность образцов после исследования сквозной пористости. Режимы формирования покрытия: $C_{\text{кон}}=3\text{г/л}$, $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=10\text{г/л}$, $D_{\text{T}}=20\text{А/дм}^2$, $T=1,5\text{ч}$. а) нанесенный сплав АМг6; б) нанесенный сплав АД1; в) нанесенный сплав АК9ч.



◆ Нанесенный сплав АМг6 ■ Нанесенный сплав АД1 ▲ Нанесенный сплав АК9ч

Рисунок 4.31 Влияние концентрации КОН на сквозную пористость покрытия сформированного на нанесенных ЭДМ сплавах. Режимы: $D_T=20 \text{ А/дм}^2$, $T=1,5 \text{ ч}$, $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=10 \text{ г/л}$.



◆ Нанесенный сплав АМг6 ■ Нанесенный сплав АД1 ▲ Нанесенный сплав АК9ч

Рисунок 4.32 Влияние концентрации Na_2SiO_3 на сквозную пористость покрытия сформированного на нанесенных ЭДМ сплавах. Режимы: $D_T=20 \text{ А/дм}^2$, $T=1,5 \text{ ч}$, $C_{\text{KOH}}=3 \text{ г/л}$.

Оценивая влияние плотности тока на пористость формируемых покрытий, при постоянных остальных параметрах МДО, необходимо отметить, что минимальная пористость наблюдается при плотности тока 25-30 А/дм² (рисунок 4.33). При низкой плотности тока энергии искрового разряда недостаточно для сплавления границ кристаллов, образующих покрытие. Поэтому увеличение плотности тока до 25 А/дм² приводит к снижению пористости. Очевидно с увеличением числа и мощности микродуговых разрядов оксиды кремния имея меньшую температуру плавления «залечивают» дефектные участки на поверхности детали, восстановленной ЭДМ и заполняют поры в покрытии. Увеличение плотности тока выше 30 А/дм² приводит к росту пористости МДО-покрытия. Это связано с тем, что дальнейшее повышение плотности тока приводит к росту кристаллов покрытия. При этом искровые разряды возникают на большем расстоянии друг от друга, не успевая сплавливать границы образующихся кристаллов. Кроме того, увеличение плотности тока более 30 А/дм² может привести к переходу МДО в дуговой режим.

Этс
[46

1Я

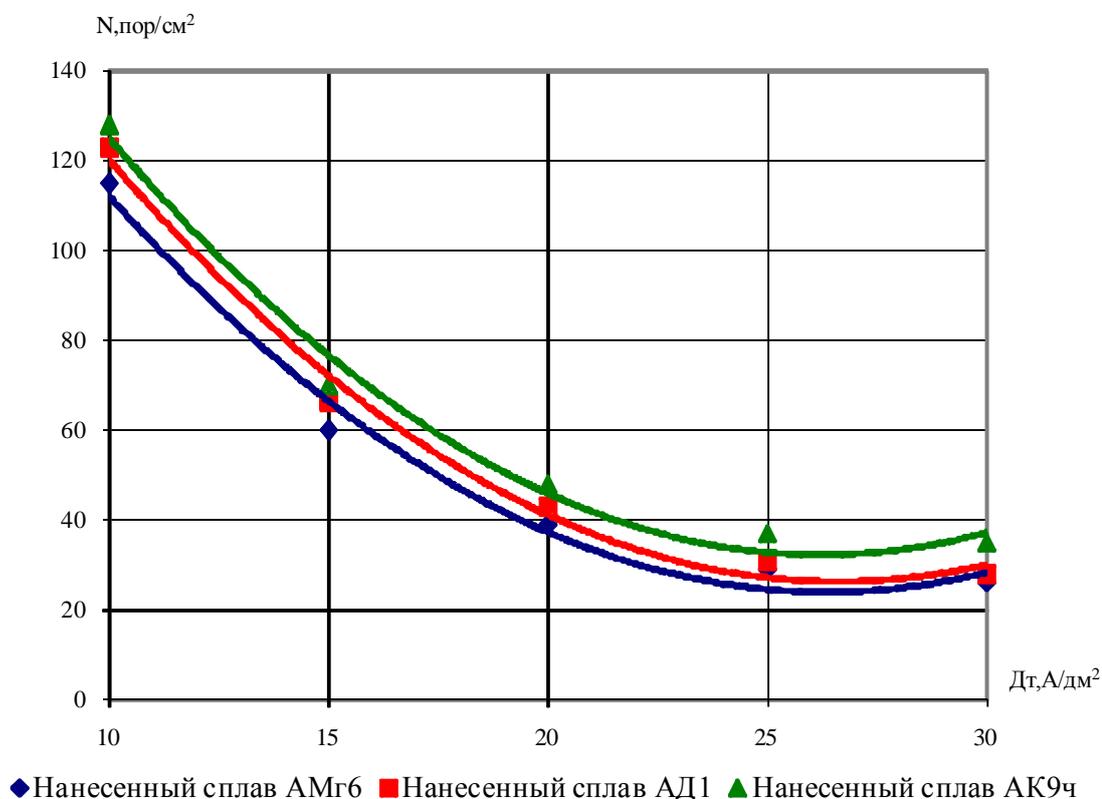


Рисунок 4.33 Влияние плотности тока D_t на сквозную пористость покрытия сформированного на нанесенных ЭДМ сплавах. Режимы: $T=1,5$ ч, $C_{KOH}=3$ г/л, $C_{Na_2SiO_3}=10$ г/л.

Результаты исследований (рисунки 4.31, 4.32, 4.33) свидетельствуют о том, что сквозная пористость МДО-покрытий зависит как от марки нанесенного ЭДМ сплава, так и от режимов формирования. Покрытия, сформированные на нанесенном сплаве АМгб, имеют наименьшую пористость, поскольку магний, являясь вентильным металлом, в сплаве с алюминием образует плотные оксидные соединения, поэтому его применение в качестве присадочного материала при ЭДМ наиболее целесообразно [75].

На основании вышесказанного можно заключить, что варьируя концентрацией компонентов электролита и плотностью тока, пористость покрытий, сформированных способом МДО, можно изменять в широких пределах. Это дает возможность применять их для упрочнения поверхностей деталей из алюминиевых сплавов, восстановленных электродуговой металлизацией, которые работают в различных условиях.

Для установления влияния основных факторов на изменение сквозной пористости покрытия, а также их взаимного влияния друг на друга проведены исследования с использованием многофакторного эксперимента.

В качестве математической модели, описывающей зависимость изменения сквозной пористости покрытия от влияющих факторов, выбрана статистическая регрессионная модель.

Для получения адекватной модели был поставлен и проведен полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа 2^3 , который ставился в локальной области времени [76]. На основании проведенных опытов и литературных данных [43,51,57,73,75] в качестве основных факторов, влияющих на сквозную пористость, были выбраны следующие:

- 1) x_1 – плотность тока, А/дм²;
- 2) x_2 – концентрация натриевого жидкого стекла (Na_2SiO_3), г/л;
- 3) x_3 – концентрация гидроксида калия (КОН), г/л.

Выбор уровней и интервалов варьирования факторов проводили на основании предварительных опытов (таблица 4.1).

Опыты, предусмотренные планом, реализовывались в случайной последовательности. Было проведено три параллельных серии опытов.

Таблица 4.1– Факторы ПФЭ

Наименование факторов	Обозначения	УРОВНИ ВАРЬИРОВАНИЯ			Интервал варьирования
		нижний	СРЕДНИЙ	верхний	
Плотность тока, А/дм ²	X ₁	10	20	30	10
Концентрация Na ₂ SiO ₃ , г/л	X ₂	2	10	18	8
Концентрация КОН, г/л	X ₃	1	4	7	3

Для данного эксперимента уравнение регрессии, характеризующее зависимость сквозной пористости покрытий (Y) от трех влияющих факторов (x₁, x₂, x₃), будет в виде полинома 2 степени [77]:

$$Y = b_1 + b_2x_1 + b_3x_2 + b_4x_3 + b_5x_1x_2 + b_6x_1x_3 + b_7x_2x_3 + b_8x_1^2 + b_9x_2^2 + b_{10}x_3^2 \quad (4.29)$$

Факторы процесса и выходные параметры Y приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Факторы процесса и средние действительные значения параметра оптимизации

N	Д _T , А/дм ²	C _{Na2SiO3} , г/л	C _{КОН} , г/л	Сквозная пористость Y, пор/см ²		
				АМг6	АД1	АК9ч
1	30	18	7	62	67	70
2	30	18	1	37	40	46
3	30	2	4	55	59	63
4	30	2	7	67	73	70
5	10	9	1	110	114	119
6	10	9	4	115	123	128
7	10	18	7	144	150	145
8	10	18	1	125	132	136
9	20	2	4	65	69	73
10	20	2	7	80	87	85
11	20	9	1	36	39	45
12	20	9	4	39	42	48

Вычисление коэффициентов уравнения регрессии, а также других статистических показателей проводили с использованием вычислительных средств прикладной программы Microsoft Excel.

Уравнение регрессии имеет следующий вид:

Напыленный сплав АМГ6

$$Y=289,75-16,92X_1-7,39X_2-4,45X_3-0,006X_1X_2-0,014X_1X_3+0,03X_2X_3+0,32X_1^2+0,33X_2^2+1,27X_3^2 \quad (4.30)$$

Напыленный сплав АД1

$$Y=303,63-17,82X_1-7,87X_2-2,52X_3+0,01X_1X_2+0,07X_1X_3+0,01X_2X_3+0,33X_1^2+0,35X_2^2+1,09X_3^2 \quad (4.31)$$

Напыленный сплав АК9ч

$$Y=306,18-17,78X_1-7,86X_2+0,25X_3-0,03X_1X_2-0,14X_1X_3+0,02X_2X_3+0,32X_1^2+0,34X_2^2+0,13X_3^2 \quad (4.32)$$

После окончательной обработки результатов эксперимента были получены математические модели процесса:

$$\text{АМГ6: } Y=289,75-16,92D_T-7,39C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}-4,45C_{\text{KOH}}+1,27C_{\text{KOH}}^2 \quad (4.33)$$

$$\text{АД1: } Y=303,63-17,82D_T-7,87C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}-2,52C_{\text{KOH}}+1,09C_{\text{KOH}}^2 \quad (4.34)$$

$$\text{АМГ6: } Y=306,18-17,78D_T-7,86C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} \quad (4.35)$$

Анализируя влияние факторов ПФЭ на сквозную пористость покрытий можно отметить, что для всех нанесенных ЭДМ сплавов наибольшее влияние оказывает плотность тока, значительное – концентрация жидкого стекла и незначительное (для АМГ6 и АД1) – концентрация щелочи.

4.6 Коррозионная стойкость МДО-покрытий

Условия эксплуатации и агрессивные жидкости (тосол, антифриз, ионизированная вода), применяющиеся в системе охлаждения, приводят к значительным коррозионным разрушениям корпусных деталей двигателей внутреннего сгорания. Поэтому представляются необходимыми исследования, связанные с коррозионной стойкостью покрытий.

Проведенные коррозионные испытания показали высокую защитную способность МДО-покрытий. Наиболее показательны сравнительные испытания, которые показали, что вся поверхность образца без покрытия была разрушена, в то время как на поверхности образцов с МДО-покрытием наблюдались незначительные очаги точечной коррозии (рисунок 4.34).



а)

б)

Рисунок 4.34 Поверхность образцов после коррозионных испытаний: а) образец с нанесенным ЭДМ сплавом АМг6 без покрытия; б) образец с нанесенным сплавом АМг6 с МДО-покрытием.

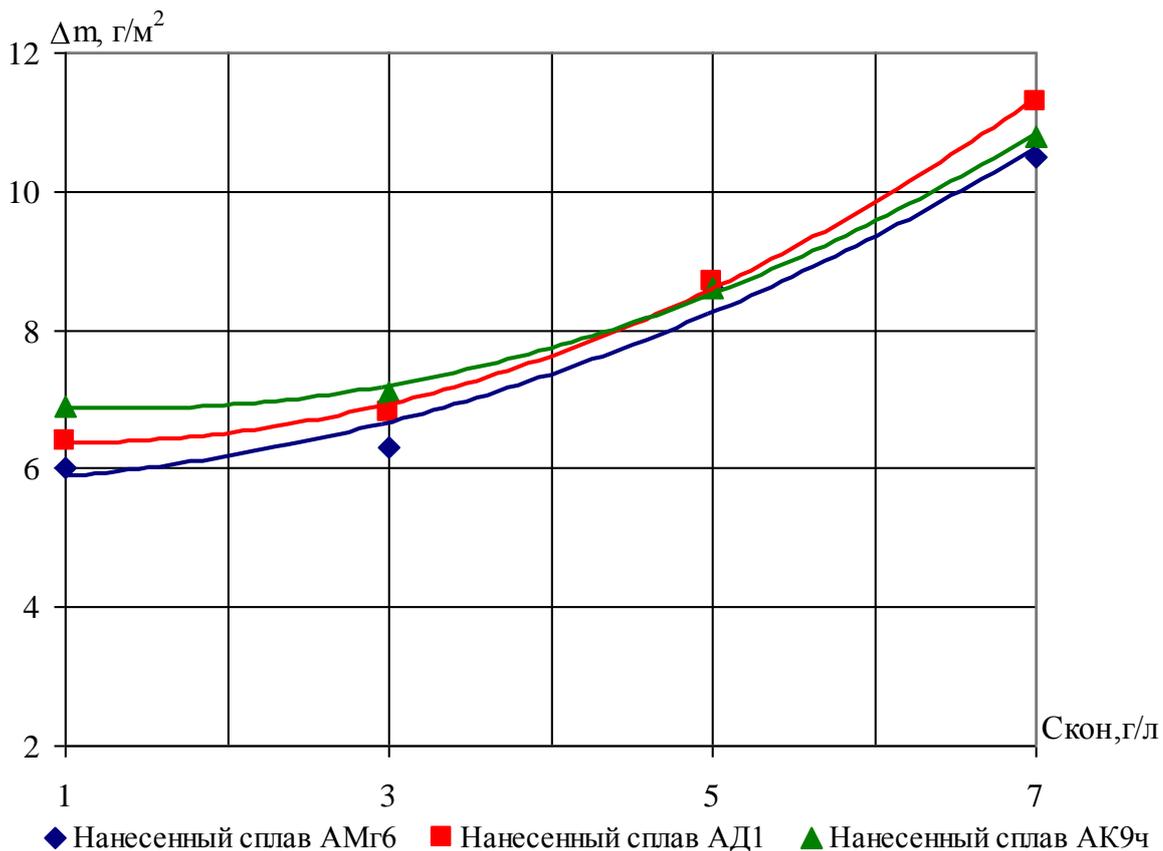
Результаты коррозионных испытаний образцов с покрытием (рисунки 4.35, 4.36, 4.37) свидетельствуют о том, что коррозионные показатели напрямую зависят от режимов МДО и марки нанесенных ЭДМ сплавов.

Анализируя влияние состава электролита на коррозионную стойкость МДО-покрытия, при неизменных остальных параметрах, можно отметить, что при увеличении концентрации КОН с 1 до 3 г/л потеря массы и скорость коррозии возрастает незначительно, однако дальнейшее повышение концентрации приводит к резкому ее росту.

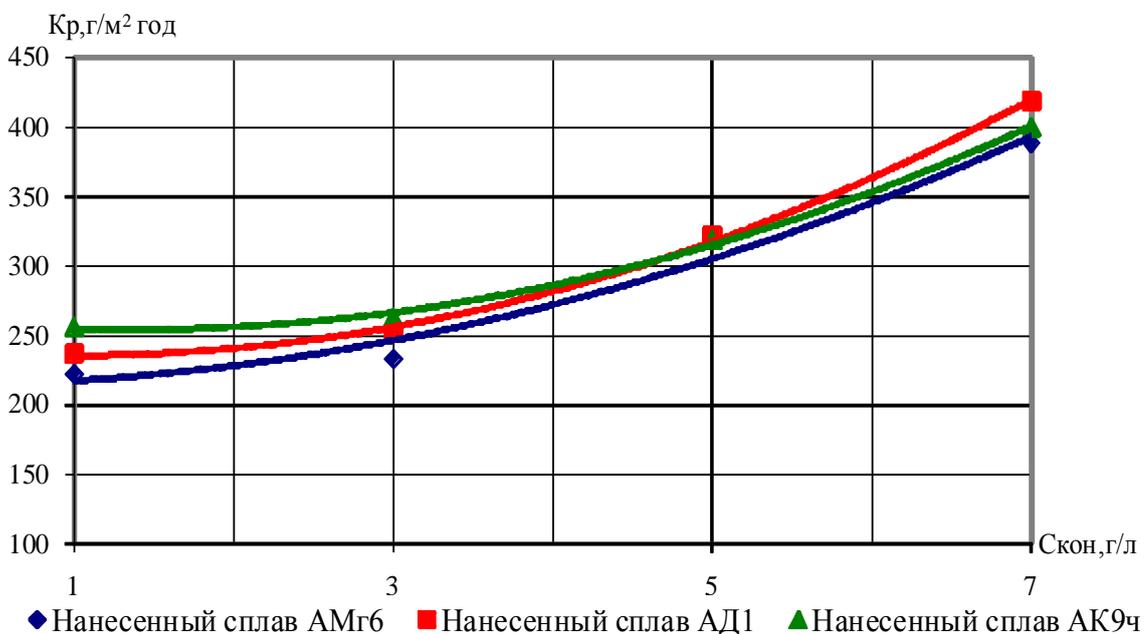
Увеличение концентрации Na_2SiO_3 в электролите до 10 г/л приводит к снижению потери массы и скорости коррозии на всех напыленных сплавах. Дальнейшее повышение концентрации Na_2SiO_3 приводит к ее повышению.

Оценивая влияние плотности тока на потерю массы и скорость коррозии формируемых покрытий, при постоянных остальных параметрах МДО, необходимо отметить, что ее минимальное значение наблюдается при плотности тока 18-23 $\text{A}/\text{дм}^2$. Увеличение плотности тока выше 23 $\text{A}/\text{дм}^2$ приводит к росту потери массы и скорости коррозии МДО-покрытия.

Наивысшей коррозионной стойкостью обладают покрытия, сформированные на нанесенном ЭДМ сплаве АМг6, поскольку магний, являясь вентильным металлом, в сплаве с алюминием образует плотные оксидные соединения с минимальной пористостью.

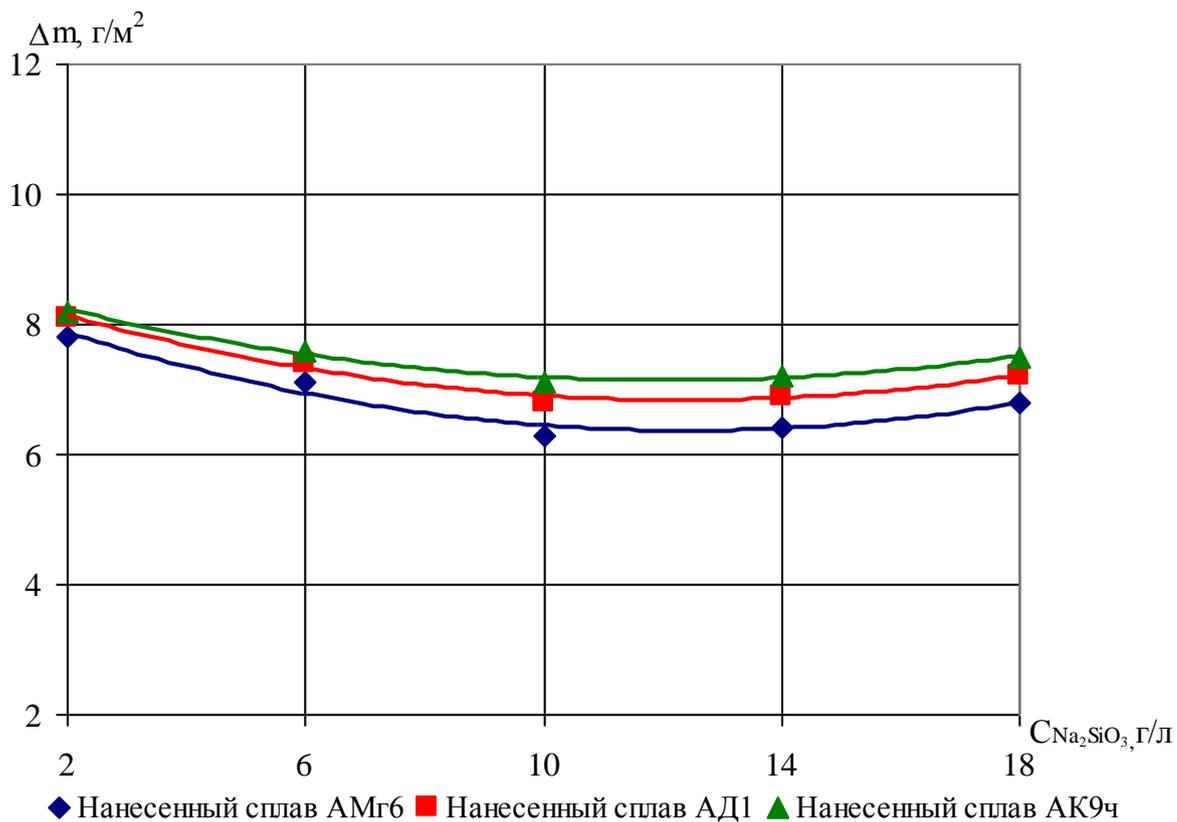


а)

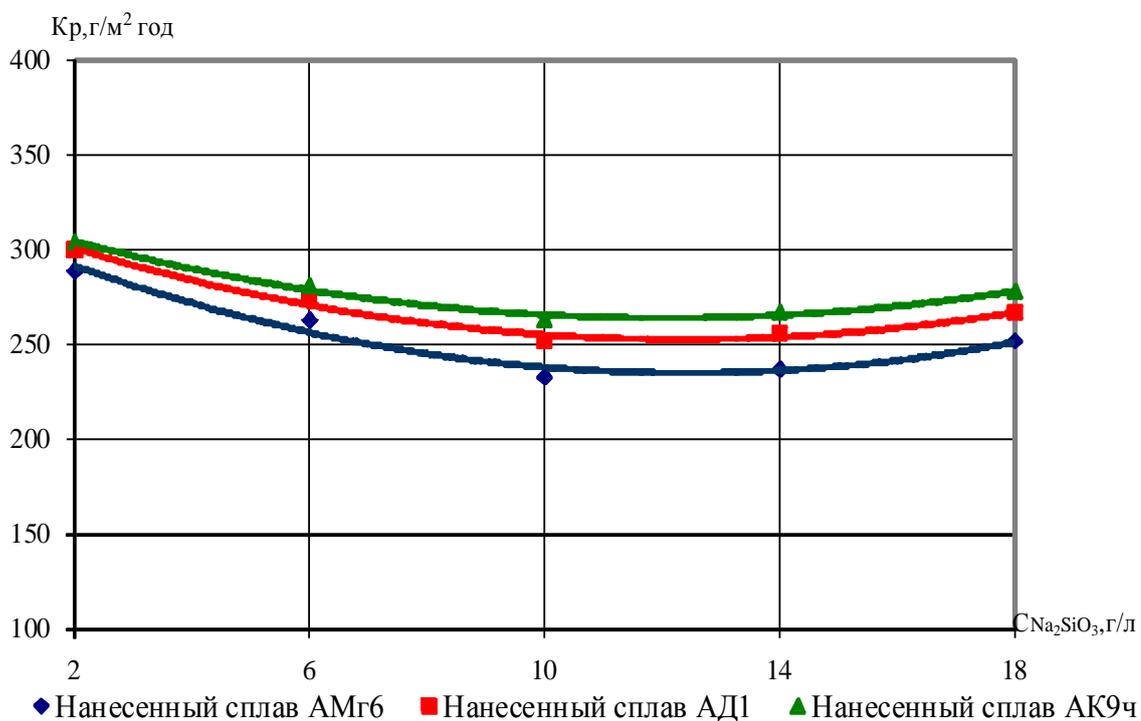


б)

Рисунок 4.35 Влияние концентрации KOH а) на потерю массы Δm , б) на скорость коррозии K_p в коррозионной среде 5% NaCl. Режимы формирования покрытия: $D_T=20A/dm^2$, $T=1,5ч$, $C_{Na_2SiO_3}=10г/л$.

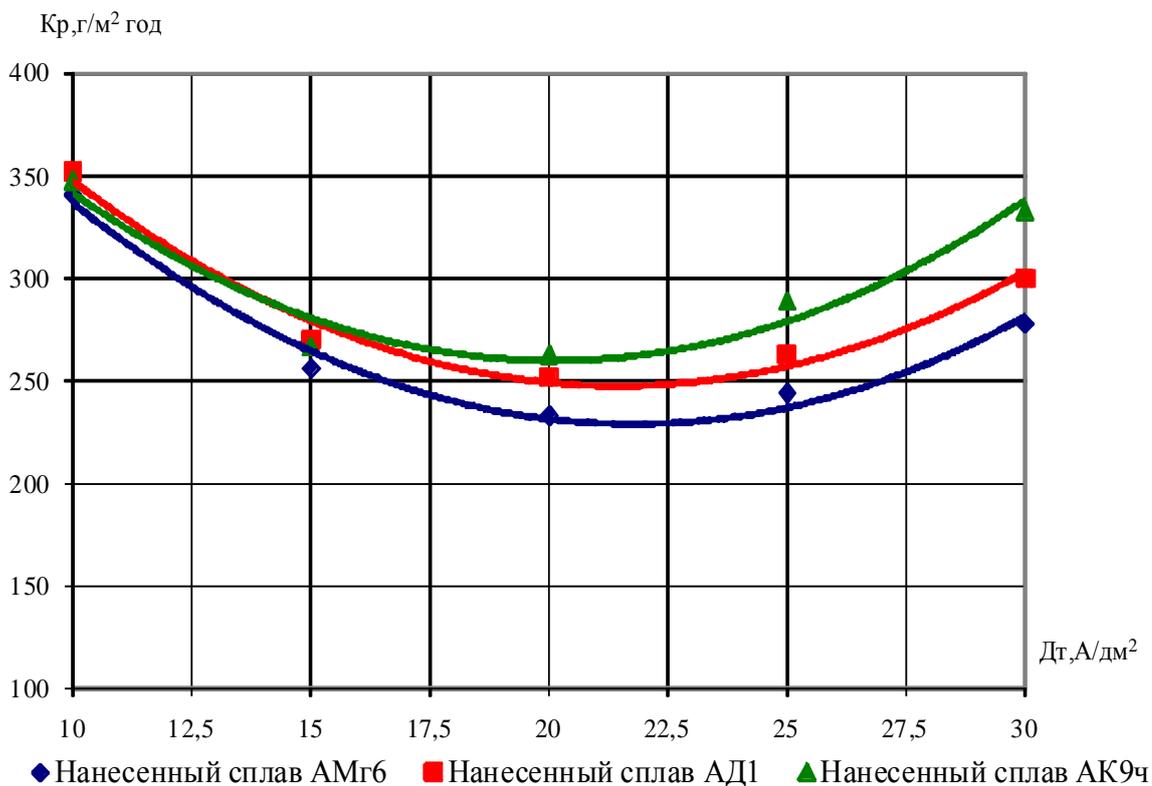
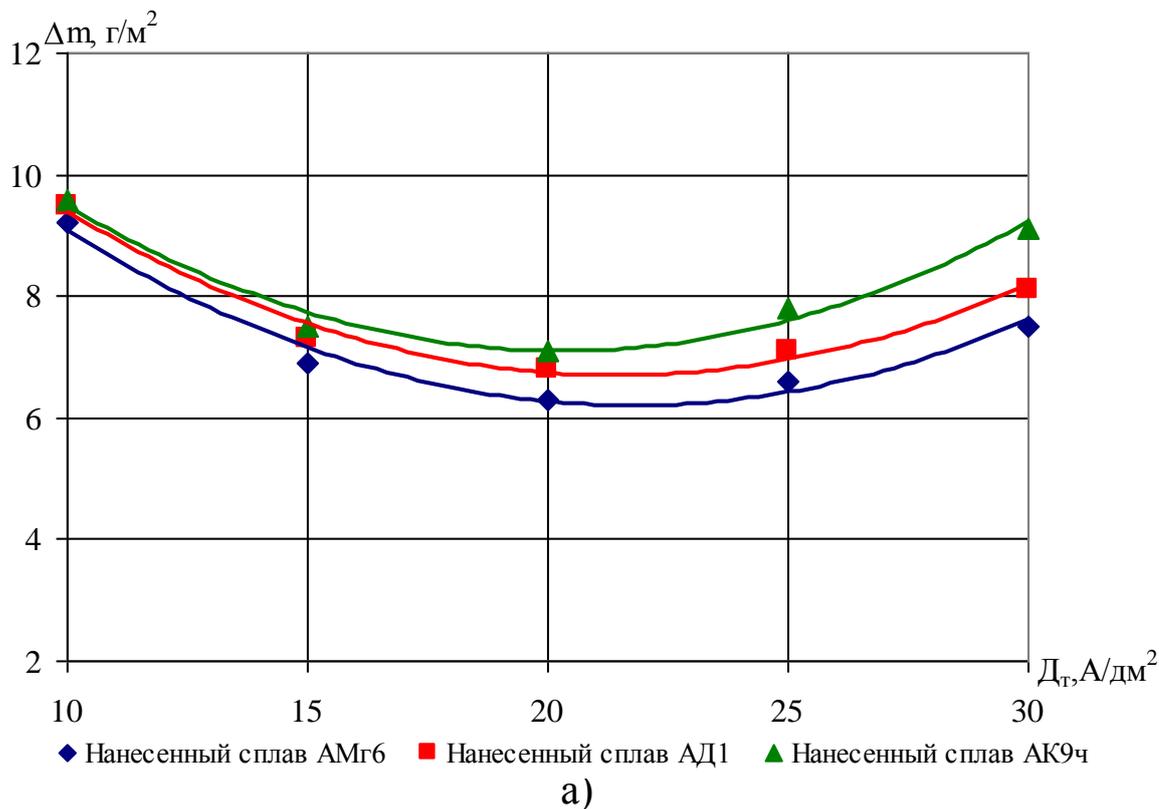


а)



б)

Рисунок 4.36 Влияние концентрации Na₂SiO₃ а) на потерю массы Δm , б) на скорость коррозии K_p в коррозионной среде 5% NaCl. Режимы формирования покрытия: $D_T=20A/dm^2$, $T=1,5ч$, $C_{кон}=3г/л$.



б)

Рисунок 4.37 Влияние плотности тока D_T а) на потерю массы Δm , б) на скорость коррозии K_p в коррозионной среде 5% NaCl. Режимы формирования покрытия: $T=1,5$ ч, $C_{\text{KOH}}=3$ г/л, $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=10$ г/л. Проанализировав в совокупности влияния режимов МДО на

коррозионную стойкость покрытий можно сделать вывод, что она практически прямо пропорционально зависит от сквозной пористости покрытий. Изначально под воздействием коррозионной среды происходит частичное выщелачивание силикатного осадка, на поверхности образуется защитная пленка кремнезема [46,57,78], препятствующая проникновению ионов хлора вглубь покрытия. Сквозные поры покрытия, являясь транспортными каналами, способствуют проникновению ионов хлора к алюминиевой подложке, в результате чего происходит ее растворение с последующим образованием гидроксида [46,47], под покрытием протекает коррозия. Поэтому, с целью дальнейшего повышения коррозионной стойкости можно предложить заполнение пор покрытия полимерными материалами (например фторопластом) [79].

4.7 Долговечность электролита

Качество покрытий, сформированных МДО, зависит от многих факторов процесса, одним из которых является электролит. Состав и концентрация компонентов вносит большой вклад в качество МДО-покрытий. Долговечность – это способность электролита сохранять свои свойства при формировании МДО-покрытий требуемого качества.

Долговечность электролита оценивали по изменению водородного показателя рН и содержанию растворенного алюминия в электролите.

После приготовления электролита и в процессе его работы контролировали величину рН с помощью прибора «Checker В» фирмы «HANNA».

Перед измерением стеклянный электрод вымачивали в растворе НИ 70300 в течении 4 часов. Настройку осуществляли по буферным растворам НИ 7007 со значением рН 7,01 и НИ со значением рН 10,01 при температуре 25°C.

В процессе работы электролита контролировали концентрацию растворенного алюминия с помощью спектрофотометра «UNICO 1200». Сравнение проводили с дистиллированной водой. По полученным данным строили кривую зависимости концентрации от длин волн.

Результаты исследования показали, что изменение рН электролита не зависит от марки напыленного сплава.

По мере работы ванны МДО происходит снижение рН раствора (рисунок 4.38).

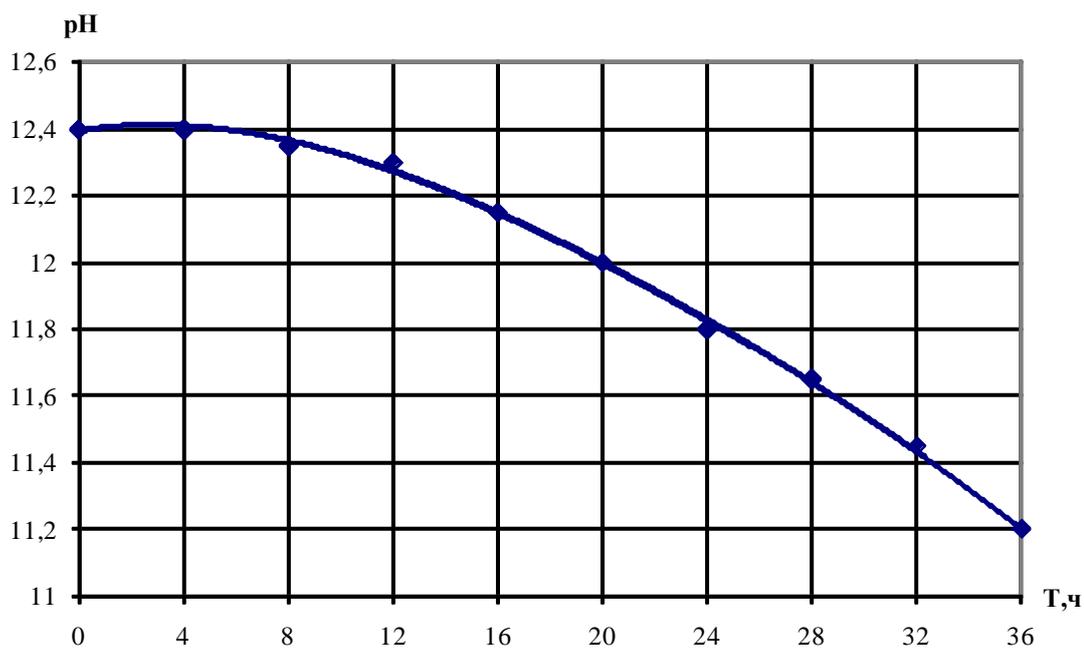


Рисунок 4.38 Влияние продолжительности работы ванны МДО на pH электролита. Режимы формирования покрытия: $C_{\text{KOH}}=3\text{г/л}$, $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=10\text{г/л}$, $D_T=20\text{А/дм}^2$.

При работе ванны в течении первых 4 часов pH электролита остается неизменным. Покрытия высокого качества из-за незначительного изменения состава электролита. В интервале 4...12 часов pH раствора снижается незначительно. Покрытия серого цвета с минимальной шероховатостью. После 20 часов работы наблюдается интенсивное снижение pH раствора, наблюдается повышенная шероховатость, образование наростов, цвет покрытия изменяется до темно-серого.

Полученные результаты показывают, что снижение качества сформированных покрытий связано с изменением состава раствора и его pH. При оксидировании щелочной электролит со временем переходит в алюминатный, так как в процессе МДО происходит растворение алюминиевого сплава (рис. 4.39). Электролит, постепенно обедняясь ионами Na^+ , SiO_3^- , обогащается алюминат ионами AlO_2^- , которые, как ионы слабой кислоты, подвергаются гидролизу с образованием гидроксида алюминия. Раствор мутнеет насыщаясь гидроксидом алюминия, в результате чего нормальный процесс МДО прекращается.

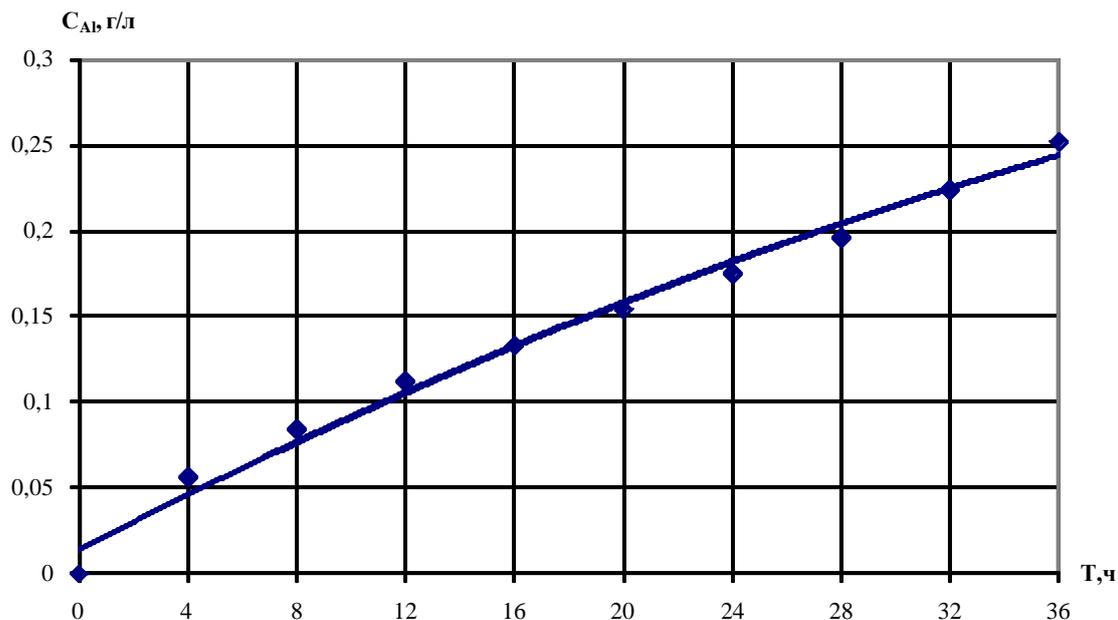


Рисунок 4.39 Влияние продолжительности работы ванны МДО на концентрацию растворенного алюминия в электролите. Режимы формирования покрытия: $C_{\text{KOH}}=3\text{г/л}$, $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=10\text{г/л}$, $D_T=20\text{А/дм}^2$.

Для повышения долговечности электролита возможно использование дополнительных компонентов, таких как крахмал или ржаная мука.

Глава 5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

5.1 Технологический процесс упрочнения привалочной плоскости головки блока цилиндров двигателя ЗМЗ-513 при восстановлении

Применяемые в современных транспортных и сельскохозяйственных машинах детали из алюминиевых сплавов обладая высокими физико-механическими и химическими свойствами, однако, имеют невысокую износостойкость [1,2,3]. Так, например, в головке блока цилиндров в результате эксплуатации имеют место следующие характерные износы и дефекты: износ фасок клапанных седел, износ внутренних поверхностей направляющих втулок, коробление и коррозия (рисунок 5.1) поверхности прилегания головки к блоку цилиндров, трещины, повреждение резьбы в резьбовых отверстиях, нагар и смолистые отложения на поверхности камеры сгорания.

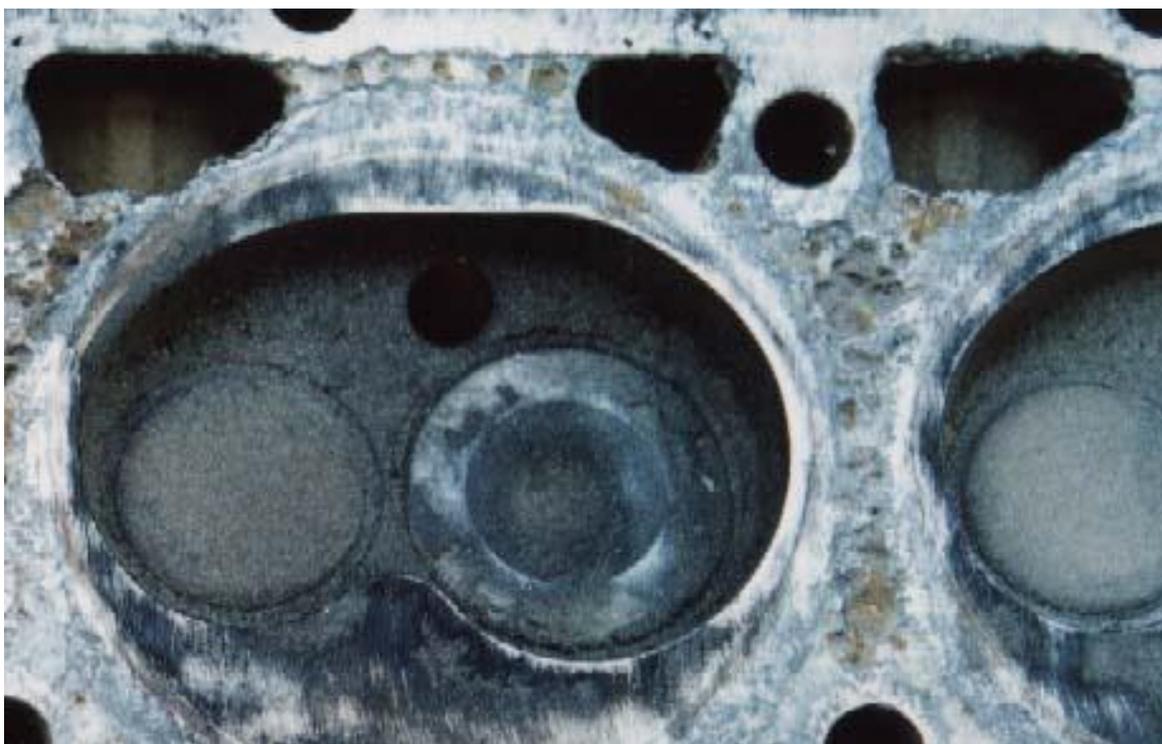


Рисунок 5.1 Изношенная привалочная плоскость ГБЦ двигателя ЗМЗ-513.

Для ремонта деталей транспортных и сельскохозяйственных машин, в частности головок блока ДВС, необходимо знать их техническое состояние, характер дефектов, а так же величину их износа. Эти критерии являются основными исходными показателями при назначении технологии восстановления изношенных поверхностей.

Анализ литературных данных показал противоречивые сведения по износу привалочной плоскости головок блока двигателя ЗМЗ-513. Поэтому для получения более точных сведений в моторемонтном цеху ОАО «Ресурс плюс», занимающемся капитальным ремонтом ДВС в Орловской области, в течении двух лет проводился сбор данных по износу привалочных плоскостей головок. Измерению подвергали выборку деталей в количестве 100 штук. Выбор плоскостей измерений проведен согласно ГОСТ 18509-80.

На изношенных плоскостях, вследствие использования агрессивных жидкостей (тосол, антифриз, ионизированная вода), наблюдается коррозия металла (рисунок 5.1). Действительные размеры износа привалочных плоскостей определяли на специальном приспособлении используя глубиномер микрометрический ГМ – 25 кл.1 ГОСТ868-82.

Математическая обработка полученных статистических данных проводилась с использованием компьютерной программы NADREM.

По результатам математической обработки были построены гистограмма, полигон, а также дифференциальные и интегральные кривые вероятностей распределения износа привалочной плоскости головки блока, которые представлены на рисунках 5.2 и 5.3

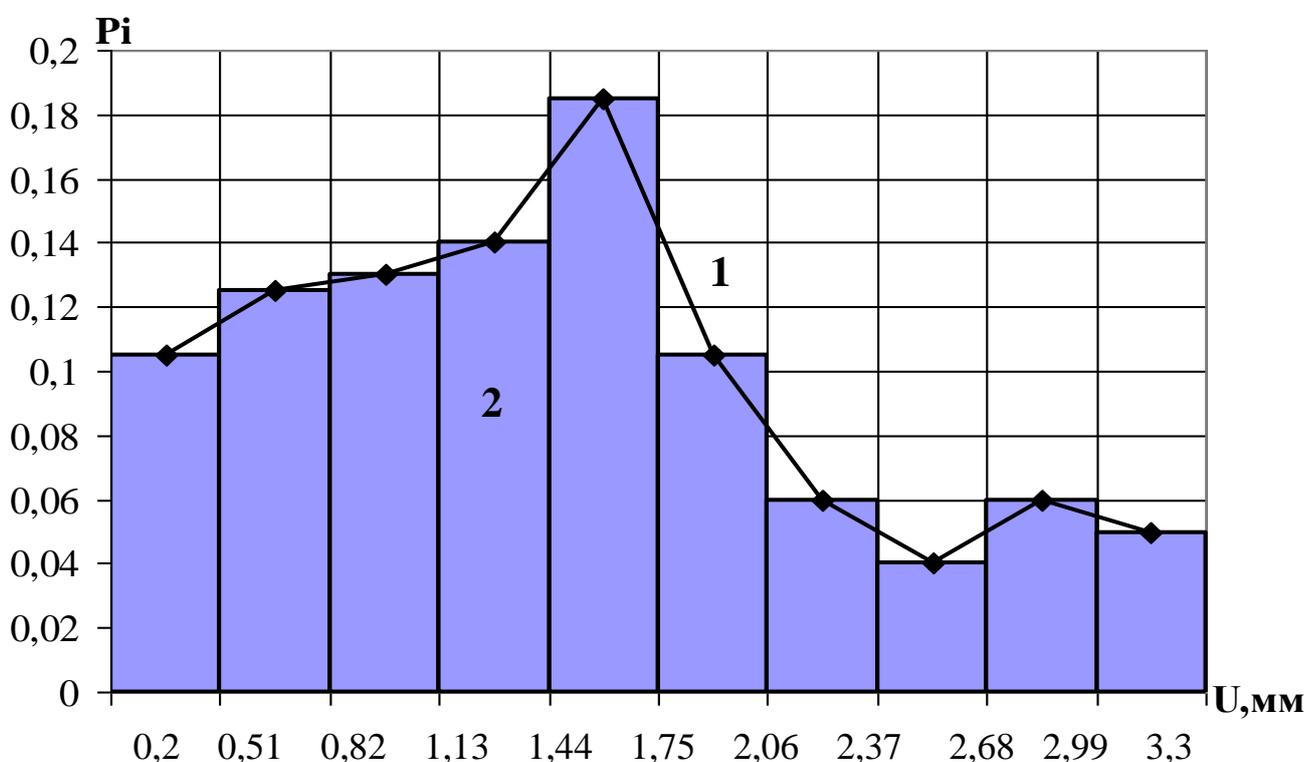


Рисунок 5.2 Гистограмма (1) и полигон (2) распределения износов привалочной плоскости ГБЦ двигателя ЗМЗ-513.

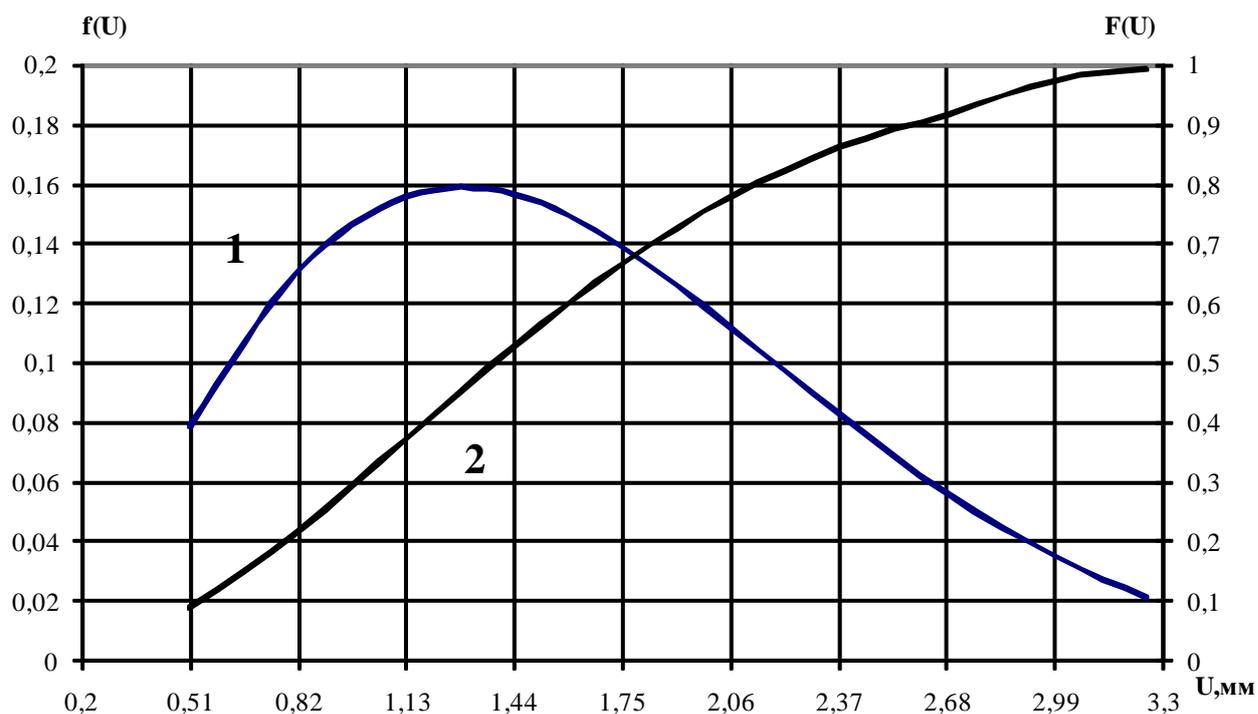


Рисунок 5.3 Распределение износов привалочной плоскости головки цилиндров двигателя ЗМЗ-513:

- 1 – теоретическая дифференциальная кривая распределения износов;
 2 – теоретическая интегральная кривая распределения износов.

Было установлено, что распределение износа привалочных плоскостей подчиняется теоретическому закону распределения Вейбулла. Анализ результатов показал, что количество деталей, у которых износ превышает допустимый, составляет около 75%. Величина среднего износа составляет 1,483 мм, среднего квадратичного отклонения – 0,775мм, коэффициент вариации – 0,539. Максимальный износ привалочных плоскостей достигает 3,3 мм.

Одним из самых распространенных способов восстановления этих деталей является наплавка, которая имеет ряд недостатков, таких как большие термические воздействия, деформирующие головку, большой расход присадочного материала.

Проведенные нами исследования позволили разработать и предложить ремонтному производству технологический процесс восстановления деталей электродуговой металлизацией с последующими упрочнением МДО на примере привалочной плоскости головки блока двигателя ЗМЗ-513 [79,80,81], схема которого представлена на рисунке 5.4.

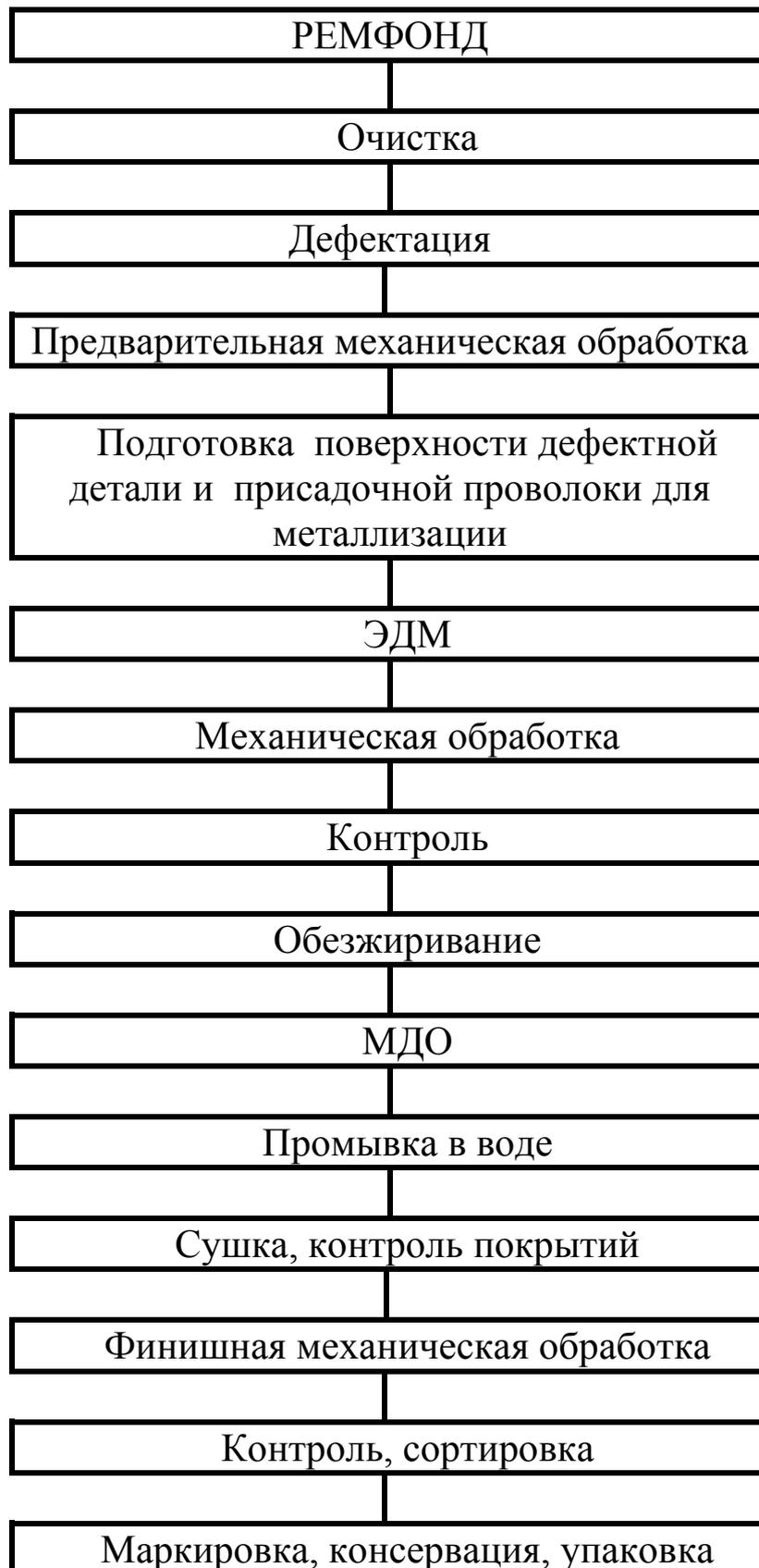


Рисунок 5.4 - Структурная схема технологического процесса восстановления металлизацией с последующим упрочнением МДО привалочной плоскости головки блока двигателя ЗМЗ-513.

Головки, поступающие в ремонт, тщательно очищают от грязи, нагара и накипи с помощью шаберов и щеток, изготовленных из стальной проволоки диаметром не более 0,15 мм, так чтобы не получить грубых рисок на поверхностях. Можно применять ручные щетки насаженные на электрическую или пневматическую дрель. Использование для очистки абразивных инструментов (шлифовальные круги и шкурки) не допускается. Твердость алюминиевых сплавов невелика и внедрившиеся в них, выкрошившиеся абразивные частицы могут образовать включения в напыляемом металле.

После механической очистки остатки масел и загрязнений с деталей и присадочной проволоки удаляют обезжириванием. Его проводят органическими растворителями (бензин, уайт-спирт, ацетоновая смывка и др.). Для этих целей применяют также водные растворы синтетических моющих средств «Лабомид-101», «Лабомид-203» и МС-18. При температуре раствора 60...70⁰С продолжительность обезжиривания обычно не превышает 3...5 минут. Готовые детали и проволоку промывают в теплой воде (температура не ниже 25⁰С) и протирают жесткими волосяными щетками.

Очищенные детали подвергают дефектации, определяя износ привалочной плоскости головки ДВС. После дефектации изношенную деталь и присадочную проволоку готовят для металлизации. Подготовку проволоки проводят погружением в 5%-ный водный раствор щелочи NaOH или KOH, нагретый до температуры 60...70⁰С. Выдержка в этом растворе должна быть непродолжительной (1...2 мин), так как после стравливания оксидной пленки с поверхности металла, едкий натр взаимодействует с алюминием. Затем остатки щелочи смывают сначала горячей (температура не ниже 40...50⁰С), а после холодной водой, одновременно протирая проволоку волосяными щетками. Остатки щелочи с проволоки удаляют в 15%-ном водном растворе азотной кислоты (HNO₃) при температуре 60...70⁰С в течение 2...5 минут, или в 30%-ном водном растворе HNO₃ при комнатной температуре в течение 1...2 минут. После чего проволоку промывают в теплой воде, протирают жесткими волосяными щетками или тряпками и сушат при температуре 60⁰С до окончательного удаления влаги.

Предварительная подготовка детали к металлизации включает механическую обработку привалочных плоскости головки цилиндров на вертикально-фрезерном станке 6М12П до выведения следов изнашивания, получения насечек на внешних краях плоскости разъема, камеры сгорания и всех углублений (кроме сквозных отверстий под шпильки) с помощью специального ударного

приспособления или гидравлического пресса и обработку в закрытой камере струей воздуха, содержащей корунд, стальную колотую дробь или чугунную крошку. Давление воздуха при обработке в закрытой камере – 0,6...0,9 МПа, расход материала – в среднем 1,7 м³/мин, дистанция обработки – 140...160 мм, угол наклона струи воздуха с материалом к обрабатываемой привалочной плоскости головки цилиндров – 80°, скорость перемещения головки цилиндров относительно распыляющего пистолета – 0,6 м/мин. Предварительная подготовка необходима для создания на привалочной плоскости определенной шероховатости с целью улучшения адгезии слоя, наносимого электродуговой металлизацией.

Перед электродуговой металлизацией отверстия камер сгорания и водяной рубашки охлаждения головки цилиндров закрывают асботекстолитовыми пробками. Электродуговую металлизацию осуществляют на механизированной установке, которая содержит модернизированный электрометаллизатор ЭМ-14М, блок управления, кассеты для присадочной проволоки, металлизационную камеру и источник питания ВДУ-504. Допускается использование других источников питания с жесткой характеристикой, которые обеспечивают ток дуги не меньше 310 А. Процесс осуществляют в металлизационной камере. Ее конструкция позволяет устанавливать и перемещать в разных плоскостях головку цилиндров и электрометаллизатор. Режимы ЭДМ: ток дуги – 310 А, напряжение – 30...35 В, подача присадочной проволоки марок АМг6 или АД1 диаметром 2 мм – 8,5 м/мин, расход сжатого воздуха – 2,8 м³/мин, давление сжатого воздуха – 0,5...0,7 МПа, расстояние от сопла металлизатора до привалочной плоскости головки цилиндров – 100...120 мм, продолжительность металлизации – 9...10 мин, толщина нанесенного слоя металла – до 3,5 мм.

После нанесения слоя металла плоскость прилегания головки подвергают механической обработке – фрезерованию на вертикально-фрезерном станке модели 6М12П с припуском под МДО-покрытие. Фрезерование выполняют при частоте вращения фрезы 2000 мин⁻¹, глубине резания 0,5...0,8 мм и скорости подачи стола 200 м/мин. Затем выполняют необходимые сверлильные работы: зенкуют фаски установочных отверстий на глубину 2...3 мм и фаски под шпильки. Для этого используют вертикально-сверлильный станок 2Н135 и зенковку. Напльвы нанесенного покрытия зачищают напильником или шабером.

После механической обработки металлизированных поверхностей детали готовят для нанесения упрочняющего покрытия. Головки обезжиривают в водном растворе, содержащем 5...10 г/л

NaOH, 40...50 г/л Na_3PO_4 и 3...5 г/л Na_2SiO_3 . Температура раствора 60...70⁰С. Время обезжиривания 1...1,5 минуты. Затем детали промывают в воде, нагретой до температуры 40...50⁰С в течение 3...5 минут, после чего поверхности, не подлежащие упрочнению, изолируют. Изоляцию токопроводящих поверхностей деталей целесообразно изготавливать в виде специальных втулок и съемных футляров, повторяющих форму защищаемой поверхности. Материалом для их изготовления служит капролон или фторопласт. В случае невозможности применения футляров и втулок для изоляции поверхностей деталей целесообразно применять щелочестойкий силиконовый герметик.

Подготовленные головки ДВС монтируют на подвеску, устанавливают электроды, вывешивают над электрохимической ванной, подсоединяют трубопровод, подающий электролит, и осуществляют оксидирование. Схема расположения головки в электрохимической ванне при МДО представлена на рисунке 5.5. Для подачи электролита к оксидируемым деталям используют щелочестойкий насос с электродвигателем.

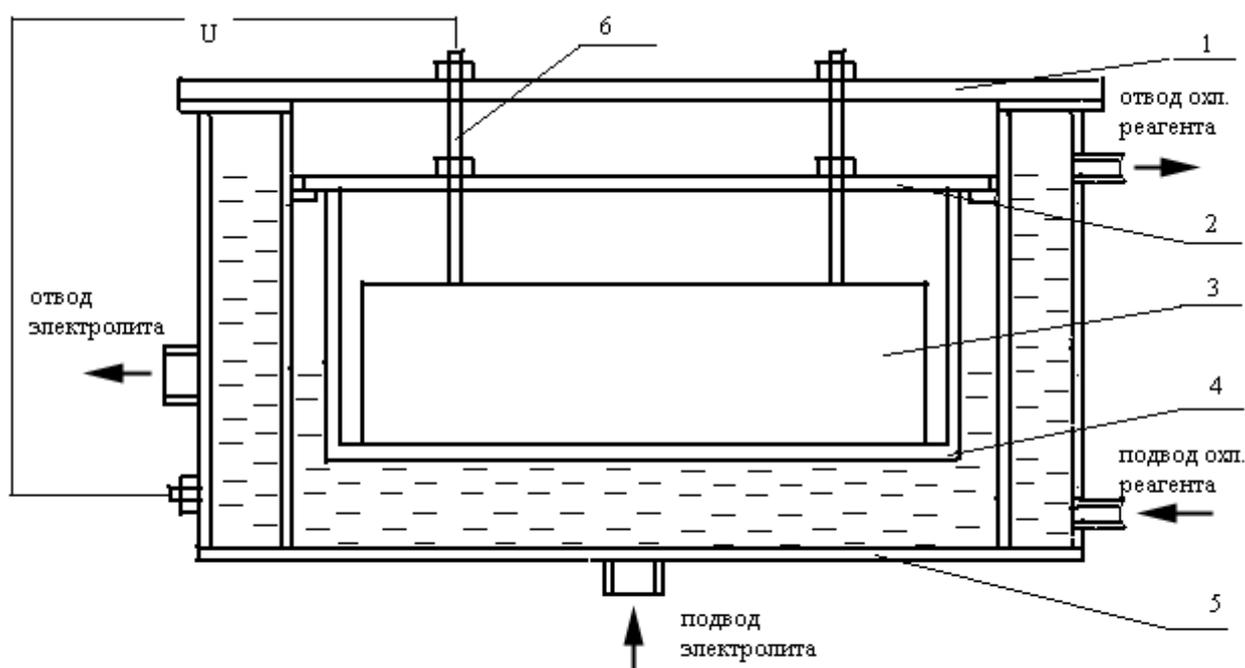


Рисунок 5.5 - Схема расположения головки блока цилиндров в электрохимической ванне при микродуговом оксидировании: 1 – крышка ванны; 2 – крышка корпуса; 3 – головка блока; 4 – корпус; 5 – ванна; 6 – электроды.

Микродуговую обработку рекомендуется начинать при плотности тока 30...35 А/дм². После выхода процесса на режим плотность тока необходимо довести до 20...25 А/дм². Это обусловлено тем, что при увеличении плотности тока свыше 25...30 А/дм² возможен переход микродуговых разрядов в дуговые, которые приводят к порче и разрушению покрытия, а уменьшение плотности тока ниже 20 А/дм² приводит к медленному росту оксидного покрытия.

Из-за значительного тепловыделения при МДО электролит может нагреваться до температуры 100⁰С. Это увеличивает скорость образования оксидных слоев, одновременно существенно повышается и скорость их растворения электролитом, в результате чего суммарная скорость роста оксидной пленки уменьшается и увеличивается пористость покрытий. Если температура электролита превышает 50...60⁰С, то получаются высокопористые (свыше 25%) покрытия. Это приводит к более интенсивному изнашиванию покрытия, так как поры уменьшают площадь поперечного сечения и действуют как концентраторы напряжений [41,56]. Поэтому для охлаждения электролита необходимо электрохимическую ванну снабжать рубашкой водяного охлаждения. Использование такой схемы позволит предотвратить перегрев электролита.

После МДО детали снимают с подвески, промывают в проточной воде комнатной температуры, сушат и осуществляют контроль полученных покрытий.

Нами установлено, что свойства покрытий различны по толщине упрочненного слоя. Адгезия и микротвердость поверхностного слоя покрытия невелики, а пористость высока и при работе он будет осыпаться. Для удаления рыхлого слоя покрытия, упрочненные МДО, поверхности деталей подвергают финишной механической обработке на плоскошлифовальном станке 3Б722 при помощи алмазного абразивного круга типа АСН [82].

На рисунке 5.6 представлена головка блока ДВС, прошедшая все этапы технологического процесса восстановления электродуговой металлизацией и упрочнения МДО изношенных поверхностей.

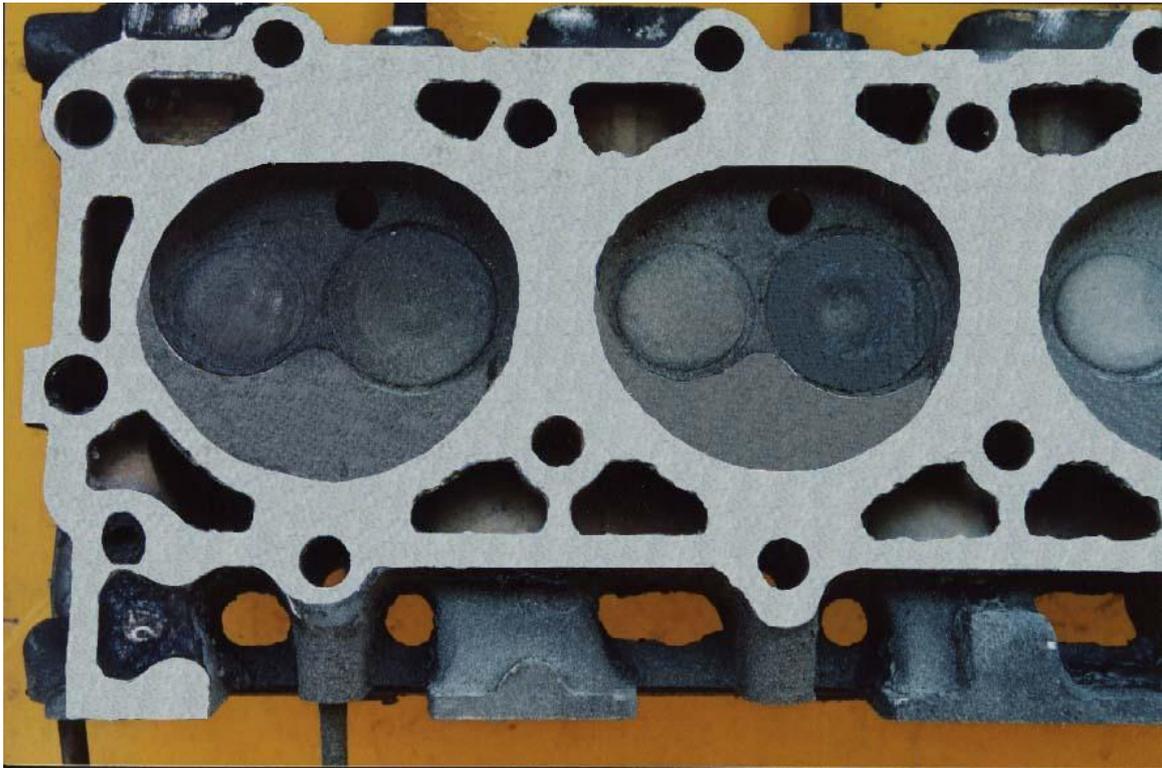


Рисунок 5.6 – Привалочная плоскость ГБЦ двигателя 3МЗ-513, восстановленная электродуговой металлизацией и упрочненная МДО.

5.2 Вопросы экологии технологии микродугового оксидирования

В связи с тем, что при микродуговом оксидировании в электролите содержатся специфические загрязнения и компоненты их сброс регламентирован «Правилами приема производственных сточных вод в системы канализации населенных пунктов» [83]. Основными факторами ограничивающими сброс промышленных стоков в водоотводящую сеть являются:

- превышение расходов и концентраций загрязнений, установленных для данного предприятия;
- присутствие веществ отлагающихся на стенках трубопроводов и засоряющих или разрушающих их;
- нарушение работы сетей, насосных станций, сооружений;
- содержание токсичных для микрофлоры очистных сооружений веществ;
- наличие горючих и растворенных газообразных веществ, которые могут вызвать взрыв;
- температура более 40°C;

- рН вне пределов 6,5...8,5;
- содержание органических веществ по химическому потреблению кислорода превышающее биохимическое потребление кислорода более чем в 1,5 раза.

В технологии МДО отработанный электролит необходимо подвергать обработке, так как значение рН находится в пределах 10,3...10,7, а также содержит анионы кремнезема SiO_2^- , катионы калия K^+ [83].

Мероприятия по утилизации и дальнейшему использованию отходов МДО.

1. Отработанный электролит можно использовать при утилизации отходов гальванических производств, имеющих значения рН 3 и ниже, путем смешивания и доводить до нормативных значений по показателю рН.
2. При сбросе в канализацию отработанный электролит необходимо разбавить в 10...15 раз водой для достижения необходимого уровня рН.
3. В силикатно-щелочном электролите в процессе МДО образуются анионы кремнезема, которые необходимо удалять. Удаление производить путем химического осаждения, ионного обмена или мембранного процесса, а также с помощью центрифуг. Полученный осадок в дальнейшем уплотняется и используется в производстве строительных материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии рассмотрены вопросы применения алюминиевых сплавов для изготовления деталей транспортных и сельскохозяйственных машин. Проанализировано техническое состояние изношенных деталей на примере головки блока цилиндров.

Представлены основные способы ремонта и восстановления деталей машин, изготовленных из алюминиевых сплавов, при этом основное внимание уделено электрохимическим способам восстановления и упрочнения. Рассматривается принципиально новый способ упрочнения деталей из алюминиевых сплавов – микродуговое оксидирование, благодаря которому возможно получение керамических покрытий, обладающих рядом ценных физико-механических и защитных свойств.

Дальнейшее развитие в области формирования керамических покрытий способом МДО требует решения целого комплекса теоретических и прикладных задач, которые связаны с исследованием процессов, протекающих при высоких электродных потенциалах, а также разработкой на этой основе технологических приемов формирования покрытий и создания мощных многофункциональных источников питания.

Результаты экспериментальных исследований, представленные в данной монографии, доказывают, что в современных условиях машиностроительного и ремонтного производства существует возможность восстановить ресурс и значительно повысить долговечность восстановленных деталей машин, упрочнением МДО.

На сегодняшний день особенно актуален вопрос применения ресурсосберегающих малоотходных и безотходных технологий, сокращающих расход воды и химикатов. Предложенные ремонтному и машиностроительному производству рекомендации и разработанный технологический процесс позволяет упрочнять широкую номенклатуру как восстановленных, так и новых деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алюминиевые сплавы (свойства, обработка, применение). Справочник. / Х. Нильсон, В.Хуфнагель, Г. Ганулис. 13-е изд., перераб. и доп. Пер. с нем. - М.: Металлургия, 1979.-680 с.
2. Применение алюминиевых сплавов: Справ. изд. / М.Б. Альтман, Ю.П. Арбузов и др.2-е изд., перераб. и доп- М.: Металлургия, 1985.-344 с.
3. Шмаков, Ю.М. Алюминиевые сплавы в автомобилестроении. / Ю.М. Шмаков, М.В. Зенина // Автомобильная промышленность.– 2001. №8.-С.36-39.
4. Сыркин, П.Э. Алюминиевые двигатели зарубежных автомобилей. Обзорная информация. / П.Э. Сыркин, Б.Н. Лучинин. - М.: ЦНИИТЭИавтопром, 1987.-58с.
5. Новиков, А.Н. Ремонт деталей из алюминия и его сплавов. Учебное пособие. / А.Н.Новиков. – Орел: Орловская государственная сельскохозяйственная академия, 1997. – 57 с.
6. Сварка и свариваемые материалы: В 3-х т. Т.2. Технология и оборудование. Справ. изд. / Под ред. В.М. Ямпольского. - М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1998. – 574с.:ил.
7. Кондратьев, Е.Т. Восстановление наплавкой деталей сельскохозяйственных машин. / Е.Т. Кондратьев, В.Е. Кондратьев. – М.: Металлургия, 1989. – 95 с.
8. Шехтед, С.Я. Наплавка металлов. / С.Я. Шехтед, А.М. Резницкий – М.: Машиностроение, 1982. – 72 с.
9. Пустовалов, М.А. Надежность головок цилиндров автомобильных двигателей, используемых в сельском хозяйстве, и разработка технологии их восстановления (на примере двигателя ЗИЛ-130). Автореф. дис. к.т.н. - М., 1987 - 24 с.
10. Лившиц, Л.Г. Восстановление автотракторных деталей. / Л.Г. Лившиц, А.В. Поляченко - М.: Колос, 1966. - 478 с.
11. Кудинов, В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. Учебник для ВУЗов. / В.В. Кудинов, Г.В. Бобров – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.
12. Протапьевский, А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. / А.Г Протапьевский. – М.: Машиностроение, 1974. – 237 с.

13. Восстановление автомобильных деталей: Технология и оборудование: Учеб. для вузов/ В.Е. Канарчук, А.Д. Чигринец и др. – М.: Транспорт, 1995.-303с.: ил.
14. Ландо, С.Я. Восстановление автомобильных двигателей. / С.Я. Ландо. – М.: Транспорт, 1987. – 112 с.
15. Успенский, М.А. «Димет» в профессиональном авторемонте. / М.А. Успенский, // Автомобиль и сервис.– 2004. №2.- С.28-29
16. Авдеев, Н.В. Основы технологии материалов покрытий. Учебник для студентов технических вузов. / Н.В. Авдеев – Оренбург, ИПК ОГУ, 2003.-316с.
17. Кудинов, В.В. Нанесение покрытий плазмой. / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белащенко и др. – М.: Наука, 1990. – 408 с.
18. Григор, З.В. Плазменное напыление алюминиевых деталей при ремонте импортной строительной техники. / З.В. Григор, А.И. Комаров, А.И. Куликов // Сварочное производство.– 1990. №9. – С. 18-19.
19. Верстак, А.А. Особенности взаимодействия напыляемых частиц с шероховатой поверхностью основы. / А.А. Верстак, И.А. Куприянов, А.Ф. Ильющенко // Сварочное производство.– 1987. №2.- С.5-6.
20. Соловьев, О.О. Электродуговая металлизация силуминовых головок цилиндров. / О.О. Соловьев, Л.А. Глозман, В.Д. Шаповалов, А.Ф. Попов // Механизация и электрификация сельского хозяйства.-1990. №10.-С.53-54.
21. Черноиванов, В.И. Методика и рекомендации по восстановлению деталей способами газотермического напыления. / В.И. Черноиванов – М.:ГОСНИТИ, 1983. – 62 с.
22. Поляк, М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения. В 2 т. Т. 1. / М.С. Поляк – М.: «Л.В.М.-СКРИПТ», «МАШИНОСТРОЕНИЕ», 1995.- 832 с.:ил.
23. Поляк, М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения. В 2 т. Т. 2. / М.С. Поляк – М.: «Л.В.М.-СКРИПТ», «МАШИНОСТРОЕНИЕ», 1995.- 688 с.:ил.
24. Горленко, О.А. Износостойкость поверхностей, упрочненных лазерной обработкой. / О.А. Горленко //Трение и износ. – 1981. – Т.2, №1.- С. 27-31.
25. Семенов, А.П. О перспективе применения в машиностроении вакуумных ионно-плазменных и газотермических

покрытий. / А.П. Семенов, Н.А. Воронин // Вестник машиностроения. - 1982. - №1. - С. 42-44.

26. Семенов, А.П. Методы и средства упрочнения поверхностей деталей машин концентрированными потоками энергии./А.П. Семенов, И.Б. Ковш, И.П. Петрова и др. – М.: Наука, 1972. – 404 с.

27. Бородин, И.Н. Упрочнение деталей композиционными покрытиями. / И.Н. Бородин – М.: Машиностроение, 1982. – 141 с.

28. Полевой, С.Н. Упрочнение металлов: Справочник. / С.Н. Полевой, В.Д. Евдокимов – М.: Машиностроение. 1986.- 320 с.: ил.

29. Голубев, И.Г. Упрочнение и восстановление деталей напылением керамическими и металлокерамическими покрытиями. / И.Г. Голубев // Производств.-техн. обеспечение сельского хозяйства. Сер. Зарубежный опыт: Экспресс-информация // Госкомсельхозтехника СССР. ЦНИИТЭИ. – 1985 г. – Вып. 15. – С. 10-15.

30. Композиционные покрытия при восстановлении деталей: Обзорная информация./ Госагропром СССР. АгроНИИТЭИИТО; Сост. М.И. Черновол, И.Г. Голубев. – М.: 1989. Сер. Восстановление деталей машин и оборудования АПК.

31. Композиционные материалы: Справочник/ В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др. – М.:Металлургия, 1991. – 688 с.

32. Астахов, А.С. Применение технической керамики в сельскохозяйственном производстве. / А.С. Астахов, Д.С. Буклагин, И.Г. Голубев– М.:Агропромиздат, 1988. – 95 с.

33. Вартелеев, С.С. Детонационные покрытия в машиностроении. / С.С. Вартелеев, Ю.П. Федько, А.И. Гиргоров – М.: Машиностроение, 1982. – 215 с.

34. Антошин, Е.В. Газотермическое напыление покрытий. / Е.В. Антошин – М.: Машиностроение, 1974. – 96 с.

35. Шрейдер, А.В. Оксидирование алюминия и его сплавов. / А.В. Шрейдер – М.: Машиностроение, 1960.- 220 с.

36. Томашов, Н.Д. Толстослойное анодирование алюминия и его сплавов. / Н.Д. Томашов и др. - М.: Машиностроение, 1968. – 156 с.

37. Гурьянов Г.В. Электроосаждение износостойких композиций/Под ред. Ю.Н. Петрова. - Кишинев: Штиинца, 1985. - 240 с.

38. Николаев, А.В. Новое явление в электролизе. / А.В. Николаев, Г.А. Марков, В.И. Пещевицкий //Изв. СО АН СССР. Сер. «Химические науки». – 1977. – Вып. 5, №12. – С. 32-34.

39. Суминов, И.В. Микродуговое оксидирование защищает металл. / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, А.М. Борисов и др. // Наука в России. – 1999, №4 – С. 21-25.

40. Белеванцев, В.И. Микроплазменные электрохимические процессы. Обзор. / В.И. Белеванцев, О.П. Терлеева, Г.А. Марков и др. // Защита металлов. – 1998. – т.34, №5. – С.469-484.

41. Новиков, А.Н. Восстановление и упрочнение деталей машин, изготовленных из алюминиевых сплавов, электрохимическими способами: Учеб. пособие / А.Н. Новиков, Н.В. Бакаева.– Орел: ОрелГТУ, 2004. – 170 с.

42. Микродуговое оксидирование.– Международный ежегодник «Наука и человечество».– М.: Знание, 1981.- 341 с.

43. Марков, Г.А. Структура анодных пленок при микродуговом оксидировании алюминия. / Г.А. Марков, М.К. Миронов, О.Г. Потапова, В.В. Татарчук //Изв. АН СССР. Неорганические материалы. - 1983. – Т. 19, №17. – С. 1110-1113.

44. Марков, Г.А. Микродуговые методы нанесения защитных покрытий. / Г.А. Марков, О.П. Терлеева, Е.К. Шулепко //Тр. Московского ин-та Нефтехимической и газовой промышленности. – М.: 1985. – Т.185. – С. 764-766.

45. Марков, Г.А. Микродуговые и дуговые процессы и перспективы их практического использования. / Г.А. Марков, О.П. Терлеева, Е.К. Шулепко / Тез. докл. научно-техн. семинара «Анод-88». Казань, 1988. – С. 73-75.

46. Черненко, В.И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом. / В.И. Черненко, Л.А. Снежко, И.И. Потапова – М.: Химия, 1991. – 128 с.

47. Гордиенко, П.С. Электрохимическое формирование покрытий на алюминии и его сплавах при потенциалах искрения и пробоя. / П.С. Гордиенко, В.С. Руднев – Владивосток: Дальнаука, 1999. – 233 с.

48. Снежко, Л.А. Энергетические параметры процесса получения оксидных покрытий на алюминии в режиме искрового разряда. / Л.А. Снежко, В.И. Черненко //Электронная обработка материалов. – 1983. - №2. – С. 25-28.

49. Снежко, Л.А. Свойства анодно-искровых покрытий, сформированных на сплавах алюминия из щелочных электролитов / Л.А. Снежко, Ю.В. Удовиченко, Л.С. Тихая // Физика и химия обработки материалов. – 1989. - №3. - С. 93-96.

50. Федоров, В.А. Состав и структура упрочненного поверхностного слоя на сплавах алюминия, получаемого при микродуговом оксидировании. / В.А. Федоров, В.В. Белозеров, Н.Д. Великосельская, С.Н. Булычев // Физика и химия обработки материалов. - 1988. - №4. – С.92-97.

51. Федоров, В.А. Взаимосвязь фазового состава и свойств упрочненного слоя, получаемого при микродуговом оксидировании алюминиевых сплавов. / В.А. Федоров, Н.Д. Великосельская // Химическое и нефтяное машиностроение, 1991. - №3. - С. 29-30.

52. Малышев, В.Н. Физико-механические характеристики и износостойкость покрытий, нанесенных методом микродугового оксидирования. / В.Н. Малышев, С.И. Булычев, Г.А. Марков. и др. // Физика и химия обработки материалов. - 1985. - №1. – С.82-87.

53. Уайэтт, Оливер Г., Дью-Хьюз, Давид. Металлы, керамики, полимеры: Введение к изучению структуры и свойств технических материалов / Пер. с англ. А.Я. Беленького и др. Под ред. Б.Я. Любова. – М.: Атомиздат, 1979. – 578 с.

54. Бобкова, Н.М. Физическая химия силикатов и тугоплавких соединений / Н.М. Бобкова – М.: Высшая школа, 1984. – 256 с.: ил.

55. Чигринова, Н.М. Оксидные керамические покрытия – эффективная тепловая защита рабочих поверхностей деталей ЦПГ. / Н.М. Чигринова, В.В. Чигринов // Автомобильная промышленность. - 2004. - №6. – С.30-33.

56. Каракозов, Э.С. Микродуговое оксидирование – перспективный процесс получения керамических покрытий. / Э.С. Каракозов, А.В. Чавдаров, Н.В. Барыкин // Сварочное производство. – 1993. - №6. – С. 4-7.

57. Снежко, Л.А. Исследование коррозионной стойкости сплавов алюминия с силикатными покрытиями. / Л.А. Снежко, Г.Б. Розенбойм, В.И. Черненко // Защита металлов. - 1981. – т.17, №5. – С.618-621.

58. Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. пособие для вузов. / А.И. Колчин, В.П. Демидов- 3-е изд. перераб. и доп.-М.: Высшая школа, 2002- 496с.:ил.

59. Биргер, И.А. Расчет на прочность деталей машин. Справочное пособие. / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Р.М. Шнейдерович – М.: Машиностроение, 1966.– 616с.
60. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов.-13-е изд., исправленное. / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев – М.: Наука. Гл. ред. физ.- мат. лит., 1986. – 544 с.
61. Новиков, А.Н. Технологические основы восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственной техники из алюминиевых сплавов электрохимическими способами. / А.Н. Новиков – Орел: Орел:ГАУ, 2001.– 233 с.: ил.
62. Федоров, В.А. Формирование упрочненных поверхностных слоев методом микродугового оксидирования в различных электролитах при изменении токовых режимов. / В.А. Федоров, В.В. Белозеров, Н.Д. Великосельская // Физика и химия обработки материалов. - 1991. - №1. – С.87-92.
63. Руднев, В.С. Зависимость толщины покрытия от потенциала МДО. / В.С. Руднев, П.С. Гордиенко // Защита металлов. - 1993. – т.29, №2. – С.304-307.
64. Ерохин, А.Л. Модель формирования оксидных покрытий при плазменно-электролитическом оксидировании алюминия в растворах силикатов. / А.Л. Ерохин, В.В. Любимов, Р.В. Ашитков //Физика и химия обработки материалов. - 1996. - №5. – С.39-44.
65. Харитонов, Л.Г. Определение микротвердости. / Л.Г. Харитонов– М.: Металлургия, 1967. – 45 с.
66. Федоров, В.А. Влияние поверхностного упрочнения методом микродугового оксидирования сплава Д16 на его прочностные характеристики и характеристики разрушения упрочненного слоя. / В.А. Федоров // Нефть и газ. - 1988. - №9. – С.82-87.
67. Федоров, В.А. Физико-механические характеристики упрочненного поверхностного слоя на сплавах алюминия, получаемого при микродуговым оксидировании. / В.А. Федоров, Н.Д. Великосельская // Физика и химия обработки материалов. - 1990. - №4. – С.57-62
68. Шмелева, Н.М. Контролер работ по металлопокрытиям. Учебник для ПТУ.– 2-е изд., перераб. и дополн. / Н.М. Шмелева – М.: Машиностроение, 1985–176 с.: ил
69. Лосев, Н.Ф. Основы рентгеноспектрального флуоресцентного анализа. / Н.Ф. Лосев, А.Н. Смагунова – М.:Химия, 1982. – 282 с.

70. Ревенко ,А.Г. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ природных материалов./А.Г. Ревенко. – Новосибирск: В.О. «Наука». Сибирская издательская фирма, 1994. – 264 с.

71. Коробов, Ю.С. Восстановление деталей методом активированной дуговой металлизации. / Ю.С. Коробов, В.М. Изюитко, А.С.Прядко, В.Л. Луканин //Автомобильная промышленность.– 2000, №1- С. 23-24.

72. Эдельсон, А.М. Применение металлизации для восстановления изношенных деталей машин. / А.М. Эдельсон – М.: Машгиз. 1960.-73 с.

73. Людин, В.Б. Разработка методики определения сквозной пористости защитных покрытий, получаемых микродуговым оксидированием. / В.Б. Людин, С.В. Семенов, И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд // Тез. Докл. Рос. Научн.-техн. Конф. «Новые материалы и технологии». – М.: МАТИ, 2000. – С. 211-212.

74. Беспалова, О.В. Исследование наполненных МДО-покрытий с использованием спектрометрии ядерного обратного рассеивания протонов. / О.В Беспалова, А.М. Борисов, В.П. Мичурин и др. // Физика и химия обработки материалов. - 2002. - №2. – С. 63-66.

75. Новиков, А.Н. Пористость МДО-покрытий на восстановленных поверхностях деталей из алюминиевых сплавов. / А.Н. Новиков, В.В. Жуков // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2005.- №6 – С. 7-9.

76. Вознесенский, В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. / В.А. Вознесенский - М.: Финансы и статистика, 1981. - 263 с.

77. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ. Пер. с англ. / Н. Дрейпер, Г. Смит - М.: Финансы и статистика, 1987. - 351 с.

78. Ефремов, А.П. Влияние токовых режимов микродугового оксидирования на повышение коррозионной стойкости деталей из алюминиевых сплавов. / А.П. Ефремов, А.В. Эпельфельд, Б.В. Харитонов // Защита от коррозии и охрана окружающей среды. – 1993.- №4.– С. 10-14.

79. Патент на изобретение № 22374537. Способ восстановления изношенных привалочных плоскостей головок блока двигателей внутреннего сгорания из алюминиевых сплавов./ А.Н. Новиков, В.В.Жуков, В.В.Пронин. БИ №11. 20.04.2006 г.

80. Новиков, А.Н. Восстановление привалочных плоскостей головок цилиндров автомобильных двигателей из алюминиевых сплавов электродуговой металлизацией с упрочнением микродуговым оксидированием. / А.Н. Новиков, А.В. Коломейченко, В.В. Жуков // Труды V региональной научно-технической конф. «Современная электротехнология в промышленности центра России». – Тула:ТулГУ, 2002. - С. 107-109.

81. Новиков, А.Н. Восстановление головки блока цилиндров двигателя. / А.Н. Новиков, В.В.Жуков. // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2006.- №3 – С. 37-39.

82. Воробьев, В.Н. Финишная обработка деталей абразивным инструментом / В.Н. Воробьев, Ю.А. Луцин // Техника в сельском хозяйстве.-1985.-№6.-С.58.

83. Новиков, А.Н. Вопросы экологии технологии микродугового оксидирования. / А.Н. Новиков, В.В. Жуков, В.В. Пронин, А.Л. Севостьянов // Сб. научных статей - Орел, 2004. - С. 112-116.

Научное издание

*Новиков Александр Николаевич
Жуков Вячеслав Васильевич*

**УПРОЧНЕНИЕ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ГОЛОВОК БЛОКОВ
ЦИЛИНДРОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ
МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ**

Монография

Печатается в авторской редакции

Технический редактор И.В. Акимочкина

Орловский государственный технический университет
Лицензия ИД №00670 от 05.01.2000 г.

Подписано к печати 03.12.2009 г. Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. 5,3. Тираж 500 экз.
Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета
на полиграфической базе ОрелГТУ
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.