

Глава 22

ПЕРСПЕКТИВЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МИКРОПЛАЗМОИСКРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ ЭНЕРГО-МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Н.М. ЧИГРИНОВА

Одна из актуальных задач современного отечественного промышленного комплекса – обеспечение конкурентоспособности производимой продукции. Сегодня доля выпускаемой продукции массовыми и крупносерийными производствами в машиностроении и металлообработке в общем объеме ВВП Республики Беларусь составляет менее 30 %, а основная его часть (около 70 %) производится мелко- и среднесерийными. В первую очередь, это огромная номенклатура металлических изделий повышенной точности с полями допусков от 0.001 до 0.2 мм, изготовленных из разных токопроводящих материалов, эксплуатируемых в условиях циклических знакопеременных нагрузок, интенсивного износа и агрессивных сред.

Улучшение качества, продление ресурса и обеспечение конкурентоспособности таких изделий является важной народно-хозяйственной задачей. Среди вариантов ее решения – поверхностное упрочнение и восстановление таких изделий с созданием функциональных, вкладывающихся по толщине и шероховатости в размерные допуски на них, покрытий.

С помощью современных, обычно стационарных, дорогостоящих, энергоемких, требующих создания специальной инфраструктуры, высокопроизводительных процессов поверхностного упрочнения – газопламенных, плазменных, ионно- и детонационно-плазменных методов, лазерной обработки, воздействия на поверхность сильнотоковыми электронными пучками и др., невозможно непосредственно в процессе упрочнения обеспечить создание покрытий с толщинами и шероховатостью, вписываемыми в диапазон принятых допусков. В большинстве случаев необходима последующая механическая доработка упрочненных или восстановленных данными методами изделий, сопровождаемая дополнительными материальными затратами и часто при этом – опасностью скалывания созданного и, как правило, высоконапряженного покрытия.

На мелко- и среднесерийных производствах, где ассортимент изготавливаемых изделий гораздо шире и чаще меняется, экономически выгодней применять более дешевые, удобные и мобильные процессы упрочнения и восстановления, легко адаптируемые к производственным условиям. К таким технологиям относятся микроплазмоискровые методы – электроискровое легирование (ЭИЛ) и анодное микродуговое оксидирование (АМДО). Данные процессы отличаются возможностью точного низкотемпературного упрочнения и восстановления металлических материалов, включая стали, черные, цветные и благородные металлы, твердые сплавы и т.д. с образованием металлических покрытий требуемого назначения (ЭИЛ), и специальные материалы – вентильные металлы (Al, Ti, Zr, Nb, Ta, Mg) и их сплавы (АМДО) с созданием оксидокерамических покрытий. При этом обеспечивается адгезия формируемого покрытия к основе на уровне механической прочности обрабатываемого металла. Кроме того, поскольку экономика и промышленность РБ ориентированы и на решение социальных задач, целесообразно применять технологию АМДО при изготовлении медицинских имплантатов, а также для повышения износостойкости и улучшения декоративных свойств медицинской техники.

Вместе с тем широкое промышленное использование обоих методов для упрочнения и восстановления изделий сдерживается их относительно невысокой производительностью, стохастическим характером формирования покрытий, ограниченной толщиной, нерегулярной структурой и неравнотолщинностью, высокими пористостью и шероховатостью. Поэтому создание энергосберегающих, интенсифицированных энергомеханическим воздействием технологий упрочнения и восстановления металлических изделий повышенной точности с полями допусков от 0.001 до 0.2 мм для средне- и мелкосерийных производств с формированием функциональных покрытий увеличенных толщин является актуальным направлением в повышении конкурентоспособности отечественной продукции.

Предлагаемая автором и защищенная рядом авторских патентов концепция интенсификации процессов энерго- и массопереноса при микроплазмоискровом упрочнении и восстановлении металлических материалов в жидкой и газовой средах [1, 2] предусматривает дополнительную обработку упрочняемой поверхности электрическим и ультразвуковым полями.

Интенсификация электроискрового легирования (ЭИЛ), при котором упрочняемая поверхность подвергается воздействию энергии электроразрядной плазмы и низкочастотной механической энергии, осуществляется за счет дополнительного деформирования упрочняемой поверхности с ультразвуковой частотой. При этом очередность и интенсивность ультразвуковой

ПЕРСПЕКТИВЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МИКРОПЛАЗМОИСКРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ ЭНЕРГО-МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

обработки на разных стадиях формирования покрытий определяются первоначальной твердостью упрочняемого материала. Ускорение энерго- и массопереноса в таком интегральном процессе будет обеспечено возрастанием уровня суммарной энергии за счет увеличения интенсивности энергии пластической деформации при легировании упрочняемого катода вибрирующим с ультразвуковой частотой анодом. Это уменьшает сопротивление металла пластическому деформированию, приводя к выравниванию по толщине формируемого покрытия, вызывает заметное измельчение структуры поверхностного слоя и, как следствие, рост плотности дислокаций, а значит, повышение его прочности. Кроме того, известно, что под действием ультразвукового поля снижаются остаточные макро- и микронапряжения и создается улучшенный тип поверхности с регулярными микроструктурой и геометрией.

Эволюция структурного состояния упрочняемой на воздухе поверхности типовым и интегральным способами представлена на рис. 1.

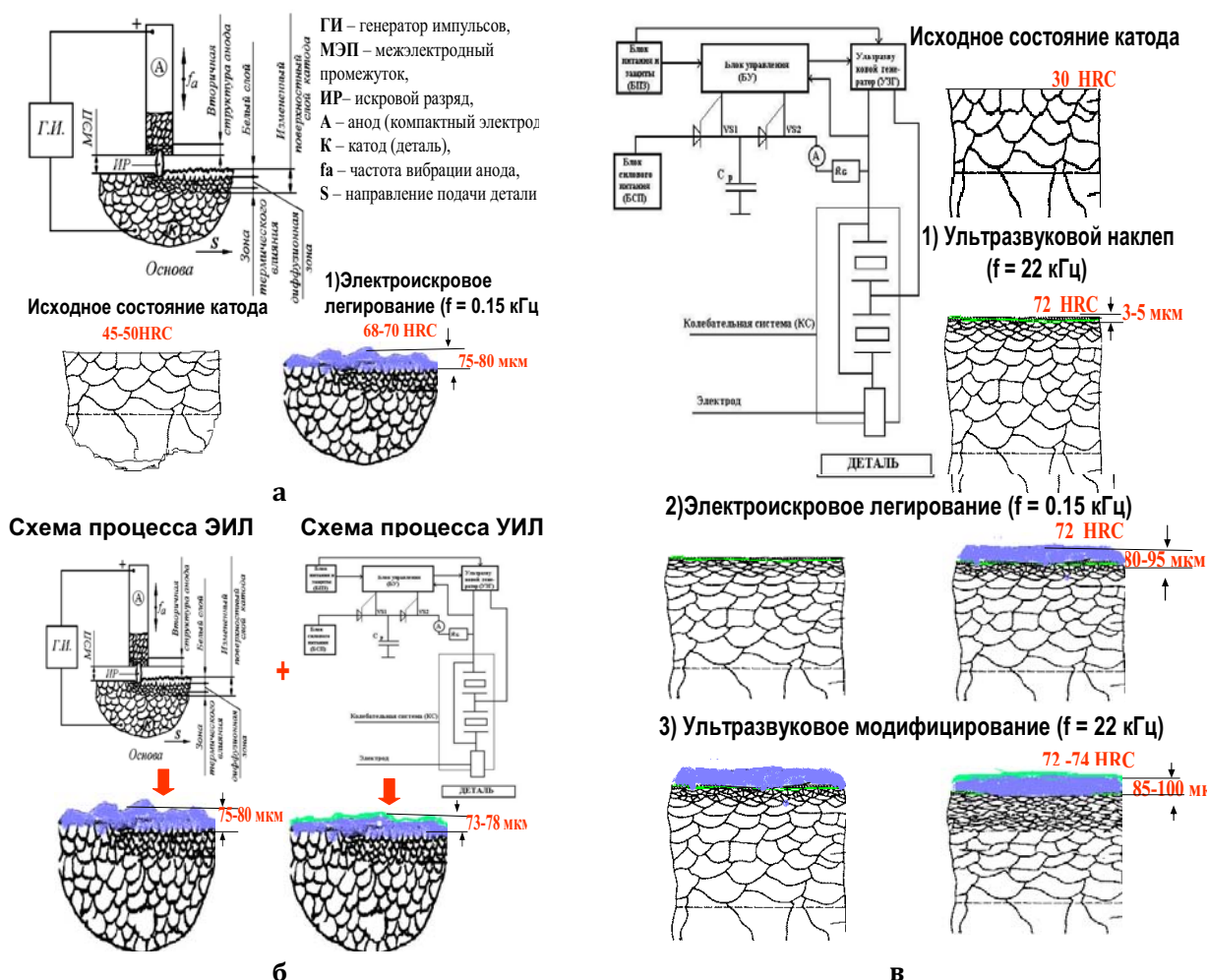


Рис. 1. Схемы типового (а – ЭИЛ) и интегральных (б – ЭИЛ+УЗО) и (в – УЗО+ЭИЛ+УЗО) процессов электроискрового легирования и эволюция состояния с структуры упрочненной поверхности

В жидкой среде в процессе АМДО интенсификация массопереноса и анодно-катодных взаимодействий при упрочнении материала связана с активацией водно-щелочных электролитов комбинированным действием электрического и ультразвукового полей.

Дополнительное введение в состав типового электролита солей натрия стимулирует химические взаимодействия в микродуговой фазе с образованием новых соединений, снижающих его вязкость, и облегчают протекание электрохимических процессов при АМДО.

Присадки в электролит разнозаряженных полирадикалов определяют возрастание его электрической мощности. Участвуя в электронном переносе, эти присадки способствуют увели-

чению уровня энергетического воздействия на оксидируемый объект. Равномерно распределенные по объему электролита заряженные полирадикалы выполняют роль миникатодов, обуславливая более равномерное и интенсивное искрение с большим количеством пробоев на поверхности анода, что приводит к ускорению роста покрытия, выравниванию по толщине и получению его более высокой плотности. Вследствие большого числа центров кристаллизации приобретает «многозародышевый» характер, улучшая качество и свойства модифицируемой поверхности за счет образования мелкокристаллической структуры.

Воздействие ультразвукового поля проявляется в повышении энерго-механической активности электролита. Характеристики ультразвукового воздействия выбираются из условия возникновения в жидкости псевдокавитационных эффектов с таким уровнем энергии, который, исключая разрушение оксидируемого анода, обеспечивает ускорение электрохимических взаимодействий, а следовательно, интенсификацию энерго- и массопереноса.

Доказательность и эффективность выдвинутых научных идей оценивались при проведении широкого круга исследований с использованием современного оборудования и оригинальных методик экспериментов и исследований, а также информационных технологий с помощью разработанных и изготовленных измерительно-управляющих устройств для изучения закономерностей многочисленных взаимодействий в режиме реального времени.

1.1. Интегральный процесс электроискрового легирования с ультразвуковым деформированием упрочняемой поверхности

На рисунке 2 представлено специализированное оборудование и режимы для осуществления типового и интегрального процессов ЭИЛ.



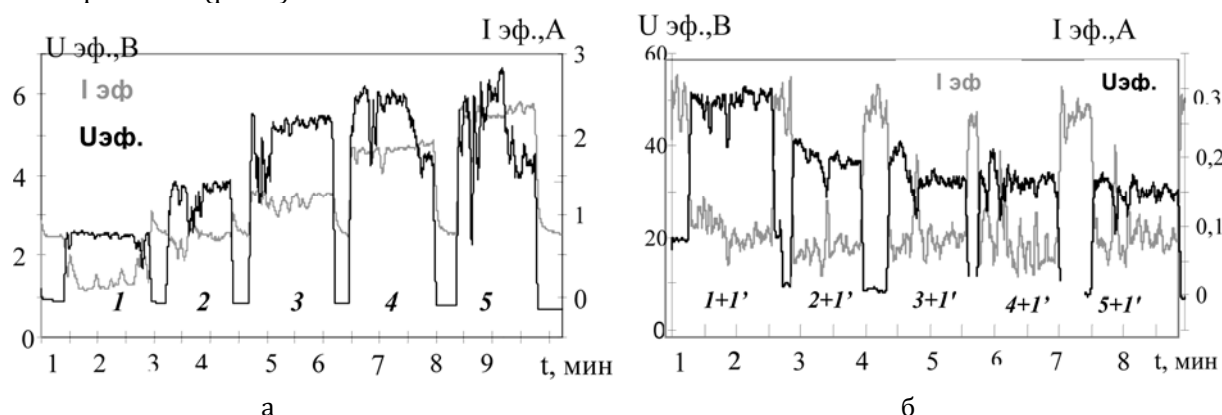
Рис. 2. Специализированное серийное оборудование для осуществления процесса ЭИЛ и ЭИЛ с УЗМ

С помощью разработанных алгоритмов и средств адаптивного контроля и управления динамикой и кинетикой электрохимических процессов в системе материал-покрытие в режиме реального времени установлены механизмы и закономерности влияния предложенной энерго-механической интенсификации массопереноса на кинетику изменения электрических параметров процесса упрочнения, структуру, фазовый состав, напряженное состояние и свойства формируемых покрытий.

Анализ полученных в режиме реального времени осциллограмм изменения электрических параметров процесса ЭИЛ показал, что в типовом методе, сочетающем энергию плазмы с низкочастотным деформированием поверхности, во всем диапазоне режимов отмечается нестабильность легирования, выраженная в заметных колебаниях уровня электрических параметров (рис. 3 а).

Полученные с использованием методик гравиметрического анализа, компьютерной обработки данных и высокостепенных полиномов поверхности отклика, отражающие влияние интенсивности энерго-механического воздействия на кинетику массопереноса, подтвердили не-

стабильность протекания стандартного ЭИЛ во времени во всем изучаемом диапазоне электрических режимов (рис.4).



Режимы ЭИЛ: 1- $U = 45$ В, $I = 0.3$ А; 2- $U = 67$ В, $I = 0.4$ А; 3- $U = 96$ В, $I = 0.6$ А; 4- $U = 67$ В, $I = 2.4$ А; 5- $U = 96$ В, $I = 3.6$ А;
Режимы УЗМ: 1'- $U = 85$ В, $I = 0.3$ А; 2'- $U = 125$ В, $I = 0.8$ А; 3'- $U = 140$ В, $I = 1.3$ А

Рис. 3. Изменение в режиме реального времени эффективных тока и напряжения при различном энерго-механическом воздействии на катод из стали 40Х в процессе легирования электродом ВК 8: ЭИЛ (а), ЭИЛ+УЗМ(б)

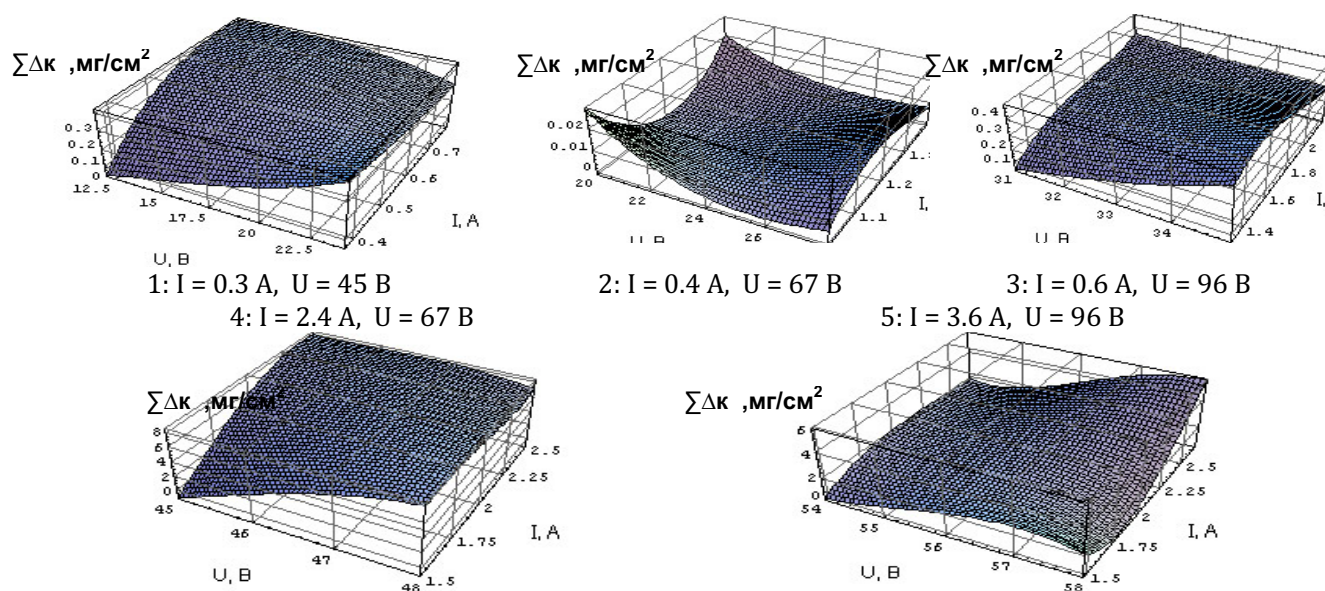


Рис. 4. Поверхности отклика, отражающие кинетику массопереноса при легировании электродом ВК 8 стальной основы 40Х методом ЭИЛ в изучаемом диапазоне режимов

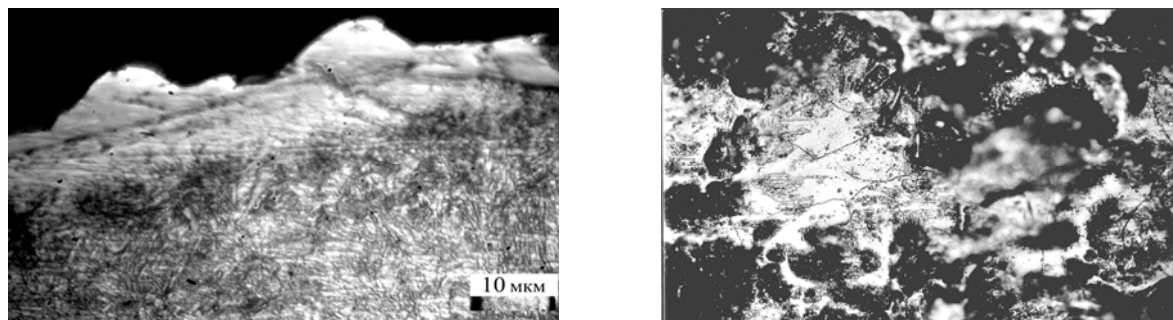


Рис. 5. Микроструктура и топография упрочненной поверхности катода из стали 40Х после ЭИЛ твердосплавным электродом ВК 8

Выявленная нестабильность массопереноса при упрочнении стального катода методом ЭИЛ определила неравномерность и разнотолщинность формируемых поверхностей и покрытий, содержащих большое количество структурных дефектов и микротрещин (рис. 5).

При двухступенчатом плазменно-механическом воздействии на упрочняемую поверхность за счет дополнительной высокочастотной пластической деформации материала катода (ЭИЛ+УЗМ) ультразвуковой удар осуществляется по находящейся в метастабильном состоянии поверхности после ЭИЛ, в результате чего в материале покрытия с накопленной внутренней энергией за счет большей по сравнению с исходным состоянием дефектности структуры – плотность дислокаций увеличена, границы зерен мигрируют – релаксационные процессы происходят активнее и система быстрее приходит в равновесное состояние [3]. Это иллюстрируется микроструктурой и топографией полученных указанным методом покрытий (рис. 6).

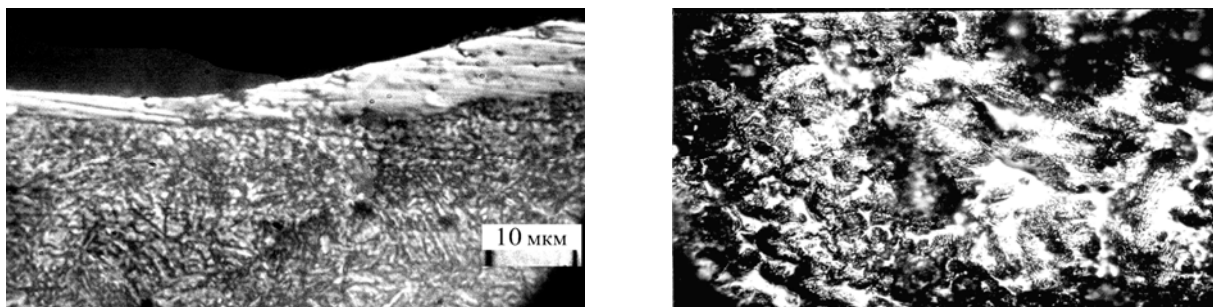
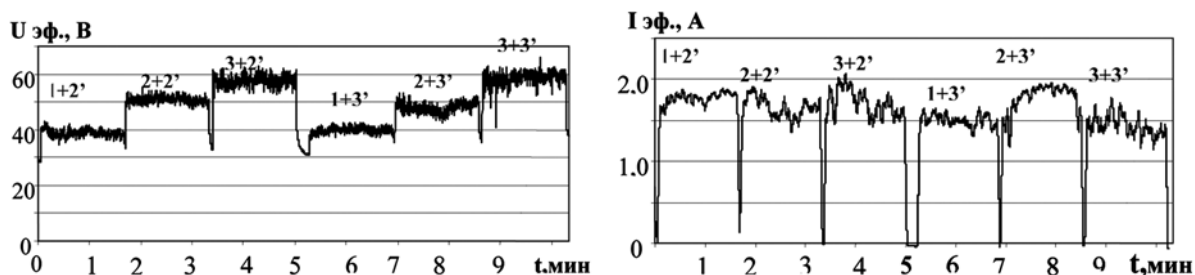


Рис. 6. Микроструктура и топография поверхности катода из стали 40Х после ЭИЛ+УЗМ электродом ВК 8



Режимы ЭИЛ: 1 – $U = 45$ В, $I = 0.3$ А; 2 – $U = 67$ В, $I = 0.4$ А; 3 – $U = 96$ В, $I = 0.6$ А

Режимы УЗМ (22 кГц): 2' – 125 В, $I = 0.8$ А; 3' – 140 В, $I = 1.3$ А

Рис. 7. Изменение электрических параметров во времени при тройном энергетическом воздействии электродом ВК 8 на стальной катод 40Х

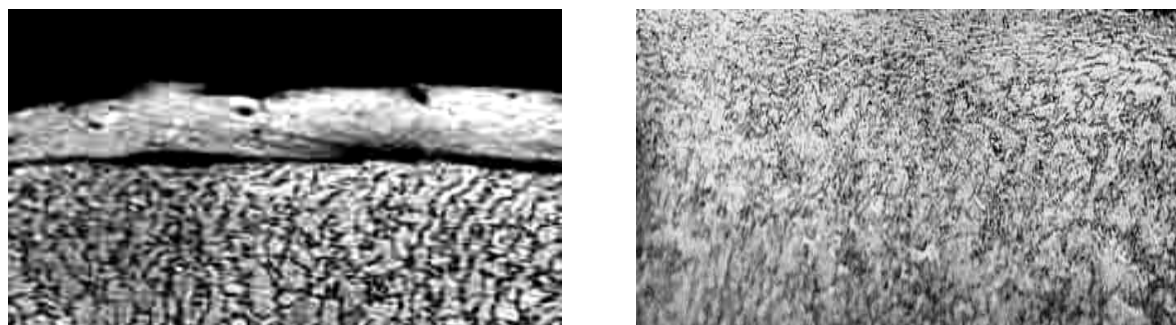


Рис. 8. Микроструктура и топография поверхности стального катода 40Х после УЗО+ ЭИЛ+УЗМ электродом ВК 8

Наиболее высокой стабильностью изменения электрических характеристик во времени в изучаемом диапазоне режимов (рис. 7), а также устойчивым приростом массы катода при смене

ПЕРСПЕКТИВЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МИКРОПЛАЗМОИСКРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ ЭНЕРГО-МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

режима легирования, с получением наиболее равнотолщинного покрытия с минимальным количеством структурных несовершенств (рис. 8) отличается трехступенчатое легирование (УЗО+ЭИЛ+УЗМ) [4, 5].

Установлено, что ультразвуковая обработка поверхности катода на первом этапе упрочнения позволяет расширить диапазон рабочих токов процесса ЭИЛ, обеспечивающих интенсификацию на 80–120 % устойчивого и стабильного массопереноса с образованием покрытий увеличенной в 1,5–2,5 раза толщины (рис. 9). Это можно объяснить активацией поверхности в процессе ее предварительного деформирования с ультразвуковой частотой, обуславливающего создание дополнительных условий для возникновения искрового разряда, в результате чего осуществляется более интенсивный массоперенос.

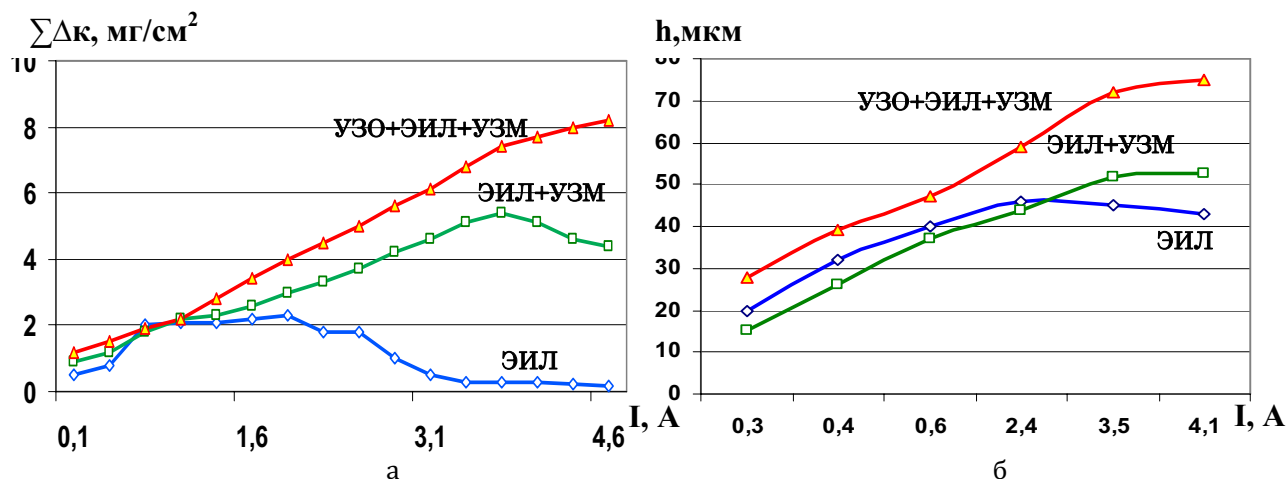


Рис. 9. Влияние энерго-механического воздействия разной интенсивности на динамику массопереноса (а) толщину формируемых покрытий (б)

Оптимизация электрических режимов и параметров энерго-механического воздействия связана с обеспечением устойчивого и стабильного массопереноса для формирования в единицу времени покрытий увеличенных толщин с регулярной геометрией и сниженной шероховатостью поверхности. Технологически это осуществляется за счет управления энергией импульсного разряда, частотой возникновения импульсов, частотой вибрации анода [6, 7]. С этой целью были получены, систематизированы и изучены экспериментальные данные по массопереносу в режиме реального времени при различном энерго-механическом воздействии на упрочняемую поверхность. На рис. 10 а приведены усредненные экспериментальные кривые по привесу $\Sigma \Delta k$ стального катода при его упрочнении изучаемыми методами.

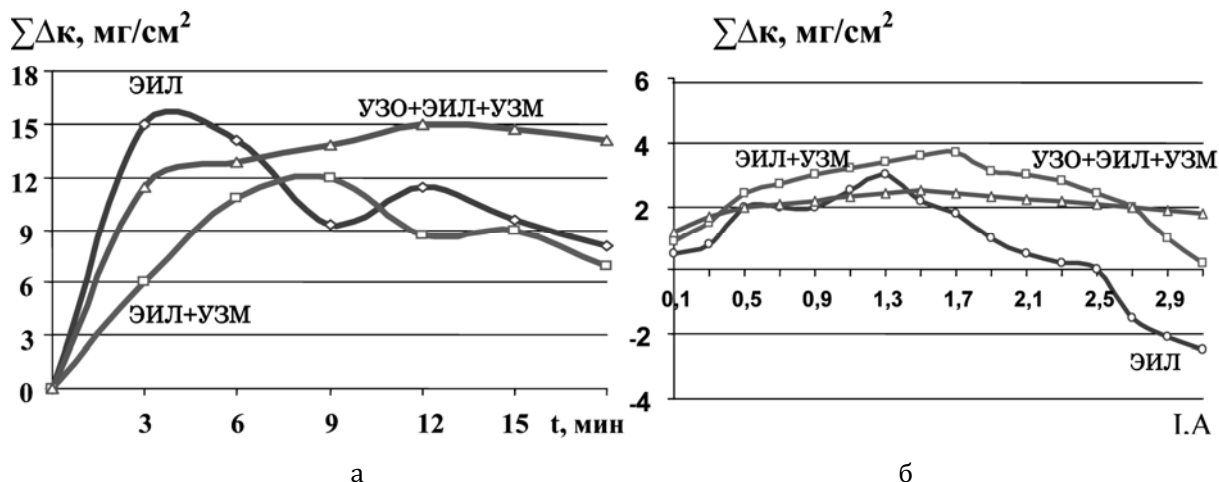


Рис. 10. Влияние продолжительности легирования (а) и энерго-механического воздействия изменяющейся интенсивности на характер и величину привеса катода

Анализ кривых на рисунке 10 а показал, что при работе в диапазоне оптимальных электрических параметров ЭИЛ ($U \geq 67$ В, $I \geq 2,4$ А) легирование стандартным методом целесообразно вести с удельной длительностью до 2 мин/см². При этом, если продолжительность ЭИЛ с максимальным массопереносом ограничивается 4 – 5 минутами, то при трехступенчатом упрочнении в этом же диапазоне вольтамперных режимов устойчивый и стабильный массоперенос сохраняется при более длительной (в 3,5 – 4 раза) обработке. Изучение характера кривых на рис. 10 б позволило сделать вывод, что при смене варианта легирования замедление процесса массопереноса протекает не идентично. В оптимальном диапазоне электрических параметров процесса легирования стандартным методом, начиная с $U=67$ В, $I=2,4$ А, привес катода практически прекращается и начинается съём металла с его поверхности, о чем свидетельствует снижение кривой привеса в отрицательную область на графике. При этом наиболее резкий подъем кривой, описывающей изменение величины $\Sigma \Delta k$, наблюдается в диапазоне рабочих токов от 0,1 А до 1,3 А, что хорошо коррелирует с графиком нарастания толщины покрытия (рис. 9). Из сравнения рисунков 9 и 10 видно, что дополнительное энерго-механическое воздействие с ультразвуковой частотой на первой стадии упрочнения в процессе трехступенчатого легирования (УЗО+ЭИЛ+УЗМ), следовательно, возрастание энергии и частоты возникновения импульсного разряда, частоты вибрации анода на несколько порядков позволяет не только «растянуть» диапазон токов и напряжений, обеспечивающих привес катода, но и гарантирует стабильный и устойчивый массоперенос, что расширяет возможности процесса ЭИЛ.

Объяснение зафиксированных особенностей интегральной технологии ЭИЛ найдено при расчетах уровней напряжений и исследовании параметров тонкой структуры упрочненных стальных подложек, осуществленном с применением системы обработки информации СОИ и планирования эксперимента, реализованной в специальном пакете программных средств и компьютерной графики “GOR”. В результате установлено, что дополнительное комбинированное воздействие на материал электрического и ультразвукового физических полей является одним из эффективных приемов его поверхностного наноструктурирования, т.к. вызывает существенную деформацию его кристаллической структуры. Об этом свидетельствует ярко выраженное «галло» на дифрактограммах, определяющих наличие на поверхности аморфномикроструктурных фаз с размером ОКР в 1,5. раза меньшем по сравнению с этим же параметром в слоях после обычного легирования (рис. 11, таблица 1).

Расчеты напряженного состояния материала показали, что в покрытии, полученном под двойным ультразвуковым воздействием, плотность дислокаций почти в 6 раз выше, чем в слое после легирования типовым методом ЭИЛ, в 2,0 – 2,5 раза меньший уровень напряжений в материале в результате их релаксации при ультразвуковой обработке.

В процессе проведенных испытаний и расчетами величин энергозатрат установлен энергосберегающий эффект при легировании поверхности разработанным интегральным методом, который в 1,5 раза менее энергозатратен, чем типовое ЭИЛ, требует в 2–2,5 раза меньше энергии на образование покрытия 1 мкм толщиной, а потребляемая при этом мощность в 1,8–2,0 раза ниже (рис. 12).

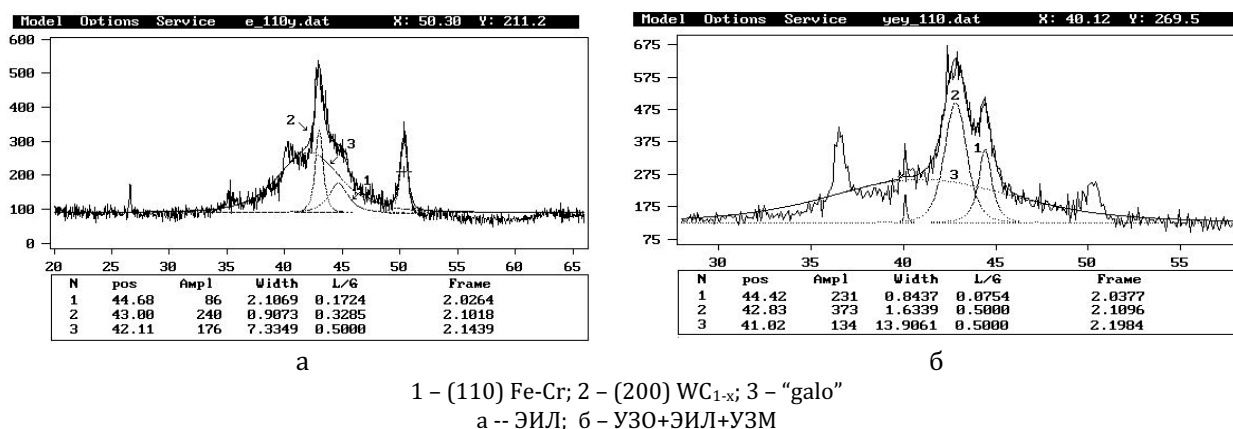
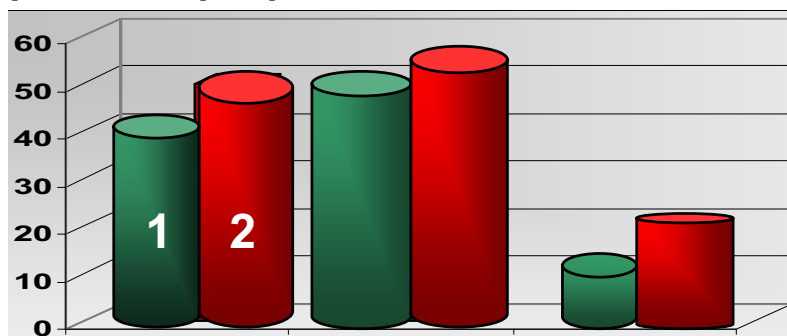


Рис. 11. Дифрактограммы покрытий после ЭИЛ и ЭИЛ с УЗМ

Таблица 1. Параметры тонкой структуры твердосплавного покрытия

Вид обработки	Фаза	Размер ОКР ($D_{\text{эфф.}}$ по Селякову $\text{\AA}$)	ОСМД по Се- лякову), ($\langle E^2 \rangle^{1/2}$) 10^{-4}	Плотность дислокаций $\theta \cdot 10^{10}, 1/\text{см}^2$	Интеграль- ная шири- на линий	Параметр решетки $a, \text{\AA}$
Исх. состояние	(Fe, Cr)	99 ± 2.6	78.6 ± 53.95	5.2604	2.6263	2.8629
ЭИЛ	(Fe, Cr)	10 ± 0.8	68.4 ± 44.39	10.8227	2.2816	2.8774
	"galo"	6.2	48.1 ± 40.18	0.1614	1.6012	2.8685
	WC _{1-x}	74 ± 0.9				
ЭИЛ+УЗМ	(Fe, Cr)	$158 \pm 0.8.2$	16.7 ± 8.34	22.1453	0.4437	2.8673
	"galo"	5 ± 0.9				
	WC _{1-x}	62 ± 1.0				
УЗО+ЭИЛ+УЗМ	(Fe, Cr)	185 ± 1.2	7.7 ± 2.67	90.0978	0.2559	2.8668
	"galo"	4 ± 1				
	WC _{1-x}	50 ± 1.1				

Снижение уровня
энергетических характеристик, %



Эф. энергия Энергия на 1 мкм Мощность
1 – ЭИЛ+УЗМ; 2 – УЗО+ЭИЛ+УЗМ

Рис. 12. Снижение энергозатрат при легировании стальной основы интегральным методом ЭИЛ с разной степенью энерго-механического воздействия

С использованием полученных научных данных разработан ряд энергосберегающих и импортозамещающих технологических процессов упрочнения и восстановления металлических поверхностей с созданием износо- и термостойких покрытий, проведены приемочные испытания восстановленных и упрочненных объектов с внедрением на ряде промышленных предприятий республики.

Так, применение разработанного метода ЭИЛ с УЗМ для ремонта и восстановления комплектующих летательных аппаратов (рис. 13) на ГП «Минский авиаремонтный завод», ГП «Авиакомпания Трансавиаэкспорт» существенно сократило количество и сроки межремонтных циклов, обеспечивая твердость восстановленных поверхностей на уровне 72–74 HRC, необходимую работоспособность узлов и комплектующих шасси, тормозных систем и пр., с гарантией надежной и долговечной работы в специальных средах, с сохранением пневмоплотности и герметичности контактов в узлах трения.

Использование интенсифицированной технологии ЭИЛ с УЗМ для повышения износостойкости и сохранения герметичности контакта в дисковых тормозных системах большегрузных самосвалов для подземных работ, производимых на филиале ГП «БелАЗ» (рис. 14), позволило заменить дорогостоящую легированную сталь для изготовления уплотнительных колец на сталь 40Х с износостойким покрытием на контактных поверхностях. Это привело к существенному снижению трудоемкости изготовления данного узла и его себестоимости, исключению валютных затрат на приобретение импортных колец. В узле с созданным методом ЭИЛ с УЗМ согласно разработанному техпроцессу износо- и антифрикционным покрытием обеспечивается необходимая герметичность контакта за счет твердости контактных поверхностей на уровне 72 HRC и низкого коэффициента трения – не более 0,12.



Рис. 13. Некоторые примеры комплектующих летательных аппаратов, восстановленных и упрочненных комбинированным методом ЭИЛ с УЗМ



Рис. 14. Износостойкое антифрикционное покрытие на контактной поверхности уплотнительного кольца

Подтверждена целесообразность и эффективность внедрения в производство на целом ряде предприятий республики технологии ЭИЛ с УЗМ для восстановления и упрочнения штамповой оснастки и металлорежущего инструмента широкой номенклатуры и назначения, различных ответственных узлов и комплектующих с узкими полями допусков (рис. 15), функционирующих при нормальных (около 273 К) и повышенных (более 1500 К) температурах.



Рис. 15. Восстановленный и упрочненный интегральным методом ЭИЛ с УЗМ металлообрабатывающий инструмент и штамповая оснастка

В результате производственных и приемочных испытаний установлено, что стойкость восстановленных и упрочненных разработанным методом инструментов и штамповой оснастки превышает стойкость серийных изделий в 3–5 раз и более.

1.2. Интенсифицированный процесс анодного микродугового оксидирования (АМДО)

Микродуговое оксидирование образцов осуществлялось на серийных установках МДО-2 УВИЕ 440.329.005, содержащих трехфазный источник питания, формирующий импульсы выпрямленного напряжения частотой 150 Гц и амплитудой до 540 В, повышающий трансформатор и силовой блок. Процесс АМДО проводился в электролитической ванне из нержавеющей стали, стенки и дно которой являются катодом. Основные технологические характеристики установки АМДО и ее структурная схема представлены в таблице 2 и на рисунке 16.

Таблица 2. Основные технические характеристики установки

Технические характеристики	Максимальные значения
Мощность, кВт:	не более 60
Максимальный рабочий ток, А:	150
Амплитуда напряжения, В:	не более 540
Частота напряжения, Гц	150
Ток перегрузки, при котором блокируется режим АМДО, А	165

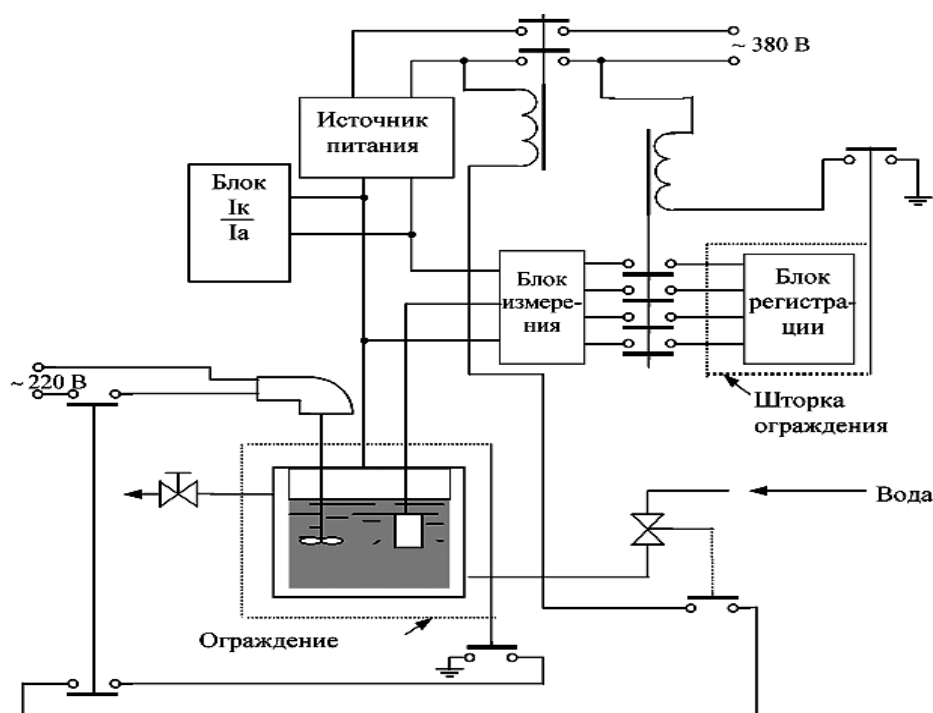


Рис. 16. Структурная схема установки АМДО

Исследование кинетических и динамических особенностей формирования покрытий проводилось в водно-щелочных электролитах, активность которых увеличена посредством применения разработанных приемов на образцах с размерами 30х30х3 мм различных групп алюминиевых и титановых сплавов, широко используемых в двигателе- и машиностроении, авиаремонтных технологиях, производстве специализированных изделий, медицине (имплантологии),

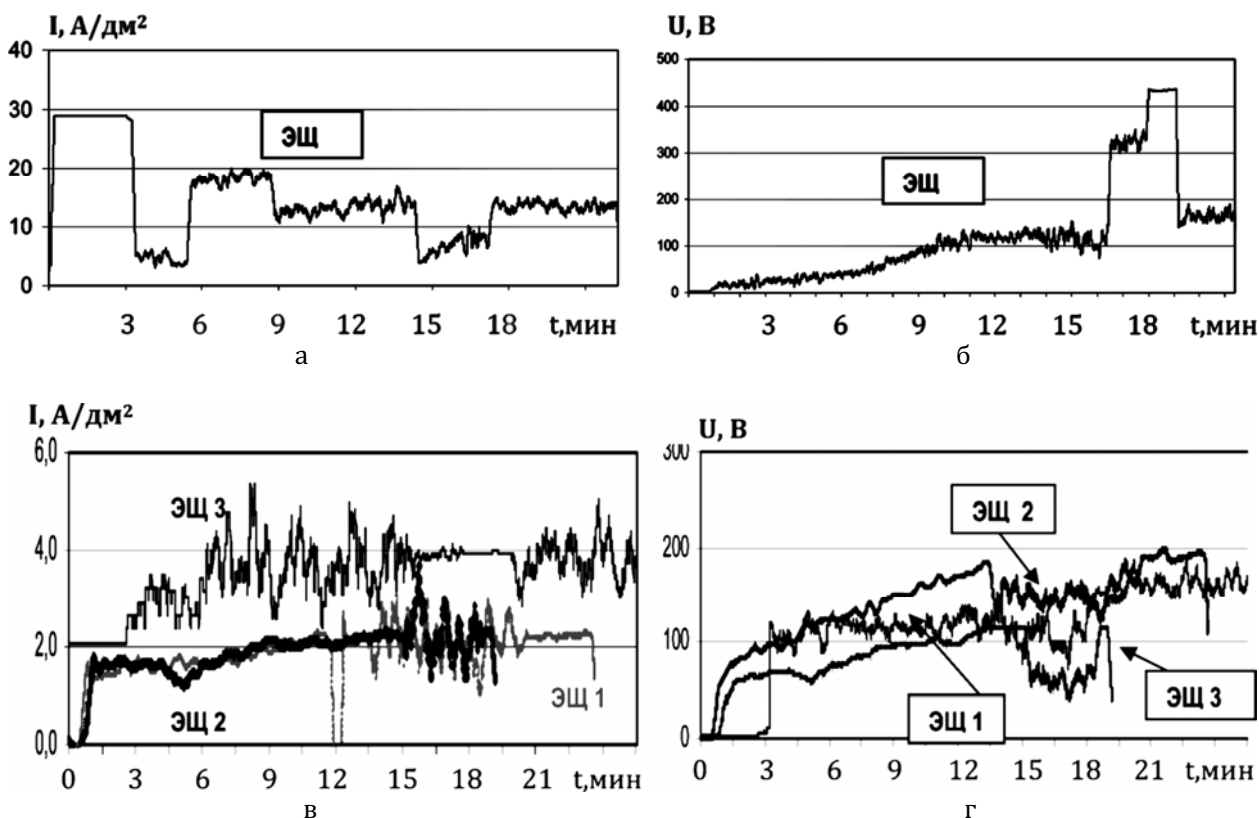
Для измерения и регистрации электрических характеристик в режиме реального времени при изменяющихся параметрах АМДО использовался разработанный и изготовленный измерительно-контролирующий комплекс ИИК с высокочастотными аналого-цифровыми преобразователями сигналов и датчиков, работающих с применением эффекта Холла [8]. Диапазон вольтамперных характеристик определялся составом оксидируемого сплава, площадью обработки, необходимыми толщиной покрытия и параметрами чистоты поверхности формируемого покрытия. Время оксидирования составляло от 20 до 30 минут. Степень и приоритетность влияния предложенных приемов интенсификации АМДО на электрическую активность разработанных электролитов оценивались посредством:

- а) изучения механизмов влияния интенсифицирующих приемов на особенности протекания процесса АМДО вентильных металлов;
- б) анализа *в режиме реального времени* осциллограмм изменения тока и напряжения с оценкой потребляемой мощности и энергозатрат;
- в) исследования структурообразования и характера взаимодействий на границе среда – покрытие – основа, кинетики роста покрытий, изменения их напряженного состояния, качественных характеристик под воздействием разработанных интенсифицирующих процесс АМДО приемов;
- г) проверки эффективности разработанных интенсифицирующих приемов и выявленных закономерностей взаимодействия посредством оценки основных свойств покрытий.

На основе полученных данных оптимизировались технологические параметры метода и прогнозировались качественные характеристики покрытий.

1.2.1 Деформируемые алюминиевые сплавы

При изучении особенностей оксидирования алюминиевых сплавов АД-0 и Д16 было отмечено, что при этом уровни вольтамперных характеристик процесса, независимо от степени и вида интенсификации метода АМДО, соизмеримы, о чем свидетельствуют полученные осциллограммы тока и напряжений при АМДО в стандартном (рис. 16 а, б) и активированных (рис. 16 в, г) электролитах. Однако, несмотря на это, скорость роста толщины покрытий в активированных растворах выросла в 1,6 – 2,8 при снижении энергозатрат серийного оборудования в 1,3 – 2,2 раза (рис. 18 и табл. 3).



ЭЩ – стандартный, ЭЩ 1– химически активированный, ЭЩ 2 –активированный заряженными полирадикалами, ЭЩ 3 –активированный ультразвуковым полем электролиты

Рис. 16. Изменение электрических параметров АМДО в режиме реального времени в активированных электролитах

Таблица 3. Энергозатраты на получение покрытий на поверхности сплава АД-0 в изучаемых электролитах

Электролит	Скорость роста покрытия мкм/мин	Энергозатраты на образование оксида, Дж	Отношение энергозатрат ЭЩ/ЭЩ _п
ЭЩ	1.4	20299	-
ЭЩ 1	2.2	15750	1.28
ЭЩ 2	2.9	11819	1.46
ЭЩ 3	3.9	8194	2.47

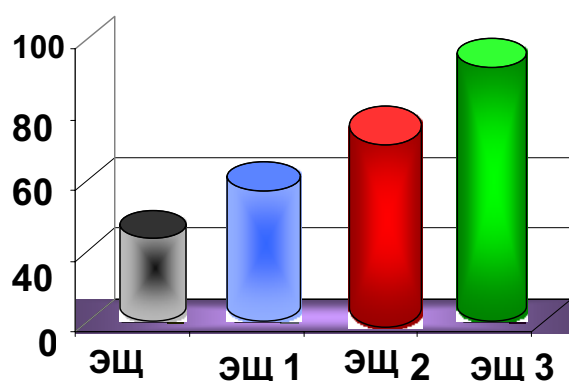


Рис. 17. Толщина покрытий на поверхности сплава АД-0, полученных после 20 мин. АМДО в изучаемых электролитах

Наиболее толстые (свыше 90 мкм) покрытия с регулярной структурой при сниженных энергозатратах зафиксированы после 20-минутного АМДО в электролите ЭЩ 3, активированном ультразвуковым полем. Микродуговое оксидирование в этом случае протекает при напряжениях в 1,5 и 2,8 раза более высоких, чем в ЭЩ 1 и ЭЩ 2 соответственно (рис. 16 б). Это не только интенсифицирует процесс нарастания толщины оксидного слоя, но и повышает его плотность и чистоту поверхности.

Механизм отмеченного увеличения установлен при анализе полученных и систематизированных осциллограмм ультразвуковых колебаний в активированном ультразвуковом поле электролите, в котором установлен эффект образования высокочастотных затухающих колебаний нерегулярной формы с высокой амплитудой по току (рис. 18).

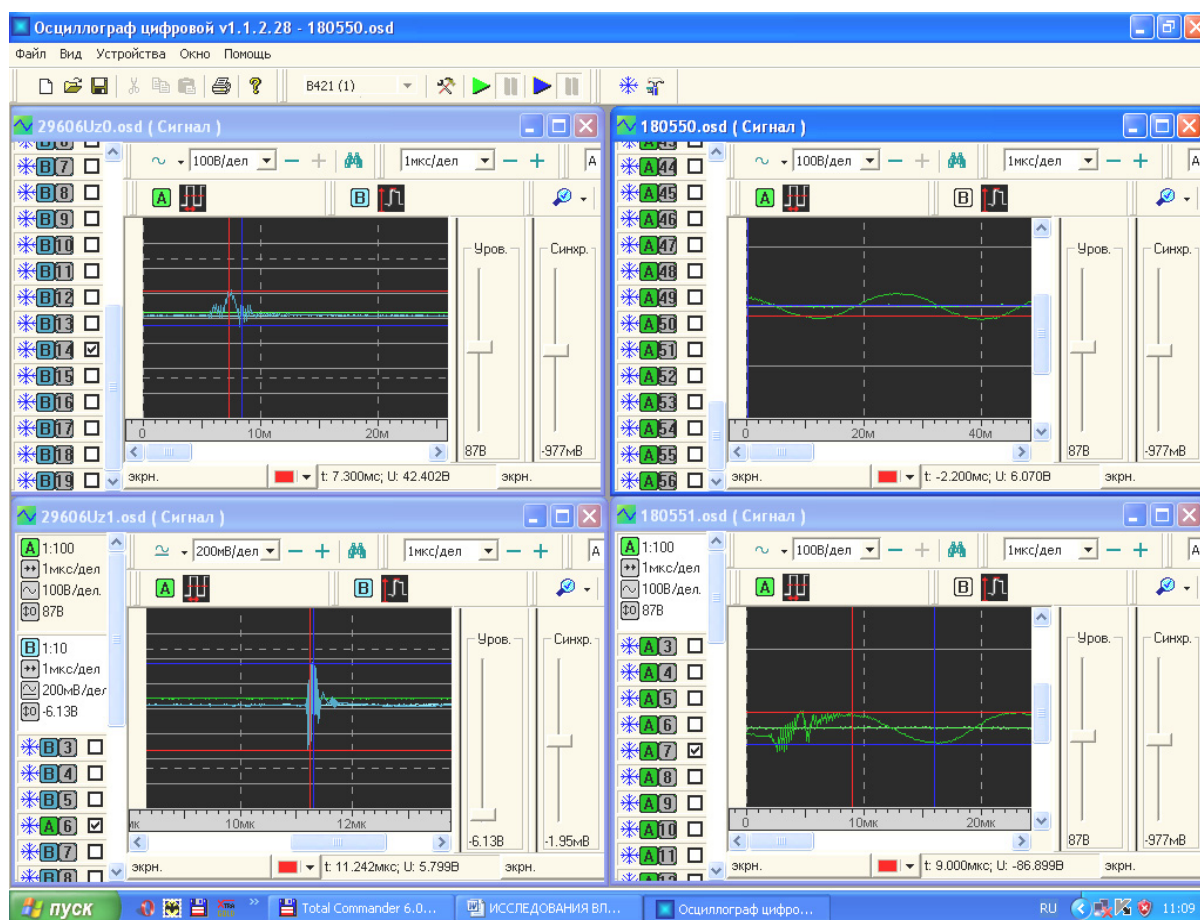


Рис. 18. Осциллограммы тока при работе ультразвукового генератора в электролизной ванне с разной степенью развертки сигнала

Определено, что средняя высота импульсов напряжения при этом увеличивается на 68%, импульсов тока – на 87 %, частота импульсов тока и напряжения возрастают на 90 % (табл. 4),

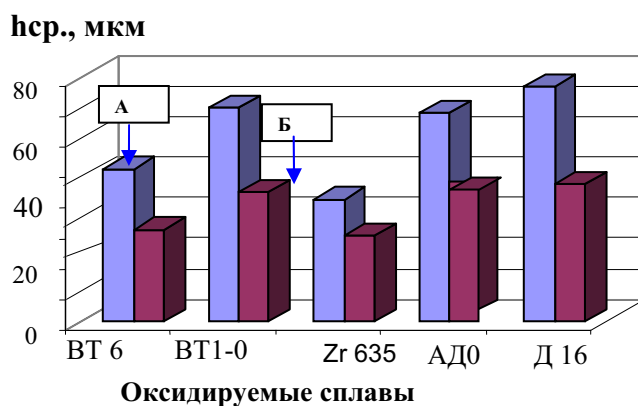
что и объясняет полученный эффект, сопровождающийся ускорением роста и повышением плотности формируемых на его поверхности покрытий.

Таблица 4. Сводные данные результатов экспериментов по механической активации электролита при АМДО

Эксперимент	Частота импульсов f , кГц	Диапазон изменения сигнала ΔU , мВ	Величина тока I , А	Увеличение средней высоты / частоты импульсов, %	
				тока	напряжения
Автономный режим работы УЗ-генератора	2	150	2		
Автономный режим работы установки МДО	2	350	5		
Пропускание УЗ через электролит	2	700	10	87 / 90	67 / 87
Пропускание УЗ через электролит с погруженным анодом	8.3	898	12.6		

В процессе АМДО без ультразвука средняя скорость роста толщины покрытия для изучаемых сплавов не превышает 1,6 мкм/мин, а при МДО с ультразвуком – возрастает в 2,5 раза, доходя до 3,9 – 4,2 мкм/мин. Иллюстрацией является гистограмма средней толщины покрытий после оксидирования различных вентильных металлов в электролите с ультразвуком и без него (рис. 19). В интенсифицированном ультразвуковым воздействием процессе АМДО отмечено максимальное снижение энергозатрат на образование 1 мкм покрытия – в 2,84 раза по сравнению с АМДО в стандартном электролите. Показано, что на формирование оксидного слоя, как в стандартном, так и в активированных электролитах необходимы источники тока с приблизительно одинаковой выходной мощностью. В то же время расходуемая при АМДО в ЭЩ 2 энергия на 35 – 40 % ниже. Поскольку скорость роста покрытия в стандартном ЭЩ и в активированном ЭЩ 1 электролитах меньше, а расход энергии выше, чем в ЭЩ 2, то, очевидно, что чем выше активность электролита, тем менее энергозатратен процесс получения оксидных слоев.

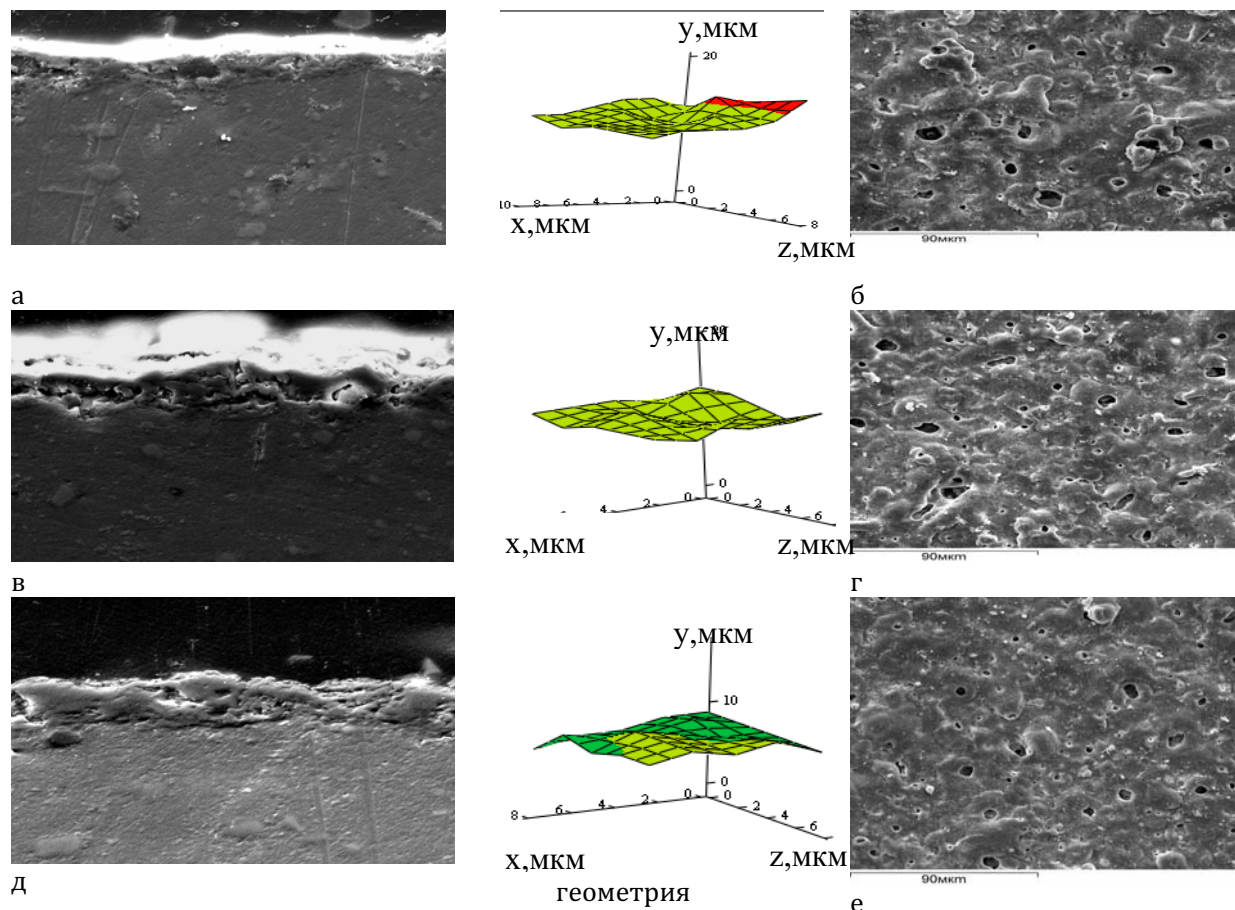
Аналогичные тенденции в изменении скорости и особенностей роста электрических параметров характерны и для АМДО алюминиевых сплавов Д16Т, АМг 6, литейных сплавов, а также для титановых и циркониевых сплавов [9, 10] (рис. 19).



А – с ультразвуком; Б – без ультразвука

Рис. 19. Средняя толщина покрытия, сформированного на поверхности различных сплавов в течение 20 минут АМДО

Установлено, что активация электролита согласно предложенным приемам дала возможность получить на алюминиевых сплавах однородные покрытия со сниженной с 25 – 40 % до 1–5 % пористостью (рис. 20), регулируемые фазовым и элементным составами.



а, б – АМДО в ЭЩ 1; в, г – АМДО в ЭЩ 2; д, е – АМДО в ЭЩ 3

Рис. 20. Микроструктура зоны соединения, топография и геометрия поверхности покрытий, сформированных методом АМДО на алюминиевом сплаве Д16 в изучаемых электролитах

Так, изучаемые электролиты содержат растворимые гидролизующиеся окислы железа и магния, способные к поддержанию постоянства pH раствора за счет его подщелачивания. Наличие оксида кальция в результате взаимодействия с алюминиевым анодом приводит к образованию алюминатов кальция, которые могут входить в состав покрытия, изменяя его свойства. Образование различных модификаций гидроксидов в активированных электролитах объясняется энергетическими условиями формирования покрытий, поскольку эти модификации отличаются по величине свободной энергии образования. Установлено, что в покрытии из ЭЩ 1 содержание нерастворимых оксидов кремния, гидроксидов прочих металлов, оксидов магния в 2 раза больше, чем в покрытиях из ЭЩ 2 и ЭЩ 3 (рис. 21).

Такое высокое содержание оксидов в покрытии можно объяснить пассивацией оксидируемой поверхности, обеспечивающей аккумуляцию отрицательного и положительного зарядов большей величины. В результате пробой покрытия сопровождается повышенным выделением концентрированной энергии, которая затрачивается на синтез кристаллических нерастворимых оксидов.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МИКРОПЛАЗМОИСКРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ ЭНЕРГО-МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

В покрытии, полученном с применением интенсификации АМДО ультразвуковым полем, присутствует на порядок больше стеклофаз на основе оксидов фосфора, что объясняет высокую твердость поверхности с существенно меньшей пористостью и более стабильная геометрия, что подтверждает данные микроструктурных исследований. Кроме того, из рис. 21 видно, что данный вид интенсификации по сравнению с химической приводит к заметному уменьшению в составе покрытия содержания кремнезема SiO_2 и нерастворимых солей азотной кислоты. Это обуславливает более устойчивый характер АМДО, т.к. практически исключает взаимодействие между собой указанных соединений с образованием дополнительного количества жидкого стекла, поддерживая стабильное рН электролита.

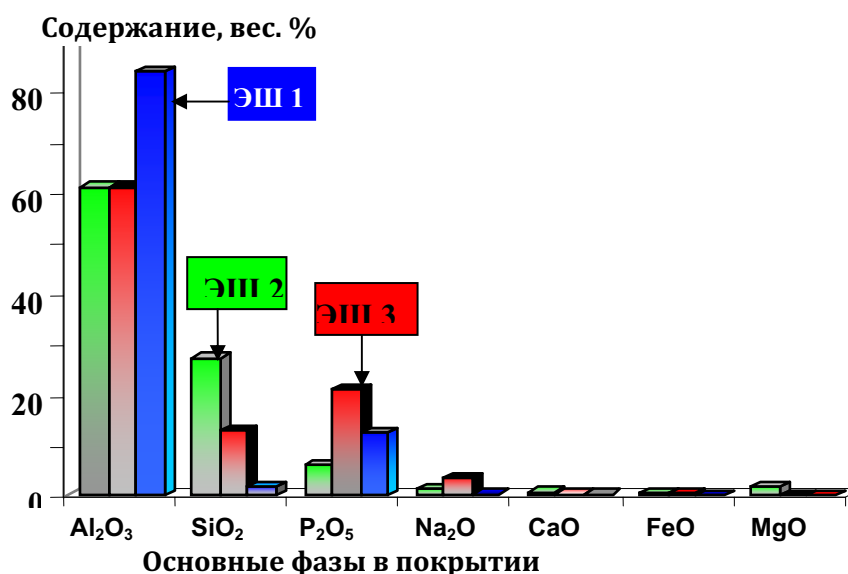


Рис. 21. Влияние метода активации на содержание основных фаз в оксидном покрытии

Определение элементного состава покрытий выполнялось по программам полуколичественного и количественного анализов с поверхности покрытия, его сердцевины, барьерного слоя на границе с подложкой, а также в центре основы образцов. Очевидно, что условия создания покрытия определяют состав и формы образующихся в нем оксидов. Из рис. 22 видно, что во всех покрытиях, полученных в активированных электролитах, концентрация кислорода по мере удаления от поверхности вглубь уменьшается.

При сравнении данных МРСА и элементного состава установлено, что при проведении АМДО в активированном солями натрия электролите происходит наиболее активное химическое взаимодействие анионов алюминия с кислородом. Поэтому количество свободного алюминия в поверхностных слоях полученного в таком электролите покрытия заметно меньше, чем в покрытиях, созданных в активированном заряженными полирадикалами растворе ЭЩ 2 или активированном ультразвуковым полем электролите ЭЩ 3 (рис. 22 а), а содержание износостойкого $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, обусловленного соотношением среднего количества кислорода и металла как 80:50, заметно больше (рис. 22 а). В покрытиях, сформированных в ЭЩ 2 и ЭЩ 3, это соотношение имеет обратную динамику (рис. 22 б, в), что соответствует более жаростойкой фазе $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Те же тенденции в механизмах формирования покрытий в процессе интенсифицированного АМДО характерны для литейных алюминиевых сплавов. При этом в активированных электролитах в процессе АМДО кремний-содержащих алюминиевых сплавов отмечена возможность сокращения в 3 раза и более времени на образование покрытия задаваемой толщины по сравнению с АМДО в стандартном растворе (рис. 23).

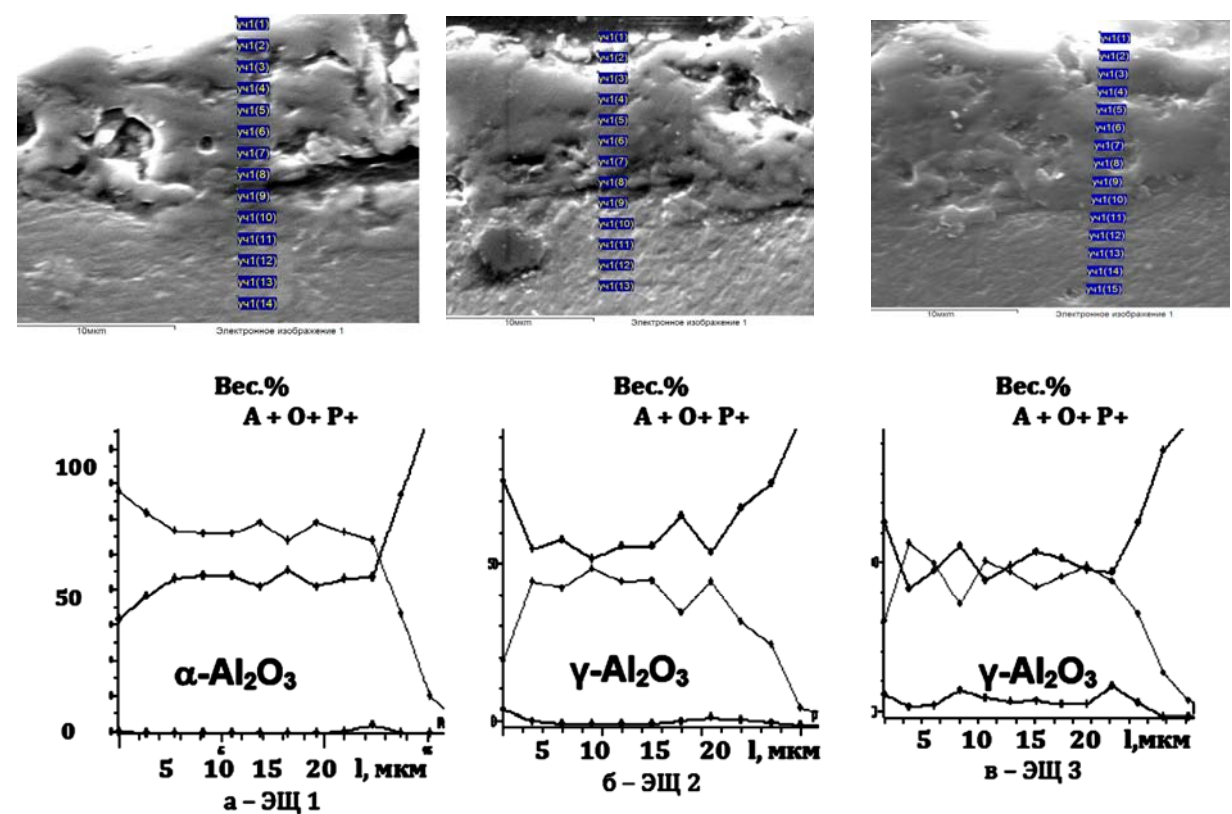


Рис. 22. Элементный состав покрытий, полученных в изучаемых электролитах



Рис. 23. Сравнительная динамика нарастания толщины покрытий на литейных и деформируемых сплавах алюминия

Таблица 5. Параметры тонкой структуры оксидных покрытий на алюминиевой подложке Д16 после АМДО в разработанных электролитах

№ элект-ролита	Основа покры-тия	Размер ОКР (кристаллитов) Dэфф., nm	Модель плот-ности распре-деления числа ячеек в ОКР	Относительная среднеквадратическая микродеформация ОСМД, ($\langle E^2 \rangle^{1/2}$)·10 ⁻⁴	Плотность дислока-ций ρ, ·10 ⁸ 1/см ²	Распределение деформаций	Функция физического уширения линий-ФФУ β _{1/2} , °	Парамет-ры решетки, Å
ЭЩ	γ-Al ₂ O ₃	435.2±3.84	Экспоненциал.	1.45±0.3	0.0083142	Экспоненциал.		a = 7.8851
ЭЩ 1	γ-Al ₂ O ₃	189.2±3.84	Экспоненциал.	1.29±0.3	0.0253121	Степенное	0.1222	a = 7.8859
ЭЩ 2	γ-Al ₂ O ₃	213.6±3.82	Экспоненциал.	1.15±0.25	0.0706324	Степенное	0.1084	a = 7.8884
ЭЩ 3	γ-Al ₂ O ₃	212.2±3.84	Экспоненциал.	1.11±0.24	0.104726	Степенное	0.1096	a = 7.8859
ЭЩ 2+УЗМ	γ-Al ₂ O ₃	218.4±3.84	Экспоненциал.	1.12±0.24	0.107929	Прямолинейн	0.1067	a = 7.8846

ПЕРСПЕКТИВЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МИКРОПЛАЗМОИСКРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ ЭНЕРГО-МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

При анализе напряженного состояния созданных в активированных электролитах покрытий установлено, что их поверхностные слои находятся в на-ноструктурированном состоянии за счет дробления в 2 раза кристаллитов. Это приводит к возрастанию в 4–6 раз плотности дислокаций, а ультразвуковое поле вызывает упорядочение блочной структуры в покрытии, что описывается степенной моделью их распределения, и способствует повышению его прочностных свойств в процессе дополнительного наклепа при схлопывании в анодно-катодной области пузырьков перегретого пара, приводя к образованию в материале покрытия напряжений сжатия (рис. 24).

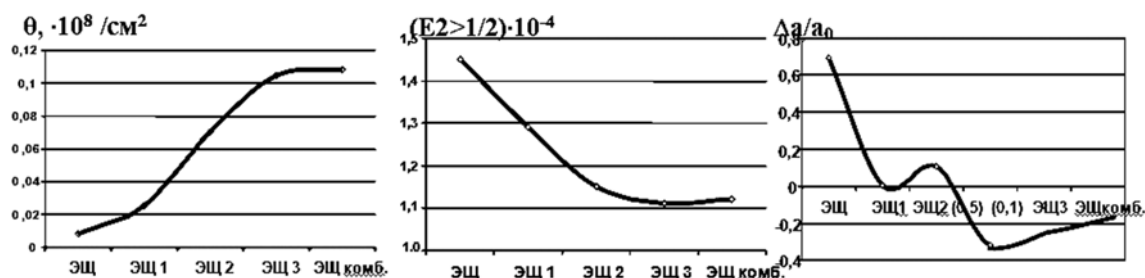


Рис. 24. Параметры тонкой структуры оксидо-керамических покрытий, полученных в различно активированных электролитах

Подтверждением полученных результатов исследования являются данные экспериментов и испытаний основных свойств созданных в активированных электролитах покрытий. Установлено, что упрочненные изделия в процессе интенсифицированного с помощью разработанных приемов АМДО имеют в 1,1–1,4 раза более высокий уровень критической нагрузки разрушения, на 10–22 % большую износостойкость и увеличенную на 20–95 % микротвердость, повышенное сопротивление пробойным напряжениям.

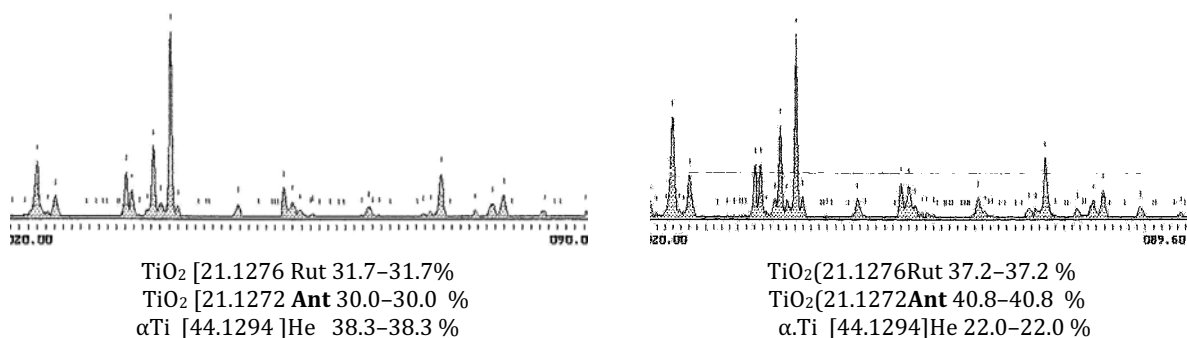


Рис. 25. Дифрактограммы с поверхности покрытий, сформированных в изучаемых электролитах на поверхности образцов из титанового сплава ВТ6

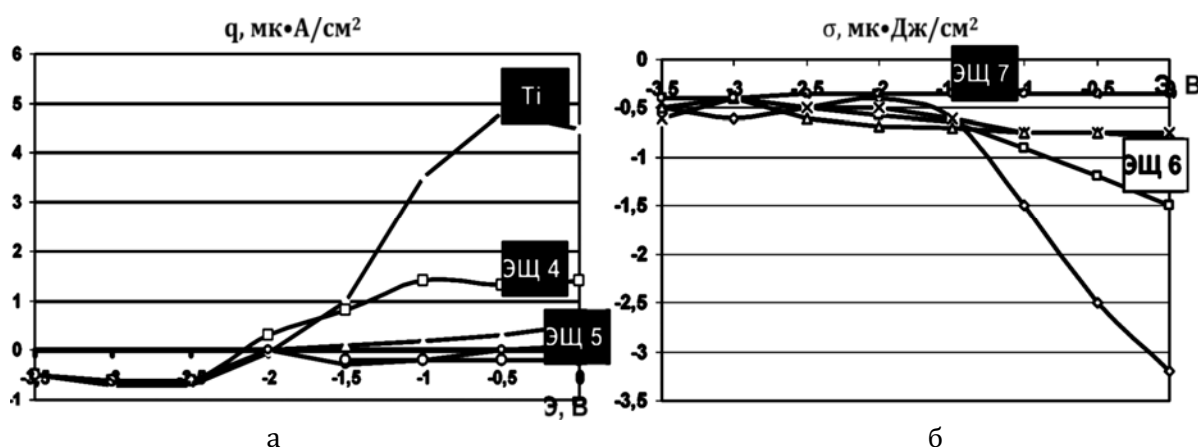


Рис. 26. Зависимость плотности заряда на поверхности исследуемых образцов (а) и изменения поверхностного натяжения от потенциала электрода в физиологическом растворе

Отмечена высокая эффективность разработанных электролитов для АМДО технического ВТ1-0 и высокопрочного ВТ 6 титановых сплавов, из которых изготавливают медицинские имплантаты. Показано, что при введении в раствор с гидроксипатитом ЭЩ 6 присадок полирадикалов реализуется наиболее предпочтительный для имплантата состав покрытия с преимущественным (до 80%) содержанием высокотемпературных диоксидов титана со структурой анатаза и рутила, и тип микроструктуры с развитой мелкой и равномерной 25–30%-ной пористостью, демонстрирующие улучшенные свойства поверхности по сравнению с имплантатами из титана без покрытия (рис. 25, 26).

На рисунке 27 показаны микроструктура и топография высокодисперсного АМДО-покрытия с гетерогенным привитым слоем на основе фуллереносодержащих соединений, полученном методом иммобилизации. Насыщенность этого покрытия фуллеренами хорошо видна по всей его площади, что свидетельствует о высокой равномерности и плотности прививки [11].

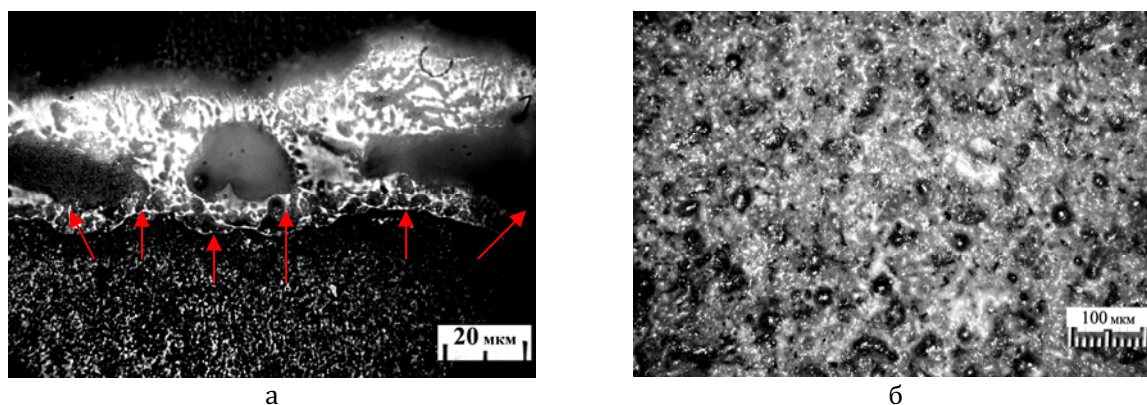


Рис. 27. Микроструктура и топография покрытия с привитыми структурами на основе фуллереносодержащих соединений на поверхности образца из титанового сплава ВТ 6

Проверка эффективности предложенной концепции интенсификации анодного микродугового оксидирования осуществлялась на основе изучения поведенческих особенностей упрочненных в активированных электролитах изделий в условиях эксплуатации.

Применение интенсифицированного метода АМДО согласно разработанному техпроцессу для создания термостойких покрытий на рабочих поверхностях деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) двигателя внутреннего сгорания (ДВС) показало его высокую эффективность. Так, в процессе стендовых испытаний ДВС, содержащих оксидированные детали ЦПГ, наиболее устойчивая и стабильная работа ДВС при возрастании частоты вращения коленчатого вала зафиксирована в двигателе, содержащем поршни и головки цилиндров с оксидным покрытием: в этом случае в двигателе отмечены максимальная мощность, наибольший крутящий момент – особенно на больших оборотах коленчатого вала и наименьший расход топлива (рис. 28 в, г). При этом весьма важным является малое увеличение расхода топлива при возрастании мощности ДВС с ростом оборотов двигателя (рис. 28 б, в). Эти данные свидетельствуют о работе ДВС в более экономичном режиме и его повышенном к.п.д.

Использование разработанной программы при обработке экспериментальных данных позволило установить, что при одних и тех же условиях работы высокофорсированного двигателя средняя температура разогрева поршня с покрытием ниже, чем поршня без покрытия: наличие АМДО-слоя на рабочих поверхностях деталей ЦПГ на 15 % уменьшает теплоотвод через поршень в рубашку охлаждения ДВС (рис. 29) [14].

Это обуславливает повышение температуры газов в цилиндре и, следовательно, возрастание давления в нем, что вызывает увеличение крутящего момента на коленчатом валу (рис. 28 г). При сохранении мощности двигателя неизменной зафиксированный эффект уменьшения теплоотвода в рубашку цилиндра приводит к снижению расхода топлива в системе, а следовательно, к улучшению экологических характеристик ДВС. Именно поэтому наиболее существенная экономия топлива отмечена при работе двигателя, содержащего поршень и головку цилиндра с теплозащитными АМДО-слоем [12, 13].

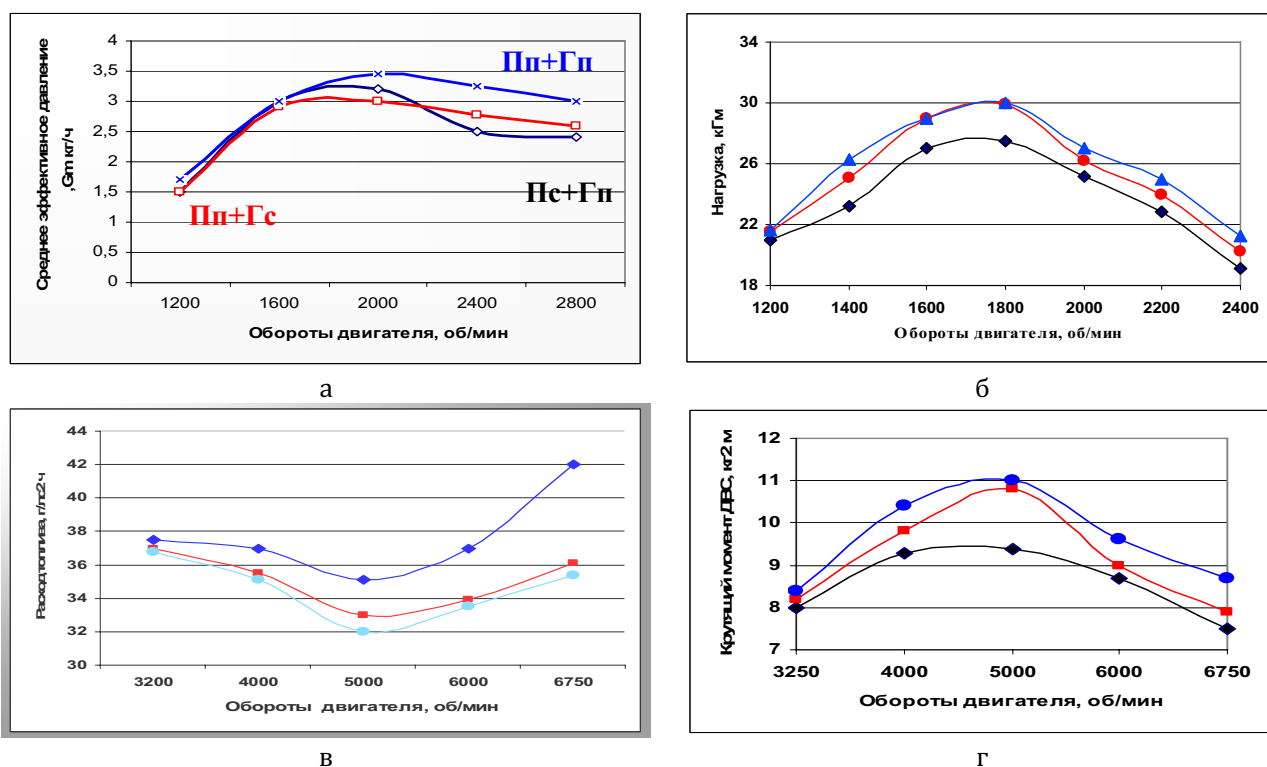
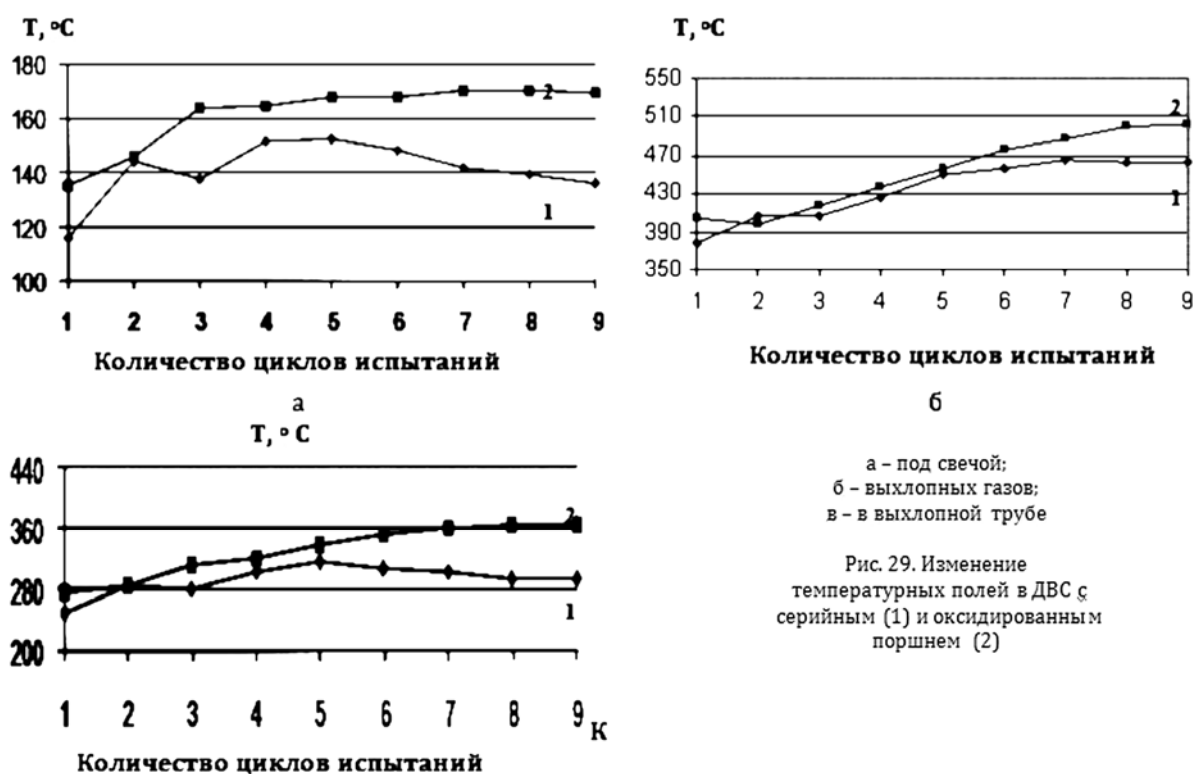


Рис. 25. Основные характеристики двигателя на разных оборотах, содержащих:

Пп+Гп – поршни и головки цилиндров – с покрытием;
Пп+Гс – поршни с покрытием, головки – серийные;
Пс+Гп – поршни серийные, головки цилиндров – с покрытием



Применение интенсифицированного процесса АМДО для формирования защитных покрытий на поверхности медицинских имплантатов (рис. 30) позволило установить их высокую



Рис. 30. Образцы имплантантов для межтелового спондилодеза с монтажным инструментом с оксидо-керамическим покрытием, сформированным в активированных электролитах

работо- и конкурентоспособность. Проведенными санитарно-гигиеническими, органолептическими и токсикологическими испытаниями таких имплантантов определено их соответствие существующим нормативно-правовым и техническим актам на медицинские приборы и приспособления, что позволило начать успешную эксплуатацию прошедших государственную регистрацию в РБ титановых имплантантов в клинической практике.



Рис. 31. Алюминиевые комплектующие медицинского прибора «гемокоагулометр четырехканальный СТ2410» с износостойким декоративным оксидным покрытием на поверхности

Данный метод оказался весьма эффективным при создании декоративно-износостойких покрытий на поверхности комплектующих медицинских приборов (рис. 31).



Рис. 32. Алюминиевый ролик для натяжения металлокорда с оксидо-керамическим покрытием

ПЕРСПЕКТИВЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МИКРОПЛАЗМОИСКРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ ЭНЕРГО-МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Применение интенсифицированной технологии анодного микродугового оксидирования в производстве медицинских приборов в сочетании с конструкцией и свойствами указанных приборов позволяет успешно решать проблемы импортозамещения и конкурентоспособности, экономить средства за счет исключения использования дорогостоящих красителей.

Высокую эффективность разработанной технологии продемонстрировали алюминиевые ролики для натяжения металлокорда с оксидо-керамическим покрытием (рис. 32).

Дюралюминиевые ролики ВМ-1927.5402.13.00.001 установлены на компенсационных намоточных устройствах волочильных станов НТ-12 на РУП БМЗ, в которых металлокорд через систему роликов без охлаждения подается со скоростью 1500 м/с. Срок службы такого ролика не превышает 1 смены, вследствие чего их закупают за рубежом, на что БМЗ тратит значительные валютные средства. С целью исключения валютных затрат и увеличения рабочего ресурса алюминиевых роликов на его рабочих поверхностях интенсифицированным методом АМДО в электрически активированном электролите ЭЩ 2 формировалось износостойкое оксидо-керамическое покрытие толщиной до 60 мкм. Стойкость роликов с таким покрытием не уступает импортным керамическим аналогам, а их стоимость более, чем в 2,5 – 3 раза ниже.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено:

1) применение для упрочнения металлических поверхностей разработанного интенсифицированного процесса электроискрового легирования с дополнительной ультразвуковой пластической деформацией упрочняемого материала при анодно-катодных взаимодействиях обеспечивает интенсификацию в 2–3 раза энерго- и массопереноса с получением покрытий увеличенной в 1.5–2.5 раза толщины в наноструктурированном состоянии, с повышенной в 2.0–2.5 раза прочностью за счет увеличения в 4–6 раз плотности дислокаций и снижения в 1.5–2.0 раза уровня остаточных напряжений в его структуре, что обусловлено процессами их релаксации. Отмечено, что доминирующее влияние на характер и интенсивность массопереноса и анодно-катодных взаимодействий оказывают состояние упрочняемой поверхности и амплитуда импульсных колебаний при ее ультразвуковом деформировании, а величина энергозатрат на процесс упрочнения снижается в 1.5–2.5 раза.

2) применение интенсифицированного комбинированным энерго-механическим воздействием процесса АМДО позволило увеличить уровень энергетического воздействия на осидируемый объект без принудительного наращивания вольтамперных характеристики с помощью серийного оборудования, что обеспечило энергосберегающий эффект и сократило потребляемую при формировании покрытий мощность более чем в 2 раза. Создаваемые в активированных электролитах покрытия с наноструктурированным состоянием поверхности с упорядоченным распределением дислокаций в стенках блоков, что определяет стабильные структуру и уровень напряжений в материале, имеют в 1.3–2.4 раза большую толщину, в 1.5 раза сниженный уровень остаточных напряжений. Созданные разработанным способом покрытия являются защитным барьером для образования в основе металла растягивающих напряжений, что предотвращает его разрушение в условиях циклических знакопеременных нагрузок и позволяет прогнозировать долговременную эксплуатацию таких изделий в условиях интенсивного абразивного износа, термоциклирования, высоких температур, агрессивных сред.

Полученные результаты характерны для широкой гаммы алюминиевых и титановых сплавов, включая литейные и высокопрочные.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чигринова, Н.М. Физическая модель энергетической активации процесса анодного микродугового оксидирования / Н.М. Чигринова, А.А. Кулешов, В.В. Нелаев // Инженерно-физический журнал. – НАНБ, 2009. – Вып.5. – С. 1004–1013.
2. Чигринова, Н.М. Интенсификация процесса массопереноса при формировании покрытий методом АМДО / Н.М. Чигринова // Материалы. Технологии и оборудование для нанесения функциональ-

- ных защитных покрытий: материалы Междунар. симпозиума, Минск, 30 марта 2007 г. – Минск, 2007. – С. 12–14.
3. Чигринова, Н.М. Применение технологии электроискрового легирования с ультразвуковым модифицированием для восстановления изношенных поверхностей / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов // Передовые технологии в производстве материалов и восстановлении изношенных поверхностей: материалы II Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 1997 г. – Минск, 1997. – С. 12–16.
 4. Chigrinova, N. Theoretical model of the engineering of metal surfaces by microplasma-spraying alloying with the alternative intensity of the mechanical impact / ISSN 1068 – 3755, Surface engineering and Applied electrochemistry, USA, 2010, Vol.46, № 1, pp.21–261.
 5. Чигринова, Н.М. Микроплазменное легирование с ультразвуковым модифицированием поверхности / Н.М. Чигринова, А.А. Кулешов, В.В. Нелаев // Электронная обработка материалов. – НАН Молдовы. – Кишинев, 2010. – № 2.(262) – С.27–34.
 6. Верхотуров, А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании / А.Д. Верхотуров. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 323 с.
 7. Влияние технологических режимов механизированного электроискрового легирования на качество получаемой поверхности / Петров Ю.Н. [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1965. – № 3. – С. 45–49.
 8. Устройство управления микроплазменным легированием с целью минимизации энергозатрат: пат. 5240 Респ. Беларусь МПК (2006) В 23Н 7/26 / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, В.В. Чигринов, А.В. Дроздов; заявитель Государственное научное учреждение «Ин-т порошковой металлургии». – № u 20080534, заявл.28.06.2008. опубл. 30.04.2006.
 9. Чигринова, Н.М. Особенности получения оксидных керамических покрытий на Al-отливках / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.А. Кухарев, В.В. Овчинников // Литейное производство. – Москва, 1999. – № 11. – С. 24–26.
 10. Чигринова, Н.М. Микроплазменно-химическая обработка материалов – эффективное средство продления ресурса рабочего времени изделий из них / Н.М. Чигринова // Порошковая металлургия. – Минск, 2000. – Вып. 23. – С. 91–98.
 11. Чигринова, Н.М. Микродуговые оксидо-керамические покрытия с фуллереновым наполнением / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, Э.М. Шпилевский, В.И. Прокошин // Фуллерены и фуллереноподобные структуры в конденсированных средах: материалы Междунар. симпозиума, Минск. – июнь 2004. – С. 93–98.
 12. Чигринова, Н.М. Особенности формирования керамических покрытий методом АМДО на поршнях высокофорсированных двигателей / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов // Порошковая металлургия. – Минск, 1998. – Вып. 21. – С. 97–100.
 13. Чигринова, Н.М. Улучшение тепловой защиты поршней в двигателях внутреннего сгорания методом анодного микродугового оксидирования / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.А. Кухарев // Вестн НАНБ. Серия физико-технических наук. – Минск, 2000. – № 2. – С. 45–48.
 14. Чигринова, Н.М. Тепловая защита поршней высокофорсированным анодным микродуговым оксидированием / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.А. Кухарев // Защита металлов. – Москва, 2000. – Т. 36, № 3. – С. 303–309.