

**СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ
МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ, НА
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ В АНОДНО-КАТОДНОМ
РЕЖИМЕ**

**А.В. Коломейченко д.т.н. доц.; М.С. Грохольский аспирант;
А.В. Козлов аспирант; Мусалитин М.В. студент;
Измашкин М.М. студент**

ФГБОУ ВПО Орел ГАУ, г. Орёл, Россия

В работе рассматривается перспективный способ формирования износостойких и коррозионностойких оксидокерамических покрытий в электролитетипа «КОН- Na_2SiO_3 » под действием напряжения, подаваемого при помощи специального источника питания. Приводятся некоторые физико-механические и эксплуатационные свойства данных покрытий.

Толщина покрытий, формируемых МДО, зависит от их функционального назначения и может варьироваться в широких пределах. Так, например, в работе показано, что для соединений, работающих с относительно небольшой скоростью скольжения контактирующих поверхностей, целесообразна толщина упрочнённого слоя покрытия 50...80 мкм. В другой работе отмечается, что толщина упрочнённого слоя покрытия, достаточная для обеспечения высокой износостойкости соединения, должна быть не менее 80...100 мкм. Однако наилучшей в технологическом отношении, по мнению этих авторов, является толщина 180...230 мкм, позволяющая обеспечить длительную долговечность соединения, работающего даже в условиях абразивного изнашивания. Относительно наибольшей толщины покрытий, сформированных из электролита типа «КОН- Na_2SiO_3 », у учёных также нет единого мнения. Так, например, в работе отмечено, что их толщина находится в интервале 300...400 мкм. Однако при этом не указывается ни марка сплава, на котором выполнялись исследования, ни режимы МДО. В работе рассмотрен способ получения покрытий толщиной до 800 мкм. Однако использование при этом электролита со значительной концентрацией жидкого стекла приводит к тому, что даже при тщательном промывании сформированного упрочнённого слоя водой большая его часть удаляется, так как он в основном состоит из поверхностного технологического слоя. В тоже время получение упрочнённого слоя значительной толщины увеличивает стоимость обработки и уровень остаточных напряжений в покрытии, которые могут снижать прочность его сцепления с металлической основой. При этом следует учитывать то, что с ростом толщины упрочнённого слоя увеличивается и его твёрдость. Это связано с постоянно увеличивающимся термическим воздействием МДР на материал покрытия, уменьшением теплоотвода в электролит и металлическую подложку и возрастанию формовочного напряжения, что приводит к увеличению содержания $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$ в оксидокерамических покрытиях, сформиро-

ванных на алюминиевых сплавах [1]. В связи с выше изложенным, необходимую толщину покрытия следует выбирать с учетом технико-экономических требований, т.е. она должна быть минимальной, но удовлетворяющей условиям эксплуатации изделий.

В целом покрытия, формируемые на деформируемых алюминиевых сплавах с использованием рациональных режимов МДО и составов электролитов с удалённым технологическим слоем, имеют большую толщину, нежели на литейных, антифрикционных или на поверхностях, полученных с использованием сварочных проволок и припоев. Это связано, главным образом, с высоким содержанием кремния в составе литейных алюминиевых сплавов, благодаря которому формируемые на них покрытия имеют большую толщину поверхностного рыхлого слоя, который необходимо удалять механической обработкой.

При МДО покрытия формируются за счёт перерабатывания МДР поверхностного слоя оксидируемого сплава, благодаря чему имеют очень высокую прочность сцепления, находящуюся на уровне предела прочности сплава, которая может достигать 350...380 МПа, что соизмеримо с пределом прочности дуралюминов [1]. Это объясняется тем, что упрочнённый слой образуется в основном из обрабатываемого материала с передвижением границы раздела вглубь оксидируемого металла. Однако данная особенность формирования покрытий способом МДО приводит к тому, что незначительно снижаются показатели механических свойств детали. Обусловлено это тем, что покрытие уменьшает площадь сечения металла, из которого изготовлено изделие. При толщине 140 мкм эта площадь уменьшается на 21% (если покрытие полностью формируется из металла основы) и на 14% (если покрытие формируется на 2/3 из металла основы, а на 1/3 – за счёт электролита) [1]. Высокая прочность сцепления обусловлена также механическим сцеплением так называемого «анкерного типа», которое получается при частичном оплавлении оксидируемого алюминиевого сплава в зоне контакта с МДР и перемешивании металлической основы и покрытия, а также силами химической связи, возникающей в результате такого перемешивания. Прочность сцепления покрытий, формируемых МДО, существенно зависит от концентрации компонентов электролита. Так, например, в силикатно-щелочном электролите при концентрации жидкого стекла 65...70 г/л она значительно снижается и становится менее 20 МПа.

Немаловажное значение среди других свойств покрытий занимает их пористость, которая образуется при горении МДР. Она включает в себя сквозную и замкнутую (тупиковую часть открытой пористости). Причём последняя образуется в результате термолиза компонентов электролита и оплавления МДР их продуктов (например, SiO_2), в результате чего происходит частичное заполнение существующих сквозных пор. После перехода МДР в другое место пора, в которой он функционировал, превращается в канал с кратероподобным оплавленным устьем на внешней стороне покрытия (рисунок 1.1) [1].

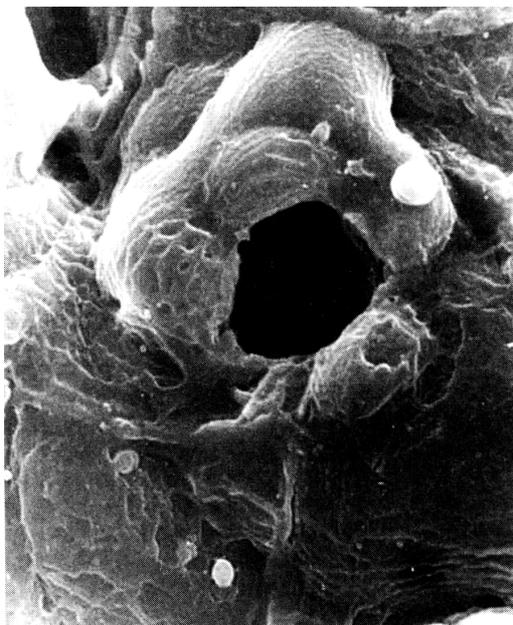


Рис.1.1. РЭМ-фотография поры с внешней стороны покрытия

На пористость покрытий существенное влияние оказывают плотность тока, а также состав и температура электролита. Поверхностный слой покрытия характеризуется наибольшей пористостью (для деформируемых сплавов в интервале 10...30%, литейных – 15...40%), упрочнённый слой имеет относительно постоянную пористость (для деформируемых сплавов в интервале 5...10%, литейных – 10...15%), а переходный слой – не более 5% независимо от марки оксидируемого сплава. При температуре электролита 10...20°C сформированный упрочнённый слой покрытия имеет минимальную пористость, а при её увеличении до 50...60°C пористость существенно возрастает, главным образом, за счёт растворения электролитом слабых мест в покрытии, в основном в зонах замкнутых пор[1].

Следует также отметить, что размер пор может колебаться от 2 до 15 мкм, причём размер основного количества пор (около 90%) в упрочнённом слое не превышает 6 мкм. При приближении к переходному слою покрытия его пористость уменьшается. Количество пор среднего размера становится меньше, а крупные поры полностью отсутствуют[1].

Для химически инертных покрытий, сформированных МДО, основным показателем их коррозионной стойкости будет именно сквозная пористость. На использование данных покрытий для повышения износостойкости подвижных соединений пористость также будет оказывать существенное влияние. С одной стороны, поры уменьшают площадь поперечного сечения и действуют как концентраторы напряжений, которые приводят к более интенсивному изнашиванию покрытия. С другой стороны, наличие определённого процента пористости, в которой будет находиться масло, может благоприятно сказаться на изнашивании не только покрытия, но и соединения деталей как при его приработке, так и в дальнейшей эксплуатации.

Фазовый состав покрытий, формируемых на различных сплавах, отличается как качественно, так и количественно. Например, упрочнённые слои,

полученные на деформируемых сплавах АМг6 и В96 состоят преимущественно из $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$, а на сплавах А99 и Д16 - из $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$. Упрочнённый слой, сформированный на литейном сплаве АК7ч, состоит, в основном, из фаз $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$ и муллита ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \times 2\text{SiO}_2$). Наиболее высокими физико-механическими свойствами и твёрдостью около 24,6 ГПа обладает $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$. Фаза $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$ имеет твёрдость порядка 14,3 ГПа, а муллит – около 10 ГПа. На количественное соотношение фаз по толщине упрочнённого слоя существенное влияние оказывают режимы МДО, состав и концентрация компонентов электролита, а также его температура. Так, например, увеличение концентрации Na_2SiO_3 выше рациональной или увеличение содержания кремния в оксидируемом металле приводят к увеличению $3\text{Al}_2\text{O}_3 \times 2\text{SiO}_2$ в покрытии, в основном в его поверхностном слое, за счёт уменьшения количества $\alpha -$ и $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$.

Отличительной особенностью данных покрытий является существенное изменение их твёрдости по толщине не зависимо от химического состава оксидируемого металла и режимов МДО. При этом область с наибольшей твёрдостью располагается на расстоянии 20...80 мкм от границы раздела «металлическая основа-покрытие», а по мере приближения к поверхностному слою она существенно снижается. Например, на деформируемом сплаве Д16Т твёрдость покрытия, сформированного на рациональных режимах, после удаления поверхностного слоя составляет 6...8 ГПа. При перемещении вглубь покрытия его твёрдость возрастает до 15...17 ГПа и на расстоянии 40...60 мкм от границы раздела «металлическая основа-покрытие» достигает своего максимального значения (около 22 ГПа). В переходном слое наблюдается резкое снижение твёрдости покрытия, обусловленное экранирующим влиянием оксидируемого металла. Твёрдость покрытий, сформированных на литейных сплавах, существенно ниже, чем на деформируемых. Так, например, на литейном сплаве АК7ч твёрдость, после удаления поверхностного слоя, составляет 3,5...4 ГПа. При приближении к металлической основе она увеличивается до 7...8 ГПа и достигает своего максимума (около 9 ГПа) на расстоянии 25...40 мкм от границы раздела «металлическая основа-покрытие», после чего существенно снижается. Изменение твёрдости покрытий по толщине обусловлено спецификой их формирования и связано не с уплотнением, а с изменением фазового состава упрочнённого слоя.

При формировании покрытий способом МДО в поверхностном слое оксидируемой детали возникают сжимающие внутренние напряжения, что в ряде случаев способствует повышению её усталостной прочности. Это связано с тем, что объём образующихся при МДО фаз $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$, составляющих значительную часть упрочнённого слоя покрытия, больше объёма исходного оксидируемого металла. С увеличением концентрации КОН в электролите внутренние напряжения также увеличиваются, однако во всех случаях они не превышают 12 МПа.

Износостойкость покрытий, сформированных МДО на рациональных режимах, очень высока и сравнима с композитами на основе карбида вольфрама, борированной сталью и корундом (рисунок 1.2).

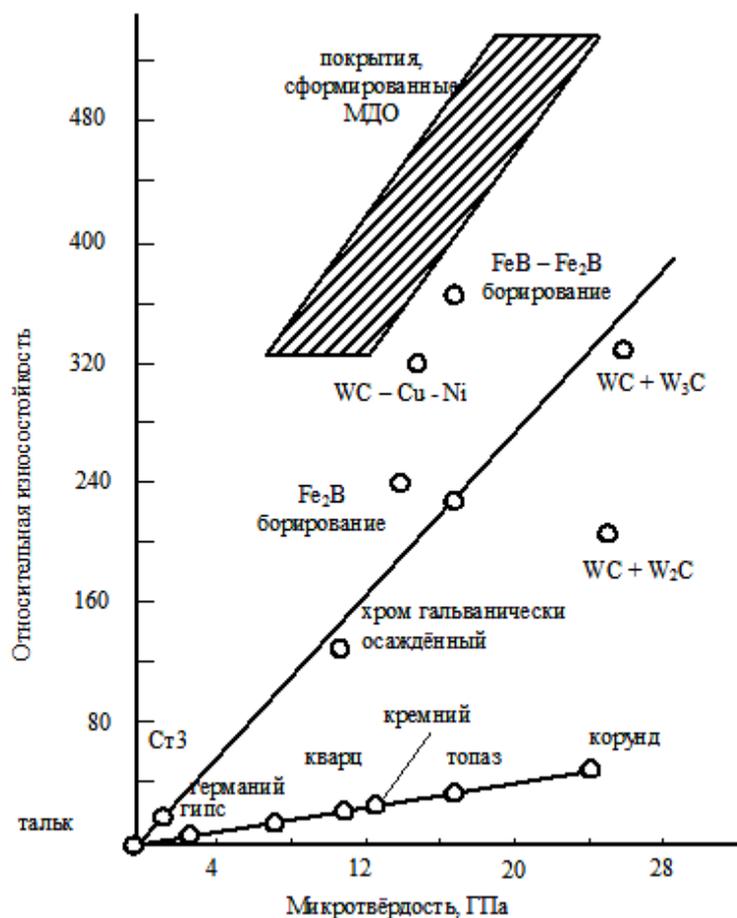


Рис.1.2. Диаграмма относительной износостойкости материалов

Это позволяет им работать в определённом диапазоне нагрузок, скоростей и смазочных сред в паре со многими материалами. При этом необходимо отметить, что предварительная механическая обработка покрытия, заключающаяся в удалении его поверхностного слоя и существенном снижении шероховатости, резко уменьшает изнашивание как детали с покрытием, так и сопрягаемой с ней детали подвижного соединения. В целом покрытия, сформированные МДО на деформируемых сплавах, обладают более высокой износостойкостью, нежели покрытия на литейных сплавах, главным образом за счёт того, что деформируемые сплавы имеют большую плотность и меньшую величину зерна, что приводит к более высоким физико-механическим свойствам сформированных на них упрочнённых слоёв.

Скорость коррозии в 3%-ном растворе NaCl покрытий, сформированных МДО на рациональных режимах на сплаве Д16, без учета сквозной пористости составляет около 1 мкм в год [1]. Однако в указанных работах не приводятся данные о том, как влияет сквозная пористость упрочнённого слоя на этот показатель.

В то же время, несмотря на высокие твёрдость, износостойкость и прочность сцепления покрытия, сформированные МДО на рабочих поверхностях деталей, при граничной смазке или взаимодействии без смазочного материала, возникающие как при приработке, так и при эксплуатации подвижных соединений, обладают высокими фрикционными свойствами. Это приво-

дит к тому, что покрытие вызывает повышенный износ (до 30%) ответной, зачастую дорогостоящей, детали типа «вал» при их взаимодействии, за счёт чего происходит снижение износостойкости подвижного соединения в целом. Кроме этого, в зоне фрикционного контакта взаимодействующих рабочих поверхностей происходит значительное тепловыделение, в ряде случаев приводящее к разрушению покрытия из-за локализованного нагрева в зонах сквозных пор и изменения прочностных свойств его металлической основы. Для устранения указанных недостатков целесообразно использовать технологические приёмы, позволяющие свести их к минимуму.

Список использованных источников

1. Суминов, И.В. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов [Текст] В 2-х т. Т. 2 / И.В. Суминов, П.Н. Белкин, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, Б.Л. Крит, А.М. Борисов – Москва: Техносфера – 2011. – 512с.
2. Хромов, В.Н. Повышение износостойкости внутренних цилиндрических поверхностей деталей машин микродуговым оксидированием и нанесением медного слоя: монография/ В.Н. Хромов, А.В. Коломейченко, Н.В. Титов, В.Н. Логачев.- Орел: Орел ГАУ, 2008-100с.

Abstract

PROPERTIES OF THE COVERINGS FORMED MDO, ON ALUMINIUM ALLOYS IN AN ANODNO-CATHODIC MODE

Kolomejchenko A.V., Groholsky M.C., Kozlov A.V., Musalitin M.V, Izmashkin M.M.

In this paper we consider a promising method for forming a wear-resistant and corrosion-resistant coatings oksidokeramicheskikh in the electrolyte such as «KOH-Na₂SiO₃» under the influence of the voltage supplied by a special power supply. Are some of the physical, mechanical and performance properties of these coatings.

Анотація

ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТТІВ, ЩО ФОРМУЮТЬСЯ МІКРОДУГОВОГОКСИДУВАННЯМ, НА АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВАХ В АНОДНО-КАТОДНОМУ РЕЖИМІ

Коломейченко А.В., Грохольський М.С., Козлов А.В., Мусалітін М.В., Ізмашкін М.М.

В роботі розглядається перспективний спосіб формування зносостійких і корозійностійких оксидокерамічних покриттів в електроліті типу «KOH-Na₂SiO₃» під дією напруги, що подається за допомогою спеціального джерела живлення. Наводяться деякі фізико-механічні та експлуатаційні властивості даних покриттів.