

Наиболее плотные пленки оксида алюминия получены при температуре ниже 10°C. На рисунке 2а представлена морфология поверхности образца традиционного анодирования, которое характеризуется глобулярной структурой и наличием большого количество пор. Образец 2б, полученный методом микродугового оксидирования, имеет рыхлую, хорошо развитую поверхность, с порами большого диаметра (до нескольких мкм). На поверхности образца, изготовленного в процессе ВВЭО (рис. 2в), также наблюдается глобулярная структура. Однако, в отличие от традиционного анодирования, она имеет более плотную структуру с низкой шероховатостью и меньшим количеством пор.

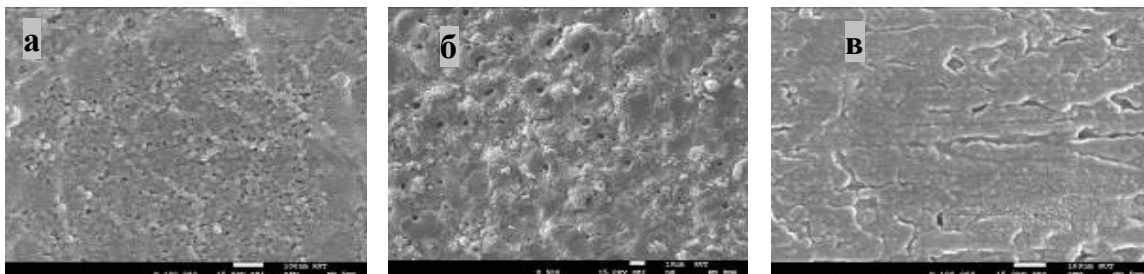


Рисунок 2 - Морфология поверхности образцов: а) традиционное анодирование, б) микродуговое оксидирование, в) высоковольтное электрохимическое оксидирование

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что технология ВВЭО позволяет формировать на поверхности сплавов алюминия слои, обладающие высокой твердостью и износостойкостью с низкой шероховатостью.

Анодированные алюминиевые подложки с теплоотводящими слоем могут быть использованы при изготовлении печатных плат, используемых как основа для размещения LED элементов для осветительной аппаратуры при конструировании гибридных микросборок на крупногабаритных подложках, объединяющих бескорпусные кристаллы, тонкопленочные гибридные интегральные схемы с многоуровневыми системами межсоединений.

УДК621.791.722

### **Получение неразъемного соединения при изготовлении ротора турбокомпрессора для ОАО «Борисовский завод агрегатов»**

Студент гр. 304815 Поболь А.И.

Научный руководитель – Горанский Г.Г.

Белорусский национальный технический университет  
г. Минск

Среди ведущих мировых производителей и разработчиков дизельных двигателей сформировалась концепция, что система турбонаддува рассматривается как средство форсирования двигателей и подавляющее большинство современных моделей дизелей проектируются и разрабатываются с наддувом. При этом система турбонаддува является неотъемлемым компонентом современного экологически чистого двигателя.

Смысл наддува двигателя внутреннего сгорания – принудительная подача сжатого воздуха в цилиндры двигателя за счет использования энергии выхлопных газов. Тем самым обеспечивается полнота сгорания увеличенной дозы топлива, что позволяет при прежнем рабочем объеме и тех же оборотах двигателя получать большую мощность.

Турбокомпрессор состоит из осерадиального центробежного компрессора и радиально-осевой турбины, связанных между собой при помощи общей «жесткой» оси, называемой валом ротора. Колесо турбины получают литьем из жаропрочного никелевого сплава и присоединяют к валу ротора методом сварки.

Традиционный вариант соединения при изготовлении радиально-осевой турбины включает получение узла нагревом с пластической деформацией при трении. Свойства получаемых таким методом деталей отличаются нестабильностью. Использование при таком соединении жаропрочных сплавов с низколегированными сталями, существенно отличающихся по характеристикам, ведет к образованию комплекса неоднородностей химического, структурного и механического характера, что оказывает влияние на проектирование и выбор материалов, технологию изготовления и испытания. Высока также вероятность образования интерметаллидных соединений в зоне соединения материалов, резко снижающих механическую прочность, пластичность и ударную вязкость соединений. Комплекс высоких значений свойств при нагреве трением разнородных сталей и сплавов получить сложно, а в случае изготовления полый конструкции, которая применяется для снижения теплопередачи от колеса турбины к подшипнику, практически невозможно.

Способ получения неразъемного соединения колеса и вала ротора турбокомпрессора с использованием электронно-лучевой сварки (ЭЛС) хорошо зарекомендовал себя в ведущих двигателестроительных фирмах в мире.

В наших работах проведен комплекс исследований и выполнены экспериментальные сварные соединения с использованием оборудования для ЭЛС на базе вакуумной камеры ВУ-1Б и аппаратуры ЭЛА 15 (СЭЛМИ, Сумы).

Исследованы и оптимизированы параметры получения соединений разнородных материалов - стали 40Х с серийным жаропрочным сплавом Inconel 713С. Для достижения требуемой глубины (8 мм) разработан комплекс оптимальных значений параметров – расстояние от среза пушки до соединяемой поверхности, ток луча, ток фокусировки, время оборота детали, опережение ванны расплавления относительно вертикали. Проведены эксперименты по выбору режима соединения деталей без дополнительной обработки лучом, с предварительным нагревом детали до ЭЛС и с последующим нагревом детали после сварки.

В образце, полученном ЭЛС предварительно ненагретых металлов, слой стали, непосредственно примыкающий к шву, вследствие быстрого охлаждения металла подвергается закалке с получением структуры мартенсита и твердостью до HV 650. В случае ЭЛС с предварительным нагревом скорость остывания металла низкая и закалочные структуры не образуются. ЭЛС с последующим нагревом позволяет значительно снизить твердость стали 40Х. Это ведет к формированию пластичного металла шва и более равномерному распределению напряжений в соединении.

Благодаря применению ЭЛС получено надежное соединение вала с колесом из сплава Inconel 713С (рисунок 1). Дефекты в соединении не обнаружены. Проведены металлографические и микродюрметрические исследования образцов соединений из разнородных материалов – сплава на основе Ni-Cr-Al и стали. Соединение представляет собою шов требуемой глубины, ширина которого составляет 1 - 4 мм на разном расстоянии от поверхности (рисунок 2). Материал шва – твердый раствор никеля с выделениями интерметаллидов и карбидов. Зоны термического влияния в стали и жаропрочном сплаве непротяженные.

Исследован фазовый состав, твердость, проведен анализ напряженно-деформированного состояния (методом рентгеновской тензометрии с использованием способа наклонной съемки) образцов сварных соединений, выполненных из разнородных материалов. В зоне сварного шва присутствуют благоприятные сжимающие напряжения со средним значением  $\sigma_{\phi} \approx 250$  МПа.



Рисунок 1 – Внешний вид ротора турбокомпрессора с колесом из сплава Inconel 713C и валом из стали 40X после ЭЛС

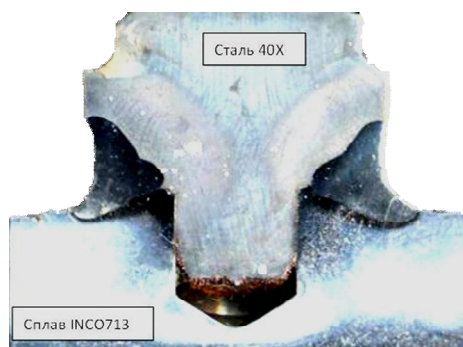


Рисунок 2 – Поперечное сечение зоны соединения разнородных материалов. Травление раствором  $\text{HNO}_3$  в этиловом спирте

Изготовлена экспериментальная партия роторов (12 шт.), совместно с ОАО «Борисовский завод агрегатов» проведены испытания роторов турбины. Испытания на разрыв образцов проводились на разрывной машине РД-20 БЗА. По техническим требованиям прочность на разрыв должна быть не менее 60 кН. При испытании ротора с колесом из сплава Inconel 713C зона соединения не претерпела разрушения, оно произошло на значительном удалении от зоны термического влияния (~100 мм) по валу из стали 40X. Прочность на разрыв роторов составила 100-136 кН.

УДК 537.521

### **Морфология и трибологические свойства покрытий молибден – углерод**

Магистрант – Степанова Е.А.  
Научный руководитель – Поболь И.Л., Станкевич Е.В.  
НИЦ «Плазмотег» ФТИ НАН Беларуси  
г. Минск

Нанесение нанокompозитных покрытий на изделия различного назначения позволяет варьировать их механические, оптические, электрические, магнитные, тепловые и химические свойства в широком диапазоне. Результатом модифицирования металлом является формирование в матрице углерода объектов нанометровых размеров, свойства которых влияют на физические характеристики получаемого материала. При изменении состава композиции металл-углерод, а также технологических параметров процесса ее получения, возможно в широких пределах модифицировать такие показатели, как твердость, тепло- и электропроводность, коэффициент трения, износо- и коррозионную стойкость материала, адгезию покрытий к основе. Необходимость создания новых материалов с заданными свойствами особенно актуальна для микро- и нанoeлектроники, радиотехники, приборо- и машиностроения, авиакосмической техники, медицины и биологии.

Одна из ключевых проблем, которые следует решить при создании нанокompозитных металлоуглеродных покрытий – генерация многокомпонентных потоков, осаждаемых на подложку. В качестве источника углерода обычно используют углеродсодержащие реакционные газы. Необходимый элементный состав потока достигается сложным и трудоемким подбором технологических режимов распыления каждого из катодов, состава и давления реакционного газа. Не всегда удается обеспечить равномерное перемешивание потоков, генерируемых из разных катодов.