



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

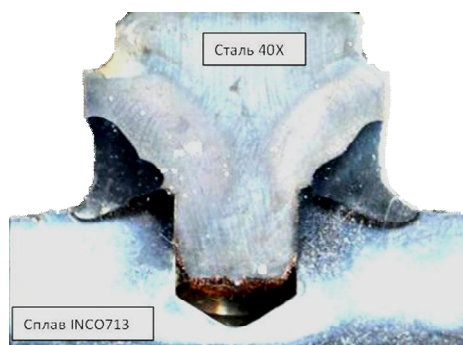


Рисунок 2 – Поперечное сечение зоны соединения разнородных материалов. Травление раствором  $\text{HNO}_3$  в этиловом спирте

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 713С зона соединения не претерпела разрушения, оно произошло на значительном удалении от зоны термического влияния (~100 мм) по валу из стали 40Х. 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.

В работе приводятся результаты исследования морфологии поверхности, твердости и трибологических характеристик полученных вакуумно-дуговым методом молибден-углеродных покрытий в зависимости от технологических параметров процесса осаждения. Покрытия наносили на вакуумной установке УВНИПА1-001 соосаждением из плазменных потоков, которые генерировались двумя импульсными (молибден и углерод) дуговыми источниками плазмы. Перед нанесением покрытий с помощью молибденовой плазмы проводилась очистка и нагрев подложек, в качестве которых использовали пластины из инструментальной стали марки Р6М5. Покрытия получали при различных режимах осаждения. Варьировались частота следования разрядных импульсов ( $F = 5 - 10$  Гц).

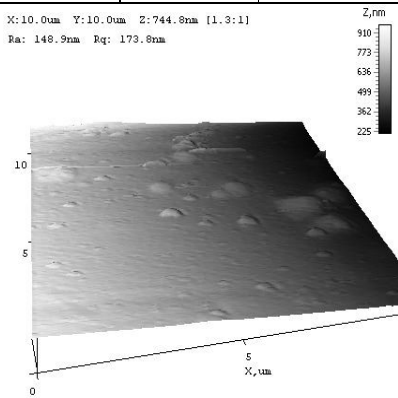
Морфология поверхности покрытий изучалась на атомно-силовом микроскопе NT-206 в режимах измерения топографии и фазового контраста. Элементный состав покрытий определялся методом энергодисперсионного рентгеноспектрального анализа на растровом микроскопе Philips SEM-515 с приставкой Genesis 2000. Измерение трибологических характеристик покрытий проводилось в режиме трения скольжения по схеме «палец – диск» на лабораторном стенде. Скорость вращения образца – 60 об/мин, нагрузка – 0,5 Н, в качестве контртела использовалась сталь ШХ-15. Микротвердость покрытий определялась методом восстановленного отпечатка на твердомере ПМТ-3 с помощью пирамиды Кнупа.

Анализ полученных результатов показал, что условия проведения процесса осаждения оказывают существенное влияние на фазовый состав и механические свойства покрытий (таблица).

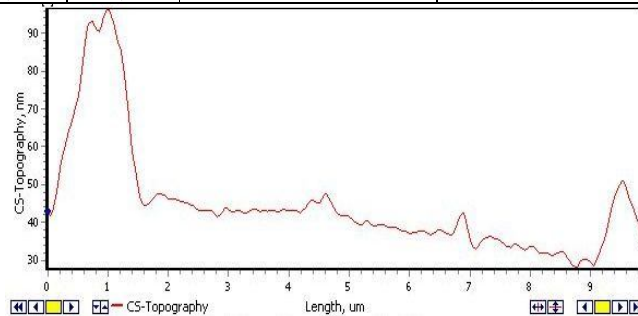
На рисунке 1 приведено изображение участка поверхности покрытия и профиля поверхности вдоль линии, проходящей через середину выбранного участка. В целом значение среднеквадратической шероховатости покрытий составляет  $\sim 149$  нм. Возможно, неоднородность рельефа связана с присутствием макродефектов на поверхности и ростом в покрытии карбидной фазы.

Таблица Технологические режимы и параметры покрытий молибден – углерод

Образец	Параметры источников плазмы, F, Гц		Элементный состав, мас. %		Микротвердость, ГПа	Коэффициент трения
	ИИ-Мо	ИИ-С	Mo	C		
1	2	10	6,55	93,45	11	0,15
2	10	8,5	20,02	79,98	12	0,2
3	10	7	25,39	74,61	15	0,06
4	10	5	26,15	73,85	14	0,023



а



б

Рисунок 1. АСМ-изображение поверхности (а) и профиль поверхности (б) покрытий молибден – углерод

Микротвердость покрытий составляет 11 – 15 ГПа в зависимости от условий осаждения. Коэффициент трения изменяется в 6 раза с увеличением концентрации углерода от 73 до 93 мас. %, достигая минимального значения 0,023 при содержании углерода ~ 73 мас. % (рис. 3).

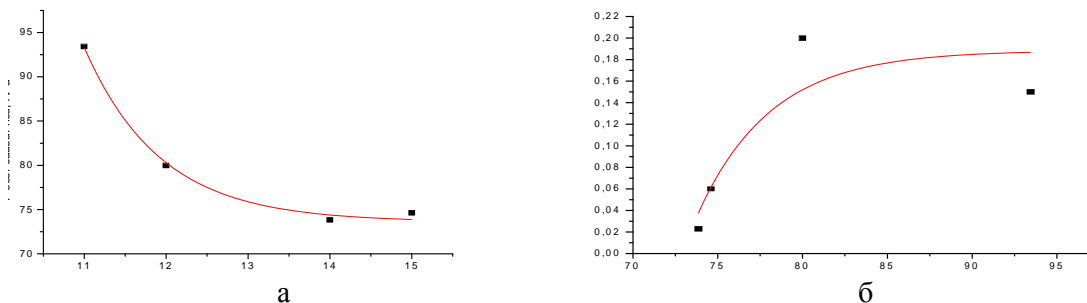


Рисунок 2 – Зависимость микротвердости(а) и коэффициента трения (б) покрытий молибден – углерод от содержания в них углерода

При трибологических испытаниях в режиме сухого трения на ранних стадиях испытаний регистрируется равномерный износ поверхностного слоя. Для покрытий с содержанием углерода ~ 73 мас. % коэффициент трения без смазки после выхода на режим достигал значения 0,023 и затем не изменялся, что свидетельствовало о стабильности поведения образцов.

Таким образом, изменяя условия осаждения, можно получать одно- или многофазные нанокompозитные металлоуглеродные покрытия, обладающие достаточно высокой твердостью и низким коэффициентом трения. Это сочетание характеристик делает предлагаемые покрытия перспективными для применений на деталях автомобильного двигателя и топливной аппаратуры.

УДК 621.791

### Электронно-лучевая сварка сталей Р6М5 и 5ХНМ при изготовлении деформирующей оправки

Магистрант Юревич С.В., студент группы 104816 Бирюков А.А.  
 Научный руководитель – Горанский Г.Г.  
 Белорусский национальный технический университет  
 г. Минск

Целью настоящей работы является исследование возможности получения соединения разнородных сталей Р6М5 и 5ХНМ с помощью электронно-лучевой сварки (ЭЛС).

При производстве заготовок переменного профиля для малолистовых рессор на Минском рессорном заводе весьма актуальна проблема долговечности деформирующей оправки, обеспечивающей получение требуемого переменного профиля с высокими точностными параметрами. Это обусловлено особенностями технологического процесса формообразования полос переменной по длине толщины горячей прокаткой. Формообразование полос с переменным по длине профилем для малолистовых рессор осуществляется путем прокатки нагретой до температуры 950-1000°С исходной заготовки на профильной деформирующей оправке при ее перемещении через неприводные валки.

Деформирующая оправка (рисунок 1) работает в условиях непрерывного истирания ее рабочих оформляющих поверхностей с деформируемым металлом, испытывая большие напряжения при статических нагрузках, а иногда при высокой и