

В. С. Марцинковский, директор, к.т.н., доц.; Лазаренко А.Д., техник-конструктор; студент СумГУ (ООО «ТРИЗ» ЛТД, г. Сумы, Украина)

Повышение качества элементов уплотнительных узлов компрессорного оборудования. (Часть 1)

Предложен новый способ изготовления плавающих колец уплотнительных узлов компрессорного оборудования, отличающийся тем, что на их внутреннюю цилиндрическую поверхность перед лужением оловом методом электроэрозионного легирования наносят промежуточный слой из меди, повышающий прочность сцепления стальной подложки с антифрикционным баббитовым слоем на 35%.

Ключевые слова: плавающее уплотнение, защитная втулка, износ, электроэрозионное легирование, поверхностный слой, микротвердость.

Запропоновано новий спосіб виготовлення плаваючих кілець ущільнювачів вузлів компресорного устаткування, що відрізняється тим, що на їх внутрішню циліндричну поверхню перед лудінням оловом методом електро-ерозійного легування наносять проміжний шар з міді, що підвищує міцність зчеплення сталевий під-ложки з антифрикційним бабітові шаром на 35%.

Ключові слова: плаваюче ущільнення, захисна втулка, знос, електроерозійне легування, поверх-логий шар, микротвер-дість.

A new manufacturing method of seal assemblies' floating rings of the compressor equipment is proposed, characterized in that an intermediate layer of copper is to be applied on the rings' inner cylindrical surface using the electroerosive alloying method before tinning, increasing joint strength between steel substrate and antifriction babbitt layer by 35%

Keywords: floating seal, protection sleeve, wear, electroerosive alloying, surface layer, microhardness.

Постановка проблемы в общем виде

Две трети всех отказов компрессоров происходят вследствие нарушения работоспособности уплотнений. Поэтому одним из наиболее ответственных узлов, обеспечивающих герметичность компрессорного агрегата, его надежную, безопасную и безотказную работу, является узел уплотнения.

Создание надежных уплотнительных узлов, обеспечивающих герметичность в течение длительного времени в широком диапазоне изменения температур и давлений, является одной из основных проблем, возникающих при проектировании компрессорных машин и агрегатов.

Анализ последних исследований и публикаций

Работа масляного уплотнения основана на разности давлений запираемой жидкости и рабочей среды, что позволяет полностью исключить попадание агрессивных газов в окружающую среду. Величина перепада давления поддерживается в пределах 0,035-0,05 МПа (в особых случаях 0,08-0,25 МПа) [1].

Для противодействия рабочей среде, давление которой на выходе компрессорного агрегата составляет 35-40 МПа, в запирающую камеру подается масло, под давлением на 0,035-0,05 МПа выше напора рабочего газа (рис. 1). Под действием давления внутреннее масло - газовое кольцо 1 прижимается к корпусу уплотнения 2; наружное плавающее кольцо 3 входит в контакт с крышкой уплотнения 4, образуя герметичную запирающую камеру. Для предотвращения попадания рабочей среды между защитной втулкой (ЗВ) 5 и валом 6 предусмотрено резиновое кольцевое уплотнение.

Совокупность факторов, таких как малые зазоры, между внутренним кольцом 1 и защитной втулкой 5, высокое давление уплотняющей среды, высокие частоты вращения вала 6, обуславливают нагрев плавающих уплотнительных колец. Поэтому минимальный зазор между плавающими кольцами и ЗВ устанавливается таким, чтобы обеспечить расход затворной жидкости, необходимой для их охлаждения.

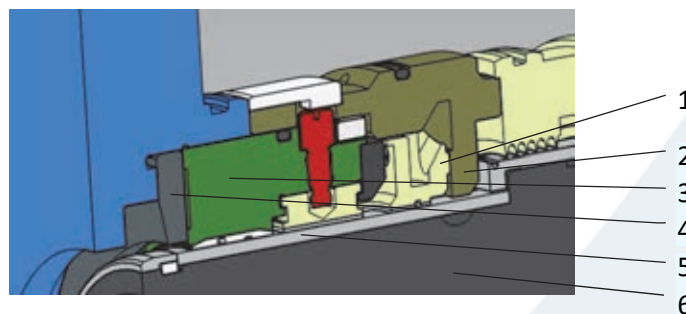


Рис. 1. Плавающее уплотнение центробежного компрессора

Увеличение расчетного зазора, связанного с износом рабочей поверхности ЗВ 5, приводит к увеличенному расходу уплотнительной жидкости, что приводит к неоправданным потерям мощности.

При повышенных вибрациях на переходных режимах и режимах отличных от номинальных возникают высокие нагрузки на антифрикционные поверхности плавающих уплотнительных колец, наружную поверхность ЗВ, контактирующие торцовые поверхности плавающих колец, а также поверхности корпуса и крышки компрессора.

Как правило, в качестве антифрикционного материала применяют баббиты марок Б83 и Б88, а в качестве основы – сталь 20 ГОСТ 1050-88.

Перед заливкой баббитов поверхность стального вкладыша подвергается лужению. Переходной слой, обуславливающий прочную металлическую связь, при этом отсутствует, что отрицательно влияет на качество сцепления, теплопроводность и работоспособность уплотнения.

В [2], для создания более надежного сцепления, наносимого металлизацией напылением металла, предлагаются различные способы. Применяют, например, гальваническое наращивание меди, а также металлизация в защитной среде.

Существует большое количество различных методов нанесения покрытий из мягких металлов на стальные изделия: гальванический способ, металлизация напылением и др. [3]. Сравнение их достоинств и недостатков позволило выделить как наиболее перспективный метод электроэрозионного легирования (ЭЭЛ), имеющий ряд специфических особенностей: возможность использования в качестве обрабатываемых материалов как чистых металлов, так и их сплавов, металлокерамических композиций, тугоплавких соединений и т.п.; легирование можно осуществлять в строго указанных местах не защищая при этом остальную поверхность детали; высокая прочность сцепления нанесенного материала с основой; отсутствие нагрева детали в процессе обработки и др.

На основании анализа технологии изготовления вкладышей подшипников, изучения условий их работы и причин выхода из строя нами предлагается на стальную подложку перед лужением оловом наносить методом ЭЭЛ слой из меди. Формирование слоя из меди, прочно сцепленного, с одной стороны, со стальной подложкой, а с другой - со слоем олова (образование твердых растворов замещения) и баббита, обеспечит более прочное сцепление стальной подложки с баббитом, а также более интенсивный отвод тепла из зоны трения.

Согласно [4] ЗВ работает в тяжелых условиях: давление до 35-40 МПа, агрессивная среда, неблагоприятный температурный режим работы.

Таким образом, поверхность ЗВ должна быть выполнена из твердого износостойкого материала, а ее основа - обладать достаточной пластичностью для обеспечения возможности напрессовки на вал.

Такие требования обуславливают необходимость применения композиционных материалов типа «основа-покрытие», сочетающих в себе защитные свойства покрытий с механической прочностью основы.

Традиционно в плавающих уплотнениях компрессоров в качестве материала основы ЗВ применяется монель-металл (сплав на основе никеля, содержащий в качестве основного легирующего элемента 27-37 % меди) [1]. Этот сплав обладает хорошей коррозионной стойкостью, достаточно высоким пределом прочности и хорошей пластичностью в горячем и холодном состояниях. Для увеличения ресурса работы ЗВ на рабочую поверхность плазменным напылением или вакуумной наплавкой наносится износостойкий материал на основе никеля - Хастеллой [5].

Анализ технологии изготовления монелевых ЗВ показал, что это очень трудоемкий процесс, характеризующийся: значительными затратами на материалы; многоуровневым контролем как материала основы, так и материала покрытия; сложной технологией нанесения покрытия; низким коэффициентом использования материала (0,1-0,3); большим процентом брака (около 20%); необходимостью применения специализированной технологической линии. Все это вызывает острую необходимость в создании новой, более экономичной, технологии их изготовления.

Следует отметить, что торец плавающего кольца уплотнения контактирует с корпусом компрессора, изготовленного из стали 30Х13, твердость которой, согласно ГОСТа 25054-81, составляет 235...277НВ. В данном случае обе контактирующие поверхности также подвергаются износу и нуждаются в повышении износостойкости.

В машиностроении широко применяются различные методы получения износостойкого поверхностного слоя деталей, работающих в условиях трения. К основным методам относятся: термообработка, различные виды химико-термической обработки, физико-термическая, химическая обработка, поверхностное пластическое деформирование (ППД), различные электрофизические методы в том числе и ЭЭЛ.

Таким образом **целью работы** является повышение качества элементов уплотнительных узлов центробежных компрессорных машин, путем формирования методом ЭЭЛ на поверхностях трения износостойких поверхностных слоев.

Повышение прочности сцепления поверхности плавающего уплотнительного кольца с антифрикционным баббитовым слоем

Методика исследований

Влияние материала легирования, среды, режимов ЭЭЛ на качественные параметры покрытий определялось на установке модели «ЭИЛ-8А». Основные режимы ее работы приведены в табл. 1.

Таблица 1. Режимы работы установки ЭЭЛ модели «ЭИЛ - 8А»

Номер режима	Напряжение холостого хода $U_{х.х}$, В	Рабочий ток I_p , А		Энергия разряда W_u , Дж	
		C=150 мкФ	C=300 мкФ	C=150 мкФ	C=300 мкФ
1	16	0,2-0,4	1,0-1,4	0,01	0,02
2	23	0,3-0,5	1,4-1,6	0,02	0,05
3	30	0,5-0,6	1,6-2,0	0,04	0,08
4	37	0,6-0,7	1,8-2,0	0,06	0,12
5	47	0,7-0,8	2,0-2,2	0,10	0,20
6	57	0,8-0,9	2,2-2,4	0,15	0,30
7	67	0,9-1,0	2,4-2,7	0,20	0,40
8	77	1,0-1,2	2,6-2,8	0,27	0,55
9	87	1,1-1,3	2,6-3,5	0,34	0,68

ЭЭЛ проводилось медным электродом, как в воздушной среде, так и в среде аргона на образцах размером 10×10×10 мм из стали 20 (175-180 НВ).

Эрозия анода и привес катода определялись на аналитических весах ВЛА-200 с точностью до 10⁻⁴ г. Толщину слоя покрытия измеряли микрометром, а шероховатость поверхности - на приборе профилографе-профилометре мод. 201 завода «Калибр» путем снятия и обработки профилограмм. Структуры поверхностного слоя изучали на оптическом микроскопе «Неофот-2», где проводилась оценка качества слоя, его сплошности, толщины и строения зон подслоя - диффузионной зоны и зоны термического влияния (ЗТВ). Одновременно на микротвердомере ПМТ-3, при различной нагрузке, проводили дюрOMETрический анализ на распределение микротвердости в поверхностном слое и по глубине шифа от поверхности. Топографический анализ, просмотр и съемка наиболее характерных участков покрытия, осуществляли при помощи растрового электронного микроскопа JOEL JSM-540, позволяющего формировать изображение объекта путем сканирования его поверхности электронным зондом (диаметром до 5-10 нм) при различных увеличениях.

Для исследования распределения элементов по глубине слоя проводился рентгеноспектральный микроанализ. При этом использовался электронный микроскоп - микроанализатор ISIS 300 Oxford instruments.

Для исследований прочности соединения баббитового слоя с подложкой проводили испытания на сжатие

по ГОСТу ИСО 4386-2-99. Для этого были изготовлены шесть заготовок подшипников скольжения размером $\varnothing 100/\varnothing 80$ мм, $b = 45$ мм, согласно табл. 2.

Таблица 2. Исследуемый материал подшипников скольжения

Материал подложки	Материал заливки - баббит	
	Б88	Б83
Бронза ОЦС5-5-5	1 шт.	1 шт.
Сталь 20	1 шт.	1 шт.
Сталь 20 + подслои меди (ЭЭЛ)	1 шт.	1 шт.

Материал втулок из стали 20 соответствует ГОСТу 1050-88, а втулок из бронзы Бр ОЦС 5-5-5 – ГОСТу 613-79.

Легирование медью осуществлялось на внутренних поверхностях втулок, изготовленных из стали 20, в среде аргона. При этом использовался 9-й режим установки «ЭИЛ-8А», что соответствует энергии разряда 0,34 Дж.

Результаты исследований

В результате проведенных исследований установлено, что как в воздушной среде, так и в защитной среде аргона с увеличением режима легирования увеличивается количество перенесенного материала с анода на катод. Наиболее интенсивный массоперенос происходит в начале легирования, затем он замедляется и при более «грубых» режимах (7-й и 9-й) может смениться эрозией нанесенного ранее слоя.

Следует отметить, что при легировании в защитной среде массоперенос при равенстве всех прочих условий больше. Это, прежде всего, свидетельствует о том, что окислы металлов в зоне легирования значительно препятствуют формированию поверхностного слоя.

Результаты измерения шероховатости и толщины покрытия, а также коэффициент (K_m), учитывающий отношение привесов катода при ЭЭЛ на воздухе и в среде аргона при легировании в течение 1 мин, сведены в табл. 3.

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что для каждого режима работы установки ЭЭЛ существует рациональное время легирования, необходимое для получения наиболее качественного покрытия. В данном случае критерием выбора времени легирования являлось получение покрытий 100% сплошности.

Таким образом, установлено, что лучшее качество покрытия (сплошность, шероховатость, равномерность и др.) достигается при использовании защитной среды - аргона. Рекомендованы энергетические режимы, соот-

ветствующие энергии разряда $W_u = 0,2-0,4$ Дж, обеспечивающие 100% сплошность и шероховатость $Rz = 8-10$ мкм.

Металлографические исследования показали, что при легировании на воздухе толщина формируемых слоев не равномерная и составляет 30-50 мкм. При этом сплошность слоя находится на уровне ~ 90%. При легировании в среде аргона равномерность слоя значительно возрастает и составляет при ЭЭЛ на тех же режимах около 20 мкм. Сплошность слоя для всех применяемых режимов легирования находится на уровне 100%.

При рассмотрении микроструктуры поверхностного слоя стали 20 с покрытием из меди, как на воздухе, так и в среде аргона можно отметить, что поверхностный слой состоит из двух зон. Вверху расположен «белый слой». Ниже располагается зона более темного травления – переходной слой с переменной концентрацией диффузионного характера. Иногда различают третью зону – ЗТВ, наличие которой и глубина воздействия определяются величиной энергии разряда.

При легировании медью в различных средах микротвердость на поверхности слоя составляет $H_u = 850-900$ МПа. По мере углубления она плавно увеличивается до микротвердости ЗТВ (2500-3000 МПа) и затем переходит в микротвердость основного металла $H_u = 1750-1800$ МПа. Толщина ЗТВ с микротвердостью выше микротвердости основного металла при легировании на 9-м режиме на воздухе достигает 50 мкм, а в среде аргона – 40 мкм. Снижение толщины ЗТВ, при легировании в среде аргона по сравнению с легированием на воздухе, объясняется охлаждением зоны ЭЭЛ струей подаваемого газа.

На рис. 2 показаны микроструктура (а) и распределение микротвердости в граничной зоне между сталью

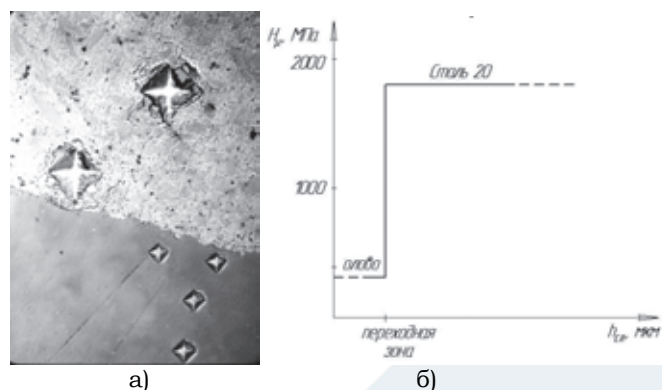


Рис. 2. Микроструктура (а) и распределение микротвердости (б) в поверхностном слое стали 20 после лужения оловом

Таблица 3. Результаты качественных параметров формируемых поверхностных слоев при ЭЭЛ стали 20 медью

Режим		Т _{рац} , мин		Шероховатость, Rz, мкм		Прирост, Δh , мм		К _м , раз
		воздух	аргон	медь		медь		
				воздух	аргон	воздух	аргон	
150 мкФ	3	3,0	2,5	8	7	0,025	0,01	0,75
	5	2,0	1,5	10	8	0,04	0,02	1,2
	7	1,2	1,0	12	9	0,05	0,02	1,3
	9	1,0	0,75	15	10	0,07	0,03	1,5
300 мкФ	3	2,0	1,5	9	7	0,01	0,01	1,0
	5	1,2	1,0	12	8	0,05	0,02	1,1
	7	1,1	0,8	16	9	0,09	0,03	1,3
	9	0,75	0,5	27	11	0,014	0,04	1,2

20 и оловом, нанесенным – лужением (б). Переходной слой между оловом и подложкой отсутствует. Микро-твердость резко изменяется по величине от 310-340 МПа (олово) до 1750-1800 МПа (сталь 20). Олово, в данном случае, удерживается на стальной подложке только за счет сил адгезии – возникновения молекулярной связи между поверхностными слоями соприкасающихся разнородных твердых тел.

При ЭЭЛ стали 20 медью между оловом и медью образуются твердые растворы замещения, обеспечивающие более прочную связь. В свою очередь прочная связь между стальной подложкой и медью обеспечивает ЭЭЛ, что подтверждается наличием в сформированных слоях диффузионной зоны. Микротвердость в переходной зоне первоначально плавно повышается от 210-230 МПа (олово) до 2700-2800 МПа (ЗТВ), а затем плавно снижается до микротвердости металла основы (рис. 3). На рисунке представлены микроструктуры одного и того же участка шлифа стали 20 с покрытием из меди, сформированного ЭЭЛ на 9-м режиме. На рис. 3, а показан нетравленный шлиф для лучшего изображения отпечатков алмазной пирамиды, полученных при измерении микротвердости, а на рис. 3, б изображен участок после травления с целью выявления качества слоя, его сплошности, толщины и структуры.

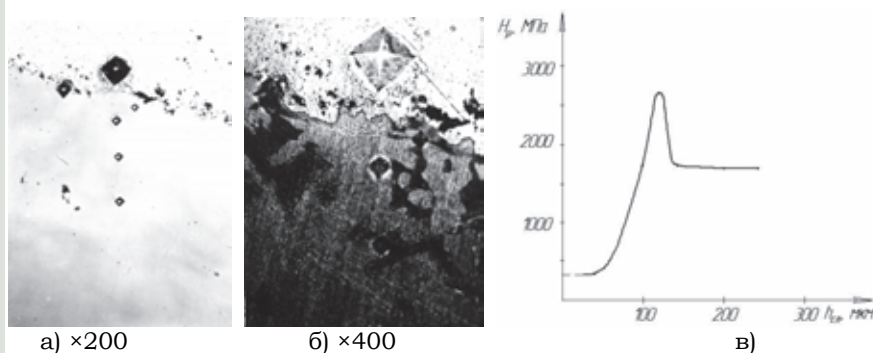


Рис. 3. Микроструктура (а, б) и распределение микротвердости (в) при ЭЭЛ стали 20 медью и последующем лужении оловом

Таким образом, ЭЭЛ стали 20 медью обеспечивает наличие переходного слоя и ЗТВ с микротвердостью выше микротвердости основы.

Ниже приведены результаты рентгеновского микроанализа наиболее характерных участков сформированных покрытий, проведенного для выявления различ-

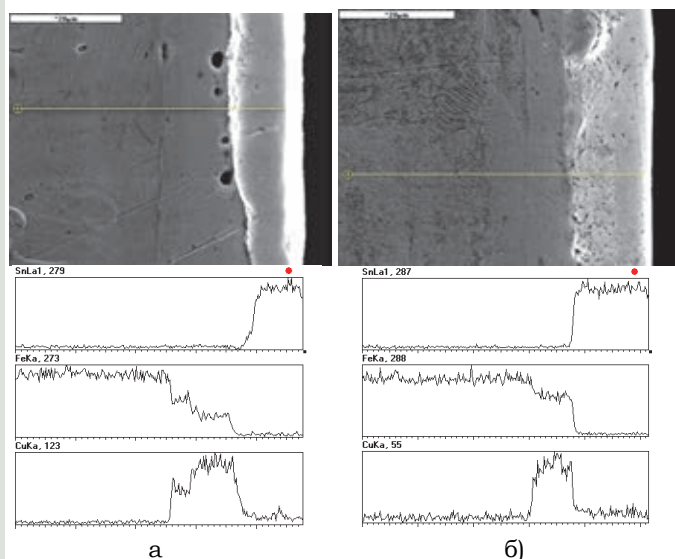


Рис. 4. Распределение элементов по глубине поверхностного слоя образца стали 20, покрытого методом ЭЭЛ: а – последовательно медью и оловом; б – медью и последующим лужением оловом, ×2000

ных элементов их структуры, а также для идентификации основных элементов по глубине слоя.

На рис. 4, а изображен наиболее характерный участок поверхностного слоя стали 20 после ЭЭЛ медью и оловом в плоскости, перпендикулярной покрытию. На поверхности располагается слой олова толщиной 10-15 мкм. Ниже находится слой, состоящий преимущественно из меди толщиной 15-20 мкм. Как в первом, так и во втором слоях есть замкнутые поры размером от долей до 3 мкм, причем поры большего размера находятся в слое меди. Наличие пор обусловлено самой специфической процессом ЭЭЛ.

Исследование состава покрытия по глубине свидетельствует о том, что граничные участки между оловом, медью и сталью 20 состоят из элементов соседних слоев, что указывает на их диффузионное перераспределение в покрытии. По мере углубления в нижних слоях олова возрастает концентрация меди. Ниже, между медью и сталью 20, концентрация меди снижается, а железа – возрастает.

В случае ЭЭЛ стали 20 медью и последующего лужения оловом (рис. 4, б) существенных отличий в структуре сформированного поверхностного слоя не наблюдается. Исследование распределения элементов в покрытии указывает на отсутствие переходного слоя между медью и оловом.

В результате испытания образцов на прочность соединения антифрикционного слоя и металлической основы установлено:

- применение переходных слоев из меди, наносимых методом ЭЭЛ в защитной среде (аргон), повышает прочность сцепления стальной подложки с антифрикционным баббитовым слоем по сравнению с традиционной технологией (сталь 20 + баббит) на 35%;
- при замене стальной подложки на бронзовую прочность вышеуказанного соединения снижается.

Таким образом, предложенный способ [6], обеспечивает наиболее прочное сцепление баббитового слоя со стальной подложкой и может быть использован для плавающих колец уплотнительных узлов компрессорного оборудования, а также упорных и опорных подшипников скольжения, опорных пальцев зубчатых колес планетарных мультипликаторов и др.

Литература:

1. Плавающие уплотнения валов высокоскоростных центробежных компрессорных машин / В.А. Максимов, Г.А. Поспелов, В.Б. Шнепп, М.Б. Хадиев - Обзорная информация, серия ХМ5. - М.: Цинтихимнефте-маш, 1977. - 52 с.
2. Гаркунов Д. Н. Триботехника. - М.: Машиностроение, 1989.- 327 с.
3. Тарельник В.Б. Управление качеством поверхностных слоев деталей комбинированным электроэрозийным легированием. - Сумы.: Изд-во «МакДен», 2002. - 323 с.
4. K. Katayama, N.Nojima, T.Mitsubishi, H.Kanki, Y.Mouri and Z.Yoshida Development of High Speed High Performance Compressor // Mitsubishi Technical Review, vol.24, No.2, 1987. - P. 75-86
5. Износостойкие материалы в химическом машиностроении: справочник / [Б.Д. Воронков, Ю.М. Виноградов, Г.Е. Лазарев, В.М. Михалин]; под ред. Ю.М. Виноградова. - Л.: Машиностроение, 1977. - 256 с.
6. Патент України № 64663А МКВ В23Н1/00. Спосіб обробки вкладишів підшипників ковзання / В.С. Марцинковський, В.Б. Тарельник/ Опубл. 16.02.2004, Бюл. № 2.