

Г. В. Кирик, д.т.н., проф., президент, Лауреат Государственной премии; П. Е. Жарков, к.т.н., доцент, академик УТА, вице-президент, Лауреат Государственной премии (Концерн «NICMAS», г. Сумы, Украина); Е. В. Коноплянченко, к.т.н., доц.; Т. П. Волошко, ст. преподаватель (СНАУ, г. Сумы, Украина); В. В. Домашенко, директор (Ахтырский колледж СНАУ, г. Ахтырка, Украина)

Проблемы и решения реновации роторов винтовых компрессоров комбинированными технологиями. Часть 2

Описана новая комбинированная технология реновации роторов винтовых компрессоров, повышающая их надежность и долговечность за счет целенаправленного сочетания отдельных способов повышения качества поверхностей деталей комбинированными технологиями, включающими: электроэрозионное легирование (ЭЭЛ), ионное азотирование, цементацию методом ЭЭЛ, метод безабразивной финишной обработки, нанесение поли-мерных материалов.

Ключевые слова: винтовой компрессор, ротор, износ, поверхностный слой, электроэрозионное легирование, микротвердость.

Описана нова комбінована технологія реновації роторів гвинтових компресорів, що підвищує їх надійність і довговічність за рахунок цілеспрямованого поєднання окремих способів підвищення якості поверхонь деталей комбінованими технологіями, що включають: електроерозійне легування (ЕЕЛ), іонне азотування, цементацію методом ЕЕЛ, метод безабразивної фінішної обробки, нанесення полімерних матеріалів.

Ключові слова: гвинтовий компресор, ротор, знос, поверхневий шар, електроерозійне легування, мікротвердість.

Described a new combined technology of screw compressors rotors renovation, which increases their reliability and durability due to purposeful combination of separate methods of parts surfaces quality improving by combined technologies include: electroerosive alloying (EEA), ion nitriding, cementation by method EEA, method nonabrasive finishing, coating of polymer materials.

Keywords: screw compressor rotor, wear, surface layer, electroerosion alloying, microhardness.

Введение

В части 1 настоящей работы обоснована актуальность исследований направленных на совершенствование реновации роторов винтовых компрессоров (ВК). Анализ литературных источников показал, что резервом повышения надежности и долговечности ВК после реновации может быть комбинированная технология (КТ), включающая в себя такие взаимодополняющие методы повышения качества поверхностей деталей машин, как: ионное азотирование (ИА), электроэрозионное легирование (ЭЭЛ), цементация ЭЭЛ (ЦЭЭЛ), метод безабразивной ультразвуковой финишной обработки (БУФО), метод сульфидирования и нанесение металло-полимерных материалов (МПМ).

Результаты исследований

КТ восстановления посадочных шеек роторов ВК под подшипники

На рис. 1 изображены микроструктуры (а, б, в, г) и распределение микротвердости (Нц) по глубине поверхностного слоя (h), соответственно (а*, б*, в*, г*), образцов стали 40Х после ИА, ЦЭЭЛ, ИА с предыдущей и последующей ЦЭЭЛ. На всех микрофотографиях четко просматривается «белый» слой, не поддающийся травлению обычными реактивами. Его микротвердость в зависимости от вида упрочнения колеблется от 7010 МПа

при ИА и ЦЭЭЛ до 8250 и 11190 МПа при ИА+ЦЭЭЛ и ЦЭЭЛ+ИА, соответственно.

Ниже располагается переходная, диффузионная зона, с плавно снижающейся микротвердостью, переходящей в микротвердость основы (3000-3100 МПа).

Глубина зоны повышенной твердости составляет при ЦЭЭЛ, ИА, ЦЭЭЛ+ИА, ИА+ЦЭЭЛ, соответственно, 60-70, до 190, 220 и 250 мкм.

В табл. 1 представлено распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя и величины шероховатости поверхности при различных вариантах ИА и ЦЭЭЛ.

Как видно из табл. 1 и рис. 1 наибольшая толщина (250 мкм) и микротвердость упрочненного слоя (11190 МПа) у образцов, подвергнутых интегрированному способу упрочнения ИА+ЦЭЭЛ. При этом шероховатость поверхности Ra при использовании при цементации графитового электрода составляет 0,8 мкм, что ниже, чем при использовании металлических электродов (3-5 мкм).

Таким образом, наиболее предпочтительным способом повышения твердости поверхностного слоя стальных деталей, у которых частично или полностью удален упрочненный поверхностный слой, является ЦЭЭЛ.

Как уже отмечалось, в качестве предварительного

Таблица 1. Шероховатость и распределение микротвердости в поверхностном слое стали 40Х после упрочнения различными способами

Способ упрочнения	Микротвердость, МПа (шаг измерения ~ 30 мкм)										Ra, мкм
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Микротвердость основы 3000-3100 МПа											
ИА	7010	5010	4800	4800	4800	4010	3700	3000			0,5
ЦЭЭЛ	7010	5010	4010	3860	3100						0,8
ЦЭЭЛ + ИА	8250	5490	5010	5010	4600	4410	4410	3580	3000		0,8
ИА + ЦЭЭЛ	11190	5490	5220	4600	4410	4410	4230	3860	3700	3100	0,8

упрочнения целесообразнее всего применять ИА, имеющее ряд преимуществ перед другими способами.

Результаты исследования микроструктуры и микротвердости поверхностного слоя образцов стали 40X, упрочненных ИА и подверженных шлифовке и ЦЭАЛ представлены на рис. 2 и сведены в табл. 2. Кроме этого, в табл. 2 представлены результаты шероховатости поверхностей образцов после обработки методом БУФО.

Анализ рис. 2 и табл. 2 показывает, что с увеличением глубины удаленного после ИА слоя снижается толщина зоны повышенной твердости микротвердость после ЦЭАЛ.

КТ восстановления поверхностей ленточек роторов ВК

Для исследования возможности восстановления поверхностей ленточек роторов ВК на плоские и круглые образцы из стали 40 методом ЭА наносили покрытия из оловянной бронзы марки БрОФ10-1 и баббита В88. Баббит наносили с целью предотвращения образования задиров в случае непредвиденного касания поверхностей ленточек роторов ВК.

С целью формирования покрытия бронзой с максимальной сплошностью и минимальной шероховатостью легирование плоских образцов проводили поэтапно, сначала при энергии разряда $W_p=0,13$ Дж, затем при $W_p=0,05$ Дж. При этом толщина слоя покрытия снизилась с 0,10 до 0,05 мм, а шероховатость (R_a) с 30,2 до 7,3 мкм. Сплошность слоя составила 100% (рис. 3, а).

Следует отметить, что при нанесении бронзы на 2-м этапе с использованием более низкого режима легирования электрические разряды протекают по выступам неровностей, нанесенного ранее слоя, в результате чего они частично разрушаются и деформируются, что приводит к снижению шероховатости поверхности и увеличению ее сплошности.

Электроды из бронзы периодически окисляются, что значительно сказывается на качестве формируемых покрытий. При длительном легировании появляются прижоги, электроды механически разрушаются и отдельные частички, размером до 0,2 мм привариваются к легируемой поверхности. Последующая обработка металлической щеткой устраняет возможные недостатки и таким образом значительно повышает качество сформированной поверхности.

Далее, на бронзовое покрытие наносили поэтапно баббит В88. После каждого этапа ЭА проводили обработку металлической щеткой. На первом этапе использовался ре-

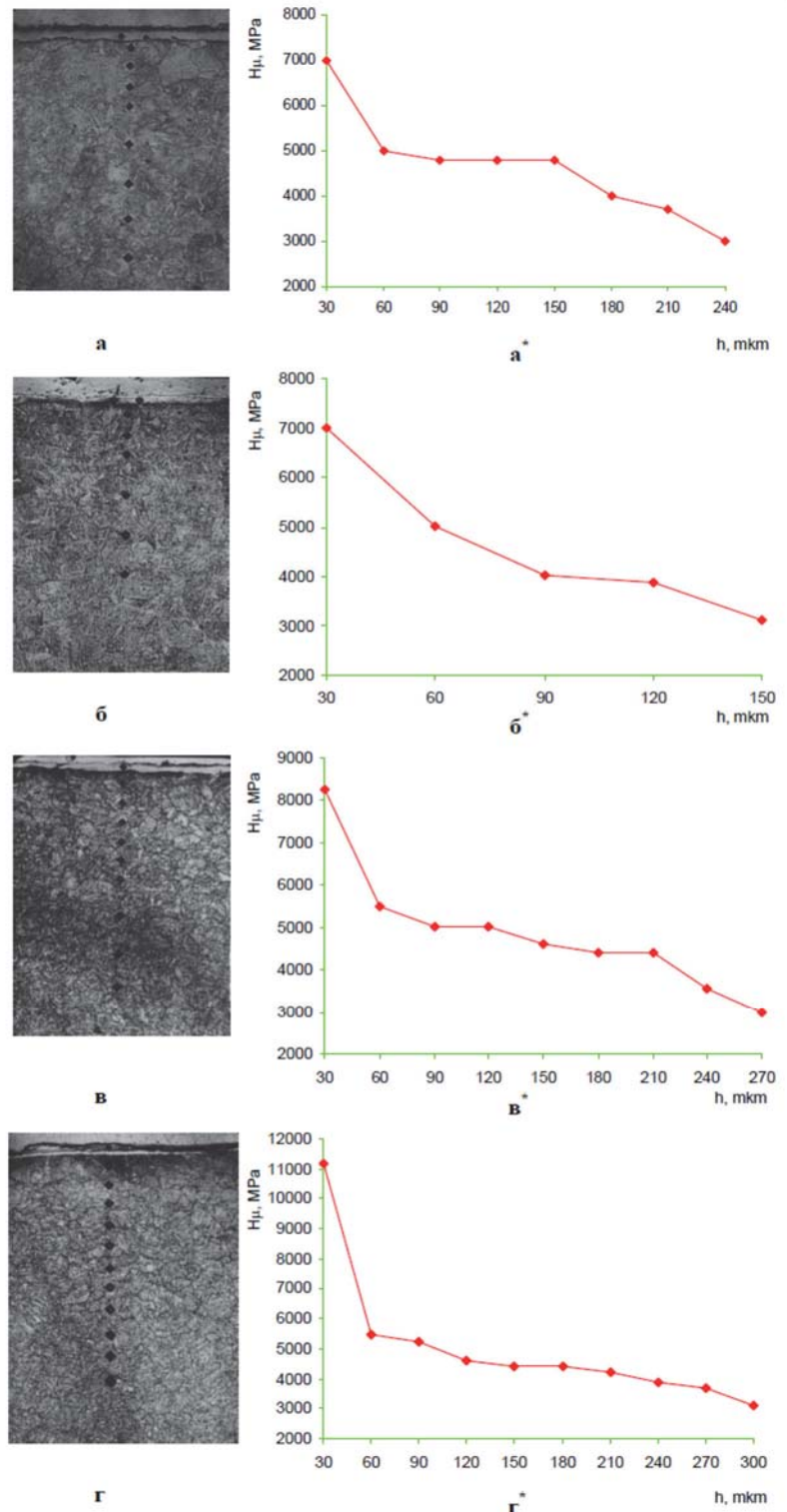


Рис. 1. Микроструктура и распределение микротвердости поверхностного слоя образцов стали 40X после: а, а* – ИА; б, б* – ЦЭАЛ; в, в* – ЦЭАЛ+ИА; г, г* – ИА+ЦЭАЛ

Таблица 2. Шероховатость и распределение микротвердости в поверхностном слое стали 40X после ИА, шлифовки и ЦЭАЛ

Глубина шлифовки, мм	Микротвердость, МПа (шаг измерения ~ 30 мкм)							Ra, мкм	
								ЦЭАЛ	БУФО
	1	2	3	4	5	6	7		
0,05	8200	6300	4800	4800	4800	4010	3000	0,8	0,5
0,10	7650	5200	4800	4000	3700	3200	3100	0,8	0,5
0,15	7250	4700	4200	4000	3400	3000		1, 2	0,5
0,20	7200	5490	4220	3800	3100			1,6	0,6

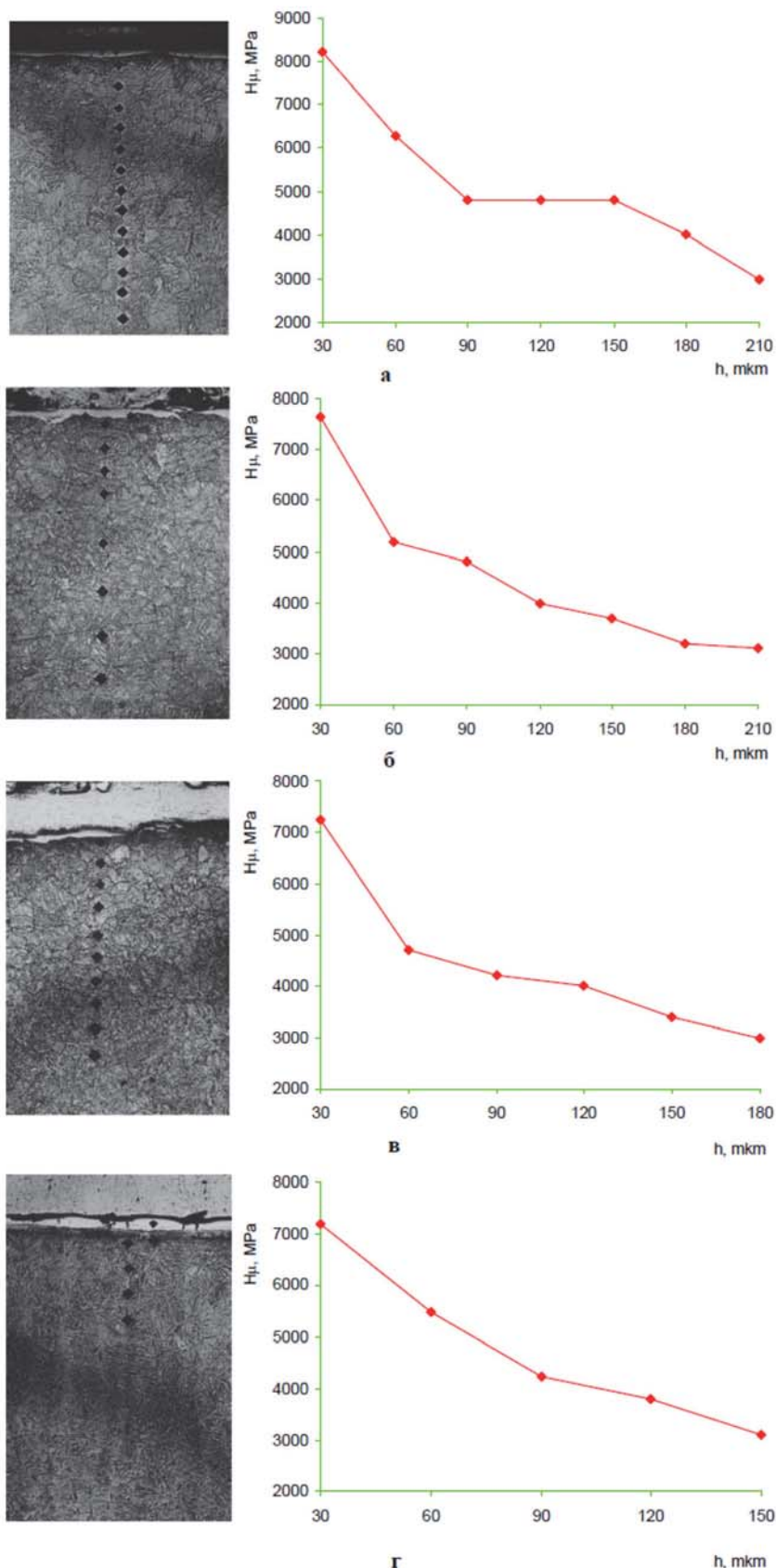


Рис. 2. Микроструктура и распределение микротвердости поверхностного слоя образцов стали 40X после нитроцементации (ИА+ЦЭЛ) у которых после ИА частично удален упрочненный поверхностный слой на глубину: а – 0,05 мм; б – 1,0 мм; в – 0,15 мм; г – 0,20 мм.

Таблица 3. ДюрOMETрический анализ поверхностного слоя стали 40 с бронзовым и баббитовым покрытием, нанесенным методом ЭЭЛ

h, мкм	150	300	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250
Hц, МПа	230	290	750	900	990	1400	1450	3920	3050	2290	2020	1970	1810	1700	1810

жим легирования при энергии разряда $W_p=0,27$ Дж, а после этого, с целью снижения шероховатости покрытия, проводили ЭЭЛ графитовым электродом, сначала при $W_p=0,39$ Дж, а затем при $W_p=0,27$ Дж.

При ЭЭЛ графитовым электродом электрические разряды протекают по выступам микронеровностей нанесенного покрытия. При этом происходит их расплавление, снижение высоты и растекание материала на большую площадь, увеличивая тем самым сплошность нанесенного слоя. Толщина покрытия после легирования бронзой и баббитом с последующей обработкой графитовым электродом составила 0,25 мм, а шероховатость (Ra) 8 мкм (рис. 3, б). На рис. 3, в показана структура сформированного покрытия, а на рис. 3, г распределение микротвердости по глубине сформированного слоя.

Анализ структуры баббитового покрытия с подслоем из оловянной бронзы показал, что сформированный слой состоит из 4-х зон. Самый верхний слой толщиной до 350 мкм и микротвердостью $H_c=240-360$ МПа из баббита, ниже расположен слой из оловянной бронзы, глубина которого находится в пределах 50-80 мкм, а микротвердость $H_c=750-900$ МПа. Еще ниже, между оловянной бронзой и сталью 40, располагается переходная зона глубиной до 10 мкм, в которой микротвердость, по мере углубления, плавно увеличивается до микротвердости зоны термического влияния (2500-3000 МПа) и затем снижаясь переходит в микротвердость основного металла $H_c=1750-1800$ МПа.

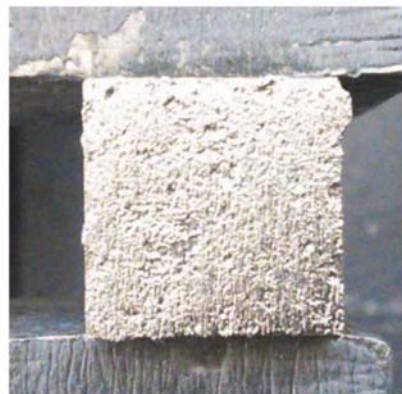
Для получения более толстого слоя, электроэрозионное легирование с помощью электрода-инструмента из оловянного баббита, с последующей обработкой графитовым электродом можно неоднократно повторять, начиная с обработки при энергиях разряда 0,27 Дж. После трёх таких процедур можно получить суммарную толщину покрытия до 1 мм.

На рис. 4, а показана структура поверхностного слоя стали 40 после ЭЭЛ на механизированной установке «ЭИЛ-9» бронзой марки БрО10Ф1 и баббитом марки Б88. Как бронза, так и баббит наносились на 2-м режиме при токе короткого замыкания $I_{к.з.}=15$ А. ЭЭЛ осуществлялось за два парохода. При нанесении бронзы за один проход толщина слоя покрытия составляла 0,17-0,18 мм, а для баббита 0,12-0,13 мм.

ДюрOMETрический анализ распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя (рис. 4, б и табл. 3) показывает, что твердость баббита находится в пределах 230-290 МПа, далее, по мере углубления, она плавно возрастает и



а

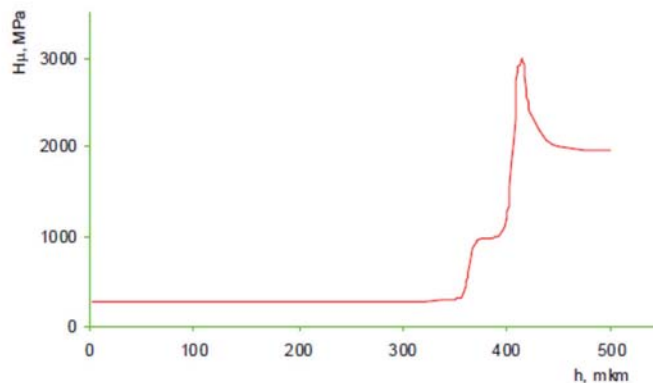


б



X 200

в



г

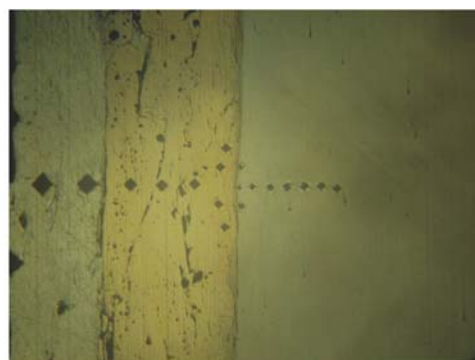
Рис. 3. Образец стали 40 после ЭЭЛ бронзой (а), бронзой и баббитом Б88 (б), структура покрытия (в) и распределение микротвердости по глубине слоя (г)

на участке с бронзовым покрытием увеличивается от 750 до 990 МПа. Ниже, в переходной зоне между бронзой и сталью 20, твердость увеличивается до 1400 и 1450 МПа, потом, в зоне термического влияния возрастает до 3920 МПа и затем плавно снижается до микротвердости 1700 – 1800 МПа. Глубина зоны повышенной твердости составляет 90–100 мкм.

Профессор Д.Н. Гаркунов в [1] рекомендует избегать сочетаний мягкого материала с мягким, а также пар из одноименных материалов. Подобные пары имеют низкую износостойкость и ненадежны в работе. При незначительных перегрузках в парах образуются очаги схватывания и происходит глубинное вырывание материалов с взаимным их налипанием на поверхности трения.

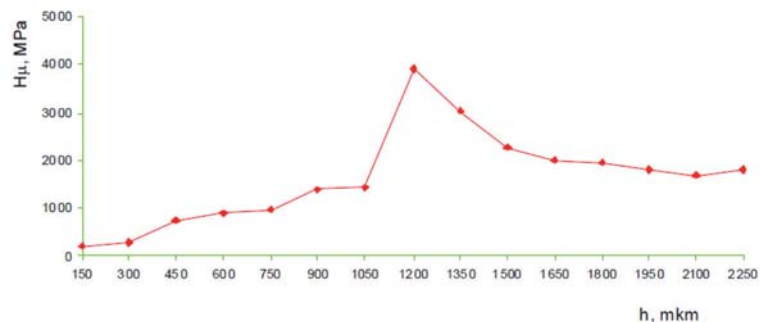
Учитывая выше сказанное, ленточки одного из роторов можно восстанавливать используя в качестве материала электродов оловянную бронзу, причем для снижения вероятности возникновения схватывания и задира на бронзу можно наносить антифрикционный материал баббит. Для восстановления изношенных поверхностей ленточек второго ротора, целесообразно применять электроды из нержавеющей стали, которые по сравнению с электродами из обычных сталей, позволяют формировать более качественные покрытия.

При ЭЭЛ на механизированных установках типа «ЭЛИТРОН-347» и «ЭИЛ-9» шероховатость поверхности может достигать 1000-1250 мкм в зависимости от режима ЭЭЛ и материала используемого электрода. При этом сплошность покрытия находится в пределах 50-80%, причем чем выше режим, тем ниже сплошность. При использовании



X 100

а



б

Рис. 4. Структура (а) и распределения микротвердости по глубине слоя (б) после ЭЭЛ стали 40 на установке «ЭИЛ-9» бронзой и баббитом Б88

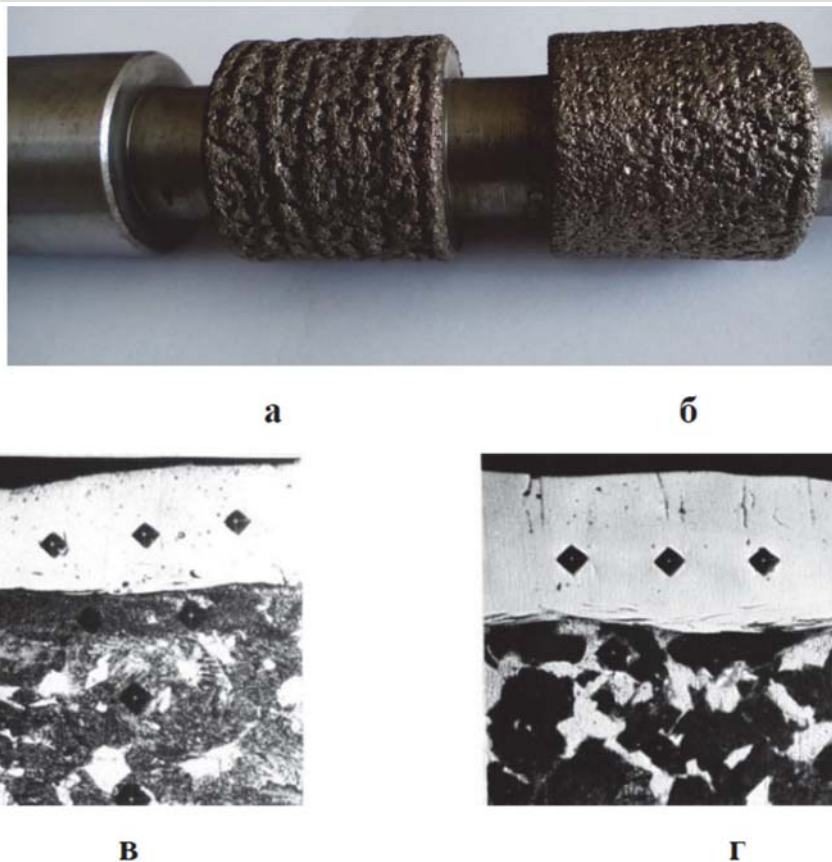


Рис. 5. Покрытия на участках образца после ЭЭЛ на установке «ЭИЛ-9»:
 электродами из сталей 08X15H5D2T (а) 12X18H10T (б) и, соответственно их
 микроструктуры: в - 1- проход; г - 2 - прохода; $\times 20$

в качестве электродов нержавеющей стали 12X18H10T или высокопрочной нержавеющей стали ВНС-2 (08X15H5D2T) за один проход толщина покрытия может достигать 0,6 мм на диаметр, при сплошности, соответственно, 70 и 60%. Шероховатость поверхности в этом случае достигает 300 мкм. После 5-ти проходов толщина слоя достигает 2,8 мм на диаметр, сплошность снижается, соответственно до 50-60%. Шероховатость поверхности (Rz) для сталей 08X15H5D2T и 12X18H10T возрастает и составляет, соответственно до 1250 и 800 мкм (рис. 5).

Сталь 08X15H5D2T при ЭЭЛ упрочняется и ее микротвердость в покрытии составляет 4780 МПа. У стали 12X18H10T микротвердость остается на прежнем уровне и составляет 1500–1600 МПа, хотя в переходной зоне микротвердость повышается до 2500-4000 МПа.

В данном случае, для восстановления изношенных поверхностей ленточки ротора, рекомендуется применять комбинированную технологию, состоящую из ЭЭЛ стальными электродами и последующего нанесения покрытий из МПМ [2]. При этом в качестве электродов при ЭЭЛ целесообразно использовать нержавеющую сталь 12X18H10T микротвердость которой ниже.

Для предотвращения возможности образования задигов на стальной поверхности восстановленной ленточки ротора в покрытие можно ввести серу. Для этого необходимо периодически обрабатывать серой восстанавливаемый участок поверхности или ввести ее в состав электрода из стали 12X18H10T.

В результате, после механической обработки (шлифовки или лезвийной обработки) в размер, поверхность ленточки будет состоять из отдельных металлических участков и мест из МПМ. При этом, по мере увеличения глубины обработки, площадь участков поверхности из МПМ будет уменьшаться, а зон, сформированных методом ЭЭЛ, соответственно возрастать.

Выводы:

1. Для ремонта подшипниковых шеек валов ВК предложена новая комбинированная технология, заключающаяся в запрессовке на изношенную поверхность вала втулки, предварительно упрочненной методом ИА, которую после проточки и шлифовки в размер, подвергают ЦЭЭЛ и обработке методом БУФО.

2. При восстановлении изношенных рабочих поверхностей ленточек роторов целесообразно использовать КТ, заключающуюся в формировании методом ЭЭЛ на более изношенном роторе покрытия из оловянной бронзы и приработочного покрытия из баббита, а на втором комбинированного покрытия, состоящего из участков нержавеющей стали 12X18H10T и зон из МПМ. В данном случае отдельно взятые технологии (методом ЭЭЛ и методом нанесения МПМ) не в коей мере не снижают достоинства друг друга, а дополняют их, и устраняют недостатки присущие каждой технологии в отдельности.

3. Методом ЭЭЛ можно варьировать толщиной нанесенного слоя и высотой микронеровностей, а последующей лезвийной обработкой можно обеспечивать то или иное соотношение площадей из нанесенного металла и МПМ.

4. Совмещение процесса сульфидирования с восстановлением поверхностей ленточек роторов ВК методом ЭЭЛ значительно снижает возникновение аварийных ситуаций, связанных с схватыванием поверхностей роторов и образованием задигов.

Литература:

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 2001. – 616 с.
2. Спосіб відновлення зношених поверхонь металевих деталей (варіанти): Пат. 104664. Україна. МПК В23Н 5/00 /Марцінковський В.С., Тарельник В.Б., Павлов О.Г., Іщенко А.О.; Опубл. 25.02.2014, Бюл. № 4.-3 с.



ОРЕЛКОМПРЕССОРМАШ

Стационарные и передвижные,
винтовые и поршневые
компрессорные станции и установки

ПРОИЗВОДСТВО, ИНЖИНИРИНГ, СЕРВИСНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

РОССИЯ, 302020
г. Орел, ул. Цветаева, 1-б
тел./факс: (4862) 421157,
(4862) 421158
info@orelkompresormash.ru



... ударная волна
ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ