

УДК 621.9.048+621.5

**ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ СКОЛЬЖЕНИЯ ТОРЦОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ
РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ**© 2012 В. Б. Тарельник¹, В. С. Марцинковский¹, Б. Антошевский²¹Сумский национальный аграрный университет, Украина²Политехнический университет, г. Кельце, Польша

Рассмотрена проблема повышения качества поверхностных слоёв деталей при торцовом трении скольжения. Изложены результаты качественного и количественного анализа поверхностных слоёв стали 38Х2МЮА, сформированных различными методами.

Импульсное уплотнение, электроэрозионное легирование, ионное азотирование, упрочнённый слой, подложка, диффузионная зона, покрытие, металлография, микротвёрдость, сплошность, структура, анализ.

Введение

Одним из путей решения задачи обеспечения высокого технического уровня центробежных машин является постоянное повышение экономичности и надёжности уплотнений ротора. В последнее время в таких машинах применяются новые типы механических торцовых уплотнений, в частности торцовые уплотнения с саморегулируемым зазором, которые получили название импульсных.

В высокооборотных насосах и компрессорах большого давления широкое применение нашли торцовые уплотнения бесконтактного типа, уплотнительные кольца которых целиком изготавливаются из износостойких материалов, таких как карбид вольфрама (WC), карбид кремния (SiC), различные виды графитов. Стоимость колец из этих материалов достигает сотен и тысяч долларов США, что обуславливает высокую стоимость уплотнительных узлов в целом.

В то же время по мере усовершенствования техники, возникает необходимость использования высоких и сверхвысоких давлений, экстремальных температур (от высоких до криогенных), агрессивных сред. Влияние таких условий эксплуатации на герметичность разъёмных соединений очень большое.

Применение в разъёмных соединениях уплотнений из неметаллических материалов возможно в определённом интервале температур и давлений и для ограниченного числа агрессивных сред [1]. Поэтому в обсуждённых выше условиях становится целесообразным применение металлических композиционных материалов типа «основа - покрытие», которые объединяют защитные свойства по-

крытий с механической прочностью основы. Таким образом, работы, направленные на изучение возможности применения различных покрытий, повышающих износостойкость колец импульсных торцовых уплотнений, являются актуальными и своевременными.

Постановка задачи

Импульсные уплотнения на жидкостной смазке исследованы в широком диапазоне параметров режима (уплотняемый перепад давлений до 16,0 МПа, скорость скольжения до 100 м/с). Благодаря своим высоким эксплуатационным качествам, они успешно работают в высокооборотных питательных насосах атомных и тепловых электростанций. В среднем их наработка между плановыми ремонтами насосов составляет не менее 8000 ч, при этом степень износа при пути 10^6 км остаётся в пределах 1...2 мкм, что для узлов трения характеризуется как нулевой износ. При типичных условиях работы (давление 2,0...4,0 МПа, окружная скорость 40...60 м/с) уровень утечки составляет всего 1...2 л/ч [2].

До последнего времени считалось, что импульсные уплотнения работоспособны только в жидких средах. Однако проведённые теоретические и экспериментальные исследования показали, что эти уплотнения работоспособны и в жидкостях, и в газах. Были выполнены уникальные исследования импульсных уплотнений при сверхвысоких режимных параметрах $p v > 400$ МПа·м/с в криогенной жидкости (жидкий азот, $t = -195^\circ\text{C}$), которые показали, что такое уплотнение малочувствительно к теплофизическим свойствам и температуре рабочей сре-

ды. Всё это позволяет сделать вывод об универсальности импульсных уплотнений и их большой практической ценности [3].

Традиционно кольца импульсных торцовых уплотнений изготавливались из силицированных графитов, что накладывало определённые ограничения на область применения уплотнения, скорость скольжения и величину уплотняемого давления. Эти материалы довольно дороги и имеют низкую ударную прочность, подвержены растрескиванию под действием силовых и тепловых нагрузок.

Расширение области применения импульсных уплотнений в сторону повышения режимных параметров потребовало использования новых материалов в паре трения.

При нормальной работе уплотнения торцовые поверхности колец контактируют очень непродолжительное время, только в моменты пуска и останова машины. Поэтому нет необходимости изготавливать кольца полностью из дорогостоящих материалов, а достаточно только обеспечить износостойкость их рабочих поверхностей путём упрочнения или нанесения на них износостойких покрытий [3].

Современная технология располагает многочисленными методами как упрочнения, так и нанесения различных износостойких покрытий, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки и занимает свою технологическую нишу.

Таким образом, целью работы является анализ и выбор наиболее перспективных методов повышения качества поверхностей деталей, которые обеспечивают необходимые трибологические свойства поверхностей трения колец импульсных торцовых уплотнений.

Методы решения

Ниже приведены результаты исследований, проводимых в соответствии с договором о научном сотрудничестве между Сумским национальным аграрным университетом (Украина) и Политехникой Свентокжиской в Кельцах (Польша), предметом которого является общая деятельность и взаимный обмен научными результатами в области формирования трибологических свойств покрытий и в области динамики машин.

Для исследований в качестве материала колец импульсных торцовых уплотнений была выбрана сталь 38Х2МЮА, образцы из которой упрочнялись различными методами: электроэрозионным легированием (ЭЭЛ), ионным азотированием (ИА), комбинированным методом - ИА с последующим ЭЭЛ, наплавкой в вакууме композиционного сплава типа стеллит.

Для проведения металлографических исследований изготавливались прямоугольные образцы размером 10×8×8 мм, которые термообработывались на твёрдость 270...280 НV. Для спекания композиционного материала типа стеллит изготавливались специальные коробочкообразные образцы с полостью внутри 10×8×8 мм и толщиной стенки 2 мм.

ЭЭЛ осуществлялось на установке с ручным вибратором модели "УИЛВ - 8" двумя способами: нанесением комбинированного электроэрозионного покрытия (КЭП) состава ВК8 + Cu + ВК8 и электродом, изготовленным из композиционного материала 1М, состоящего из 70% Ni, 20% Cr, 5% Si и 5% В.

Ионное азотирование проводили на установке НГВ 6,6/6 - И1 при температуре 520° в течение 12 ч.

Композиционный сплав типа стеллит наносился пропиткой жидкой фазой порошкового материала при нагреве в вакууме. Толщина слоя не ограничена. В состав порошкового материала входят: кобальт, хром, вольфрам, бор и кремний.

Для исследования структуры и измерения твёрдости поверхностного слоя использовали шлифы образцов. Шлифы исследовали на оптическом микроскопе "Неофот-2", где проводилась оценка качества слоя, его сплошности, толщины и строения зоны подслоя. Одновременно проводился дюрOMETрический анализ на распределение микротвёрдости в поверхностном слое и по глубине шлифа от поверхности. Замер микротвёрдости проводили на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием алмазной пирамиды под различными нагрузками.

С целью определения возможности использования того или иного покрытия в паре трения проводились исследования, направленные на изучение рельефа, микрострукту-

ры и количественного состава сформированных слоёв.

Для проведения качественного рентгеновского микроанализа наиболее характерных участков сформированных покрытий и выявления различных элементов их структуры, в частности включений, пор, трещин, а также для идентификации основных элементов по глубине слоя использовались прямоугольные образцы $10 \times 8 \times 8$ мм.

Топографический анализ, просмотр и съёмка наиболее характерных участков покрытия в плоскости, перпендикулярной нанесённому слою, осуществлялись с помощью растрового электронного микроскопа JOEL JSM - 540, который позволяет формировать изображение объекта путём сканирования его поверхности электронным зондом (диаметром до 5 - 10 нм) при разных увеличениях.

Для исследования распределения элементов по глубине слоя проводился рентгеноспектральный микроанализ, основанный на регистрации характеристического рентгеновского излучения, возбуждённого электронным пучком присутствующих в микрообъеме химических элементов. При этом использовался электронный микроскоп-микроанализатор ISIS 300 Oxford instruments.

До попадания в камеру микроскопа образцы готовились следующим образом:

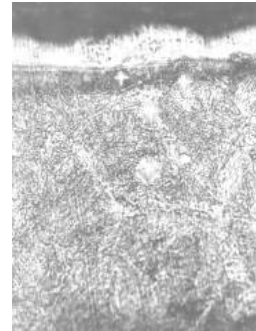
- для получения распределения элементов по профилю, перпендикулярному поверхности с нанесённым покрытием, готовился шлиф с фиксацией кромки эпоксидным компаундом "Аралдит". Полировка производилась алмазной пастой САМ 2/1;

- образцы промывались петролейным эфиром в ультразвуковом диспергаторе УЗДН- А, а шлиф во избежание подзарядки покрывался слоем углерода толщиной 250 ангстремов в вакуумной напылительной установке ВУП-5.

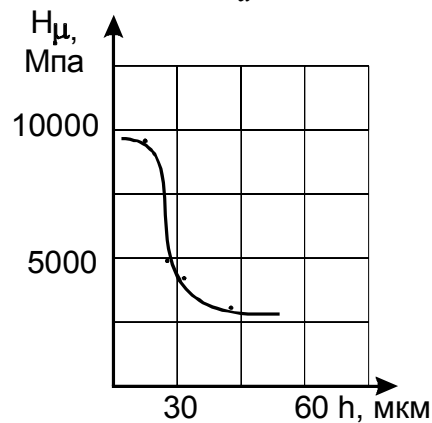
Ожидаемые результаты

При рассмотрении микроструктуры поверхностного слоя стали 38Х2МЮА, сформированного нанесением на неё КЭП состава ВК8 + Cu + ВК8, можно отметить, что поверхностный слой состоит из двух зон (рис. 1, а). Вверху расположен "белый слой" (слой, не поддающийся травлению обычными реактивами, применяемыми к основе).

Ниже располагается зона более тёмного травления - переходная зона. Микротвёрдость "белого слоя" на различных участках колеблется от 7600 до 9500 МПа, а толщина от 15 до 20 мкм. В переходной зоне микротвёрдость и толщина составляют соответственно 4800 - 5300 МПа и 15 - 20 мкм. Сплошность слоя 100%.



а



б

Рис. 1. Микроструктура (а) и распределение микротвёрдости по глубине слоя (б) при нанесении на сталь 38Х2МЮА КЭП ВК8 + Cu + ВК8

При ЭЭЛ стали 38Х2МЮА сплавом 1М (рис. 2) формируется более толстый поверхностный слой, но с меньшей сплошностью (до 90%). При этом более развит "белый слой", микротвёрдость и толщина которого составляют соответственно до 10000 МПа и до 50 мкм. В переходной зоне микротвёрдость составляет 5750 - 6030 МПа, а толщина до 30 мкм.

Сталь 38Х2МЮА относится к наиболее хорошо азотируемым. При наличии легирующих элементов происходит последовательное образование насыщенных азотом слоёв α (азотистый феррит), затем γ (нитрид F_4N) + α , затем ϵ (нитрид F_2N) + γ + α ; одновременно происходит образование нитридов специальных элементов (CrN, MoN, AlN) [5].

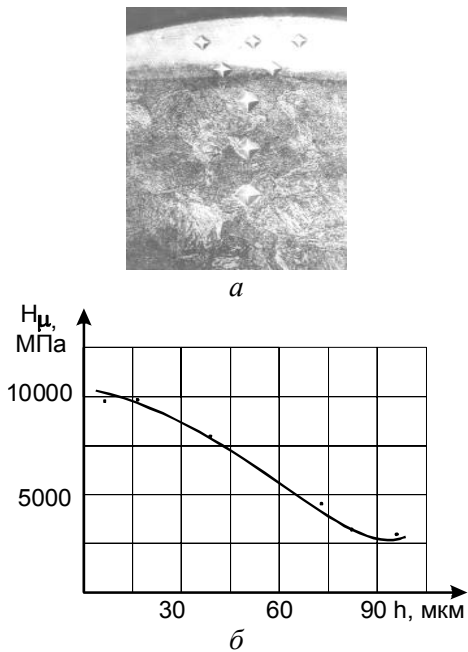


Рис. 2. Микроструктура (а) и распределение микротвёрдости по глубине слоя (б) при ЭЭЛ стали 38X2MЮА сплавом 1М

Изучение микроструктуры поверхностного слоя после ИА (рис. 3, а) показывает, что распределение азота по глубине слоя имеет скачкообразный характер вследствие отсутствия переходных двухфазных слоев. Толщина упрочненного слоя достигает 500 мкм. Микротвёрдость на поверхности 8820 МПа, плавно снижаясь, переходит к твёрдости основы. В переходной зоне микротвёрдость составляет 3620 МПа.

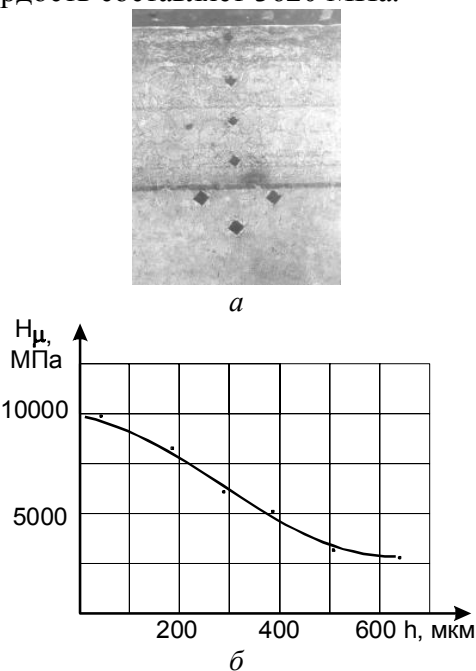


Рис. 3. Микроструктура (а) и распределение микротвёрдости по глубине слоя (б) при ИА стали 38X2MЮА

Применение комбинированной технологии, заключающейся в ИА с последующим нанесением КЭП, позволяет формировать на стали 38X2MЮА поверхностный слой, состоящий из двух зон - зоны ИА, выше которой находится зона ЭЭЛ (рис. 4,а). Микротвёрдость в поверхностном слое, сформированном поочерёдным нанесением твёрдых износостойких (ВК8) и мягких антифрикционных (Cu) материалов, неравномерная, твёрдые участки (8500 - 9000 МПа) чередуются с мягкими (4200 МПа) (рис. 4,б). Толщина слоя ЭЭЛ колеблется от 20 до 40 мкм. Сплошность слоя 100%.

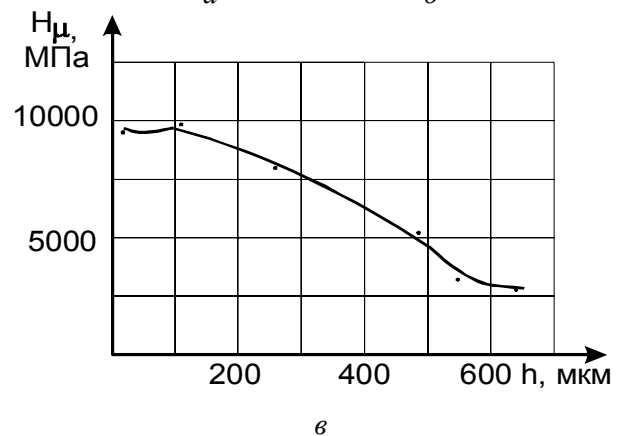
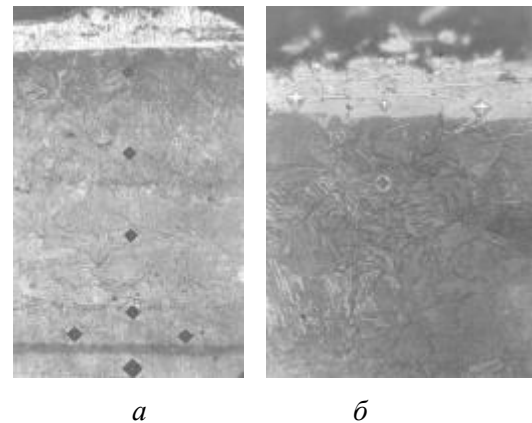


Рис. 4. Микроструктура (а, б) и распределение микротвёрдости по глубине слоя (в) после ИА стали 38X2MЮА и нанесения КЭП

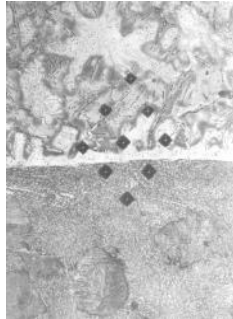
Ниже зоны ЭЭЛ с переменной микротвёрдостью расположена массивная зона ИА (до 450 - 500 мкм), микротвёрдость в которой плавно снижается с 8260 МПа до микротвёрдости основы (рис. 4, в).

На рис. 5 изображены микроструктура (а) поверхностного слоя, сформированного спеканием в вакууме композиционного материала типа стеллит, и распределение микротвёрдости по глубине слоя (б). Распреде-

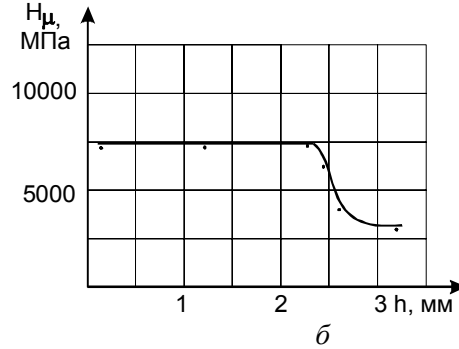
ление микротвёрдости в поверхностном слое равномерное. Микротвёрдость колеблется от 6890 до 7430 МПа. В переходной зоне от покрытия к основе микротвёрдость несколько снижается и составляет 4900...5080 МПа. Микротвёрдость основы в результате нагре-

ва выше 1000°C и медленного охлаждения с печью повысилась до 3400...3600 МПа.

На рис. 6 показаны наиболее характерные участки поверхностного слоя стали 38Х2МЮА с КЭП состава ВК8 + Cu + ВК8 в плоскости, перпендикулярной покрытию.

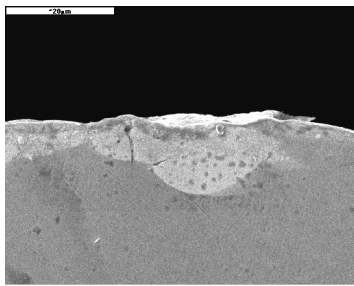


а

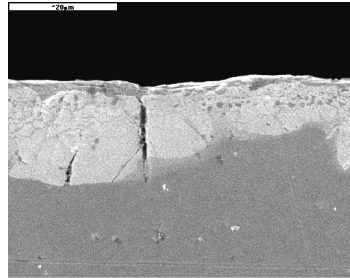


б

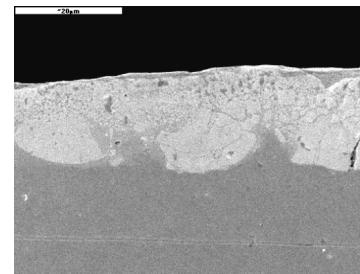
Рис. 5. Микроструктура (а) и распределение микротвёрдости по глубине слоя (б) композиционного сплава типа стеллит



а



б



в

Рис. 6. Участки КЭП в плоскости, перпендикулярной сформированному слою × 2000

Детальный анализ микрофотографий (рис. 6) показал, что сформированный ЭЭЛ слой пористый и имеет толщину 15...20 мкм. Наличие в поверхностном слое пор обусловлено самой спецификой процесса ЭЭЛ. Кроме того, быстрое нагревание и мгновенное охлаждение за счёт холодной подложки приводят к образованию микротрещин как внутри слоя (рис. 1, а), так и с выходом на поверхность (рис. 1, б). Размеры пор и микротрещин изменяются от 0.01 до 1 мкм.

На рис. 7 показаны участок упрочнённого слоя в плоскости, перпендикулярной покрытию, и распределение в нём элементов.

Анализ распределения элементов в поверхностном слое, сформированном электродами из твёрдого сплава ВК8 и меди, в последовательности ВК8 + Cu + ВК8, показывает, что покрытие состоит из основного элемента твёрдого сплава - вольфрама и меди. Концентрация как вольфрама, так и меди равномерная по всей глубине слоя.

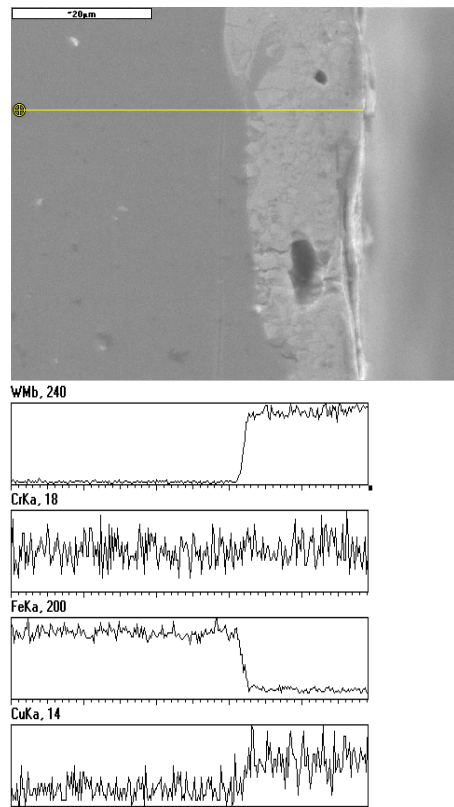


Рис. 7. Распределение элементов по глубине в КЭП × 2000

В переходной зоне от покрытия к основе концентрация вольфрама и меди снижается. На том же участке плавно увеличивается концентрация железа. Это свидетельствует об интенсивном перемешивании и взаимной диффузии элементов подложки и покрытия.

На рис. 8 показан участок профиля покрытия, нанесённого методом ЭЭЛ, и распределение в нём элементов, где в качестве материала легирующего электрода использовался сплав 1 М состава - 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% W.

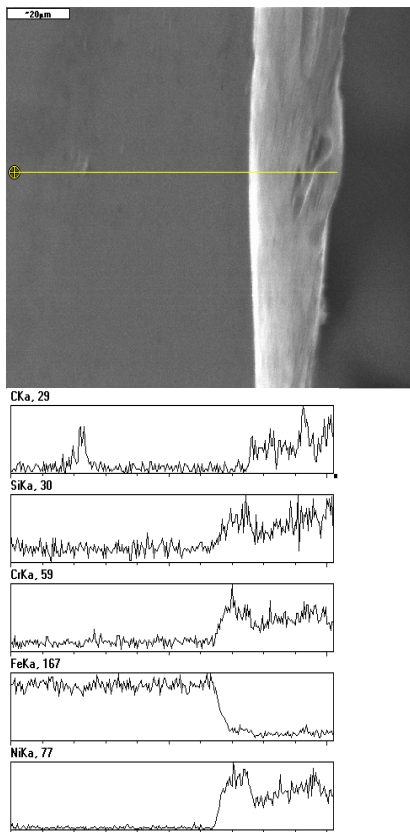


Рис. 8. Распределение элементов по глубине слоя в покрытии, сформированном электродом из сплава 1 М X 1000

В результате анализа структуры слоя (рис. 8) следует отметить её лучшее качество (снижение пористости, отсутствие трещин) в сравнении со структурой КЭП, сформированного в последовательности ВК8 + Cu + ВК8. Это объясняется характером и степенью взаимодействия материала легирующего электрода и подложки. Так, вольфрам как основной компонент твёрдого сплава ВК8 не образует твёрдых растворов с железом, а никель и хром как основные компоненты сплава 1 М неограниченно растворяются соответственно в γ -железе и α -железе. Толщина слоя на данном участке до 40 мкм. Покры-

тие состоит из элементов легирующего электрода никеля, хрома и кремния. Бор не определялся. Кроме того, в покрытии отмечается повышение концентрации углерода. Это объясняется тем, что при ЭЭЛ в воздушной среде элементы металлов, которые входят в состав электродов, взаимодействуют с углеродом воздуха и образуют в поверхностном слое карбиды.

В переходной зоне от покрытия к основе отмечается плавное снижение концентрации элементов покрытия и повышение концентрации железа, что свидетельствует о наличии диффузионной зоны.

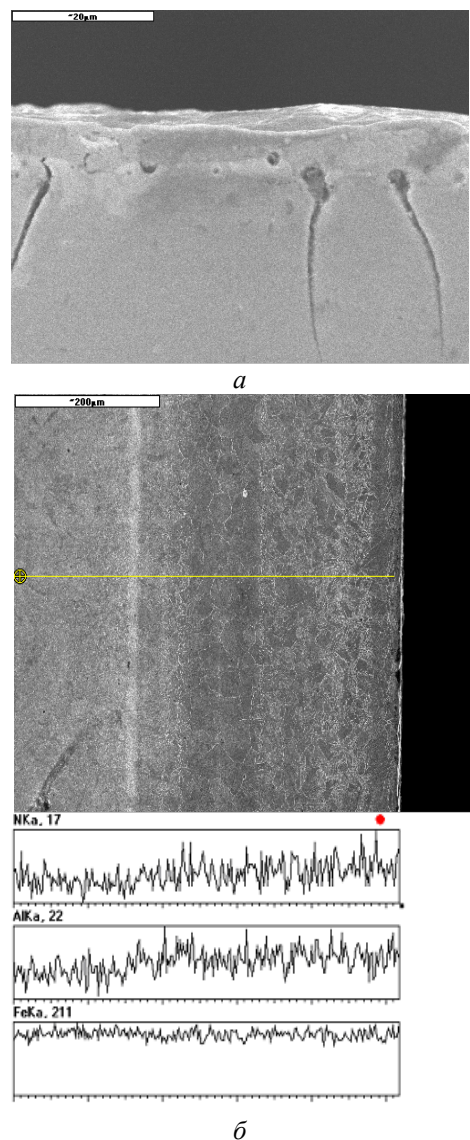


Рис. 9. Профиль слоя поверхности стали 38Х2МЮА и распределение в нём элементов после ИА (а), $\times 200$ и ИА с следующим нанесением КЭП, сформированного в последовательности ВК8 + Cu + ВК8 (б). $\times 2000$

Ещё лучшее качество структуры поверхностного слоя стали 38Х2МЮА при её

ИА (рис. 9, а). В данном случае поры и трещины отсутствуют. Азот распространяется на глубину до 500 мкм.

Дальнейшее нанесение на азотированную поверхность КЭП приводит к снижению качества слоя (рис. 9, б), о чём свидетельствует наличие пор и трещин. Глубина «дефектного» слоя распространяется от поверхности на расстояние до 30 - 40 мкм.

Концентрация вольфрама и меди равномерна по всей глубине КЭП, плавно снижается в диффузионной зоне. В этой же зоне плавно повышается концентрация железа (рис. 10).

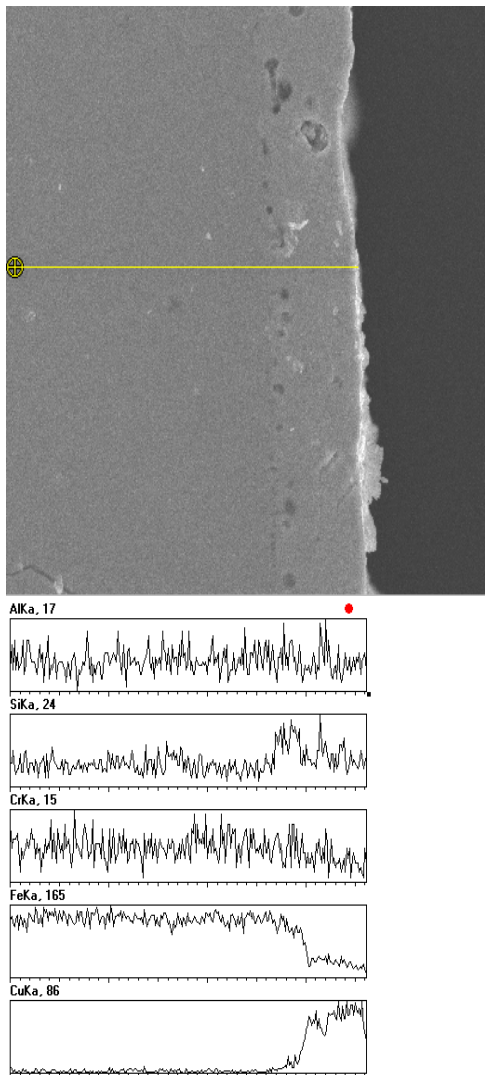


Рис. 10. Распределение элементов по глубине в поверхностном слое стали 38Х2МЮА, после ИА и нанесения КЭП, сформированного в последовательности ВК8 + Си + ВК8, ×2000

Как отмечалось выше, спеканием в вакууме композиционного материала типа стеллит можно формировать покрытие неограниченной толщины. На рис. 11 изображе-

ны структура участка покрытия, сформированного спеканием в вакууме композиционного материала типа стеллит, и распределение элементов по глубине созданного слоя. Толщина слоя на данном участке более 2 мм. Диффузионная зона отсутствует, о чём свидетельствует резкое снижение в переходной зоне концентрации основного элемента основы - железа и повышение концентрации элементов покрытия: кремния, хрома, кобальта и никеля.

Качество структуры сформированного покрытия достаточно высокое, о чём свидетельствует отсутствие пор и трещин.

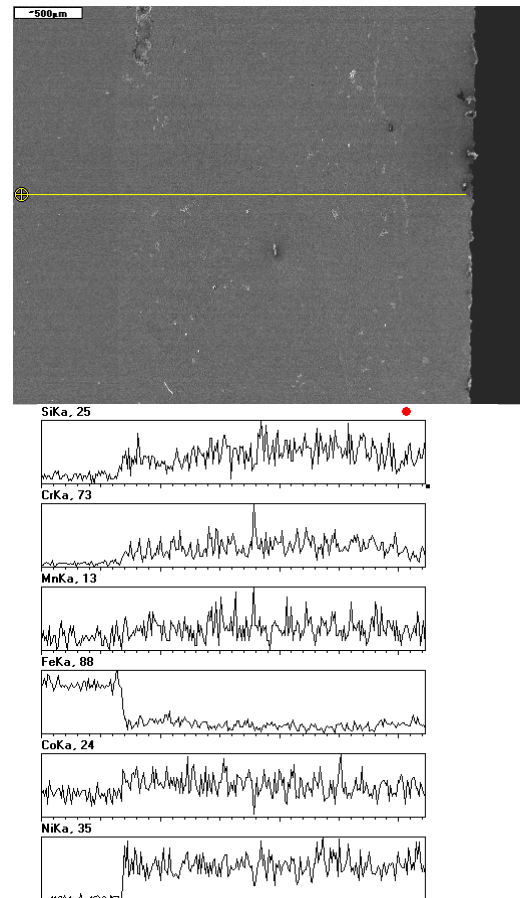


Рис. 11. Распределение элементов по глубине поверхностного слоя стали 38Х2МЮА с покрытием типа стеллит, × 2000

Таким образом, в результате проведённого качественного и количественного анализа поверхностных слоёв стали 38Х2МЮА, сформированных разными методами, можно сделать следующие выводы:

1. Толщина слоёв повышенной твёрдости (до 10000 МПа), в зависимости от применяемого способа упрочнения, колеблется от 20 - 50 мкм при ЭЭЛ до 500 мкм при ИА.

При формировании покрытия типа стеллит толщина слоя не ограничена.

2. Качество слоёв, сформированных методом ЭЭЛ, в значительной степени определяется характером и степенью взаимодействия материала легирующего электрода и подложки. Лучшее качество обеспечивается электродами, материал которых образует с материалом подложки неограниченные твёрдые растворы.

Отсутствие пор и микротрещин наблюдается в поверхностных слоях, сформированных ИА и нанесением в вакууме композиционного материала типа стеллит.

3. При ИА невозможно получить поверхностный слой необходимого состава и структуры, как в КЭП, когда твёрдые участки покрытия чередуются с мягкими.

4. Технология нанесения в вакууме композиционного материала типа стеллит очень сложна.

5. В случае устранения пор и микротрещин в поверхностном слое (например, последующей лазерной обработкой) наиболее перспективной технологией повышения износостойкости торцовых уплотнений может быть ИА с последующим нанесением КЭП.

Библиографический список

1. Опыт разработки и эксплуатации металлических уплотняющих элементов для работы в широком диапазоне температур и

давления [Текст] / Б.М. Громыко, Е.М. Матвеев, И.Д. Постников [и др.] // Тр. IX междунар. науч.-техн. конф. «Герметичность, вибронадёжность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования» - «ГЕРВИКОН-99». - Сумы: СумГУ, 1999. - Т.1. - 330с.

2. Москаленко, В.В. Характеристики и опыт эксплуатации импульсных торцовых уплотнений [Текст] / В.В. Москаленко, К.В. Лисицын, В.А. Марцинковский // Тр. 6-й техн. конф. «Уплотнения и вибрационная надёжность центробежных машин».- Сумы, 1991.- С. 41.

3. Громыко, Б.М. Опыт разработки импульсных торцовых уплотнений для быстроходных турбонасосов [Текст] / Б.М. Громыко, А.В. Колпаков, А.Е. Чернов // Тр. 9-й междунар. конф. «Герметичность, вибронадёжность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования».- Сумы, 1999.- Т.1.- С. 151-159.

4. Тарельник, В.Б. Разработка технологии повышения качества поверхностных слоёв импульсных торцовых уплотнений, работающих в различных средах, методом электроэрозионного легирования [Текст] / В.Б. Тарельник // Электронная обработка материалов.- 2000.- № 4.- С. 7-11.

5. Гуляев, А.П. Металловедение [Текст] / А.П. Гуляев. - М.: Машиностроение, 1986.- 544 с.

FORMATION OF THE SLIDING SURFACE MECHANICAL SEAL DIFFERENT METHODS

© 2012 V. B. Tarelnik¹, V. S. Martsinkovskiy¹, B. Antoshevskiy²

¹Sumy NAU, Ukraine

²Technical University of Kielce, Poland

The problem of improving the quality of the surface layers of detail in the face-end sliding. The results of qualitative and quantitative analysis of surface layers of steel 38H2MYUA formed by various methods.

Impulse seal, spark alloying, ion nitriding, hardened layer, the substrate, the diffusion zone coverage, metallography, microhardness, continuity, structure and analysis.

Информация об авторах

Тарельник Вячеслав Борисович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технического сервиса, Сумский национальный аграрный университет, Украина. E-mail: tarelnik@i.ua. Область научных интересов: герметичность, уплотнительная техника.

Марцинковский Василий Сигизмундович, кандидат технических наук, доцент, Сумский национальный аграрный университет, Украина. E-mail: mbc@triz.sumy.ua. Область научных интересов: герметичность, уплотнительная техника.

Антошевский Богдан, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой эксплуатации машин профессор, Политехнический университет, г. Кельце, Польша. E-mail: ktrba@tu.kielce.pl. Область научных интересов: герметичность, уплотнительная техника, металлографический анализ.

Tarelnik Vyacheslav Borisovich, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Department of Technical Services. Sumy NAU, Ukraine. E-mail: tarelnik@i.ua. Area of research: Seal.

Martsinkovsky Vasily Sigizmundovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Sumy NAU, Ukraine. E-mail: mbc@triz.sumy.ua. Area of research: Seal.

Antoshevsky Bogdan, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Department of machine operation, Polytechnic University, Kielce, Poland. E-mail: ktrba@tu.kielce.pl. Area of research: Seal, metallography.