

при реализации эффекта Ребиндера и обеспечивают конкурирующий процесс разряжения ионов металла, препятствуя молизации ионов водорода в микротрещинах в условиях эксплуатации.

Испытание образцов с нанесенным покрытием показало, что прирост концентрации водорода в стали после трения без покрытия составил $72,5 \times 10^{-7}$ м³/кг, а для стали с покрытием $12,0 \times 10^{-7}$ м³/кг.

Снижение наводороживания происходит тем больше, чем глубже медь диффундирует в поверхностные слои.

Износ пары трения игла – кулирный клин оценивали при изменении нагрузки P от 5 до 14 МПа в масле И20А. Результаты испытаний приведены на рисунке 3.

$I \times 10^{-4}$ мкм/м

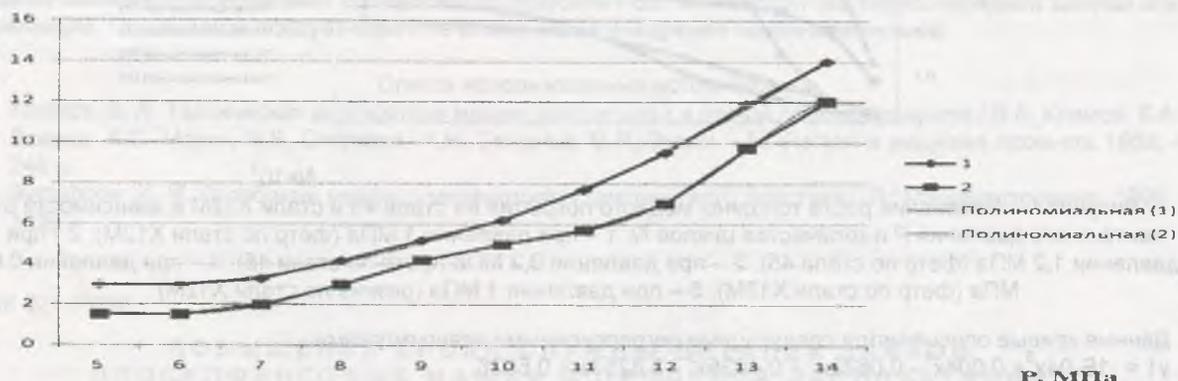


Рисунок 3 – Интенсивность износа образцов игла-кулирный клин при различных уровнях нагрузки P : 1 – без покрытия; 2 – с покрытием

Кривые описываются следующими регрессионными уравнениями:

$$y_1 = 0,1428x^2 - 0,3357x + 3,1483$$

$$y_2 = -0,001x^6 + 0,0307x^5 - 0,3659x^4 + 2,0615x^3 - 5,5131x^2 + 6,7448x - 1,4633$$

Из графика на рисунке 3 следует, что антиизносные свойства покрытия увеличиваются при повышении контактных давлений от 6 до 14 МПа в 1,7 раза. Это повышает износостойкость пары трения в режиме ограниченной смазки и при максимальной полезной нагрузке.

УДК 621.7/9.048.7

ВЛИЯНИЕ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИЗНОС УЗЛОВ ТРЕНИЯ

Котов С.Ю., асп., Беляев Г.Я.,

УО «Белорусский национальный технический университет»,
г. Минск, Республика Беларусь

Эффективность и надежность узлов трения в значительной степени определяют основные технико-экономические показатели машин. Снижения износа и потерь на трение этих деталей повышает КПД, мощность машин, их надежность и существенно снижает затраты, сопутствующие ремонту и эксплуатации.

В настоящее время в различных отраслях промышленности для повышения эксплуатационных свойств узлов трения наибольшее распространение получило применение смазочных материалов. Однако, наряду с относительно низкой стоимостью, высокой эффективностью и некоторой степенью универсальности, применение смазок не всегда целесообразно и возможно.

Все более острой становится необходимость применения более универсальных и эффективных методов улучшения характеристик узлов трения. В настоящее время получили изучения пластмассы с высокими антифрикционными свойствами, т.н. «самовосстанавливающиеся» материалы, материалы с применением наночастиц и т.д. Существенным недостатком данных методов является их высокая стоимость.

Рядом зарубежных фирм в качестве менее дорогой альтернативы таким материалам предложено нанесение на трущиеся поверхности различного рода покрытий, которые обеспечивают уникальные сочетания свойств, существенно отличающиеся от свойств материала основы.

Среди существующих современных технологий поверхностного упрочнения лучшим сочетанием свойств обладает метод осаждения покрытий на подложку из плазмы в вакууме. Среди разновидностей этого метода качеством и простотой получения покрытий стоит выделить метод физического осаждения покрытий в вакууме (в международной классификации PVD – сокращенно от англ. *physical vapour deposition*) [1-3]. Функциональные покрытия, полученные таким методом, по целевому назначению можно условно разделить на две группы: износостойкие и антифрикционные. Частные случаи трения требуют применения покрытий с одновременно высокими износостойкими и антифрикционными характеристиками. Решением данной проблемы могли бы стать композиционные покрытия, однако, они имеют ряд недостатков, ограничивающих их широкое применение: сложность производства и высокую себестоимость [4-5].

Задачей данного научного исследования стала оценка полного спектра триботехнических характеристик одноэлементных вакуумно-плазменных покрытий на основе тугоплавких металлов с целью их дальнейшего применения для улучшения эксплуатационных качеств узлов трения.

Для определения коэффициента трения скольжения со смазочным материалом использовались образцы из закаленной стали ШХ15, которые представляли собой цилиндрическое тело $\varnothing 60$ мм и высотой 10 мм, на торцовую поверхность которого были нанесены покрытия толщиной 5 мкм. Определение коэффициента трения скольжения характеристик вакуумно-плазменных покрытий и износа проводилось в соответствии с ГОСТ 23.224-86 на универсальной машине трения УМТ 2168 с электромеханическим измерителем момента сопротивления вращению (момента трения). В качестве контртела использовались термообработанные втулки из стали ШХ15 (65 HRC), контактная поверхность которых представляла собой кольцо (внутренний диаметр 12 мм, наружный – 20 мм). Шероховатость всех поверхностей трения составляла $Ra=0,04$ мкм. Условия контакта: трение скольжения по схеме «палец-диск» при неподвижном диске и вращающемся пальце.

При определении коэффициента трения скольжения со смазкой изучение производилось при погружении пары трения в масло И40А ГОСТ 20799-88.

Испытания проводили при частоте вращения пальца $n=300$ мин⁻¹ при постоянной влажности и температуре окружающей среды.

Коэффициент трения рассчитывали по формуле:

$$\mu = \frac{2M_{\text{ТР}}}{D \cdot F}$$

где $M_{\text{ТР}}$ – момент трения, Н·м;

D – диаметр образца, м; $D = 0,02$ м;

F – нагрузка, Н; при трении со смазкой $F = 1000$ Н.

В качестве образцов покрытий были представлены напыления на основе наиболее перспективных тугоплавких металлов, полученные магнетронным методом.

В результате измерения коэффициента трения покрытий в масле были получены данные, представленные на рисунке 1.

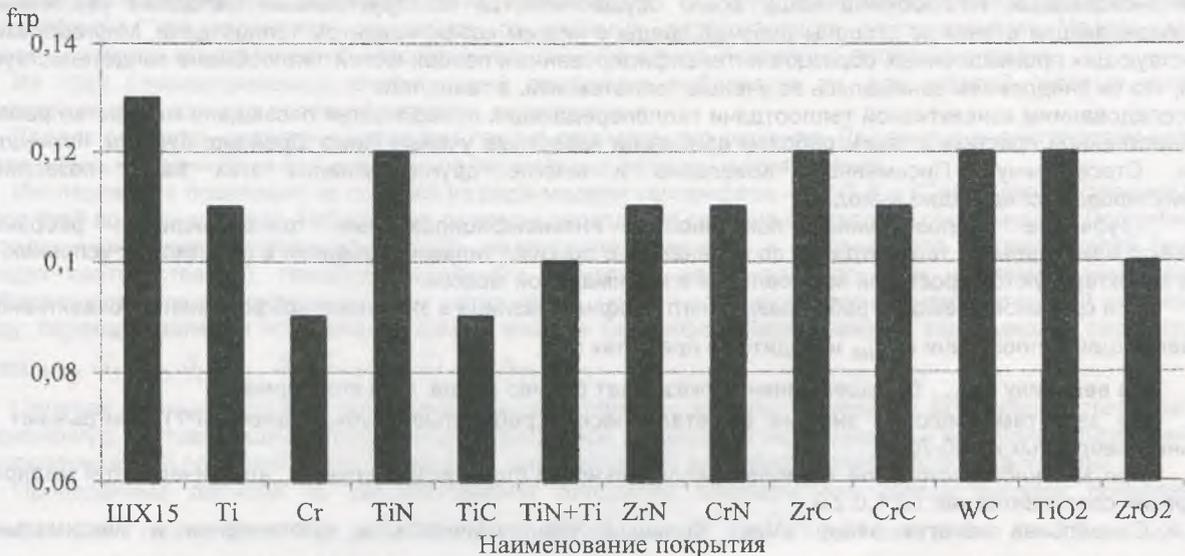


Рисунок 1 – Коэффициент трения скольжения в среде масла И40А пар трения «покрытие – сталь ШХ15»

Выводы:

1. Наименьшим коэффициентом трения скольжения при работе в паре со сталью ШХ15 обладают покрытия на основе *хрома и титана* (в том числе и многослойное). Данные вакуумно-плазменные покрытия наиболее целесообразно использовать для увеличения долговечности узлов трения, т.к. при минимальных толщинах они обладают повышенной износостойкостью и пониженным коэффициентом трения скольжения.

2. Также к использованию в узлах трения можно рекомендовать напыления *ZrN, CrN и ZrO₂*, как покрытия с повышенными триботехническими характеристиками.

3. Вакуумно-плазменное покрытие *Cr* продемонстрировало триботехнические характеристики, превосходящие характеристики покрытия, получаемого гальваническим методом. Данное обстоятельство можно объяснить более совершенной технологией нанесением вакуумно-плазменных покрытий, позволяющей получать покрытия высокой химической чистоты, однородности, мелкодисперсной структуры с низким количеством дефектов строения. Это обстоятельство позволяет рекомендовать метод вакуумно-плазменного нанесения данного покрытия, как альтернативу гальваническому способу его получения. Учитывая директивы США, Юго-Восточной Азии и ЕС 2000/53/EG ELV, значительно ограничивающих применение гальванического твердого хрома в автомобильной промышленности, ввиду его канцерогенных

свойств, применение экологически и биологически безопасного PVD напыления является перспективным шагом в развитии производства.

Список использованных источников

1. Толоч В.К., Падалка В.Г. Разработка и внедрение новых методов плазменной технологии высоких энергий // Вестник АН УССР. – 1979. – №4. – С. 40-49
2. Мацевитый В.М., Борушко М.С., Береснев В.М. и др. Структура и механические свойства вакуумно-плазменных покрытий TiCN // Известия вузов «Черная металлургия». – 1984. – №3. – С.83-86.
3. Полянин Б.И., Мацевитый В.М., Береснев В.М. и др. Вакуумно-плазменная конденсация бронзы // Авиационная промышленность. – 1985. – №5. – С.60-62.
4. Береснев В.М., Гриценко В.И., Толоч В.К. и др. Получение многокомпонентных покрытий методом КИБ // Труды семинара «Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике». М.: – 1989. – С. 143-144.
5. Мрочек Ж.А., Эйзнер Б.А., Марков В.А. Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных электродуговых покрытий. – Минск: Навука і тэхніка. –1991. – 95с.

УДК 621.1.016

**ЭКСЕРГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОРЕБРЕНИЯ
ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КАЛОРИФЕРОВ**

Зафатаев В.А., асс.,

**УО «Полоцкий государственный университет»,
г. Новополоцк, Республика Беларусь**

Важность энергосбережения в условиях недостатка в стране собственных источников энергоресурсов и роста цен на энергоносители побуждает к изучению особенностей процесса передачи теплоты и в дальнейшем к его интенсификации и удешевлению.

Интенсификация теплообмена чаще всего осуществляется конструктивными методами увеличения теплопередающей стенки со стороны рабочей среды с низким коэффициентом теплоотдачи. Многообразие существующих промышленных образцов интенсифицированных поверхностей теплообмена свидетельствует о том, что их внедрением занимались не учёные-теплотехники, а технологи.

Исследованиям конвективной теплоотдачи теплопередающих поверхностей посвящено множество работ. В отечественной практике к таким работам прибегали известные учёные Пиир, Дрейцер, Кунтыш, Кузнецов, Юдин, Стаселявичус, Письменный, Коваленко и многие другие. Анализ этих работ позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Трубчатые теплообменные поверхности, интенсифицированные трапецевидными рёбрами, обладают максимальной теплоотдачей по сравнению с другими типами оребрения в одинаковых условиях, а также характеризуются простотой изготовления и минимальной массой.

2. При одинаковой высоте рёбер различного профиля разница в значениях коэффициента конвективной составляющей теплоотдачи $\alpha_{конв}$ находится в пределах 5 %.

3. На величину $\alpha_{конв}$ большее влияние оказывает размер ребра, а не его форма.

4. По затратам тепловой энергии биметаллические ребристые трубы (далее БРТ) выигрывают у стальных ребристых на 50-70 %.

5. При заданной постоянной теплопроизводительности стоимости стального, алюминиевого и медного оребрения соотносятся как 1,2:1,0:2,0.

6. Спиральная накатка рёбер имеет большую технологичность в изготовлении и максимально возможные значения $\alpha_{конв}$ по сравнению с другими типами одиночных рёбер. Следует отметить, что в России не налажен промышленный выпуск труб со спиральной накаткой оребрения.

7. Возможности роста значения $\alpha_{конв}$ ограничены высотой ребра h , т.к. при больших значениях высоты ребра температура его торца приближается по величине к температуре омывающего потока.

8. Для шахматных пучков: величина $\alpha_{конв}$ падает при увеличении высоты ребра h и уменьшении шага рёбер S , т.е. при возрастании степени оребрения $\varphi_{ор}$ теплопередающей поверхности.

9. Из анализа конфигураций производимых БРТ значение $\varphi_{ор}=15,2$ оптимально с точки зрения учёта величины $\alpha_{конв}$ и гидравлических сопротивлений ΔP на прокачку омывающего теплоносителя. Оптимальные

размеры ребра в этом случае соотносятся как $\frac{h}{\Delta_p} = \left(\frac{2\lambda_p}{\alpha_{пр} \Delta_p} \right)^{0,5}$, где Δ_p – толщина ребра, м, λ_p –

коэффициент его теплопроводности, $\alpha_{пр}$ – приведенный коэффициент теплоотдачи оребренной поверхности, Вт/м²·°С.