

К.К.Сейтказенова, В.Н.Печерский, Б.Б.Жумалиев, Е.Г.Аким, С.Б.Калмахан

Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, Шымкент, Казахстан  
(E-mail: kseitkazi@mail.ru, vn-pecherskiy@mail.ru)

## Роль покрытий в снижении интенсивности эрозии

**Аннотация.** Предложен способ повышения эрозионной стойкости деталей путем нанесения на их рабочие поверхности покрытий, которые позволят значительно увеличить их срок службы в процессе эксплуатации.

Показана роль гальванического хромирования для изделий, испытывающих эрозионный износ в процессе работы. Установлено влияние плотности тока на степень износа, на микротвердость гальванического покрытия. Выявлено, что плотность тока, равную 60 а/дм<sup>2</sup>, следует считать оптимальной, так как этому

режиму соответствует минимальный износ  $\Delta G_k^{\min}$ .

Приведена технология защиты цилиндрических втулок двигателей плазменно-напыленным (пористым) покрытием. Показано, что последующая пропитка лаком (бакелитизация) снижает пористость плазменного покрытия. Выявлена толщина плазменно-напыленного покрытия, обеспечивающая оптимальную износостойкость, и установлена оптимальная шероховатость поверхностей

$R_a^{opt} \sim 0,16$  мкм. Проверена эффективность защиты водоохлаждаемых поверхностей втулок покрытием в натуральных условиях. Приведены результаты использования защитного неметаллического покрытия для втулок, обеспечивающих устойчивую работу систем охлаждения двигателей при всех нагрузках.

**Ключевые слова:** износ, эрозионная стойкость, покрытие, хромирование, плазменное напыление, микротвердость, стеклопластик, толщина.

DOI: [doi.org/10.32523/2616-7263-2022-140-3-125-133](https://doi.org/10.32523/2616-7263-2022-140-3-125-133)

## Введение

Несмотря на то, что современная наука и технические достижения располагают многочисленными средствами, проблема повышения износостойкости деталей машин, по-прежнему, остается актуальной. Для повышения надежности и долговечности машин используют различные технологические мероприятия, к которым можно отнести следующие: применение современных высокопрочных материалов для различных условий эксплуатации машин и получение из них заготовок высокого качества, применение современных технологий, обеспечивающих изготовление деталей заданной точности и стабильности как по размерам, так и по физико-механическим свойствам, создание надежной системы смазки, изоляция трущихся поверхностей от загрязнения, компенсация износа, применение быстросменных деталей и узлов и, наконец, использование защитных покрытий. Защитные покрытия деталей машин используются для повышения износостойкости и могут решить проблему повреждаемости деталей от внешних факторов в различных условиях изнашивания.

## Постановка проблемы

Ответственные детали различных технических средств в процессе эксплуатации

подвергаются эрозионному воздействию со стороны неоднородных жидких сред, и эта проблема еще далека до своего законченного решения. Интенсивной гидроэрозии подвергаются детали гидротурбин, лопатки влажно-паровых турбин атомных энергетических установок, разнообразное насосное оборудование, цилиндрические втулки двигателей, подшипники скольжения и качения и много другое оборудование. Срок службы любого оборудования ограничивается определенным сочетанием нагрузки, скорости и температуры. Для бесперебойной работы их нужно обеспечить износостойкость, эрозионную стойкость, надежность механизмов, узлов и деталей, входящих в состав оборудования.

В настоящее время известно достаточное количество научных направлений, перспективных для ограничения или снижения интенсивности эрозии оборудования. Некоторые из них реализованы на практике. Это управление механизмом замыкания пузырька, изменение свойств жидкости, создание специфического рельефа поверхностей и т.д. Перспективным материаловедческим решением может быть нанесение на рабочие поверхности деталей различных покрытий, которые позволят значительно увеличить их срок службы в процессе эксплуатации без изменения [1-5].

### Методы исследования

Одним из способов повышения эрозионной стойкости деталей является использование гальванических покрытий [6]. Образцы из стали 38ХМЮА, хромированные по различным технологическим режимам, испытывали на магнитострикционном вибраторе (МСВ). Температура электролита во время осаждения хрома поддерживалась постоянной в пределах 55-65<sup>0</sup>С, плотность тока изменялась от 20 до 70  $a/dm^2$  ступенями для шести групп образцов. Длительность процесса хромирования образцов менялась от 150 до 43 мин при изменении плотности тока от 20 до 70  $a/dm^2$ , что обеспечило примерно одинаковую толщину покрытия на всех образцах в пределах 30-45мк. Для покрытия использовался саморегулирующийся электролит, состоящий из хромового ангидрида, 250-300 г/л; кремнефтористого калия 18-20 г/л, и сернокислого стронция в количестве 5,5-6,5 г/л.

Испытания проводились в отстоянной водопроводной воде при 55-65<sup>0</sup>С на пассивных образцах, расположенных на расстоянии 1,2 мм от вибрирующего хвостовика магнитостриктора. Величина износа образцов определялась весовым методом после 1,2 и 3 часов испытаний.

### Обсуждение результатов

Характер изменения износа при различных плотностях тока оказался одинаковым для всех кривых, показанных на рис.1а.

Образцы с гальваническим покрытием, полученным при плотности тока, равной 60  $a/dm^2$ , имели наименьший износ. Измерение твердости показало, что образцы с минимальным износом имеют не максимальную микротвердость покрытия, но достаточно близкую к  $H_{\mu}^{\max}$ , что можно объяснить следующим образом.

С увеличением плотности тока увеличивается частота возникновения центров электрокристаллизации, размер зерна хромового покрытия уменьшается, а микроискажения кристаллической решетки увеличиваются. Микротвердость покрытия при этом непрерывно возрастает, при указанных режимах электролиза зависимость  $H_{\mu} = f(\delta_i)$  проходит через максимум при  $\delta_i = 70-80 a/dm^2$ . Увеличение плотности тока приводит к непрерывному росту пористости покрытия. Наиболее резкое увеличение пористости или трещинообразования наблюдается при плотностях тока, превышающих 90  $a/dm^2$ .

При изменении плотности тока при электролизе интенсивность кавитационно-эрозионного разрушения хромовых покрытий определяется соотношением микротвердости, с увеличением которой стойкость покрытия возрастает, и степени пористости или густоты микротрещин, а также величины остаточных напряжений в слое, снижающих стойкость покрытий (рисунок 1б). Одновременное влияние этих факторов приводит к появлению предсказанного теорией, минимума износа (рисунок 1а) в данных условиях изнашивания.

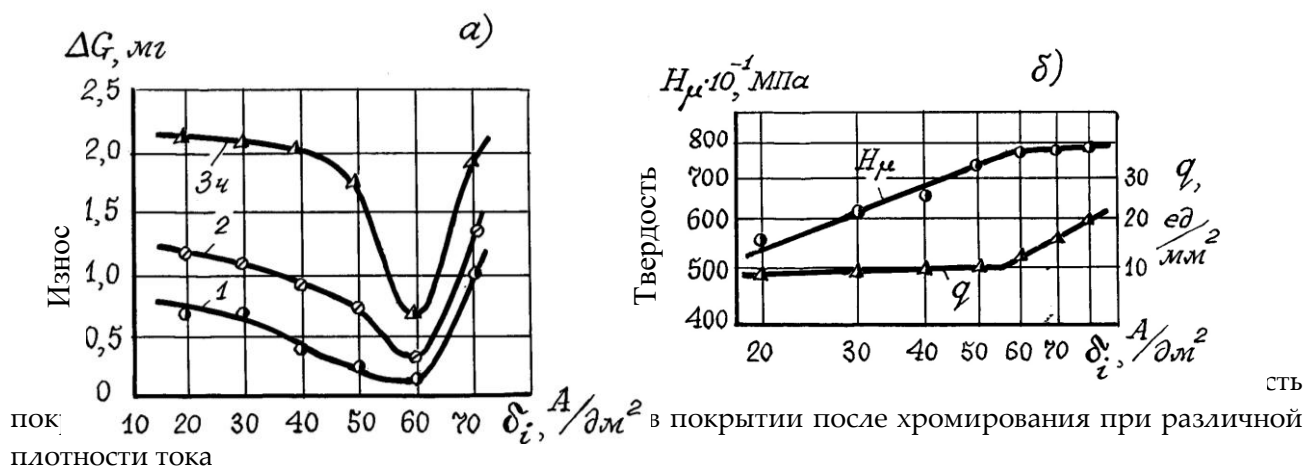


Рисунок 1. Результаты испытаний гальванически хромированных образцов из стали 38ХМЮА

При температуре электролита в пределах 55-65°C плотность тока, равную 60  $\text{a}/\text{дм}^2$ , следует считать оптимальной, так как этому режиму соответствует минимальный износ  $\Delta G_k^{\text{min}}$  в несколько раз отличающийся от  $\Delta G_k$  при неоптимальных режимах электролитического осаждения хрома.

Ресурс цилиндрических втулок средне- и высокооборотных двигателей в большинстве случаев ограничивается кавитационно-эрозионными разрушениями наружных охлаждаемых поверхностей. Основой технологии защиты поверхности втулок двигателей от кавитационно – эрозионных разрушений послужило теоретическое моделирование эрозионных процессов при кавитации и научно обоснованный выбор материалов для защитных покрытий.

Для защиты втулок от кавитационно-эрозионного разрушения использовали нихромовые плазменные покрытия. Технология нанесения покрытий на поверхность втулки плазменным способом включает следующие этапы: подготовку поверхности; нанесение покрытия; механическую обработку покрытия (на посадочных поясах); дополнительную обработку покрытия (бакелитизацию). Подготовку (активацию) поверхности втулки из стали 38ХМЮА производили карбидом кремния крупностью 450-550  $\mu\text{м}$ . Напыление порошкообразного нихрома на поверхность проводили в среде азота и аргона. Наиболее высокая износостойкость покрытия достигается при напылении нихрома в среде азота. Износ покрытия при этом примерно в 4 раза ниже в сравнении с износом нихрома, напыленного из прутка  $\varnothing 1,2 \text{ мм}$  в среде аргона.

Результаты множества экспериментальных исследований и накопленный производственный опыт при восстановлении деталей покрытием свидетельствуют о том, что оптимальная толщина эрозионностойких плазменно – напыленных покрытий составляет 300-600  $\mu\text{м}$ . Поэтому для цилиндрических втулок была принята толщина нихромового покрытия для боковой поверхности (без последующей механической обработки) и для посадочного пояса (после шлифования), равная 400  $\mu\text{м}$ . Перед напылением покрытия упрочняемые поверхности втулки шлифуют на диаметр меньше номинального на 0,8 мм.

Влияние шероховатости плазменно-напыленного (пористого) покрытия на его

кавитационно-эрозионную стойкость не является существенным. Чистовое шлифование повышает износостойкость пористого покрытия всего на 20%. С целью уменьшения отрицательного влияния пор произвели пропитку покрытия бакелитовым лаком, что увеличило его износостойкость после чистового шлифования примерно в два раза. Для условий виброконтантного взаимодействия плазменно-напыленного пояса втулки с чугунным буртом на поверхности блока установлена оптимальная шероховатость поверхностей  $R_a^{opt} \sim 0,16$  мкм. При шероховатости больше или меньше оптимальной относительная износостойкость беспористого покрытия уменьшается. На основании результатов выполненного анализа предусмотрено шлифование покрытия на посадочных поясах до шероховатости  $R_a = 0,16$  мкм с последующей бакелитизацией всех плазменно-напыленных поверхностей цилиндрической втулки.

Проверка эффективности защиты водоохлаждаемых поверхностей цилиндрических втулок покрытием в натурных условиях производилась в два этапа. На первом этапе боковые поверхности опытных втулок были покрыты нихромом Х20Н80 из проволоки повышенной чистоты напылением. Освидетельствование опытных втулок после 3 тыс. и 5 тыс. Часов эксплуатации дизеля показало высокую надежность защитных покрытий: трещины, отслоения и эрозионные повреждения в них отсутствовали.

На втором этапе испытаний шесть втулок с покрытиями по боковым и посадочным поверхностям (три – порошком ПХ18Н9Т и три – порошком ПХ20Н80 в среде азота) с пропиткой покрытий на четырех втулках бакелитовым лаком были установлены на двигатель. После эксплуатации двигателя в течение 1200 ч были произведены его разборка и осмотр опытных втулок. На всех шести втулках видимых следов кавитационно-эрозионных повреждений на боковой поверхности, щелевой эрозии и фреттинг-коррозии на посадочных поясах, обнаружено не было. Опытные втулки были оставлены в двигателе для дальнейшей эксплуатации.

В последнее время активно используются синтетические защитные покрытия. При их использовании необходимо решить следующие задачи – установить оптимальную толщину защитного покрытия, исходя из трех критериев: кавитационно-эрозионной стойкости, теплоизолирующей способности и макропрочности.

В работе использовали покрытие из стеклопластика (эпоксипласта, армированного стекложгутом), для которого экспериментально были установлены следующие зависимости:

а) зависимость кавитационного износа от толщины слоя  $\delta$ ,

$$\Delta G = 3,10 \exp(1,15\delta) \quad (1)$$

согласно которой с ростом толщины покрытия износ увеличивается по экспоненте;

б) зависимость прочности при растяжении от толщины покрытия

$$\sigma_b = 42,0 \delta^{0,36}, \quad (2)$$

утолщение покрытий увеличивает их предельную прочность;

в) и, наконец, на длине втулки между верхней и нижней мертвыми точками при заранее обусловленном (допускаемым) повышении температуры «зеркала» втулки при нахождении поршня в ВМТ толщина покрытия, как показывают расчеты, для выравнивания температуры должна возрастать по мере приближения к НМТ по степенной зависимости [7]

$$C(y) = 0,125 / \delta^{0,56}, \quad (3)$$

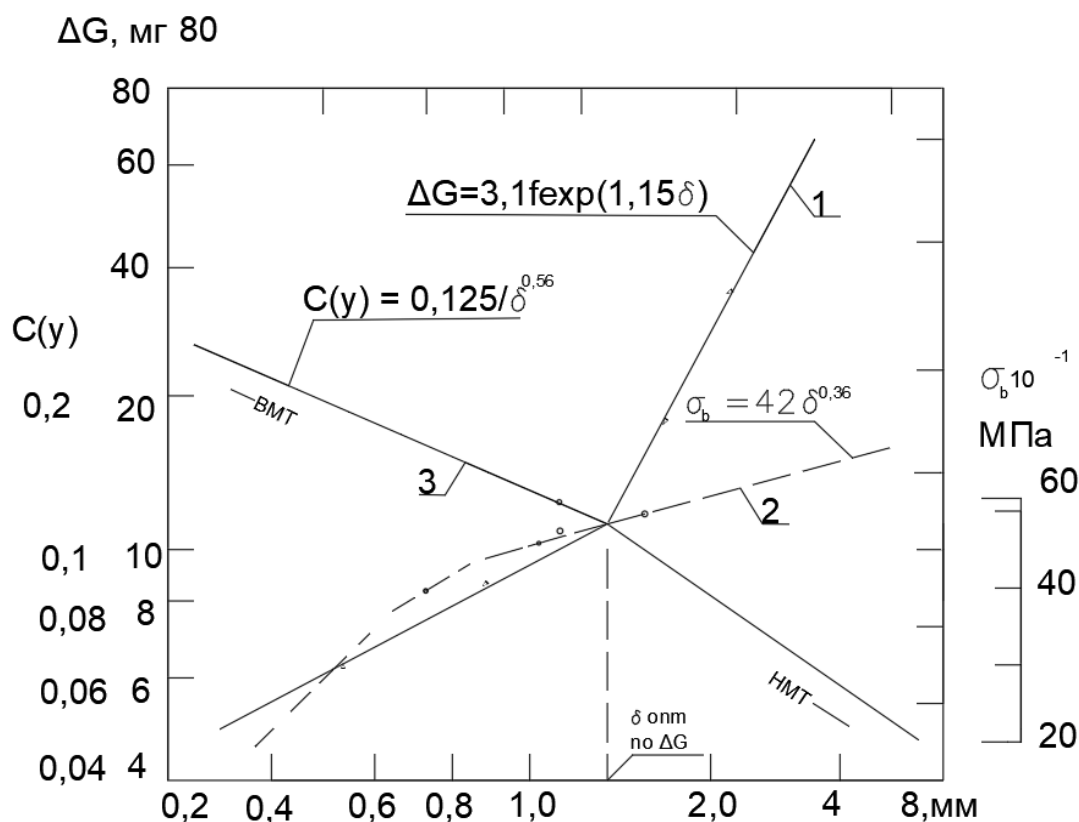
где  $C(y)$  – координата на боковой поверхности втулки, возрастающая в направлении ВМТ.

Зависимости (1)-(3), совмещенные на одном графике (рисунок 2), указывают на толщины покрытий  $\delta$ , лежащие в пределах от 0,8 до 1,5 мм, как на оптимальные (по  $\Delta G$  и  $\sigma_b$ ), если при этом не требуется более толстых покрытий по условиям теплоизоляции.

Если же по тепловому расчету требуется толщина  $\delta > 1,5$  мм, то следует принимать компромиссное решение, подчиняясь при этом экономическим соображениям, т.е. выбирать толщину покрытия по экономическому критерию.

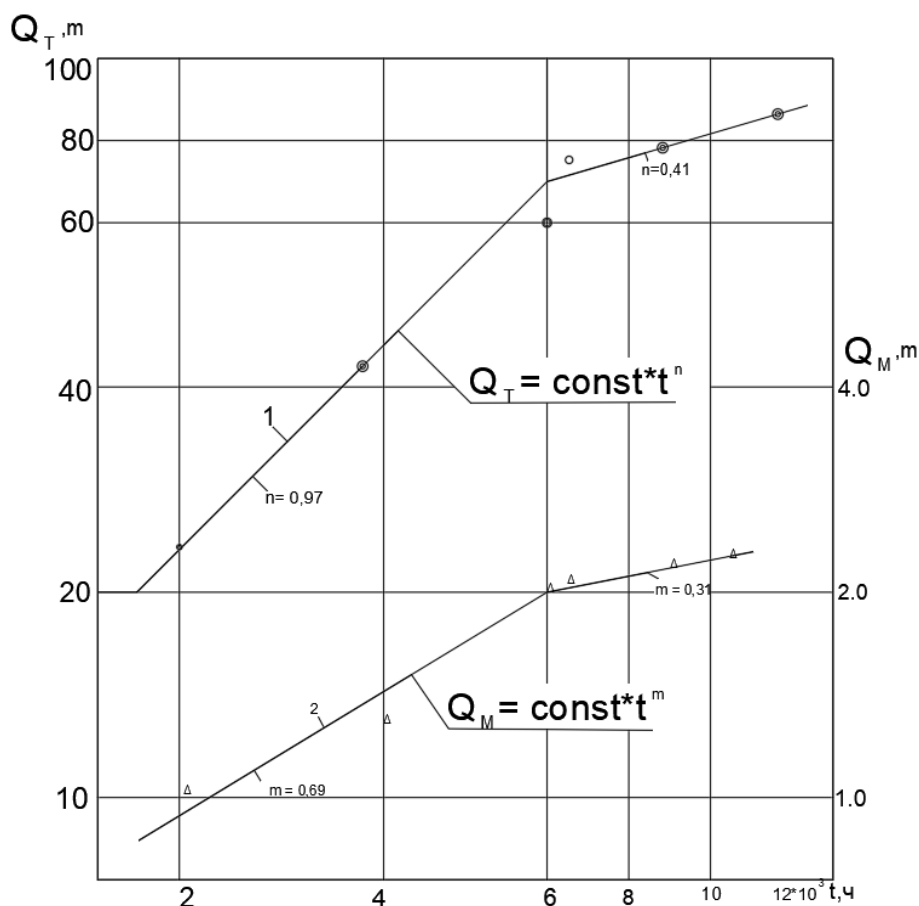
Если же толщина покрытия, установленная тепловым расчетом, приведет к улучшению рабочего процесса дизеля, уменьшению расхода топлива и масла, что в итоге перекроет потери, связанные с износом и перерасходом материала покрытия, то она (толщина) окажется оправданной (оптимальной) по экономическому критерию.

Данные более продолжительной эксплуатации дизелей с цилиндрическими втулками, защищенными синтетическим покрытием (рисунок 2), подтвердили результаты стендовых испытаний.



**Рисунок 2. Зависимость износа (1) и предела прочности синтетического покрытия (2) от его толщины; изменение толщины покрытия по высоте втулки (3) при условии наиболее равномерного распределения температуры**

Применение коррозионно-кавитационностойких теплоизоляционных синтетических покрытий (рисунок 2) не только предотвратило эрозию охлаждаемых поверхностей втулок и обеспечило выработку полного расчетного ресурса детали по износу «зеркала», но также привело к экономии 5% топлива (кривая 1 на рисунке 3) и 5,9% масла (кривая 2 на рисунке 3).



**Рисунок 3. Изменение количества сэкономленного топлива (1) и масла (2) в процессе эксплуатации двигателей с втулками цилиндров, защищенными покрытиями.**

Как уже было отмечено, ресурс цилиндрических втулок средне- и высокооборотных судовых двигателей в большинстве случаев лимитируется кавитационно-эрозионными разрушениями наружных охлаждаемых поверхностей и циклической долговечностью металла в галтели опорного бурта. В числе мероприятий, позволяющих наиболее эффективно бороться с эрозией деталей, в частности, цилиндрических втулок, на сегодняшний день остаются технологические: нанесение на водоохлаждаемые поверхности различных покрытий разными способами.

### Выводы

1. Существенное снижение интенсивности эрозии деталей достигается использованием покрытий, например, гальванических, необходимая толщина которых обеспечивалась выбором оптимальной плотности тока.
2. Наиболее эффективно бороться с эрозией цилиндрических втулок позволяют те же технологические мероприятия: нанесение на водоохлаждаемые поверхности металлических покрытий. Плазменные покрытия порошками ПХ20Н80 и ПХ18Н9Т поверхностей цилиндрических втулок двигателей исключают следы эрозии после эксплуатации ДВС, что подтверждается испытаниями в производственных условиях.
3. Ресурс цилиндрических втулок средне- и высокооборотных двигателей в большинстве случаев лимитируется не износом «зеркала», а кавитационно-эрозионными разрушениями наружных охлаждаемых поверхностей и циклической долговечностью металла в галтели опорного бурта.

4. Защита водоохлаждаемых поверхностей цилиндрических втулок судовых двигателей коррозионно-кавитационно-эрозионностойкими покрытиями на металлической и полимерной основе обеспечивает равную долговечность (равноизносность) втулки с наружной и внутренней сторон, что позволяет на 100% вырабатывать расчетный ресурс по износу «зеркала».

### Список литературы

1. Погодаев Л. И., Кузьмин А. А., Сейтказенова К. К. Расчет долговечности цилиндрических втулок дизельных двигателей при вибрационной кавитации //Трение, износ, смазка [www.tribo.ru](http://www.tribo.ru) – 2015, том 17, №62, с.1-13.
2. Сейтказенова К.К., Арапов Б.Р., Шокобаева Г.Т., Телешева А.Б. Оценка разрушающего воздействия кавитации на конструкционные материалы // Вестник КазНУТУ №5 2017, ст. 140-143.
3. Сейтказенова К.К., Мырзалиев Д.С., Суендыкова М.М., Асылбек М., Ергали К.Е. Анализ износостойкости материалов при кавитации в зависимости от механических и кинетических характеристик //Технология текстильной промышленности, № 5 (389) 2020, с.26-33.
4. Savenko V.I., Toporov Yu P., Chernyshev V.V., Malkin A.I. Microstructure and properties of surface-modified tungsten powders mechanically activated in different media // Physics of Metals and Metallography -2017, volume 118, № 11, P. 1066-1072.
5. Petrunin M.A., Gladkikh N.A., Maleeva M.A., Maksaeva L.B., Kostina Yu V., Shapagin A.V., Yurasova T.A., Kotenev V.A., Tsivadze A.Yu. The formation of self-organizing organosilicone layers on a carbon steel surface and their effect on the electrochemical and corrosion behavior of the metal // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces – 2019, volume 55, № 5, P. 895-902.
6. Создание новых и совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических и их замещающих покрытий // Материалы докладов республиканского научно-технического семинара. – Минск: БГТУ, 2011. – 163 с.
7. Zhou Y.K., Gu Ch., Shen F., Lou B. Study on mechanism of combined action of abrasion and cavitation erosion on some engineering steels //Wear. – 1993, №162-164.–P.811-819.

**К.К. Сейтказенова, В.Н. Печерский, Б.Б. Жұмалиев, Е.Г. Әкім,  
С.Б. Қалмахан**

*М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан*

### Эрозия қарқындылығын төмендетудегі жабындардың рөлі

**Аңдатпа.** Бөлшектердің эрозияға төзімділігін олардың жұмыс беттеріне жабындарды қолдану арқылы арттыру әдісі ұсынылады, бұл олардың қызмет ету мерзімін едәуір арттырады.

Жұмыс барысында эрозиялық тозуды бастан кешіретін өнімдер үшін гальваникалық хромдаудың рөлі көрсетілген. Ток тығыздығының тозу дәрежесіне, гальваникалық жабынның микроқаттылығына әсері анықталды. 60 а/дм<sup>2</sup>-ге тең ток тығыздығы оңтайлы деп саналуы керек, өйткені бұл режим минималды  $\Delta G_k^{\min}$  тозуға сәйкес келеді .

Қозғалтқыштардың цилиндрлі төлкелерін плазмалық-тозаңды (кеуекті) жабынмен қорғау технологиясы келтірілген. Кейіннен лакпен сіндіру (бакелитизация) плазмалық жабынның кеуектілігін төмендететіні көрсетілген. Оңтайлы тозуға төзімділікті қамтамасыз ететін плазмалық

шашыратылған жабынның қалыңдығы анықталды және  $R_a^{omm} \sim 0,16$  мкм беттердің оңтайлы кедір-бұдырлығы анықталды. Төлкелердың су салқындататын беттерін табиғи жағдайда жабынмен қорғаудың тиімділігі тексерілді. Барлық жүктемелер кезінде қозғалтқыштарды салқындату жүйелерінің тұрақты жұмысын қамтамасыз ететін төлкелер үшін қорғайтын металл емес жабынды пайдалану нәтижелері келтірілген.

**Кілт сөздер:** тозу, эрозияға төзімділік, жабын, хромдау, плазмалық тозандату, микроқаттылық, шыны пластик, қалыңдығы

**K.K. Seitkazenova, V.N. Pecherskiy, B.B. Zhumaliev, E.Akim, S.Kalmakhan**  
*M.Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan*

### The role of coatings in reducing erosion intensity

**Abstract.** The article proposes a method for increasing the erosion resistance of parts by applying coatings on their working surfaces. It will significantly increase their service life while in operation.

The article considers the role of electrolytic chrome-plating for workpieces experiencing erosive wear on stream. The effect of the current density on the degree of wear and on the microhardness of the electroplated coating. It was found that the current density equal to 60 A / dm<sup>2</sup> should be considered optimal since this regime corresponds to the minimum wear  $\Delta G_k^{\min}$ .

The article presents the technology of protection of engine cylinder bushings with a plasma-sprayed (porous) coating. It is shown that the subsequent impregnation with varnish (bakelization) reduces the porosity of the plasma coating. The authors have revealed the thickness of the plasma-sprayed coating, which provides optimal wear resistance, and the optimal surface roughness is  $R_a^{omm} \sim 0.16$  microns. The authors have tested the effectiveness of protection of the water-cooled surfaces of the bushings with a coating in natural conditions. The article presents the results of using a protective non-metallic coating for bushings, which ensures stable operation of engine cooling systems under all loads.

**Keywords:** wear, erosion resistance, coating, chrome-plating, plasma spraying, micro hardness, [glass reinforced plastic](#), thickness

### References

1. Pogodayev L. I., Kuz'min A. A., Seytkazenova K. K. Raschet dolgovechnosti tsilindrovyykh vtulok dizel'nykh dvigateley pri vibratsionnoy kavitatsii //Treniye, iznos, smazka www.tribo.ru – 2015, tom 17, №62, s.1-13.
2. Seytkazenova K.K., Arapov B.R., Shokobayeva G.T., Telesheva A.B. Otsenka razrushayushchego vozdeystviya kavitatsii na konstruktsionnyye materialy // Vestnik KazNITU №5 2017, st. 140-143.
3. Seytkazenova K.K., Myrzaliyev D.S., Suyendykova M.M., Asylbek M., Yergali K.Ye. Analiz iznosostoykosti materialov pri kavitatsii v zavisimosti ot mekhanicheskikh i kineticheskikh kharakteristik //Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti, № 5 (389) 2020, s.26-33.
4. Savenko V.I., Toporov Yu P., Chernyshev V.V., Malkin A.I. Microstructure and properties of surface-modified tungsten powders mechanically activated in different media // Physics of Metals and Metallography -2017, volume 118, № 11, R. 1066-1072.
5. Petrunin M.A., Gladkikh N.A., Maleeva M.A., Maksaeva L.B., Kostina Yu V., Shapagin A.V., Yurasova T.A., Kotenev V.A., Tsivadze A.Yu. The formation of self-organizing organosilicone layers on a carbon steel surface and their effect on the electrochemical and corrosion behavior of the metal // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces – 2019, volume 55, № 5, R. 895-902.
6. Sozdaniye novykh i sovershenstvovaniye deystvuyushchikh tekhnologiy i oborudovaniya



naneseniya gal'vanicheskikh i ikh zameshchayushchikh pokrytiy // Mmaterialy dokladov respublikanskogo nauchno-tekhnicheskogo seminarara. – Minsk: BGTU, 2011. – 163 s.

7.Zhou Y.K., Gu Ch., Shen F., Lou B. Study on mechanism of combined action of abrasion and cavitation erosion on some engineering steels //Wear. – 1993, №162-164.–P.811-819.

**Сведения об авторах:**

**Сейтказенова К.К.** - доктор технических наук, профессор кафедры механики и машиностроения, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауезова, пр. Тауке-хана, 5, корпус В, Шымкент, Казахстан.

**Печерский В.Н.** - доктор технических наук, профессор кафедры механики и машиностроения, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауезова, пр. Тауке-хана, 5, корпус В, Шымкент, Казахстан.

**Жумалиев Б.Б.** - магистр, старший преподаватель кафедры механики и машиностроения, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауезова, пр. Тауке-хана, 5, корпус В, Шымкент, Казахстан.

**Аким Е.Г.** - магистрант кафедры механики и машиностроения, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауезова, пр. Тауке-хана, 5, корпус В, Шымкент, Казахстан.

**Калмахан С.Б.** - магистрант кафедры механики и машиностроения, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауезова, пр. Тауке-хана, 5, корпус В, Шымкент, Казахстан.

**Seitkazenova K.** - Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Mechanics and Mechanical Engineering, M.Auezov South Kazakhstan University, Tauke khan avenue 5, building B, Shymkent, Kazakhstan.

**Pecherskiy V.** - Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Mechanics and Mechanical Engineering, M.Auezov South Kazakhstan University, Tauke khan avenue 5, building B, Shymkent, Kazakhstan.

**Zhumaliev B.-** Master of Technical Science, Senior Lecturer of Department of Mechanics and Mechanical Engineering, M.Auezov South Kazakhstan University, Tauke khan avenue 5, building B, Shymkent, Kazakhstan.

**Akim E.** - Master student of Department of Mechanics and Mechanical Engineering, M. Auezov South Kazakhstan University, Tauke khan avenue 5, building B, Shymkent, Kazakhstan.

**Kalmakhan S.** - Master student of Department of Mechanics and Mechanical Engineering, M. Auezov South Kazakhstan University, Tauke khan avenue 5, building B, Shymkent, Kazakhstan.