

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-435-448

EDN SWATXX

INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF CHROME ELECTROLYTIC COATINGS ON THEIR RESISTANCE AGAINST CAVITATION WEAR

Y. N. Tsvetkov¹, E. O. Gorbachenko², A. D. Cheblokov³

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation,

² — Joint Stock Company «KSZ», St. Petersburg, Russian Federation,

³ — Joint Stock Company «Concern «Sea underwater weapon — Gidropribor»»,
St. Petersburg, Russian Federation

Bright chromium electrolytic deposits are widely used on water transport to provide the wear resistance of the crucial equipment parts in particular to protect the water-cooled surface of ship diesel liners against the cavitation attack. There were seven bright chromium coatings tested. The coatings were deposited in different regimes and the surface of the coatings was subjected to different treatment. The coatings were distinguished from each other by thickness, microhardness and the character of cracks distribution. The chromium plating was carried out in standard electrolyte of the following composition (kg/m³): chrome anhydride — 250; sulphuric acid — 2,5; trivalent chrome — no more than 5; trivalent iron ions — no more than 10. The electrolyte was prepared on the distilled water of a single distillation. The chrome electrolytic coatings were obtained on the plates cut out of the used ship diesel liners made out of cast iron SCh21. The cavitation wear tests were carried out on a magnetostrictive vibratory rig in fresh water, the frequency and amplitude of vibration of the rig horn being equal to 22 kHz and 28 μm accordingly. The distance between the sample chrome surface and the horn butt amounted to 0,5 mm. The wear of the samples was evaluated by periodical weighing during the testing on an analytical balance with step-type indication equal to 0,1 mg. Along with the samples weighing, the roughness of their surface was measured before and during testing, the roughness was evaluated by the value of arithmetical mean deviation of the assessed profile. The coatings structure was investigated on their cross microsections using a metallurgical microscope before and after the test. Cavitation wear resistance of a chromium coating is determined by two factors: the character of the cracks in the coating and the coating thickness. The coating thickness affects the coating longevity under cavitation attack, and the cracks character affects both the coating longevity and the wear rate of the chromium coating. The density of the cracks emerging on a coating surface and the cracks breadth define the surface roughness, and the cavitation wear begins from the coatings spots adjacent to the cracks edges: there occurs the brittle breaking off of the particles from the coating by its destruction along the cracks already present in the original coating. So there has to be a dependence of the wear rate on the height parameter of the roughness: the dependence was established by results of the experiments. The existence of the dependence of the wear rate on the value of the arithmetical mean deviation of the assessed profile of initial coating surface allows one to draw a conclusion, that after chromium plating, liners surface is necessary to expose to grinding with a fine-grained tool and, if possible, to polishing. The chrome coating has to be dense, that is the broad extended cracks have to be absent in the coatings.

Keywords: chrome electrolytic coating, coating structure, ultrasonic magnetostrictive rig, cavitation wear, surface roughness.

For citation:

Tsvetkov, Yuriy N., E. O. Gorbachenko and A. D. Cheblokov “Influence of the structure of chrome electrolytic coatings on their resistance against cavitation wear.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 435–448. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-435-448.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ХРОМОВЫХ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ИХ КАВИТАЦИОННУЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ

Ю. Н. Цветков¹, Е. О. Горбаченко², А. Д. Чеблоков³

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация,

² — ЗАО «Канонерский судоремонтный завод», Санкт-Петербург, Российская Федерация,

³ — АО «Концерн «Морское подводное вооружение — Гидроприбор»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой работы является исследование хромовых электролитических покрытий, широко применяемых на водном транспорте для повышения износостойкости деталей ответственного оборудования, в том числе для защиты водоохлаждаемых поверхностей втулок цилиндров судовых дизелей от кавитационного воздействия. В работе предпринята попытка связать шероховатость хромовых блестящих покрытий с характером распределения в них трещин и, как следствие, с кавитационной износостойкостью покрытий. Были испытаны семь покрытий из блестящего хрома, нанесенных при разных режимах и имеющих разную обработку поверхности, отличающихся друг от друга толщиной, микротвердостью и характером распределения трещин. Хромирование выполнялось в стандартном электролите — водном растворе хромового ангидрида и серной кислоты — следующего состава: хромовый ангидрид (CrO_3) — 250 г/л; серная кислота (H_2SO_4) — 2,5 г/л; содержание трехвалентного хрома — не более 5 г/л; содержание ионов трехвалентного железа — не более 10 г/л. Электролит готовился на дистиллированной воде однократной перегонки. Хром наносили на образцы из серого чугуна СЧ21, вырезанные из втулок цилиндров судового дизеля, бывших в эксплуатации. Испытания на кавитационный износ проводили в пресной воде при температуре воды $20 \pm 3^\circ\text{C}$ на ультразвуковом магнитоэстрикционном вибраторе при частоте и амплитуде колебаний торца концентратора, равных примерно 22 кГц и 28 мкм соответственно. Расстояние между поверхностью испытываемого покрытия и торцом колеблющегося концентратора выставляли равным 0,5 мм. В процессе испытаний образцы периодически взвешивали на аналитических весах с дискретностью показаний 0,1 мг, при этом наряду с потерями массы образцов оценивали шероховатость поверхности покрытий в очаге износа по значению среднего арифметического отклонения профиля. Структуру покрытия исследовали на металлографическом микроскопе на поперечных нетравленных шлифах до и после испытаний. Учитывали, что износостойкость хромовых электролитических покрытий при кавитации определяется двумя факторами: характером трещин в покрытии и толщиной покрытия, а также то, что толщина покрытия влияет на его долговечность, а характер трещин — как на долговечность, так и на скорость изнашивания хромового покрытия. Густота сетки трещин, выходящих на поверхность, и их ширина определяют шероховатость поверхности, а поскольку кавитационный износ начинается с районов покрытия, примыкающих к берегам трещины в начальный период кавитационного воздействия, происходит хрупкий откол частиц от покрытия путем его разрушения по уже имеющимся трещинам в исходном покрытии, должна проследиваться зависимость между скоростью изнашивания и высотным параметром шероховатости R_a , что подтверждается результатами экспериментов. Существование зависимости скорости изнашивания от среднего арифметического отклонения профиля исходной поверхности хромового покрытия позволяет сделать вывод о том, что поверхность втулок цилиндров после хромирования необходимо подвергать шлифованию мелкозернистым инструментом и по возможности полированию. При этом покрытие должно быть плотным, а именно не содержать большое количество широких протяженных трещин.

Ключевые слова: хромовое электролитическое покрытие, структура покрытия, трещины, ультразвуковой магнитоэстрикционный вибратор, кавитационное изнашивание, шероховатость поверхности.

Для цитирования:

Цветков Ю. Н. Влияние структуры хромовых электролитических покрытий на их кавитационную износостойкость / Ю. Н. Цветков, Е. О. Горбаченко, А. Д. Чеблоков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 435–448. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-435-448. — EDN SWATXX.

Введение (Introduction)

Кавитация воды в рубашках охлаждения между поверхностью втулок и блока цилиндров дизельных двигателей вследствие вибрации втулок при ударах поршней при их перекладке являет-

ся серьезной проблемой, с которой приходится сталкиваться при эксплуатации высокооборотных дизелей [1], [2]. Вибрационная кавитация приводит к кавитационному изнашиванию водоохлаждаемых поверхностей втулок цилиндров [3], [4] и противолежащих поверхностей блока цилиндров. Втулки цилиндров чаще всего изготавливают из серого чугуна, реже — из азотируемых сталей. Чугун обладает замечательными трибологическими свойствами при работе на трение в паре с поршневыми кольцами, однако кавитационная износостойкость его чрезвычайно низкая. Кавитационная износостойкость стали существенно выше износостойкости чугуна, однако на стальных втулках очаги кавитационных разрушений появляются также часто, как и на чугунных.

Одним из способов повышения долговечности втулок цилиндров судовых дизелей в условиях кавитационного изнашивания является электролитическое хромирование водоохлаждаемой поверхности втулок^{1,2}. Несмотря на серьезные недостатки технологии электролитического хромирования, указанные, в частности, в работах [5], [6], и внедрение новых более совершенных технологий повышения износостойкости водоохлаждаемой поверхности втулок [7], хромовые электролитические покрытия до сих пор применяются при изготовлении и ремонте втулок судовых дизелей. Внешний диаметр втулки цилиндра в ее водоохлаждаемой части не относится к сопрягаемым размерам, поэтому механическая обработка внешней поверхности втулок после ее хромирования с конструктивной точки зрения необязательна. В этой связи возникает вопрос о необходимости шлифования и полирования хромового покрытия, нанесенного на водоохлаждаемую поверхность.

Известно, что в зависимости от режима хромирования можно получить молочные блестящие и матовые покрытия. Максимальную износостойкость при кавитационном воздействии имеют блестящие хромовые покрытия, однако они всегда покрыты сеткой трещин вследствие больших остаточных напряжений в покрытии, возникающих при его формировании³. Распределение трещин и их характеристики зависят от многих факторов, включая режим хромирования и толщину покрытия [8], [9].

Очевидно, что трещины влияют на эксплуатационные свойства деталей с хромовыми электролитическими покрытиями, к примеру, на сопротивление циклическим нагрузкам [9], [10], износостойкость³ и коэффициент трения [11] покрытий при трении скольжения. Вопрос износостойкости хромовых покрытий при трении исследован достаточно подробно, так как электролитический хром часто наносят на поверхность трения втулок цилиндров двигателей внутреннего сгорания. Известно, что гладкое хромовое покрытие обладает плохой смачиваемостью смазочными маслами, а микротрещины на поверхности хромового покрытия играют роль микропор. Поэтому сетка трещин способствует удержанию смазочного масла на поверхности хромового покрытия и кратному увеличению его износостойкости при трении в условиях граничной смазки [12]. Установлено³, что пористость хромового покрытия для поршневых колец дизелей должна быть в пределах 30–45 % [11].

При кавитационном воздействии влияние трещин на износостойкость хромового покрытия имеет принципиально иной характер по сравнению с их влиянием на износостойкость при трении скольжения. Так, например, в работе [13] показано, что трещины на поверхности хромовых электролитических покрытий являются очагами разрушения при кавитационном воздействии. Можно обоснованно полагать, что густота сетки трещин, а также длина и ширина их раскрытия будут оказывать влияние на шероховатость поверхности, а значит, можно попытаться связать шероховатость хромовых покрытий с их кавитационной износостойкостью, тем более, что с подобных позиций исследования кавитационной износостойкости хромовых электролитических покрытий не проводились.

Целью работы является исследование влияния структуры и шероховатости хромового электролитического покрытия на его кавитационную износостойкость.

¹ Погодаев Л. И. Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования: монография / Л. И. Погодаев, П. А. Шевченко. Л.: Судостроение, 1984. 264 с.

² Фомин В. В. Гидроэрозия металлов: монография / В. В. Фомин. М.: Машиностроение, 1977. 287 с.

³ Ларин Т. В. Повышение износостойкости втулок и поршневых колец тепловозных дизелей: монография / Т. В. Ларин, Б. М. Асташкевич. М.: Трансжелдориздат, 1957. 124 с.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Эксперименты выполнялись на образцах, вырезанных из рабочих втулок цилиндров дизеля 6Ч(Н)СП 18/22. Материал втулки — чугун СЧ21. Заготовки для образцов вырезали вдоль оси втулки. Вырезанные полосы фрезеровали, чтобы получить полосу толщиной около 7 мм с двумя плоскими поверхностями. Хромовое покрытие осаждалось на фрезерованную поверхность чугуна.

Хромирование выполнялось в стандартном электролите — водном растворе хромового ангидрида и серной кислоты — следующего состава: хромовый ангидрид (CrO_3) — 250 г/л, серная кислота (H_2SO_4) — 2,5 г/л, содержание трехвалентного хрома не более 5 г/л, содержание ионов трехвалентного железа не более 10 г/л. Электролит готовился на дистиллированной воде однократной перегонки. Так как износостойкость покрытий определяется конкретными характеристиками и не зависит от того, на каких режимах хромирования получены требуемые характеристики покрытия, хромирование осуществляли анодно-струйным и стационарным методами при разных значениях температуры и плотности тока с последующим после хромирования анодным травлением (покрытия образцов 1–4) и без него (покрытия образцов 5, 6), чтобы получить покрытия разной толщины и пористости (см. таблицу). Следует обратить внимание на то, что покрытие образца 6 представлено двумя видами образцов, отличающихся разной обработкой после хромирования: образцы 6_ш шлифовали на шкурке 320, а образцы 6_п сначала шлифовали на шкурках 320, 500, 800, 1000 и 1200, а потом полировали на влажном сукне.

Структуру покрытия исследовали на поперечных нетравленных шлифах на металлографическом микроскопе. Технология подготовки шлифов рассмотрена в работе [14]. Шлифы покрытий готовили перед испытаниями для определения структуры покрытия в исходном состоянии и после испытаний на кавитационный износ. Шлифы анализировали с помощью металлографического микроскопа.

Характеристики образцов хромового электролитического покрытия

Номер образца	Метод хромирования	Средняя толщина покрытия, мкм	Параметр шероховатости R_a , мкм	Микротвердость покрытия H_{100} , МПа	Состояние поверхности покрытия
1	Стационарное + анодное травление	60	2,11	7593	Исходное, полученное при хромировании
2	Анодно-струйное + анодное травление	90	4,07	7133	То же
3	Анодно-струйное + анодное травление	160	1,91	5915	То же
4	Анодно-струйное + анодное травление	120	3,05	7411	То же
5	Анодно-струйное	70	0,605	6821	То же
6	6 _ш Анодно-струйное	140	0,817	7340	Шлифованное после хромирования
	6 _п Анодно-струйное	120	0,012	7340	Шлифованное и полированное после хромирования

¹ Микротвердость покрытий образцов 1–5 находили на поперечных шлифах покрытия, микротвердость покрытия образца 6 оценивали на полированной поверхности покрытия образца 6_п.

Перед испытаниями делали снимки поверхности покрытия образцов на металлографическом микроскопе, измеряли шероховатость поверхности, определяли микротвердость покрытия и взвешивали образец на аналитических весах с дискретностью показаний 0,1 мг. Шероховатость оценивали по значению среднего арифметического отклонения профиля R_a на приборе шероховатости MahrSurf PS1. Длина оценки включала пять базовых длин, последнюю выставляли равной 0,8 мм. Измерения исходной шероховатости проводили трижды, за окончательный результат брали среднее арифметическое значение. Микротвердость покрытий измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор (пирамидку Виккерса), соответствующей массе грузика, равной 100 г.

Испытания образцов хромовых покрытий на кавитационный износ проводили на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе (МСВ) — рис. 1 — в отстоявшейся водопроводной воде г. Санкт-Петербурга. Температура воды в процессе испытаний поддерживалась в диапазоне 20 ± 3 °С. Частота и амплитуда колебаний торца концентратора 4 вибратора составляла, соответственно, 22 кГц и 28 мкм. Расстояние между хромированной поверхностью образца 5 и торцом концентратора 4 выставляли равным 0,5 мм.

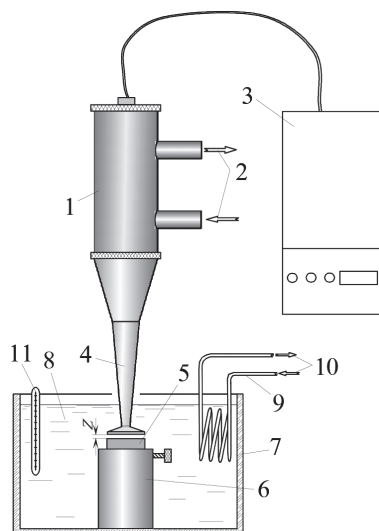


Рис. 1. Схема испытаний на магнитострикционном вибраторе:

- 1 — ультразвуковой излучатель; 2 и 10 — подвод охлаждающей воды;
3 — генератор ультразвуковых колебаний; 4 — концентратор колебаний; 5 — образец;
6 — державка образца; 7 — емкость с водой; 8 — вода;
9 — охлаждающий змеевик; 11 — термометр

Периодически во время испытаний установку выключали, образец вынимали из державки, сушили, фотографировали очаг износа, измеряли шероховатость, взвешивали и определял потери массы ΔM . По результатам испытаний строили зависимости ΔM и R_a от продолжительности кавитационного воздействия. После окончания испытания готовили поперечный шлиф образца и анализировали кавитационное разрушение хромового покрытия на металлографическом микроскопе.

Результаты и их обсуждения (Results and Discussion)

На рис. 2 представлены фотографии исходной (до испытаний) поверхности хромового покрытия на образцах 1–5. Покрытия на образцах 6 перед испытаниями, соответственно, шлифовали (образец 6_ш) или шлифовали и полировали (образец 6_п). В результате обработки абразивными шкурками рисунок трещин на поверхности пропадает, так как они забиваются продуктами шлифования и полирования, и поверхность приобретает однородный зеркальный блеск. Однако после краткого кавитационного воздействия на МСВ рисунок трещин вновь проявляется на поверхности и по нему можно судить о пористости хромового покрытия в исходном (до испытания) состоянии, поэтому на рис. 2, е приведена фотография поверхности полированного покрытия на образце 6_п.

после 8-часового кавитационного воздействия, на основе которой можно судить о распределении трещин в исходном покрытии образца 6.

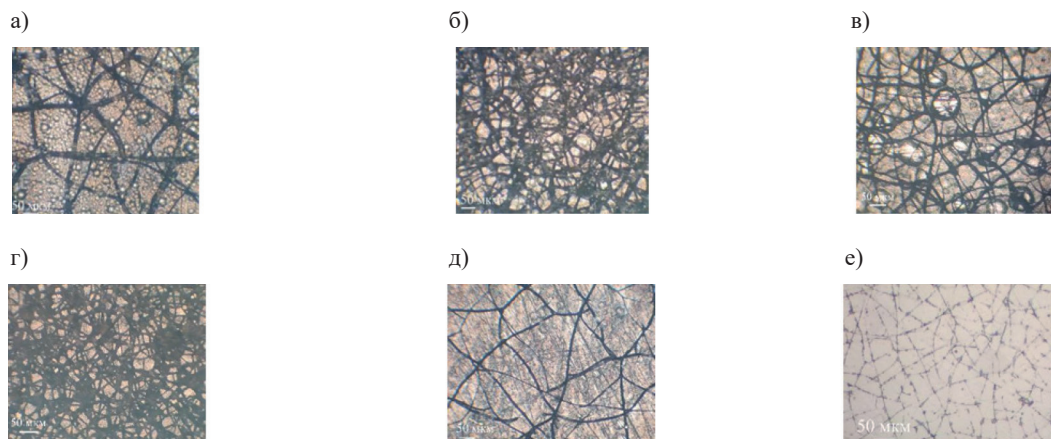


Рис. 2. Фотографии поверхности хромового покрытия в исходном состоянии:
а — образец 1; б — образец 2; в — образец 3; г — образец 4; д — образец 5;
е — образец 6_п после 8-часового кавитационного воздействия на него

На рис. 3 показана структура хромовых покрытий в исходном (до испытания) состоянии на поперечных нетравленных шлифах. Как видно, покрытия существенно отличаются не только по толщине, но и по характеру и распределению трещин. Если покрытие образца 6 сравнительно плотное (см. рис. 3, е, ж), то покрытия на образцах 1–5 содержат большое количество трещин разной протяженности, причем, если сопоставлять фотографии на рис. 2 и 3, то можно отметить, что густой сетке соответствуют узкие короткие трещины и если такие трещины начинаются с поверхности, то проникают на небольшую глубину (см. рис. 3, б–г, е, ж), а редкой сетке — наоборот, широкие и глубокие (см. рис. 3, а, д), и в пределе такие трещины достигают чугуновой подложки (см. рис. 3, а).

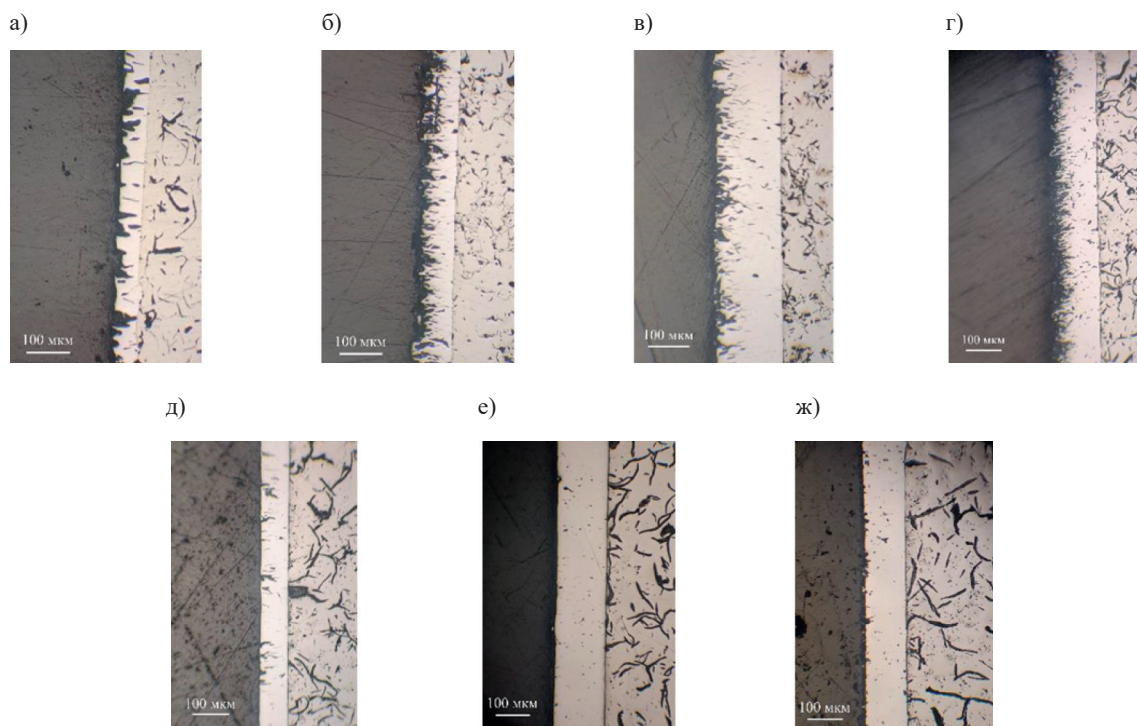


Рис. 3. Структура хромового покрытия:
а — на образце 1; б — на образце 2; в — на образце 3; г — на образце 4;
д — на образце 5; е, ж — на образцах, соответственно, 6_ш и 6_п

Известно, что кавитационное изнашивание металлических материалов характеризуется наличием инкубационного периода, т. е. начального отрезка времени, в течение которого потери материала с поверхности покрытия отсутствуют, идет процесс накопления повреждений в поверхностном слое. Сравнение построенных по результатам испытаний зависимостей потерь массы ΔM от продолжительности t кавитационного воздействия $\Delta M(t)$, приведенных на рис. 4 и 5, показало, что скорость изнашивания испытанных покрытий находится в широком диапазоне и может отличаться для разных покрытий на два порядка, при этом износ всех покрытий начинается с первых секунд кавитационного воздействия. Причину такого поведения покрытий при кавитационном воздействии поможет раскрыть анализ зависимостей $R_a(t)$, представленных вместе с графиками $\Delta M(t)$ на рис. 4 и 5, а также фотографий на рис. 6, на которых показан внешний вид испытанных образцов и поперечные сечения покрытий в очаге кавитационного износа.

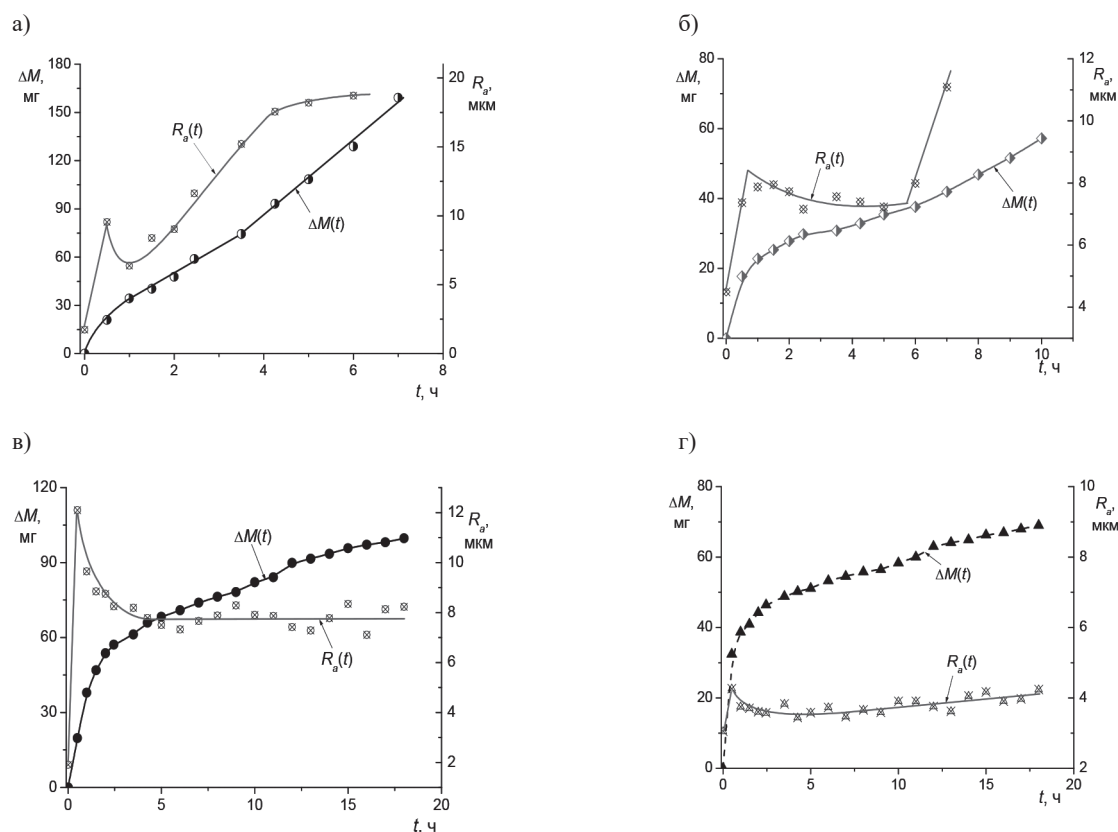


Рис. 4. Зависимости потерь массы и среднего арифметического отклонения профиля от продолжительности кавитационного воздействия:

а — образец 1; б — образец 2; в — образец 3; г — образец 4

В работе [15] показано, что при кавитационном изнашивании металлических материалов зависимость $R_a(t)$ имеет вид ломаной линии, т. е. в пределах инкубационного периода зависимость $R_a(t)$ линейная, а окончанию инкубационного периода соответствует появление первой точки перелома. Это хорошо видно на графиках для покрытий образцов 5 и 6 (рис. 5): по точке перелома на зависимостях $R_a(t)$ можно оценить продолжительность $t_{и2}$ инкубационного периода. Результаты периодического измерения микротвердости покрытия $6_{и}$ в течение времени $t_{и2}$ показали наличие стадии упрочнения и разупрочнения [16], т. е. потери массы в инкубационный период на образцах покрытий $6_{и}$ и $6_{п}$, по всей видимости, не имеют ничего общего с кавитационной износостойкостью собственно хромового покрытия.

Характер изменения зависимости $\Delta M(t)$ для покрытий образцов $6_{и}$ и $6_{п}$ (см. рис. 5) в течение инкубационного периода имеет отличительные особенности, проявляющиеся вначале в увеличении потерь массы образцов, а затем в их уменьшении и прохождении через минимум. Причины

такого изменения потерь массы подробно описаны в статье [16] и, вероятнее всего, объясняются вымыванием частиц микрочастиц покрытия, образовавшихся при шлифовании покрытия, из трещин и попаданием воды в условиях ультразвукового кавитационного воздействия в микротрещины. Кроме того, предлагается корректировать кинетические кривые $\Delta M(t)$ переносом оси абсцисс вверх так, чтобы она прошла через минимум (линия 1 на рис. 5, б) и тогда условную продолжительность инкубационного периода $t_{и1}$ находить, согласно [17], по точке пересечения касательной 2 с новой осью абсцисс 1 (на рис. 5, в, линии 1 и 2 не обозначены). Видно, что значения $t_{и1}$ и $t_{и2}$ очень близки друг к другу. Это доказывает возможность использования *метода профилометрии* для оценки продолжительности инкубационного периода хромовых блестящих покрытий с низкой пористостью.

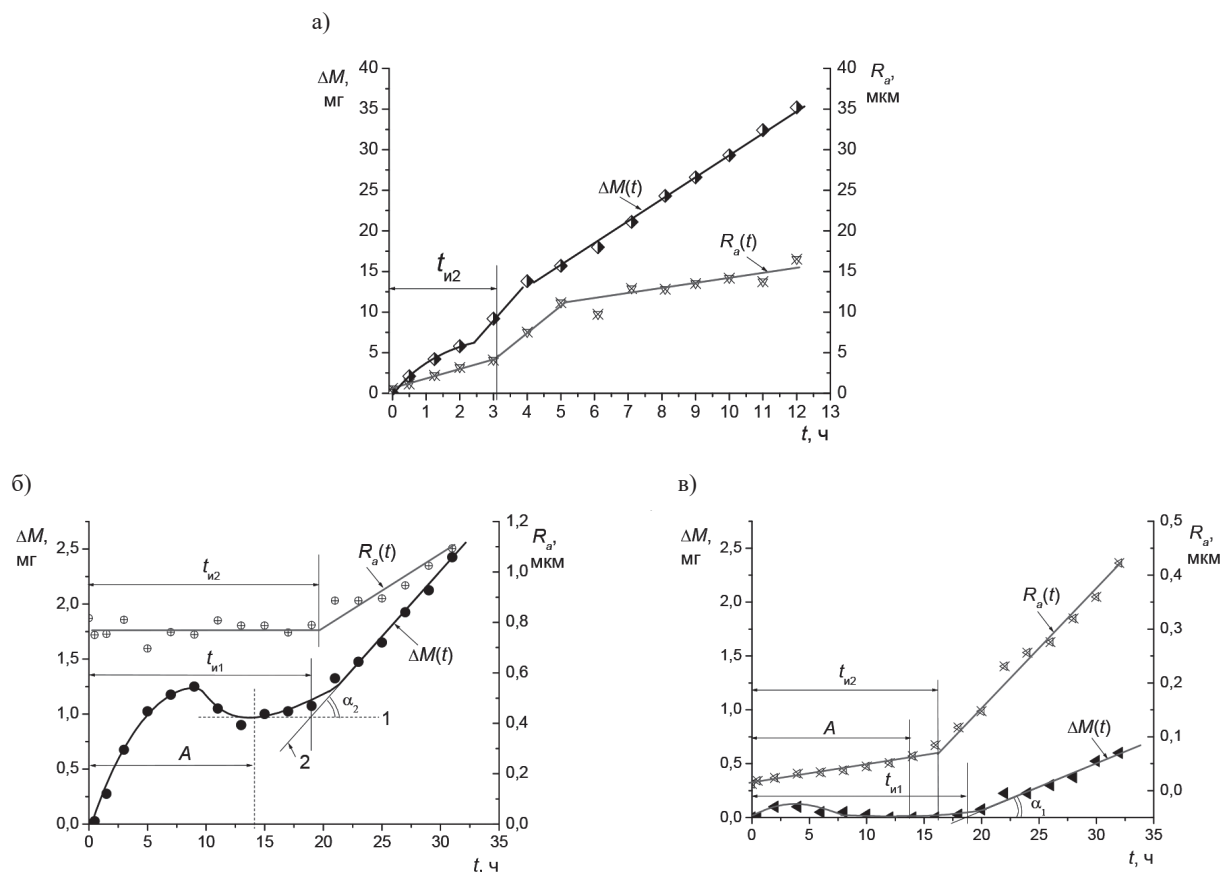


Рис. 5. Зависимость потерь массы и среднего арифметического отклонения профиля образцов от продолжительности кавитационного воздействия:
а — образец 5; б, в — соответственно образцы 6_ш и 6_п

Для покрытий образцов 1–4 (см. рис. 4) вид зависимостей $R_a(t)$ принципиально отличается от вида графиков $R_a(t)$ на рис. 5. Как видно из рис. 4, параметр R_a вначале резко увеличивается и проходит через максимум. Это объясняется тем, что в начальный период кавитационного воздействия происходит хрупкий откол частиц от покрытия путем его разрушения по уже имеющимся трещинам в исходном покрытии.

Для покрытий образцов 3 и 4 после прохождения максимума значение параметра R_a изменяется слабо и не превышает максимального значения, т. е. шероховатость покрытия после откола крупных частиц снижается. Последнее очевидно, если сравнить покрытия 3 и 4 в исходном состоянии (см. рис. 3, в, з) и после испытаний (см. рис. 6, в и з), т. е. верхние слои покрытий, наиболее насыщенные трещинами, удаляются в виде частиц износа. После испытаний покрытий образцов 3 и 4 в них не обнаружено участков полного отделения покрытий от чугунной подложки.

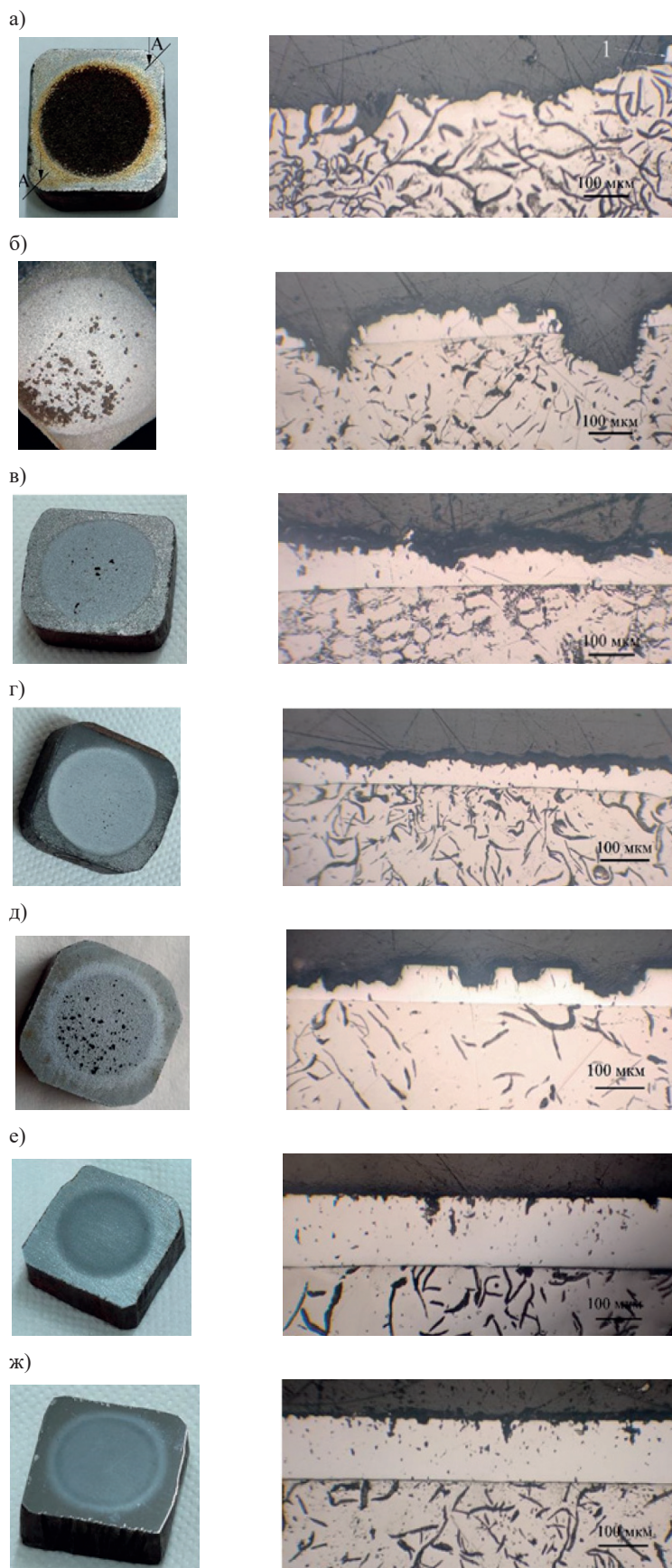


Рис. 6. Внешний вид испытанных образцов и их поперечного сечения в очаге кавитационного износа:
а — образец 1 после 7 ч испытаний (1 — остаток хромового покрытия); б — образец 2 после 10 ч испытаний;
в — образец 3 после 18 ч испытаний; г — образец 4 после 18 ч испытаний; д — образец 5 после 12 ч испытаний;
е — образец 6_ш после 32 ч испытаний; ж — образец 6_н после 32 ч испытаний

Для покрытий образцов 1 и 2 после прохождения максимума значение параметра R_a проходит минимум и начинает возрастать (начало увеличения параметра R_a соответствует началу разрушения серого чугуна). Для покрытия образца 1 (см. рис. 4, а) участки полностью удаленного покрытия появляются уже через 1 ч, что соответствует минимуму зависимости $R_a(t)$ кавитационного воздействия, и после 4 ч изнашивания хромовое покрытие оказывается полностью удаленным, в этот момент также происходит изменение характера зависимости R_a (см. рис. 4, а). На рис. 6, а показано, что хромовое покрытие полностью удалено в очаге кавитационного износа, видны остатки (обозначены цифрой 1) хромового покрытия на периферии очага износа, из уровня расположения которых следует, что разрушение чугунной подложки произошло на заметную глубину. Для покрытия образца 2 минимум на графике $R_a(t)$ наступает лишь после 6 ч испытаний (см. рис. 4, б), и, кроме того, полное отделение хромового покрытия от чугунной подложки произошло лишь на некоторых участках (рис. 6, б). Таким образом, покрытие образца 2 оказалось более износостойким, чем покрытие образца 1, что объясняется тем, что в отличие от покрытия образца 1 в покрытии образца 2 отсутствуют широкие длинные сквозные трещины. Тем не менее толщина покрытия образца 2 является недостаточной для того, чтобы обеспечить продолжительную долговечность в условиях кавитационного воздействия.

Так же, как и в случае кавитационного изнашивания покрытий образцов 3 и 4, при испытании покрытия образца 5 (рис. 6, д) и покрытий образцов $6_{\text{ш}}$ и $6_{\text{п}}$ (рис. 6, е, ж) кавитационное повреждение не достигает чугунной подложки. Изнашивание покрытия образца 5 (см. рис. 6, д) определяется исходной структурой покрытия (см. рис. 3, д), отличающейся чередованием участков плотного (с отсутствием трещин) покрытия и участков скопления трещин, в которых имеются трещины с большим раскрытием. Поэтому кавитационное разрушение покрытия образца 5 (см. рис. 6, д) происходит путем отделения сравнительно больших частиц износа в результате выламывания покрытия на участках скопления трещин, при этом участки с исходной плотной структурой остались практически неповрежденными.

Износостойкость покрытий образцов $6_{\text{ш}}$ и $6_{\text{п}}$, в которых отсутствуют протяженные широкие трещины, оказалось наиболее высокой. Как видно из рис. 6, е, ж, кавитационные разрушения этих покрытий представляют собой язвы глубиной 10–45 мкм и диаметром 10–30 мкм, что соизмеримо с диаметром ударных микроструй, генерируемых при испытании на МСВ, т. е. характер кавитационного разрушения покрытий образцов $6_{\text{ш}}$ и $6_{\text{п}}$ отличается от характера кавитационного разрушения покрытия образцов 1–5 (см. рис. 6, а–д) — в последних размер повреждений определяется длиной и раскрытием трещин в исходном состоянии.

Таким образом, износостойкость хромовых электролитических покрытий при кавитации определяется двумя факторами: характером трещин в покрытии и толщиной покрытия. Толщина покрытия влияет на его долговечность, а характер трещин — как на долговечность, так и на скорость изнашивания хромового покрытия. Очевидно, густота сетки трещин, выходящих на поверхность, и их ширина определяют шероховатость поверхности, а так как кавитационный износ начинается с районов покрытия, примыкающих к берегам трещины, должна проследиваться зависимость между скоростью изнашивания и высотным параметром шероховатости R_a . Действительно, согласно рис. 7, большинство точек формируют единую зависимость скорости изнашивания от значения параметра R_a , обозначенную линией. Скорость изнашивания I_i находили как отношение средневзвешенного износа и продолжительности испытаний:

$$I_i = \frac{I_{\text{ср.взв}}}{t} = \frac{1}{t^2} \int_0^t \Delta M(t) dt,$$

где t — продолжительность испытаний;

$I_{\text{ср.взв}}$ — средневзвешенный износ, определяемый как отношение площади под зависимостью $\Delta M(t)$ к продолжительности кавитационного воздействия t .

На рис. 7 видно, что точка, соответствующая покрытию образца 1, не подчиняется общей зависимости $I_i(R_a)$. Тот факт, что точка, соответствующая покрытию образца 1, выпадает из общей

группы точек, объясняется тем, что скорость изнашивания покрытия образца 1 определяется главным образом скоростью изнашивания чугунной подложки, так как большая часть хромового покрытия была удалена уже через 1 ч кавитационного воздействия. В то же время положение точки, соответствующей образцу покрытия 2, подчиняется общей зависимости, несмотря на то, что образец покрытия 2 местами тоже был удален с чугунной подложки и в этих местах начался износ чугуна (см. рис. 6, б), тем не менее незначительный вклад потерь массы чугуна в общий износ образца не мог повлиять на положение точки, соответствующей покрытию образца 2.

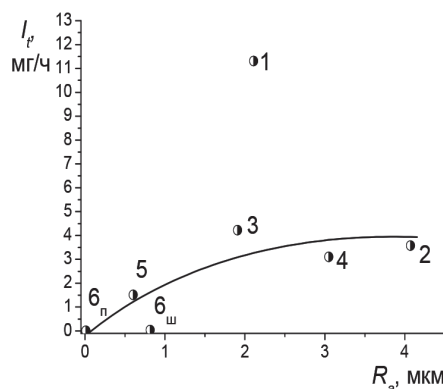


Рис. 7. Зависимость средней скорости изнашивания хромовых электролитических покрытий от высотного параметра шероховатости R_a покрытий в исходном (до испытания) состоянии (номер точки соответствует номеру образца покрытия в таблице)

О влиянии шероховатости поверхности металлов и сплавов на их кавитационную износостойкость известно давно: установлено, что чем лучше обработана поверхность, тем меньше интенсивность кавитационных разрушений в начальный период изнашивания⁴. Однако применительно к хромовым электролитическим покрытиям подробные исследования о влиянии шероховатости их поверхности на кавитационную износостойкость не проводились. Существование зависимости $I_p(R_a)$ позволяет сделать вывод о том, что поверхность втулок цилиндров после хромирования необходимо подвергать шлифованию мелкозернистым инструментом и по возможности полированию. При этом покрытие должно быть плотным и не содержать широких протяженных трещин.

Заключение (Conclusion)

Износостойкость хромовых электролитических покрытий при кавитации определяется двумя факторами: характером трещин в покрытии и толщиной покрытия. Толщина покрытия влияет на его долговечность, а характер трещин — как на долговечность, так и на скорость изнашивания хромового покрытия.

Кавитационный износ начинается с районов покрытия, примыкающих к берегам трещины — в начальный период кавитационного воздействия происходит хрупкий откол частиц от покрытия путем его разрушения по уже имеющимся трещинам в исходном покрытии. Густота сетки трещин, выходящих на поверхность, и их ширина определяют шероховатость поверхности.

Между скоростью кавитационного изнашивания хромовых электролитических покрытий и высотным параметром шероховатости R_a исходной поверхности покрытий существует зависимость, которая позволяет сделать вывод о необходимости после хромирования поверхности втулок цилиндров производить шлифование покрытия мелкозернистым инструментом и по возможности полирование. При этом для обеспечения высокой кавитационной износостойкости хромовое покрытие должно быть плотным, а именно не содержать широких протяженных трещин.

⁴ Иванченко, Н. Н. Кавитационные разрушения в дизелях: монография / Н. Н. Иванченко, А. А. Скуридин, М. Д. Никитин. Л.: Машиностроение, 1970. 152 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Liu D.* Modelling and evaluating piston slap-induced cavitation of cylinder liners in heavy-duty diesel engines. / D. Liu, N. Sun, G. Zhu, H. Cao, T. Wang, G. Li, F. Gu // *Eksploracja i Niezawodność — Maintenance and Reliability*. — 2023. — Vol. 25. — Is. 3. DOI: 10.17531/ein/169644.
2. *Tong D.* An Analysis of the Factors Influencing Cavitation in the Cylinder Liner of a Diesel Engine / D. Tong, S. Qin, Q. Liu, Y. Li, J. Lin // *Fluid Dynamics & Materials Processing*. — 2022. — Vol. 18. — Is. 6. — Pp. 1667–1682. DOI: 10.32604/fdmp.2022.019768.
3. *Bako S.* Canvitational deterioration of diesel power plant cylinder liner / S. Bako, A. Nasir, B. Ige, N. Musa // *Journal of Mechanical and Energy Engineering*. — 2020. — Vol. 4. — Is. 3. — Pp. 239–246. DOI: 10.30464/jmee.2020.4.3.239.
4. *Park I-C.* Cavitation erosion characteristics of hard chromium plated diesel engine cylinder liner / I-C. Park, S-J. K. and // *Transactions of the IMF*. — 2022. — Vol. 100. — Is. 4. — Pp. 189–192. DOI: 10.1080/00202967.2022.2063588.
5. *Mekicha M. A.* The effect of hard chrome plating on iron fines formation / M. A. Mekicha, M. B. Rooij, D. T. A. Matthews, C. Pelletier, L. Jacobs, D. J. Schipper // *Tribology International*. — 2020. — Vol. 142. — Pp. 106003. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.106003.
6. *Astanin V. K.* Hardening parts by chrome plating in manufacture and repair / V. K. Astanin, E. V. Pukhov, Y. A. Stekolnikov, V. V. Emtsev, O. A. Golikova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2018. — Vol. 327. — Is. 3. — Pp. 032008. DOI: 10.1088/1757-899X/327/3/032008.
7. *Zhang W.* Strengthening the Cavitation Resistance of Cylinder Liners Using Surface Treatment with Electroless Ni-P (ENP) Plating and High-Temperature Heat Treatment / W. Zhang, H. Gao, Q. Wang, D. Liu, E. Zhang // *Materials*. — 2025. — Vol. 18. — Is. 5. DOI: 10.3390/ma18051087.
8. *Вихров Н. М.* Гидродинамика процесса анодно-струйного хромирования / Н. М. Вихров, В. А. Голицын // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2013. — № 2(21). — С. 77–86. — EDN RUOIBJ.
9. *Вихров Н. М.* Влияние проточного электролитического хромирования на предел выносливости стали / Н. М. Вихров, В. А. Голицын // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2014. — № 4(26). — С. 59–67. — EDN SKOIBD.
10. *Ngon D. T.* Study of the Effect of Chrome Coating Layer to the Fatigue Strength of the Axial Machine Parts / D. T. Ngon, L. C. Cuong, N. V. Phoi // *2016 3rd International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD) 2016*. — C. 135–140. DOI: 10.1109/GTSD.2016.40.
11. *Podgornik B.* Crack density and tribological performance of hard-chrome coatings / B. Podgornik, O. Massler, F. Kafexhiu, M. Sedlacek // *Tribology International*. — 2018. — Vol. 121. — Pp. 333–340. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.01.055.
12. *Sohi M. H.* Comparative tribological study of hard and crack-free electrodeposited chromium coatings / M. H. Sohi, A. A. Kashi, S. M. M. Hadavi // *Journal of Materials Processing Technology*. — 2003. — Vol. 138. — Is. 1. — Pp. 219–222. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00075-X.
13. *Цветков Ю. Н.* Особенности изнашивания хромовых электролитических покрытий при кавитационном воздействии / Ю. Н. Цветков, Б. О. Горбаченко, В. А. Голицын, А. Д. Чеблоков // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. — 2024. — Т. 90. — № 9. — С. 75–84. DOI: 10.26896/1028-6861-2024-90-9-75-84. — EDN KRPTDX.
14. *Цветков Ю. Н.* Особенности технологии подготовки микрошлифов хромового гальванического покрытия / Ю. Н. Цветков, А. Д. Баранов, А. Д. Чеблоков // *Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, 25 сентября — 2023 года*. — СПб.: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2023. — С. 387–392. — EDN EOCTHX.
15. *Цветков Ю. Н.* Исследование кавитационного изнашивания сталей методом измерения профиля поверхности / Ю. Н. Цветков, Е. О. Горбаченко // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. — 2015. — Т. 81. — № 11. — С. 62–65. — EDN UXWBMB.
16. *Цветков, Ю. Н.* Прогнозирование кавитационной износостойкости хромовых электролитических покрытий по профилю изношенной поверхности / Ю. Н. Цветков, Е. О. Горбаченко, В. А. Голицын // *Вестник машиностроения*. — 2019. — № 4. — С. 79–86. DOI 10.3103/S1068798X19070232. — EDN ACMQXZ.
17. ASTM G32–16 Standard test method for cavitation erosion using vibratory device. ASTM International, 2016. — 20 p.

REFERENCES

1. Liu, D., et al. "Modelling and evaluating piston slap-induced cavitation of cylinder liners in heavy-duty diesel engines." *Eksploatacja i Niezawodność — Maintenance and Reliability* 25.3 (2023). DOI: 10.17531/ein/169644.
2. Tong D. An Analysis of the Factors Influencing Cavitation in the Cylinder Liner of a Diesel Engine / D. Tong, S. Qin, Q. Liu, Y. Li, J. Lin // *Fluid Dynamics & Materials Processing*. — 2022. — Vol. 18. — Is. 6. — Pp. 1667–1682. DOI: 10.32604/fdmp.2022.019768.
3. Bako, S., A. Nasir, B. Ige and N. Musa. "Canvitational deterioration of diesel power plant cylinder liner." *Journal of Mechanical and Energy Engineering* 4.3 (2020): 239–246. DOI: 10.30464/jmee.2020.4.3.239.
4. Park, I–C. and S–J. K. and. "Cavitation erosion characteristics of hard chromium plated diesel engine cylinder liner." *Transactions of the IMF* 100.4 (2022): 189–192. DOI: 10.1080/00202967.2022.2063588.
5. Mekicha, M. A., et al. "The effect of hard chrome plating on iron fines formation." *Tribology International* 142 (2020): 106003. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.106003.
6. Astanin, V. K., O. A. Golikova, et al. "Hardening parts by chrome plating in manufacture and repair." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 327.3 (2018): 032008. DOI: 10.1088/1757–899X/327/3/032008.
7. Zhang, W., E. Zhang, et al. "Strengthening the Cavitation Resistance of Cylinder Liners Using Surface Treatment with Electroless Ni–P (ENP) Plating and High-Temperature Heat Treatment." *Materials* 18.5 (2025). DOI: 10.3390/ma18051087.
8. Vikhrov, N. M. and V. A. Golitsyn. "Gidrodinamika protsessa anodno-struynogo khromirovaniya." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 2(21) (2013): 77–86.
9. Vikhrov, N. M. and V. A. Golitsyn. "Vliyanie protochnogo elektroliticheskogo khromirovaniya na predel vynoslivosti stali." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 4(26) (2014): 59–67.
10. Ngon, D. T., L. C. Cuong and N. V. Phoi. "Study of the Effect of Chrome Coating Layer to the Fatigue Strength of the Axial Machine Parts." *2016 3rd International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)2016*: 135–140. DOI: 10.1109/GTSD.2016.40.
11. Podgornik, B., O. Massler, F. Kafexhiu and M. Sedlacek. "Crack density and tribological performance of hard-chrome coatings." *Tribology International* 121 (2018): 333–340. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.01.055.
12. Sohia, M. H., A. A. Kashia and S. M. M. Hadavi. "Comparative tribological study of hard and crack-free electrodeposited chromium coatings". *Journal of Materials Processing Technology* 138.1 (2003): 219–222. DOI: 10.1016/S0924–0136(03)00075–X.
13. Tsvetkov, Yu. N., B. O. Gorbachenko, V. A. Golitsyn and A. D. Cheblov. "Features of cavitation wear of chrome electrolytic coatings." *Industrial Laboratory. Materials Diagnostics* 90.9 (2024): 75–84. DOI: 10.26896/1028-6861-2024-90-9-75-84.
14. Tsvetkov, Yu. N., A. D. Baranov and A. D. Cheblov. "Peculiarities of technology of preparing the microsections of chrome electrolyte deposit." *Sbornik nauchnykh statey natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO "GUMRF imeni admirala S. O. Makarova", Sankt-Peterburg, 25 sentyabrya — 202023 goda*. Sankt-Peterburg: Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2023: 387–392.
15. Tsvetkov, Yu. N. and E. O. Gorbachenko. "Estimation of incubation period at cavitation wear of steel through measuring roughness." *Industrial Laboratory. Materials Diagnostics* 81.11 (2015): 62–65.
16. Tsvetkov, Yu. N., E. O. Gorbachenko and V. A. Golitsyn. "Predicting the Cavitation Wear Resistance of Electrolytic Chromium Coatings". *Russian Engineering Research* 39.7 (2019): 580–586. DOI: 10.3103/S1068798X19070232.
17. *ASTM G32–16 Standard test method for cavitation erosion using vibratory device*. ASTM International, 2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цветков Юрий Николаевич —
доктор технических наук, профессор,
Государственный университет морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова,
198035 Санкт-Петербург,
ул. Двинская, д. 5/7,
e-mail: yuritsvet@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tsvetkov Yuriy Nikolayevich —
doctor of science, professor,
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping,
d.5/7, ul. Dvinskaya, Saint-Petersburg, 198035,
Russian Federation.
e-mail: yuritsvet@mail.ru

Горбаченко Евгений Олегович —

кандидат технических наук

ЗАО «Канонерский судоремонтный завод»,

198184, г. Санкт-Петербург, Канонерский остров, 41

e-mail: jenyraqwerty@gmail.com

Чеблоков Андрей Дмитриевич —

инженер-технолог,

АО «Концерн “Морское подводное вооружение –

Гидроприбор”»,

194044, г. Санкт-Петербург, пр. Большой

Сампсониевский, дом 24А, литер 3

e-mail: cheblovandrey@gmail.com

Gorbachenko Evgeniy Olegovich — PhD,
JSC “KSZ”,

41, Kanonersky ostrov, St. Petersburg, 198184,

Russian Federation

e-mail: jenyraqwerty@gmail.com

Cheblovkov Andrey Dmitrievich —

manufacturing engineer,

JSC “Concern “Sea underwater weapon –

Gidropribor”,

24, lit. 3, B. Sampsonievskii prospect, Saint-Petersburg

Petersburg, 198035, Russian Federation.

e-mail: cheblovandrey@gmail.com

Статья поступила в редакцию 13 марта 2025 г.

Received: Mar. 13, 2025.