частотного диапазона обнаружения бронетанковой техники техническими средствами разведки и наведения вооружения противника, наносится определенное количество функционального радиопоглощающего материала на резинотканевую подложку в определенной последовательности.

Материал резино-тканевый радиопоглощающий РТП-90 поставляется в виде ленты готовой для установки на бронетанковую технику, при этом все исходные компоненты выпускаются предприятиями Российской Федерации.

Усредненные данные измерений коэффициентов отражения по мощности материала радиопоглощающего РТП- 90 представлены в таблице 1.

Таблица 1 – **Усредненные данные измерений коэффициентов отражения по мощности материала радиопоглощающего РТП- 90**

Длина волны λ, см	**Коэффициент отражения**
0,8	10, не более
2	10, не более
3,2	10, не более
10	15, не более

Измерение радиофизических характеристик образцов РПКМ, реализуемых на объектах военной техники проведены в СВЧ измерительной лаборатории АО "ЦНИИМ", по стандартной методике измерений, в отдельных точках диапазона 3 – 37 ГГц.

УДК 623.4.011

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ СТВОЛОВ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ ОРУДИЙ

Д.Е. Латышев[1], В.С. Сивко[2], Е.Н. Моисеев[3]

Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт материалов», 191014, *Санкт-Петербург, ул. Парадная,* 8, *e-mail: info@cniim.com*

Представлены результаты металлографических исследований и стендовых испытаний экспериментальных образцов, изготовленных из орудийной стали, с применением различных технологических методов нанесения защитных покрытий и модифицирования поверхности канала ствола, направленных на снижение механического износа и разгарно-эрозионного действия продуктов сгорания высокоэнергетических порохов.

Ключевые слова: живучесть, гальваническое хромирование, ионно-плазменное вакуумное магнетронное осаждение, лазерная наплавка, плазменно-порошковая наплавка, лазерная закалка, плазменная закалка.

Введение

Живучесть трубы артиллерийской системы определяется количеством выстрелов, при котором обеспечивается выполнение требований тактико-технического задания по сохранению баллистических параметров (начальной скорости, дальности, кучности и точности стрельбы) в соответствии с установленными критериями. Снижение баллистических параметров выстрела определяется, прежде всего, состоянием внутренней поверхности канала трубы, ее износом.

[1]*Латышев Денис Юрьевич – начальник отдела «Живучесть», тел.:* (812) 578-91-41 *e-mail: crim31lab@yandex.ru;*
[2]*Сивко Владимир Сергеевич – заместитель начальника «Живучесть», e-mail: sivko@cniim.com;*
[3]*Моисеев Евгений Николаевич – начальник сектора отдела «Живучесть», e-mail: moiseev_evgen@inbox*

Износ внутренней поверхности канала трубы возникает в результате совокупного влияния следующих факторов воздействия выстрела: термического, химического, газодинамического и механического. Максимальная интенсивность воздействия вышеуказанных факторов приходится на различные по длине участки трубы и на разные временные периоды выстрела. Данное обстоятельство определяет необходимость проведения комплекса мероприятий, направленных на обеспечение живучести трубы [1].

Превалирующим фактором резкого увеличения износа поверхности канала труб в перспективных образцах ствольной артиллерии среднего и крупного калибра является разгарно-эрозионное действие (РЭД) продуктов сгорания высокоэнергетических порохов (ВЭП). Для снижения уровня РЭД, обусловленного высокой термической нагрузкой, наиболее эффективными мероприятиями являются применение вкладных защитных элементов (флегматизаторов) в составе метательного заряда [2] и нанесение защитных покрытий поверхности канала трубы на основе эрозионностойких тугоплавких металлов и сплавов.

В настоящей статье рассмотрена эффективность применения следующих технологических методов: многослойное гальваническое хромирование в протоке электролита с гальванохонингованием, плазменно-порошковая наплавка, лазерная наплавка, термодиффузионное насыщение хромом, плазменная и лазерная закалка поверхности канала трубы.

Оценка эффективности технологических методов проведена по результатам металлографических исследований и стендовых стрельбовых испытаний на многоцелевой стреляющей 30-мм установке (МЦСУ) разработки АО "ЦНИИМ". Накопленный опыт эксплуатации МЦСУ подтверждает высокую достоверность моделирования термических и газодинамических процессов взаимодействия газопороховой смеси с внутренней поверхностью трубы, характерных для артиллерийских орудий среднего и крупного калибров.

1 Гальваническое хромирование в протоке электролита с применением гальванохонингования

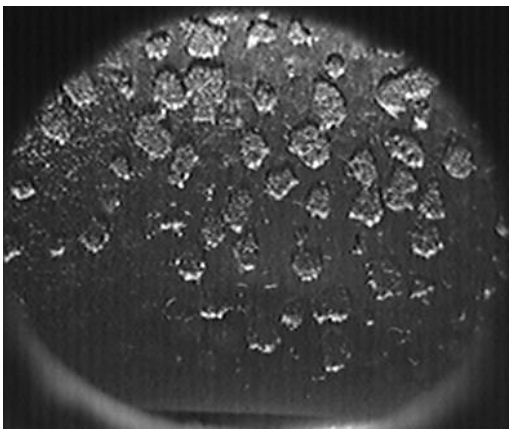
При значительном увеличении нагрузок на поверхность канала трубы, критическое влияние на стойкость гальванического хромового покрытия оказывает наличие трещин (в объеме и на поверхности защитного покрытия) и пористость, обусловленная дендритообразованием в процессе нанесения.

В ходе совершенствования технологии гальванического хромирования в АО "ЦНИИМ" была разработана технология электролитического проточного хромирования с применением гальванохонингования, которая позволяет получать покрытие с мелкозернистой структурой и без трещин на его поверхности.

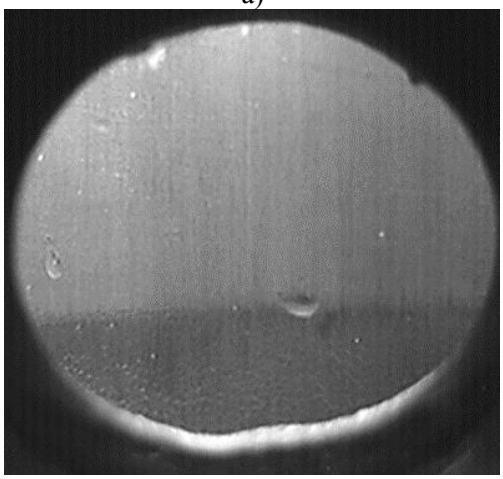
Метод гальванохонингования осуществляется при помощи механического воздействия на хромируемую поверхность во время процесса хромирования. Механическое воздействие осуществляется за счет притиров, выполненных из минералокерамики, совершающих возвратно-поступательное движение (осцилляцию) по хромируемой поверхности. При этом, скорость осаждения защитного покрытия сопоставима с методом скоростного проточного хромирования.

На рисунке 1 представлены фотографии состояния защитного покрытия на участке заходного конуса опытной 30-мм втулки после проведения стрельбовых испытаний на МЦСУ.

На рисунке 1а видно образование сколов покрытия на участке заходного конуса с эрозионным износом основного металла в зоне сколов. При осмотре технического состояния защитного покрытия, нанесенного с применением гальванохонингования (рисунок 1б), образования сетки трещин и сколов не зафиксировано. Таким образом, при сохранении производительности технологического процесса, применение гальванохонингования позволяет значительно увеличить стойкость защитного покрытия.



а)



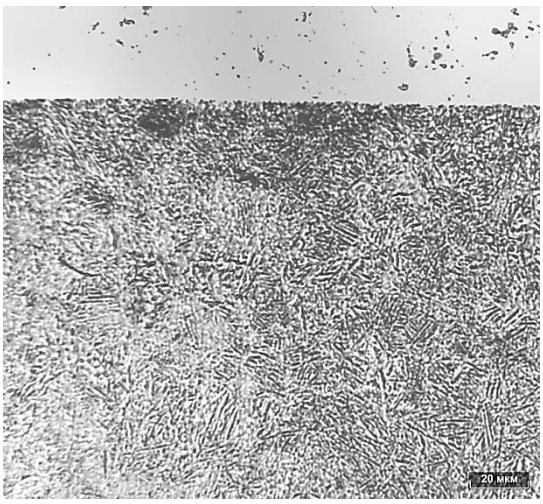
б)

Рисунок 1 – **Состояние защитного покрытия на участке заходного конуса после стрельбовых испытаний:** а) – нанесенного методом скоростного проточного хромирования (после 25 ударов); б) – нанесенного методом проточного хромирования с применением гальванохонингования (после 50 ударов)

2 Плазменно-порошковая наплавка

Наплавка порошков на основе жаропрочных кобальтовых сплавов проводилась плазматроном с подачей порошка внутрь сопла. В качестве плазмообразующего и транспортирующего газа использовался аргон высокой чистоты, а в качестве защитного газа – активная газовая аргоно-водородная смесь.

Объектом проведения металлографических исследований защитного покрытия, нанесенного на внутреннюю поверхность методом плазменно-порошковой наплавки, и зоны термического влияния на орудийную сталь (основной металл) были фрагменты втулки, вырезанные после наплавки и термообработки по стандартному для основного металла режиму.



а)

б)

Рисунок 2 – **Результаты металлографических исследований:** а) – структуры зоны термического влияния и основного металла; б) – структуры наплавленного слоя

Структура околошовной зоны и зоны термического влияния однородная, близка к основному металлу и представляет собой троостито-сорбитную смесь (рисунок 2а).

Наплавленный металл имеет дендритную структуру без пор и шлаковых включений (рисунок 2б). Граница сплавления имеет небольшую волнистость, что говорит о незначительной доле участия основного металла в металле наплавки.

Результаты стрельбовых испытаний на МЦСУ опытной 30-мм втулки с защитными покрытием из жаропрочного кобальтового сплава, полученным методом плазменно-порошковой наплавки, показали высокую стойкость защитного покрытия.

Исследования прочности сцепления покрытия, нанесенного на внутреннюю поверхность методом плазменно-порошковой

наплавки, с основой, проведенные путем испытания образца на трехточечный изгиб, показали прочность соединения с орудийной сталью не менее 700 МПа.

4 Лазерная наплавка

Были проведены металлографические исследования образцов из орудийной стали с нанесенными ООО "ТСЗП" методом лазерно-порошковой наплавки покрытиями. Результаты проведенных АО "ЦНИИМ" металлографических исследованных образца с покрытием на основе тантала толщиной 435 мкм представлены на рисунке 3. Под покрытием отмечена зона термического влияния (ЗТВ) глубиной 900 мкм с полосами ликвационной природы.

При наплавке металлических порошков тантала на сталь образуется структура, в которой можно выделить следующие зоны: наплавленный слой, диффузионная зона сплавления и зона термического влияния.

Основной металл – сталь, не претерпевшая изменений, со структурой сорбита отпуска твердостью от 42,7 до 46,3 HRC.

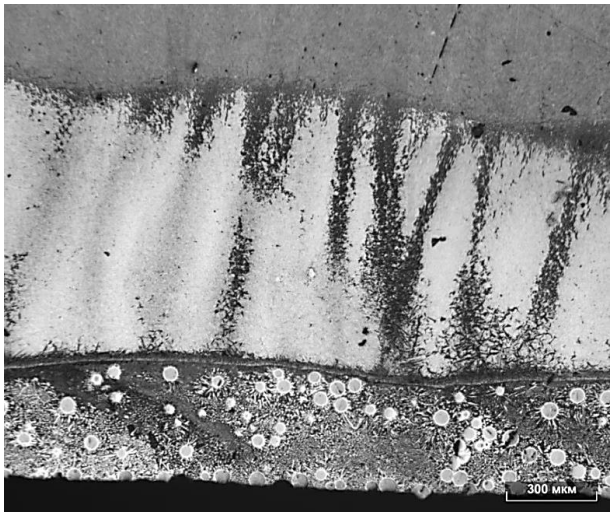


Рисунок 3 – **Покрытие на основе тантала**

ЗТВ представляет собой неотпущенный мартенсит в совокупности с грубоигольчатым мартенситом с остаточным аустенитом и полосами ликвации, твердость которого уменьшается от диффузионной зоны сплавления, где она максимальна (61,3 HRC), в сторону основного металла, где она составляет 55,6 HRC.

В диффузионной зоне сплавления наблюдается межзеренная диффузия тантала в сталь (рисунок 4) глубиной до 35 мкм с пониженной твердостью.

Рисунок 4 – **Зона сплавления покрытия на основе тантала со сталью**

Характерный участок покрытия образца представлен на рисунке 5. Под действием лазерного луча образуется расплав, в состав которого входит как порошок тантала, так и компоненты стальной основы. После кристаллизации расплава образуется сложная литая структура, в которой можно выделить 4 основные фазы. Первой фазой, согласно проведенному энергодисперсионному микрорентгеноспектральному анализу частиц округлой формы, является исходный порошок чистого тантала. Эти частицы играют роль центров кристаллизации при затвердевании расплава, и вокруг них образуются светлые участки с высокой твердостью (соединение TaFe). Далее идет процесс кристаллизации дендритов. И, в последнюю очередь, затвердевает механическая смесь (эвтектика) (αFe и $TaFe_2$). Предположения о возможном составе фаз были сделаны на основе данных химического анализа и диаграммы состояния Fe – Ta.

Перед началом проведения стрельбовых испытаний опытных 30-мм втулок на МЦСУ необходимо провести корректировку технологических режимов с целью исключения нерасплавленной дисперсной фазы (металлического порошка) в объеме покрытия.

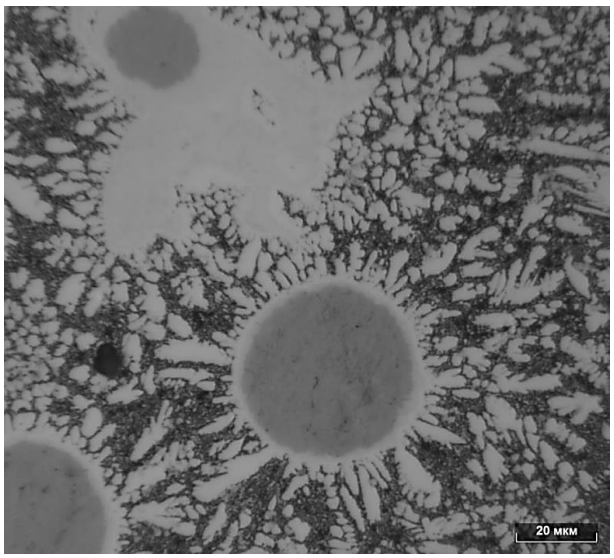


Рисунок 5 – **Структура покрытия**

5 Термодиффузионное насыщение хромом

Термодиффузионное насыщения внутренней поверхности опытной 30-мм втулки было осуществлено специалистами ЮУрГУ (г. Челябинск), для насыщения использовался электролитический рафинированный хром марки ЭРХ99,95-МП (минимальная массовая доля хрома 99,95 %). Исследования результатов термодиффузионного насыщения, проведенные в лаборатории электронной микроскопии ЮУрГУ, представлены на рисунке 6. Исследования проведены с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6460LV с энергодисперсионным спектрометром (ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 3нА).

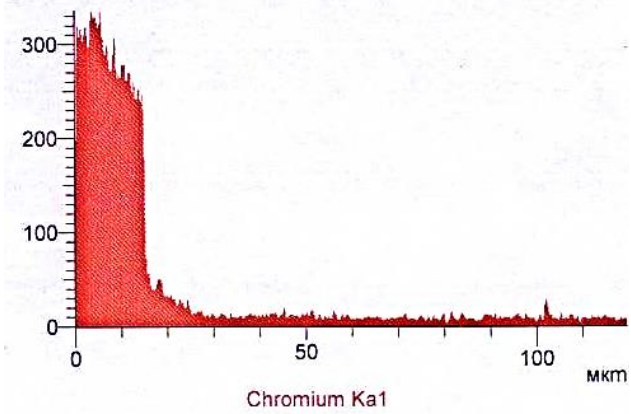


Рисунок 6 – **Толщина диффузионного слоя хрома**

Металлофизические исследования покрытия проводились на образце (сектор кольца), отрезанном от дульного торца опытной 30-мм втулки, после термодиффузионного насыщения хромом ее внутренней поверхности.

При исследовании покрытия был проведен микрорентгеноспектральный анализ на установке КАМЕБАКС (включающий в себя количественный элементный анализ в заданных точках, получение изображений в рентгеновских лучах и количественных карт) и анализ фазового состава на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3. Параметры при проведении микроанализа: ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток зонда – 10 нА.

Средняя толщина диффузионного слоя (под толщиной диффузионного слоя подразумевается толщина участка, который по элементному составу существенно отличается от основы) составляет около 150 мкм (рисунок 7).

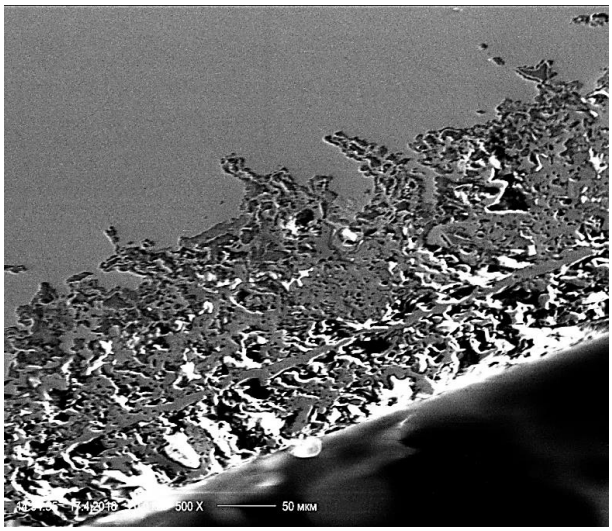


Рисунок 7 – **Диффузионный слой** (изображение во вторичных электронах, ×500)

Из полученных результатов было отмечено, что покрытие отличается неоднородностью фазового состава. На расстоянии свыше 30 мкм от поверхности образца имеются многочисленные включения оксидов хрома и железа, также в состав покрытия входит карбидная фаза, состоящая из карбидов типа Me_7C_3, $Me_{23}C_6$ и твердый раствор, содержащий хром и железо в различных концентрациях.

В дальнейшем, для проведения стрельбовых испытаний была проведена

повторная объемная термообработка (закалка и отпуск) опытной 30-мм втулки. Наблюдаемая неоднородность покрытия (наличие включений оксидов и карбидов) и пористость недопустимы в условиях высоких термосиловых нагрузок, действующих на поверхность трубы, что было подтверждено результатами стрельбовых испытаний на МЦСУ.

При осмотре состояния заходного конуса и начала калиберной части опытной 30-мм втулки после 25 выстрелов (рисунок 8), отмечено образование крупной сетки трещин на поверхности стальной основы.

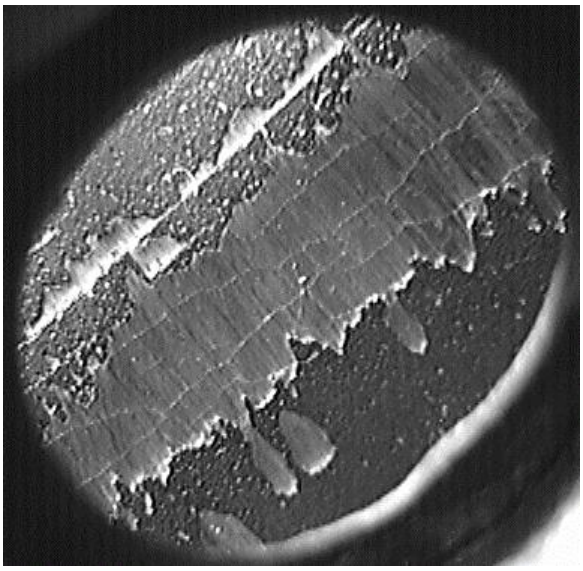


Рисунок 8 – **Состояние защитного покрытия в начале калиберной части**

6 Поверхностное термоупрочнение

В средней и дульной части значительный вклад в износ трубы вносит механическое воздействие ведущих устройств и элементов снаряда. Одним из направлений повышения износостойкости поверхности канала ствола на данных участках является применение методов поверхностного термоупрочнения, в том числе лазерного или плазменного.

В первом случае, термическое упрочнение материалов основано на локальном нагреве участка поверхности под воздействием лазерного излучения и последующем охлаждении этого поверхностного участка со сверхкритической скоростью. Во втором случае закалка поверхности осуществляется с использованием плазмотрона за счет теплового воздействия на обрабатываемую поверхности плазменной дуги.

Выбор основных технологических параметров поверхностного термоупрочнения для повышения износостойкости внутренней поверхности канала трубы необходимо проводить с учетом исходной структуры металла ствола, определяемой режимом термообработки трубы.

6.1 Лазерная закалка

Были проведены исследования образцов с лазерным термоупрочнением поверхности канала ствола с геометрическим расположением дорожки по спирали и с дорожками по поверхности параллельно продольной оси.

Во всех случаях закаленная зона имеет линзовидную форму. Смещение дорожки по спирали идет с наложением и, как следствие, с развитием процессов отпуска, обуславливающих образование затемнения. Твердость в этих участках составила от 45 до 47 HRC. Максимальная глубина и ширина закаленной зоны по спирали – 1 мм и 18 мм соответственно, параллельно оси – 2 мм и 27 мм соответственно. Твердость закаленной зоны составляет от 57 до 59 HRC.

Микроструктура поверхностного слоя закаленной зоны (рисунок 9) представляет грубоигольчатый мартенсит с остаточным аустенитом и отдельными карбидами, окруженными троститом.

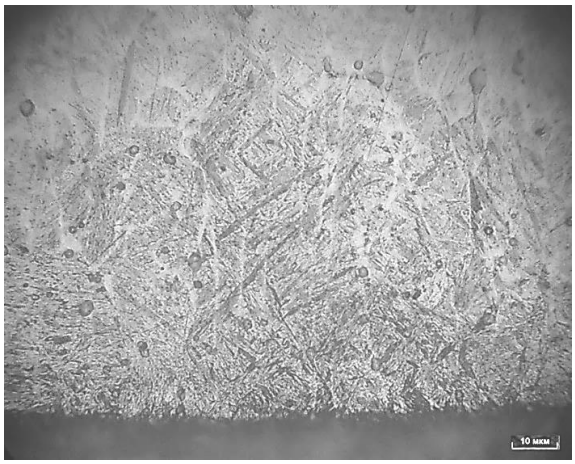


Рисунок 9 – **Микроструктура поверхностного слоя закаленной зоны**
(лазерное термоупрочнение)

Наблюдаемая структурная неоднородность недопустима для канала трубы, где имеет место действие максимальных рабочих напряжений, так как остаточный аустенит, участок с отпущенной зоной и карбидотроооститные включения будут являться концентраторами напряжений и источниками зарождения трещин.

6.2 Плазменная закалка

Одним из способов поверхностного термоупрочнения канала трубы является применение плазменной закалки. Несмотря на меньшую плотность мощности плазменная закалка, в сравнении с лазерной, характеризуется меньшими капитальными вложениями в оборудование и эксплуатационными затратами.

Эффективность применения плазменного термоупрочнения поверхности оценивалась по результатам стендовых испытаний на МЦСУ (рисунок 2). После 25 выстрелов эрозионный износ опытной 30-мм втулки с плазменной закалкой внутренней поверхности меньше, чем у эталонного образца. В качестве эталонного образца рассматривалась опытная 30-мм втулка из орудийной стали без защитного покрытия.

На поверхности заходного конуса опытной 30-мм втулки после 25 ударов образовалась крупная сетка разгарных трещин (рисунок 10), что, вероятно, является следствием структурной неоднородности приканальной зоны, сформированной в результате плазменной поверхностной закалки.

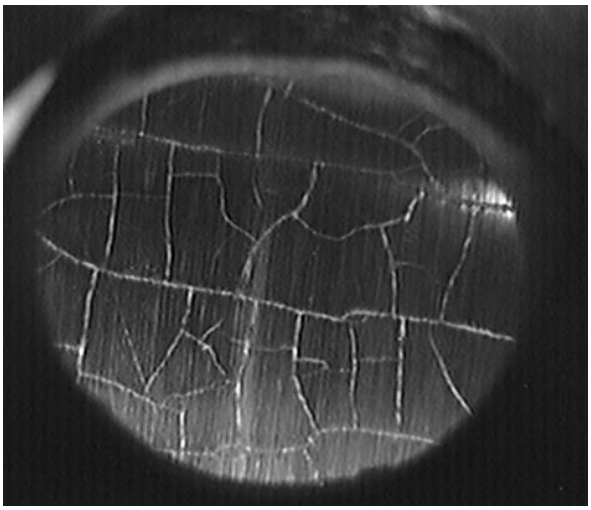


Рисунок 10 – **Разгарная сетка трещин на заходном конусе**

При дальнейшем настреле интенсивность износа внутренней поверхности опытной 30-мм втулки с плазменной закалкой внутренней поверхности резко возросла. После 50 ударов износ втулки с плазменной закалкой в начале калиберной части превысил износ эталонной втулки.

Заключение

На основании анализа результатов экспериментальных и металлографических исследований и состояния существующей промышленно-производственной базы наиболее оптимальным направлением обеспечения требований по живучести, в настоящее время, является совершенствование технологии гальванического хромирования поверхности канала трубы в протоке электролита с применением гальванохонингования.

При этом, перспективным направлением повышения живучести труб артиллерийских систем является разработка технологии нанесения многослойного защитного покрытия на основе тугоплавких металлов и сплавов с подслоем, характеризующимся высокой адгезионной прочностью (например, нанесенным методами лазерной или плазменно-порошковой наплавки). Также в настоящее время продолжаются исследования по созданию технологии нанесения защитного тугоплавкого покрытия методом ионно-плазменного вакуумного магнетронного осаждения.

Список литературы

1. Болкисев С.А., Иванова Е.С., Моисеев Е.Н. Проблемы обеспечения живучести стволов перспективных артиллерийских систем // Актуальные вопросы повышения живучести танковых и артиллерийских стволов, 2016.
2. Иванова Е.С., Богатырев С.А., Моисеев Е.Н. Эффективность применения микрокапсулированных нефтепродуктов как средства снижения разгарно-эрозионного действия пороховых газов // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды XVII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН, 2014.