

УДК 623.526

doi: 10.53816/23061456\_2025\_11-12\_107

## К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ТЕРМОЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА СТВОЛОВ МАЛОКАЛИБЕРНЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ ПУШЕК

### ON THE ISSUE OF ASSESSING THE THERMOEROSION WEAR OF THE BARRELS OF SMALL-CALIBER AUTOMATIC GUNS

*Канд. техн. наук А.М. Пушкирев, И.С. Абрамычев*

*Ph.D. A.M. Pushkarev, I.S. Abramychev*

*Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации*

Рассмотрен вопрос оценки термосилового воздействия потока пороховых газов на поверхность канала ствола малокалиберной автоматической пушки. Доминирующей причиной потери живучести стволов малокалиберных автоматических пушек является изменение температуры поверхностного слоя канала ствола при стрельбе, которое приводит к появлению сетки тепловых усталостных трещин (термоэрозионный износ), нарушающих сплошность поверхности канала ствола. С этой целью в статье проанализированы критериальные соотношения малоциклической термической усталости. Исходя из этого, предложен критерий оценки термоэрозионного износа стволов малокалиберных автоматических пушек, с учетом циклических температурных напряжений и деформаций в стенке ствола. Предложенная зависимость позволяет произвести расчет термоэрозионного износа стволов малокалиберных автоматических пушек с учетом их настрела.

**Ключевые слова:** автоматическая пушка, артиллерийский ствол, износ ствола, малоцикловая усталость, напряженно-деформированное состояние, режим стрельбы.

The article discusses the assessment of the thermo-force effect of the powder gas flow on the surface of the barrel of a small-caliber automatic gun. The dominant cause of the loss of survivability of the barrels of small-caliber automatic guns is the change in the temperature of the surface layer of the barrel during firing, which leads to the appearance of a grid of thermal fatigue cracks (thermal erosion wear) that disrupt the continuity of the barrel surface. To this end, the article analyzes the criteria for low-cycle thermal fatigue. Based on this, a criterion for assessing the thermoerosion wear of the barrels of small-caliber automatic guns has been proposed, taking into account the cyclic temperature stresses and deformations in the barrel wall. The proposed dependence allows for the calculation of the thermoerosion wear of the barrels of small-caliber automatic guns, taking into account their number of shots.

**Keywords:** automatic cannon, artillery barrel, barrel wear, low-cycle fatigue, stress-strain state, firing mode.

Стремление повысить живучесть ствола, приблизить его долговечность к долговечности других узлов и деталей малокалиберного автоматического оружия, вызвало множество исследо-

ваний и технических предложений, относящихся как к стволу (эрэзионностойкие покрытия, искусственное охлаждение и др.), так и к метательному заряду (флегматизаторы, неорганические

защитные средства и др.) и снаряду (специальные материалы для ведущих устройств и др.) [1].

Однако, решить задачу этим путем в полной мере пока не удается: стремление повысить мощность и скорострельность автоматического артиллерийского оружия неизбежно вызывает трудности в обеспечении ряда эксплуатационных характеристик, в частности приемлемого ресурса стволов. Известно, что даже относительно небольшое повышение начальной скорости снаряда, ужесточение режимов стрельбы приводит к существенному увеличению износа канала ствола и, как следствие, к падению баллистических свойств выстрела после непродолжительной эксплуатации, то есть к потере живучести ствола [2, 3].

В артиллерийской практике при исследовании живучести артиллерийских стволов особый интерес представляют термоэрзационные разрушения. С позиции механики разрушения, термоэрзационные разрушения артиллерийских стволов представляют собой результат термической усталости металла ствола, а также химического воздействия пороховых газов на металл ствола в условиях нагрева до высоких температур. Следует отметить, что в основе своей эти факторы в своем сочетании вызывают ту или иную степень износа ствола, а также различное внешнее проявление процесса главным образом по характеристике состояния поверхности канала ствола после разрушения.

Так, характер разрушения поверхности показывает, что снижение живучести ствола в первую очередь является следствием эрозионного износа его канала; значительно реже причиной являются усталостные повреждения поверхности [4]. Если следовать гипотезе [4], основанной на предположении, что интенсивность эрозионного износа ствола определяется энергией пороховых газов, расходуемой на разрушение поверхностного слоя металла ствола, то износ предлагается считать пропорциональным отношению удельной энергии теряемой потоком пороховых газов, к характеристике износостойчивости металла ствола при максимальной температуре нагрева его поверхности:

$$h_{xi} = \int_0^{\tau_i} \left\{ \frac{\rho_r(\tau) [V(x, \tau)]^3}{2} A(x, \tau) \psi(T_n) \right\} d\tau, \quad (1)$$

где  $h_{xi}$  — радиальный износ в сечении  $x$ ;

$V(x, \tau)$  — скорость потока газов;

$\tau$  — время;

$\rho_r(\tau)$  — плотность газов;

$A(x, \tau)$  — коэффициент сопротивления трения с учетом поправки на неизотермичность потока газов, приведенный к началу калиберной части ствола;

$\psi(T_n)$  — функция интенсивности процесса эрозионного изнашивания, зависящая от температуры поверхности канала ствола и от конкретной гетерогенной пары взаимодействия — известного сочетания материала ствола и продуктов сгорания пороха.

Однако зависимость (1) лишь приближенно отражает суть происходящего физического процесса термоэрзационного изнашивания ствола при стрельбе, и дает удовлетворительные результаты только при настреле порядка 100 выстрелов. Кроме того, в алгоритмах, реализующих эту задачу при расчетном анализе эрозионного износа артиллерийских стволов, все еще используются характеристики, свойственные материалу ствола в исходном структурном состоянии. Поэтому в настоящее время термическую усталость описывают как процесс деформации, а также образования и увеличения структурных повреждений конструкционных элементов под влиянием многократных изменений температуры.

При малоцикловом нагружении оценочные расчеты накопления повреждений проводят на основе критериальных зависимостей долговечности от величины деформаций, напряжений, температуры и истории нагружения. В условиях неизотермического нагружения материала его долговечность обычно определяется на основании феноменологических гипотез суммирования повреждений [5]. В тех случаях, когда происходит одновременное накопление квазистатических и усталостных повреждений, суммарное повреждение определяется суммой двух членов, один из которых описывает квазистатическое, а другой усталостное повреждение. При этом предполагается, что разрушение имеет место, когда сумма этих членов равна единице. Условие разрушения материала при неизотермическом циклическом нагружении по аналогии с изотермической малоцикловой усталостью [6] можно записать в виде:

$$\int_0^N \left( \frac{\Delta \varepsilon}{2 D(\tau)} \right)^m dN + \int_0^N \frac{\varepsilon_{\text{НАК}}}{D(\tau)} dN = 1, \quad (2)$$

$$2^m \int_0^N \left( \frac{\Delta \varepsilon}{2 D(\tau)} \right)^m dN + \int_0^N \frac{(\varepsilon_{\text{НАК}})_R}{D(\tau)} dN = 1. \quad (4)$$

где  $N$  — число циклов нагружения ствола;

$\Delta \varepsilon$  — размах упругопластических деформаций в цикле;

$\varepsilon_{\text{НАК}}$  — накопленная остаточная деформация (для случая мягкого нагружения);

$D(\tau)$  — истинная пластичность с учетом длительности нагружения;

$m$  — эмпирический коэффициент.

Здесь первый интеграл характеризует величину односторонне накопленной деформации (вследствие термоциклической анизотропии или действия дополнительной статической нагрузки), а второй — величину циклически накопленной пластической деформации за  $N$  циклов.

Если рассматривать жесткое нагружение, которое в той или иной степени реализуется обычно в деталях, разрушающихся от термоусталости, то уравнение (2) преобразуется в уравнение Коффина, для случая неизотермического циклического нагружения [7]:

$$\int_0^N \left( \frac{\Delta \varepsilon}{2 D(\tau)} \right)^m dN = 1. \quad (3)$$

В формировании предельного малоциклового повреждения при неизотермическом нагружении значима роль характеристики длительной пластичности  $D$ , которая коррелирует с сопротивлением малоцикловой усталости. Поэтому одним из главных вопросов при использовании деформационных критериев, как при неизотермическом, так и при изотермическом нагружении является выбор предельной пластичности. При этом необходимо учитывать зависимость пластичности от времени деформирования.

Другими подходами по оценке долговечности при малоцикловой термической усталости являются подходы, основанные на использовании деформационно-кинетического критерия [8, 9], в которых показано, что линейное суммирование долей статической и циклической повреждаемости справедливо, если их представить в виде выражения:

Здесь первый интеграл характеризует долю усталостного повреждения  $\Pi_1$ , а второй — долю квазистатического повреждения  $\Pi_2$ . При этом, в общем случае нагружения, когда в материале возникают все виды неупругих деформаций, суммарное повреждение  $\Pi$  следует определять, как сумму относительных долей повреждений:

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 + \dots + \Pi_n, \quad (5)$$

где  $n$  — количество всех видов неупругих деформаций.

Известно, что изменение температуры во время стрельбы происходит по треугольному циклу [10, 11], поэтому, при нормальных режимах стрельбы, происходит накопление только усталостного повреждения.

Следовательно, одностороннего накопления пластических деформаций не происходит, и уравнение (4), теряя второе слагаемое, превращается в уравнение Коффина (3). При этом в уравнении (4) не учтена специфика влияния разрушения поверхности канала ствола, за счет химического воздействия пороховых газов.

Поэтому для оценки доли накопления повреждений, вносимой химическим воздействием пороховых газов, на основании выражений (1) и (5), представляется целесообразным дополнить уравнение (4) членом, который характеризует это накопление. Его можно представить в виде отношения между циклической плотностью энергии пороховых газов, расходуемой на разрушение поверхностного слоя металла ствола  $h_{xi}$  (радиальный износ ствола в сечении  $x$ ), к суммарной плотности энергии  $h_x$  за предполагаемый ресурс  $N$ , то есть при оценке термоэрозионного износа целесообразно деформационно-кинетический критерий (4) трансформировать следующим образом:

$$\frac{2^m \Delta \varepsilon^m}{[D(\tau)]^m} N + \sum_{i=1}^N \frac{h_{xi}}{h_x} = 1, \quad (6)$$

где  $\sum_{i=1}^N \frac{h_{xi}}{h_x}$  — доля повреждения, вносимая хемосорбицией и адсорбицией.

Таким образом, уравнение (6), для расчета термоэррозионного износа, можно преобразовать к виду:

$$h_x = \frac{h_{xi} N}{1 - \left[ \frac{2^m \Delta \epsilon}{(D(\tau))^m} N \right]}. \quad (7)$$

Приведенная зависимость (7) дает принципиально новую возможность вычисления характеристик повреждаемости и термоэррозионного износа поверхности канала ствола малокалиберных автоматических пушек, определения энергетических затрат на повреждение поверхности в конкретном сечении ствола. Для реализации такого расчета необходимо многократное решение задачи внутренней баллистики и тепловой задачи для ствола разной степени износа. В рамках проведенных исследований было создано программное обеспечение, которое позволило на основе разработанной методики решения задачи о тепловом нагружении ствола автоматической пушки разработать машинную программу, предназначенную для расчета термоэррозионного износа стволов малокалиберных автоматических пушек с учетом их настройки [12]. Моделирование расчета параметров термоэррозионного износа реализуется на основе решения системы дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности конечно-разностным методом. Разработанное программное обеспечение для расчета термоэррозионного износа стволов определяет возможность его реализации в работах по исследованию температурного поля агрегата ствола.

## Выводы

На основании рассмотренных в статье результатов исследований можно сделать следующее заключение, что приведенные исследования и их результаты позволяют обосновать перспективные подходы для косвенной оценки и прогнозирования скорости изнашивания стволов с различными конструктивно-технологическими параметрами и возможности использования, в конечном итоге, комплексной задачи о температурном напряженно-деформированном состоянии ствола как самостоятельной, независимо от других методов исследования. Получен-

ные в материалах статьи закономерности теплового нагружения агрегата артиллерийского ствола при выстреле, могут быть использованы в инженерной практике при расчете теплового состояния стволов и влияния его на параметры функционирования малокалиберной автоматической пушки, строить температурное поле ствола на различных режимах стрельбы и оценивать эффективность боевого применения малокалиберной автоматической пушки.

## Список источников

1. Лазарев С.Ю., Калинин В.Ю., Медянников М.А. О возможности улучшения параметров ствольных систем методом устранения потерь при выстреле // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2021. № 2 (117). С. 136–142.
2. Шипунов А.Г., Швыкин Ю.С. Живучесть стволов скорострельных пушек и способы ее обеспечения. М.: Машиностроение, 1977. 168 с.
3. Пушкарёв А.М., Абрамычев И.С. К вопросу оценки живучести стволов малокалиберного автоматического оружия; сб. науч. тр. научно-техн. конф. «Перспективы совершенствования боеприпасов и развития спецхимии». Пенза: филиал ВА МТО. 2024. С. 527–530.
4. Логвинов В.С. Расчет эрозионного изнашивания канала ствола // Оборонная техника. 1991. № 1. С. 49–51.
5. Дульнев Р.А. Суммирование повреждений и условие прочности при термоциклическом нагружении // Проблемы прочности. 1971. № 10. С. 101–104.
6. Серенсен С.В., Шнейдерович Р.М., Гусенков А.П. и др. Прочность при малоциклическом нагружении. М.: Наука, 1975. 287 с.
7. Coffin L.F. Thermal stress and thermal stress fatigue. SESA Proceedings. 1958. Vol. IV. No 2. Pp. 117–130.
8. Гусенков А.П., Котов П.И. Малоциклическая усталость при неизотермическом нагружении. М.: Машиностроение, 1983. 240 с.
9. Шнейдерович Р.М., Гусенков А.П. Деформационно-кинетические подходы к оценке длительной циклической прочности // Материалы Всесоюзного симпозиума по малоциклической усталости при повышенных температурах. Челябинск: ЧПИ. 1974. Вып. 3. С. 140–165.

10. Иванова С.А., Романов Р.Б. Расчет двухмерного температурного поля ствола автоматического оружия // Оборонная техника. 1980. № 7. С. 39–41.
11. Хижняк А.Е., Сметанин С.Д., Калинин В.Ю. Оценка теплового состояния стволов артиллерийских орудий при стрельбе // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2013. № 3 (78). С. 35–39.
12. Методика расчета теплового состояния ствола автоматической пушки при стрельбе: свид. о гос. регистр. программы для ЭВМ 2025616203 Рос. Федерации № 2025614538; заявл. 03.03.2025; опубл. 13.03.2025, Бюл. № 3.
4. Logvinov V.S. Calculation of Erosion Wear of the Barrel Channel // Defense Technology. 1991. No 1. Pp. 49–51.
5. Dulnev R.A. Summation of Damage and Strength Condition under Thermocycle Loading // Problems of Strength. 1971. No 10. Pp. 101–104.
6. Serensen S.V., Shneiderovich R.M., Gusenkov A.P. et al. Strength under low-cycle loading. M.: Nauka. 1975. 287 p.
7. Coffin L.F. Thermal stress and thermal stress fatigue. SESA Proceedings. 1958. Vol. IV. No 2. Pp. 117–130.
8. Gusenkov A.P., Kotov P.I. Low-cycle fatigue under non-isothermal loading. M.: Mashinostroenie, 1983. 240 p.
9. Shneiderovich R.M., Gusenkov A.P. Deformation-kinetic approaches to assessing long-term cyclic strength // Materials of the All-Union Symposium on Low-cycle Fatigue at Elevated Temperatures. Chelyabinsk: ChPI. 1974. Issue 3. Pp. 140–165.
10. Ivanova S.A., Romanov R.B. Calculation of the two-dimensional temperature field of the barrel of automatic weapons // Defense technology. 1980. No 7. Pp. 39–41.
11. Khizhnyak A.E., Smetanin S.D., Kalinin V.Y. Assessment of the thermal condition of the barrels of artillery guns during firing // Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. 2013. No 3 (78). Pp. 35–39.
12. Methodology for Calculating the Thermal State of the Barrel of an Automatic Cannon during Shooting: Certificate of State Registration of the Computer Program № 2025616203 of 13.03.2025.

### References

1. Lazarev S.Y., Kalinin V.Y., Medyannikov M.A. On the possibility of improving the parameters of barrel systems by eliminating losses during firing // Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. 2021. No 2 (117). Pp. 136–142.
2. Shipunov A.G., Shvykin Yu.S. The survivability of the barrels of rapid-fire guns and methods of its provision. M.: Mashinostroenie. 1977. 168 p.
3. Pushkarev A.M., Abramycov I.S. On the issue of assessing the survivability of small-caliber automatic weapon barrels // Collection of scientific papers of the scientific and technical conference «Prospects for the improvement of ammunition and the development of special chemistry». Penza: branch of VA MTO. 2024. Pp. 527–530.