

УДК 623.565.33, 623.565.53

<https://elibrary.ru/jipybj>

jipybj



## ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА СТВОЛА НА ЕГО ЖИВУЧЕСТЬ ПРИ СТРЕЛЬБЕ 5,45-ММ ПАТРОНАМИ С КОМПОЗИТНОЙ ГИЛЬЗОЙ

Бакланов Д. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Филиал Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе, г. Пенза.

В статье проведена оценка влияния термических и механических нагрузок, возникающих при стрельбе 5,45-мм патронами с композитными гильзами на износ и эрозию материала канала ствола, а также на определение показателя живучести в сравнении с воздействием свойств патронов с традиционной стальной гильзой. Также количественно оценено влияние композитной гильзы на термический баланс ствола и установлены преобладающие механизмы износа для данного типа боеприпасов, что отличается от классических моделей износа при стрельбе патронами с стальной гильзой.

**Ключевые слова:** композитная гильза; диссипация; модуль Юнга; температурное поле; закон Фурье; контактное сопротивление.

**Для цитирования:** Бакланов Д. В. Влияние нагрева ствола на его живучесть при стрельбе 5,45-мм патронами с композитной гильзой // Альманах Пермского военного института войск национальной гвардии Российской Федерации. Выпуск 3(19) (сентябрь 2025). С. 8–13.

## THE EFFECT OF BARREL HEATING ON ITS SURVIVABILITY WHEN FIRING 5.45MM CARTRIDGES WITH A COMPOSITE SLEEVE

Baklanov D. V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>File of the Military Academy of Logistics named after Army General A. V. Khrulev in Penza, Penza.

The article evaluates the effect of thermal and mechanical loads that occur when firing 5.45mm cartridges with composite sleeves on the wear and erosion of the bore material, as well as on determining the survivability index in comparison with the effects of the properties of cartridges with a traditional steel sleeve. The effect of the composite sleeve on the thermal balance of the barrel was also quantified and the prevailing wear mechanisms for this type of ammunition were established, which differs from the classical wear models when firing cartridges with a metal sleeve.

**Keywords:** composite sleeve; dissipation; Young's modulus; temperature field; Fourier law; contact resistance.

### Введение

Тепловое состояние ствола автоматического оружия (на примере 5,45-мм автомата Калашникова АК-74М) является критическим фактором, определяющим его эксплуатационные характеристики. Нагрев ствола является следствием диссипации энергии, генерируемой при сгорании метательного взрывчатого вещества (порохового заряда), и сил трения, возникающих при взаимодействии оболочки пули с поверхностью канала ствола. Кинетическая энергия пороховых газов составляет основную долю (85–95 %) общего теплового потока в систему ствола [1].

Применение боеприпасов с композитными гильзами, характеризующимися пониженной теплопроводностью, ингибирует процесс теплопередачи от продуктов сгорания к патроннику. Интенсивность тепловыделения в стволе прямо пропорциональна мощности

выстрела и обратно пропорциональна временным интервалам между выстрелами. Следовательно, термическая нагрузка на ствольную группу возрастает при:

**интенсификации баллистических параметров:** повышении начальной кинетической энергии пули  $V_0$  и пикового давления газов  $P_{max}$ ;

**увеличении темпа стрельбы,** что сокращает временной интервал для теплоотвода.

#### Основная часть

Прогрессирующий нагрев оказывает детерминирующее влияние на механическую целостность (прочность), ресурс (живучесть) и баллистическую стабильность (точность и кучность) оружия. В связи с этим, исследование нестационарных тепловых процессов в стволе автоматического оружия, особенно с использованием перспективных материалов гильз, является актуальной научно-прикладной задачей. Точное определение пространственно-временного распределения температуры необходимо для:

1. **Установления эксплуатационных ограничений:** определения критических режимов ведения огня, исходя из термической стойкости конструкции.

2. **Оценки термоупругих напряжений:** прогнозирования термических деформаций и напряжений в материале ствола для анализа прочности.

3. **Оптимизации систем теплосъема:** разработки и расчета эффективных систем охлаждения (как пассивных, так и активных).

Математическое моделирование температурных полей базируется на синтезе законов **теории теплообмена и внутренней баллистики**. Хотя теплопередача в системе «пороховые газы – гильза – ствол» теоретически может осуществляться всеми тремя механизмами (теплопроводность, конвекция, радиация), в данной постановке задачи **основным механизмом признается теплопроводность**. Это допущение лежит в основе большинства аналитических моделей [2].

Распределение теплового потока по длине ствола является **неоднородным**. По мере адиабатического расширения пороховых газов и движения пули их температура и давление монотонно убывают, что приводит к соответствующему уменьшению теплового потока от газов к стенке, достигающего минимума в дульном срезе. Тепловыделение от сил трения также распределено неравномерно: его максимум наблюдается в области начала нарезов (зона первичного врезания), где контактные напряжения и сила трения максимальны, с последующим экспоненциальным спадом по направлению к дульной части.

Временная развертка процесса показывает, что лишь 15–20 % от общего тепла, передаваемого за выстрел, поступает в ствол за время нахождения пули в канале. Основная же доля энергии передается в фазе **последствия** пороховых газов [3].

**Высокоскоростной характер процесса** (длительность выстрела исчисляется миллисекундами) обуславливает возникновение экстремального температурного градиента в приповерхностном слое материала. Глубина прогрева за время выстрела не превышает 1,5–2 мм, при этом температура на поверхности раздела может достигать 800–900 °С. В последующие моменты времени происходит перераспределение тепла вглубь материала по закону Фурье: поверхность охлаждается, а внутренние слои нагреваются, что в конечном итоге через несколько минут приводит к выравниванию температуры по сечению.

При ведении автоматического огня (очередями) имеет место **суперпозиция тепловых полей** от последовательных выстрелов. Это формирует сложное нестационарное температурное поле: в приповерхностных слоях наблюдаются кратковременные высокоамплитудные термические пики, которые сглаживаются по мере распространения тепла к периферии ствола, создавая гистерезисный тепловой профиль.

Подход для решения поставленной задачи был комплексным. Композитные слои состоят из двух материалов с теплопроводностью 1,85 Вт/м<sup>2</sup>°С и 45 Вт/м<sup>2</sup>°С. Внутренняя часть гильзы подвергается воздействию пороховых газов при температуре 2500 °С с коэффициентом конвекции 40 Вт/м<sup>2</sup>°С, а внешняя часть – воздействию воздуха при температуре 23 °С с коэффициентом конвекции 25 Вт/м<sup>2</sup>°С. Контактное сопротивление между слоями составляет  $1 \times 10^{-5}$  м<sup>2</sup>°С/Вт (металл-металл  $5,5-6,2 \times 10^{-5}$  м<sup>2</sup>°С/Вт). Определяли

теплопотери при длине 0,0396 м патронника и температуру поверхности патронника. Внутренний диаметр = 0,005 м.

Суммируя контактные сопротивления, получили, что контактное сопротивление должно соответствовать площади контакта гильзы и патронника. Площадь здесь равна  $2\pi \times 0,005 \times 0,0396 \text{ м}^2$ .

Если конвекция осуществляется несколькими слоями различных материалов и с обеих сторон, тогда:

$$Q = \frac{T_B - T_H}{\frac{1}{h_1 2\pi r_1 l} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi k_1 l} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi k_2 l} + \frac{\ln \frac{r_4}{r_3}}{2\pi k_3 l} + \frac{1}{h_2 2\pi r_4 l}} = \frac{\Delta T_i}{\sum R_i}, \quad (1)$$

где  $\Delta T_i$  – перепад температур в исследуемом слое, а  $\sum R_i$  – тепловое сопротивление слоя.

Уравнение автоматически укажет, направлен ли тепловой поток внутрь или наружу. Общий коэффициент теплопередачи запишем как:

$$Q = U_i A_i \Delta T, \quad (2)$$

где  $A_i$  – расчетная область, а  $U_i$  – общий коэффициент теплопередачи.

Для оценки температуры на границе раздела фаз между телом композитной гильзы и патронником вводили коэффициент контактного сопротивления. Для контакта полиамида и стали оно будет выглядеть как:

$$R = \left( 5,5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}} \right) \cdot \frac{1}{2\pi \cdot 0,005 \cdot 0,0396} = 0,045 \frac{\text{°C}}{\text{Вт}}.$$

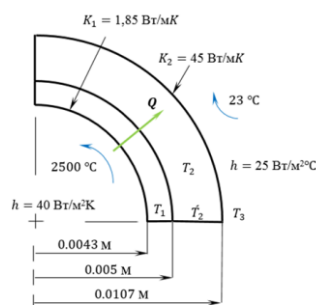


Рисунок 1 – Расчетная схема математической модели теплового состояния патронника стрелкового оружия при использовании патрона с композитной гильзой

Теплопередача между стенкой композитной гильзы и стенкой ствола стрелкового оружия во время выстрела основана на модели классической теории внутренней баллистики (рисунок 2). В ходе проведения численных расчетов получены результаты, по которым видно, что система определяется не только процессами нагрева, но и охлаждения [7].



Рисунок 2 – Модель ствола 5,45-мм автомата Калашникова

Очевидно, что температура и скорость теплопередачи между стенкой композитной гильзы и патронником изменяются в системе с быстропотекающими физическими процессами, так как время выстрела длится миллисекунды. В связи с этим система

описывалась через комбинацию уравнений Лагранжа и показала адекватные результаты. Балансовое дифференциальное уравнение скорости изменения температуры газообразных продуктов:

$$\frac{\rho_m}{k-1} \frac{d\varepsilon_{lp}}{dt} - \frac{p_s(L,t)}{p_m(t)} \frac{d\rho_m(t)}{dt} - \rho_m(t) \left( q_v \frac{d\psi(t)}{dt} + q_z \frac{d\psi_z(t)}{dt} \right) = 0. \quad (3)$$

Поскольку, согласно определению, текущая мощность газообразных продуктов сгорания определяется соотношением:

$$\varepsilon I_p = RT, \quad (4)$$

где  $R$  – газовая постоянная;

$T$  – температура;

$q_v$  – теплота горения заряда;

$q_z$  – теплота горения воспламенителя.

Уравнение скорости изменения температуры газообразных продуктов сгорания после преобразований принимало вид:

$$\frac{dT}{dt} = T = \frac{k-1}{R} \left( \frac{p_s(L,t)}{(p_m(t))^2} \frac{d\rho_m(t)}{dt} + q_v \frac{d\psi(t)}{dt} + q_z \frac{d\psi_z(t)}{dt} \right). \quad (5)$$

Опираясь на выведенные уравнения, составлена математическая модель горения пороха и давления пороховых газов во время выстрела 5,45-мм композитным патроном из автомата Калашникова [4]. Результаты расчёта теплового состояния патронника стрелкового оружия при использовании штатной и композитной гильзы представлены в таблице 1 и рисунке 3, где  $R$  – контактное сопротивление между слоями материала;  $Q$  – теплопередача между композитной гильзой и патронником;  $U_v$  – коэффициент теплопередачи на внутреннем слое;  $U_n$  – коэффициент теплопередачи на наружном слое;  $T_1, T_2, T_2^1, T_3$  – температура сопряжения на разделе сред.

Таблица 1 – Результаты расчёта теплового состояния патронника стрелкового оружия при использовании штатной и композитной гильзы

Наименование	$R, \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$	$Q, \text{Вт}$	$U_v, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$	$U_n, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_2^1, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$
Композитная гильза	0,045	62,99	23,39	9,37	1000,8	980,6	970,1	973,9
Стальная гильза	0,083	62,22	23,56	9,44	1019,2	1009,87	1003,8	1000

Неравномерный нагрев стенки ствола по ее толщине вызывает появление температурных напряжений. Расчеты показывают, что температурные напряжения в стенках ствола составляют большую величину и могут достигать 50 % от напряжений, вызываемых давлением пороховых газов. Однако отличие температурных напряжений от напряжений, вызываемых давлением пороховых газов, состоит в том, что они не могут быть снижены при помощи увеличения толщины стенок ствола или путем применения более качественных сталей. Поэтому их определение и учет при проектировании и эксплуатации стволов стрелкового оружия представляет не только теоретический, но и практический интерес [5].

Так температурные напряжения зависят от особенностей конструкции стволов и принятой системы их охлаждения. Например, для не скреплённых стволов температурные напряжения уменьшают результирующие напряжения во внутренних слоях стенок ствола и увеличивают их в наружных слоях. При больших перепадах температур наиболее напряженными слоями могут оказаться наружные слои. В стволах, имеющих сложную конструкцию стенок, распределение результирующих напряжений с учетом температурных напряжений будет носить сложный характер. Определение их должно производиться на основе анализа конкретной конструкции ствола.

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

Time = 2.7e+05  
 Contours of Temperature  
 min=50.4806, at node# 52407  
 max=2500, at node# 3  
 section min = 50.4806, near node# 52396  
 section max = 2500, near node# 4396

y  
x

а)

Temperature  
 2.500e+03  
 2.418e+03  
 2.337e+03  
 2.256e+03  
 2.173e+03  
 2.092e+03  
 2.010e+03  
 1.928e+03  
 1.847e+03  
 1.765e+03  
 1.683e+03  
 1.602e+03  
 1.520e+03  
 1.439e+03  
 1.357e+03  
 1.275e+03  
 1.194e+03  
 1.112e+03  
 1.030e+03  
 9.486e+02  
 8.670e+02  
 7.853e+02  
 7.037e+02  
 6.220e+02  
 5.404e+02  
 4.587e+02  
 3.771e+02  
 2.954e+02  
 2.138e+02  
 1.321e+02  
 5.048e+01



б)

Рисунок 3 – Температурные нагрузки в стволе при использовании патрона с композитной гильзой

Нагрев ствола стрелкового оружия приводит к изменению механических характеристик ствольной стали. Например, при нагреве ствольной стали до температуры 400 °С модуль упругости  $E$  уменьшается на 10 %, предел пропорциональности уменьшается на 15–20 %, коэффициент Пуассона  $\mu$  увеличивается на 15–25 %. Изменяются и другие механические характеристики ствольной стали. Данное обстоятельство также должно учитываться при оценке прочности ствола. Нагрев ствола влияет на кучность и точность стрельбы [6]. Это влияние проявляется в уменьшении дальности стрельбы, увеличении рассеивания, изменении угла вылета пули. Уменьшение дальности стрельбы и увеличение рассеивания пуль объясняется тем, что вследствие разогрева ствола увеличиваются зазоры между стенками ствола и внешней рубашкой пули. При изменении температуры ствола от 15 °С до 400 °С рассеивание увеличивается в 2–3 раза. Для учета изменения дальности стрельбы в зависимости от температуры ствола имеется эмпирическая формула

$$\Delta v = 1,4(0,1 \cdot \delta_m)^2 v_0 = 0,014 \delta_m^2 v_0, \quad (6)$$

где  $\Delta v$  – изменение начальной скорости пули при нагреве ствола;

$\delta_m$  – угол нутации на начальном участке траектории;

$v_0$  – начальная скорость пули.

### Заключение

Таким образом, установлено, что применение патронов с композитной гильзой приводит к изменению теплового потока стенки ствола вследствие иных теплофизических характеристик гильзового материала. Выявлена корреляция между скоростью роста температуры, максимально достигнутой температурой и интенсивностью эрозионно-усталостного разрушения материала основы ствола. Определено, что основной вклад в снижение живучести вносит термоциклическая усталость, усугубляемая химическим воздействием продуктов горения.

Результаты, приведенные в статье, позволяют прогнозировать ресурс ствольных групп оружия под патроны с композитными гильзами, оптимизировать режимы ведения огня для сохранения тактико-технических характеристик, а также скорректировать требования к материалам и технологиям упрочнения для перспективных образцов стрелкового оружия.

### Библиографический список

1. Арзамасов, Б. Н. Научные основы материаловедения / Б. Н. Арзамасов, А. И. Крашенинников, Ж. П. Пастухова, А. Г. Рахштадт. – Москва: Издательство МГТУ имени Н. Э. Баумана. – 1994. – 366 с.
2. Бабабджанов, А. В. Идентификационно-имитационная математическая модель теплофизического нагружения малокалиберного артиллерийского ствола / А. В. Бабабджанов, А. В. Подкопаев. Сибирский аэрокосмический журнал № 2 (23). – Красноярск: СибГУ, 2022. – С. 210–223.
3. Алферов, В. А. Конструкция и расчёт автоматического оружия / В. А. Алферов. – Москва: «Машиностроение», 1977. – 248 с.

4. Серебряков, М. Е. Внутренняя баллистика / М. Е. Серебряков. – Москва: Оборонгиз. – 1949. – 770 с.
5. LS-DYNA Keyword User's Manual. Volume I, II. Livermore: LSTC, 2019. – 5289 p.
6. Швининг, В. Конструкция и материал стволов огнестрельного оружия. – Ленинград: Издательство артиллерийской академия РККА. – 1937. – 103 с.
7. Шадский, А. С., Морозов, Е. М., Жеков, К. Н., Плонтиков, А. С. ANSYS в руках инженера: Температурные напряжения. Изд. Стереотип. – Москва: ЛЕНАНД, 2020. – 480 с.
8. Gonzalez Jr. J.R.: Internal ballistics optimization. Kansas State University Manhattan Department of Mechanical Engineering, – 1990.
9. Ионов, В. Н. Динамика разрушения деформируемого тела / В. Н. Ионов, Л. Н. Покровский. – Москва: Машиностроение, 1987. – 312 с.
10. Гурвич, Г. Р. Экспериментальное исследование термического расширения слоистых углепластиков / М. Р. Гурвич [и др.] // Механика композитных материалов. 1990. – № 1. – С. 32–36.

**Контактная информация:**

Бакланов Дмитрий Владимирович – [baklanov90@yandex.ru](mailto:baklanov90@yandex.ru)

**References**

1. Arzamasov, B. N. Scientific foundations of materials science / B. N. Arzamasov, A. I. Krasheninnikov, Zh. P. Pastukhova, A. G. Rakhshadt. – Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. 1994. – 366 p.
2. Bababdzhanov, A. V. Identification and simulation mathematical model of thermophysical loading of a small-caliber artillery barrel / A. V. Bababdzhanov, A. V. Podkopaev. Siberian Aerospace Journal No. 2 (23). – Krasnoyarsk: SibGU, 2022. – P. 210–223.
3. Alferov, V. A. Design and calculation of automatic weapons / V. A. Alferov. Moscow: Mashinostroenie, 1977. – 248 p.
4. Serebryakov, M. E. Internal ballistics / M. E. Serebryakov, Moscow: Oborongiz. 1949. – 770 p.
5. LS-DYNA Keyword User's Manual. Volume I, II. Livermore: LSTC, 2019. – 5289 p.
6. Schwining, V. Construction and material of firearms barrels. – Leningrad: Publishing house of the Artillery Academy of the Red Army, 1937. – 103 p.
7. Shadsky, A. S., Morozov, E. M., Zhekov, K. N., Plontikov, A. S. ANSYS in the hands of an engineer: Temperature stresses. Ed. Stereotype. – Moscow: LENAND, 2020. – 480 p.
8. Gonzalez Jr. J.R.: Internal ballistics optimization. Kansas State University Manhattan Department of Mechanical Engineering, – 1990.
9. Ionov, V. N. Dynamics of destruction of a deformable body / V. N. Ionov, L. N. Pokrovsky. – Moscow: Mashinostroenie, 1987. – 312 p.
10. Gurvich, G. R. Experimental study of thermal expansion of layered carbon plastics / M. R. Gurvich [et al.] // Mechanics of composite materials. – 1990. – No. 1. – P. 32–36.

**Contact information:**

Baklanov Dmitry Vladimirovich – [baklanov90@yandex.ru](mailto:baklanov90@yandex.ru)