

УДК 623.442.47

О перспективах применения алюминиевых сплавов в стрелковом оружии

Суслиев В. С.^{1,*}, Чернов Ю. С.¹

* suslyaevs@gmail.com

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Целью работы является исследование возможности использования сплавов алюминия для изготовления командных деталей стрелкового оружия. В предлагаемой статье рассмотрено их применение в качестве материала кожуха в двухслойном стволе пулемета, подвергаемого при стрельбе интенсивному нагреву. Показано, что в этом случае вследствие улучшения теплофизических характеристик, при прочих равных условиях, появляется возможность повысить живучесть ствола и увеличить длину непрерывной очереди. При этом появляются предпосылки для улучшения характеристик стрельбы и исключения сменного ствола из комплекта пулемета.

Ключевые слова: живучесть ствола, длина непрерывной очереди, теплоемкость, пулемет, алюминиевый сплав

Введение

Одной из основных проблем, стоящих перед разработчиками автоматического стрелкового оружия, является улучшение их боевых характеристик за счет повышения живучести ствола и увеличения боекомплекта, отстреливаемого непрерывной очередью в сочетании с короткими очередями. С этой целью стоящий на вооружении единый пулемет ПК/ПКМ имеет в своем комплекте сменный ствол, устанавливаемый при перегреве основного ствола [1]. Такое решение ухудшает массогабаритные параметры и осложняет использование пулемета. По сообщениям печати лучшими характеристиками обладает недавно появившийся пулемет ПКП («Печенег»), у которого сменный ствол отсутствует ввиду усовершенствования основного ствола и увеличения его ресурса [2]. Этих качеств, по мнению разработчиков, удалось добиться благодаря изменению конструктивных и геометрических параметров ствола и «эжектору охлаждения», включенному в его конструкцию. Однако отсутствие опубликованных результатов испытаний и теоретических обоснований не позволяет в полной мере оценить полученный положительный эффект.

Известно достаточно большое число технических приемов, направленных на решение указанной проблемы. К ним относятся системы охлаждения стволов: размещение ствола в кожухе, заполненном охлаждающей жидкостью (пулемет Максима); установка

ствола в трубе, при которой реализуется инжекционное охлаждение окружающим воздухом, прокачиваемым вдоль ствола в направлении дульного среза (пулемет Льюиса); межслойное охлаждение [7], применяемое в стационарных ствольных системах малого и среднего калибров; другие системы охлаждения. Перечисленные устройства из-за их громоздкости в современном стрелковом оружии не применяются.

В современных пулеметах для решения проблемы снижения нагрева стволов проводят целый ряд конструктивных мероприятий, в их числе - увеличение массы ствола, увеличение поверхности теплообмена с окружающим воздухом путем выполнения продольных канавок на внешней поверхности ствола [1] и установка на стволах радиаторов [7], применение быстросменных стволов.

Вместе с тем, имеются работы, в которых намечены пути и даны конструкторские проработки и теоретические обоснования решения указанной проблемы путем создания многослойных композиций из материалов, обладающих необходимыми свойствами [3,11]. В статье [3] рассмотрены некоторые конструкции ствола пулемета, которые позволяют предположительно увеличить длину непрерывной очереди по сравнению со штатным пулеметом ПКМ при одинаковой массе рассмотренного и штатного стволов. Рассмотрены многослойные композиции, составленные из ствольной стали, жаропрочного титанового сплава ВТ9 и алюминиевого сплава АЦП1У [4]. Увеличение ресурса и ужесточение режимов стрельбы при этом имело простое физическое объяснение. Во-первых, ствол предлагалось выполнить из титанового сплава. При этом положительный эффект предполагалось достичь за счет малой по сравнению со штатным стволом теплопроводностью титана, что снижало бы поток теплоты, поступающей в ствол во время выстрела. Во-вторых, по условиям прочности часть материала наружного слоя ствола могла быть заменена сплавом алюминия, имеющим большую теплоемкость, что должно увеличить теплоаккумулирующую способность ствола. И наконец, композиция из титанового и алюминиевого сплавов суммирует оба эффекта.

Однако, как показали проведенные исследования, титановые жаропрочные сплавы не могут быть использованы для изготовления стволов непосредственно из-за существенного снижения живучести вследствие механического износа канала. Для решения этой проблемы необходимы дополнительные меры, например, нанесение специальных покрытий канала.

1. Постановка задачи

Композиция ствольной стали и сплава алюминия может уже сейчас обеспечить преимущество перед стальным моноблоком, позволив значительно увеличить ресурс пулемета без замены ствола. Эффект, как уже отмечалось, достигается за счет выполнения ствола в двухслойном исполнении: со стальным лейнером и кожухом из алюминиевого сплава. Из современных алюминиевых сплавов представляются предпочтительными для решаемой задачи сплавы САП и САС [4,5]. Они обладают небольшой плотностью, высокими теплоемкостью, теплопроводностью и сопротивляемостью коррозии, низким коэффи-

ентом теплового расширения, термической стабильностью и высокой жаропрочностью (при нагреве до 500 °С прочность остается на уровне $\sigma_{вр} = 50...110$ МПа, кратковременные нагрузки допускаются до 700...900°С).

Ограничения по режиму стрельбы и отстреливаемому боекомплекту на один ствол обусловлены нагревом ствола. Это же обстоятельство оказывает решающее влияние на его живучесть. Поэтому в обоснование сравнительного анализа целесообразно положить именно тепловое состояние ствола сравниваемых конструктивных схем. Точный расчет динамики нагрева ствола при стрельбе весьма проблематичен. Вместе с тем, при сравнительном анализе различных конструктивных схем погрешности тепловых расчетов будут качественно и количественно близкими, что дает основание предположить их (погрешностей) несущественное влияние на результаты сопоставления.

В качестве отправной точки для сравнения конструктивных решений удобно взять результаты расчета изменения теплового состояния штатного ствола после отстрела боекомплекта в режиме, регламентированном ТУ [6]. Основное требование при этом состоит в том, чтобы температура $t_1(r_1, \tau)$ на поверхности канала ствола во всех сравниваемых вариантах была одинакова и равна расчетной температуре канала штатного ствола.

Ствол пулемета имеет различную толщину по длине, интенсивность отвода тепла также меняется по длине ствола. Поэтому температура на поверхности канала также переменна по его длине. Возникает вопрос, для какого сечения ствола сопоставительные тепловые расчеты наилучшим образом отражают рассматриваемую проблему.

Известно, что наибольшее количество теплоты подводится в ствол в области начала нарезков, поскольку здесь возникают при выстреле максимальные баллистические давления и температуры. В этой области экспериментально регистрируется максимальный износ канала. Для нее имеются данные по температуре на внешней поверхности ствола, что равноценно средней температуре по сечению ствола. Поэтому для сопоставительного анализа расчеты должны выполняться для сечений, расположенных именно в этой области.

2. Решение задачи нагрева ствола

Для определения теплового состояния ствола при стрельбе решалась задача теплопроводности. Расчетная схема двухслойного ствола приведена на рис. 1, на которой слой 1 – лейнер; слой 2 – кожух; $t_1 = t_1(r, \tau)$, $t_2 = t_2(r, \tau)$ – распределения температур в соответствующих слоях в функции времени τ и координаты r ; r_1, r_2, r_3 – радиусы слоев. Результат решения задачи теплопроводности в существенной мере определяется выбором граничных условий. На наружной поверхности ствола ввиду малости времени процесса теплообмена и небольших тепловых потоков в условиях свободной конвекции вполне допустимо, с точки зрения физики процесса, принять тепловой поток нулевым. На границе раздела слоев температуры одинаковы. На поверхности канала ствола тепловые потоки в процессе выстрела изменяются в весьма широком диапазоне и определяются как разностью температур пороховых газов (ПГ) и канала ствола, так и параметрами теплообмена.

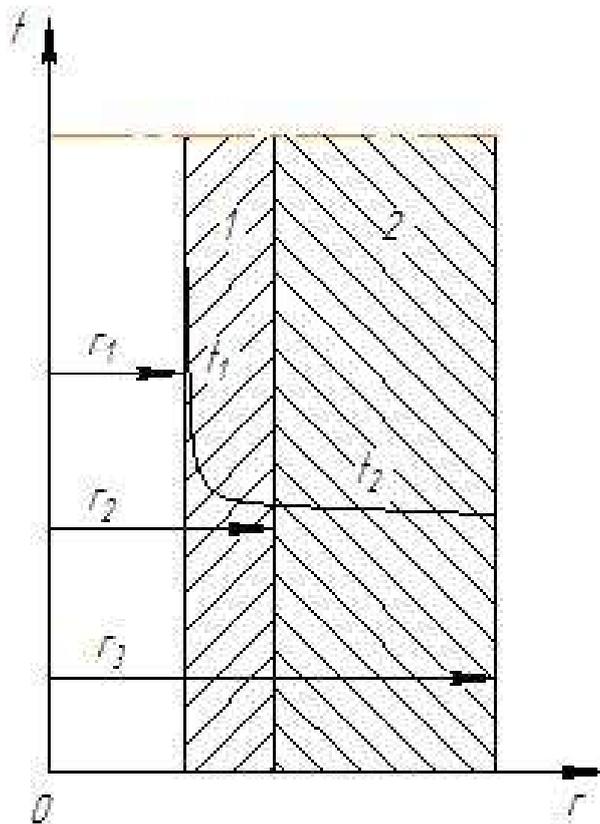


Рис. 1. Расчетная схема ствола

Система уравнений, описывающая нагрев ствола, имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda_1 r \frac{\partial t_1(r, \tau)}{\partial r} \right] &= c_1 \rho_1 \frac{\partial t_1(r, \tau)}{\partial \tau}, \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda_2 r \frac{\partial t_2(r, \tau)}{\partial r} \right] &= c_2 \rho_2 \frac{\partial t_2(r, \tau)}{\partial \tau}, \\ \alpha_r [t_r(\tau) - t_1(r_1, \tau)] &= -\lambda_1 \frac{\partial t_1(r_1, \tau)}{\partial r}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \lambda_1 \frac{\partial t_1(r_2, \tau)}{\partial r} &= \lambda_2 \frac{\partial t_2(r_2, \tau)}{\partial r}, \\ \frac{\partial t_2(r_3, \tau)}{\partial r} &= 0, \\ t_1(r_2, \tau) &= t_2(r_2, \tau), \end{aligned}$$

где ρ_i, c_i, λ_i - плотности, удельные теплоемкости и коэффициенты теплопроводности материалов слоев, $i = 1, 2$; c_i, λ_i - функции температуры; α_r - коэффициент теплоотдачи; t_r - температура газов в рассматриваемом сечении.

Задать физически обоснованный вид функции теплового потока с позиции структуры пограничного слоя не представляется возможным из-за наличия в нем горящих частиц пороха. В этой ситуации целесообразно использовать согласованную с опытом эмпирическую зависимость теплового потока от давления, температуры и массы пороховых частиц [7] в виде

$$\alpha_r = \sigma_T \rho_g,$$

где ρ_g - плотность пороховых газов в сечении канала ствола, σ_T - коэффициент пропорциональности.

Задача настоящего исследования заключается в сравнительном анализе изменения теплового состояния предлагаемого двухслойного ствола. За исходное принималось тепловое состояние ствола пулемета ПКМ. В качестве объекта сравнения рассматривался ствол пулемета ПКП.

Предлагаемый двухслойный ствол содержит лейнер из ствольной стали 30ХН2ВФМА и кожух из алюминиевого сплава типа САП и САС. Теплофизические и прочностные характеристики лейнера (удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, коэффициент линейного расширения, предел упругости, модуль упругости и пр.) назначались в соответствии с [8]. Теплофизические характеристики сплава САП брались из [4,5].

Размеры лейнера рассчитывались из условия прочности ствола моноблока. В расчетном сечении (150 мм от казенного среза ствола): внутренний радиус $r_1 = 3,96$ мм, наружный радиус $r_2 = 7$ мм. Размеры кожуха назначались, исходя из равенства массы ствола ПКП и массы рассматриваемого ствола: $r_3 = 25$ мм. Отсутствие проскальзывания кожуха относительно лейнера при нагреве ствола контролировалось путем сопоставления расчетных значений деформаций поверхностей их контакта, гарантирующих наличие натяга. Исходное значение относительного натяга между ними в слое r_2 принималось равным $\eta_2 = 0,0025$.

Исходные данные для прочностных и тепловых расчетов формировались на основании решения задач внутренней и промежуточной баллистики в термодинамической постановке [7, 9, 10]. Осесимметричная задача теплопроводности решалась при граничном условии третьего рода с заданием коэффициента теплоотдачи α_r . Постоянная теплообмена σ_T определялась по результатам экспериментальных исследований нагрева ствола пулемета ПКМ. В эксперименте регистрировались среднеинтегральные температуры

$$t_{cp} = \frac{2}{r_3^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_3} t(r, \tau) r dr$$

для регламентированных [6] условий стрельбы, согласно которым пулемет ПКМ должен допускать 400 выстрелов: 200 выстрелов короткими очередями и 200 выстрелов непрерывной очередью, после чего ствол должен быть заменен. Эти же температуры рассчитывались при различных значениях σ_T . За искомое принималось то значение σ_T , которое давало наилучшее соответствие расчетных и экспериментальных температур $t_{cp}(n)$, где n – число выстрелов. Результаты решения задачи удовлетворительны и приведены на рис. 2 в виде экспериментальных точек и расчетной кривой среднеинтегральной по сечению температуры t_{cp} в функции числа выстрелов n . В соответствии с ними была определена постоянная σ_T .

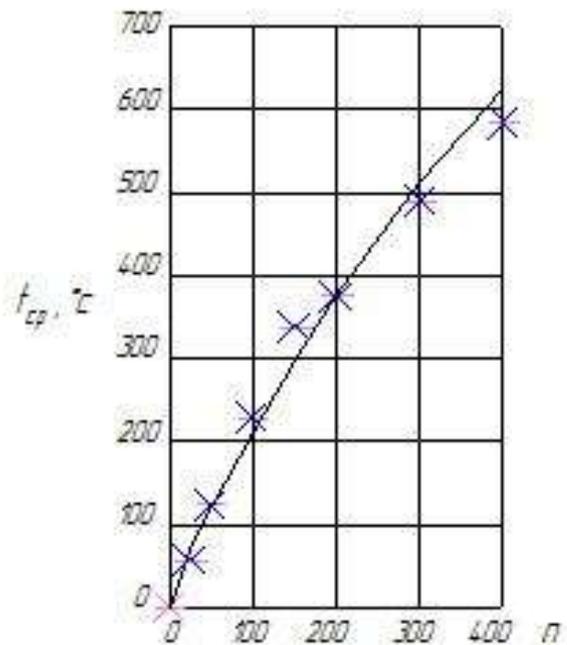


Рис. 2. Тестирование задачи теплопроводности

Результаты численного решения нестационарной задачи теплопроводности (1) для рассматриваемого ствола приведены на рис. 3. Кривая 1 на рисунке представляет температуру $t_1(r_1, \tau)$ поверхности канала ствола-моноблока пулемета ПКМ. Его наружный радиус в рассматриваемом сечении $r_2 = 15$ мм. Боекомплекту в 400 выстрелов соответствует расчетное значение температуры канала ствола ПКМ $t_1(r_1, \tau) = 740^\circ\text{C}$, которую примем за предельно допустимую температуру для данного материала (стали 30ХН2МФА). После достижения предельно допустимой температуры в соответствии с ТУ [6] необходимо сменить ствол. С этой температурой будем сравнивать расчетные температуры других конструкций стволов.

Кривая 2 на рис. 3 соответствует нагреву ствола пулемета «Печенег», отличающегося от ствола пулемета ПКМ величиной наружного радиуса $r_2 = 17$ мм. Расчеты показывают, что ПКП имеет преимущество по боекомплекту в 25% при достижении допустимой температуры $t_1(r_1, \tau)$. Это объясняется различиями в массе сравниваемых стволов.

Изменению температуры поверхности канала предлагаемого ствола соответствует на рис. 3 кривая 3. Значения радиусов $r_2 = 7$ мм и $r_3 = 25$ мм обусловлены ограничениями по массе (необходимостью обеспечения равенства его массы массе ствола ПКП). При этом выбранное значение радиуса r_2 является наименьшим из значений, обеспечивающих баллистическую прочность лейнера. Таким образом, кривая 3 характеризует динамику нагрева ствола с лучшими для данной схемы теплофизическими характеристиками. С учетом имеющихся ограничений (достижению допускаемой температуры на поверхности канала ствола) предлагаемый ствол обеспечивает отстрел непрерывной очередью почти двойного боекомплекта, что в два раза превосходит показатели ПКМ и в полтора раза - показатели ПКП.

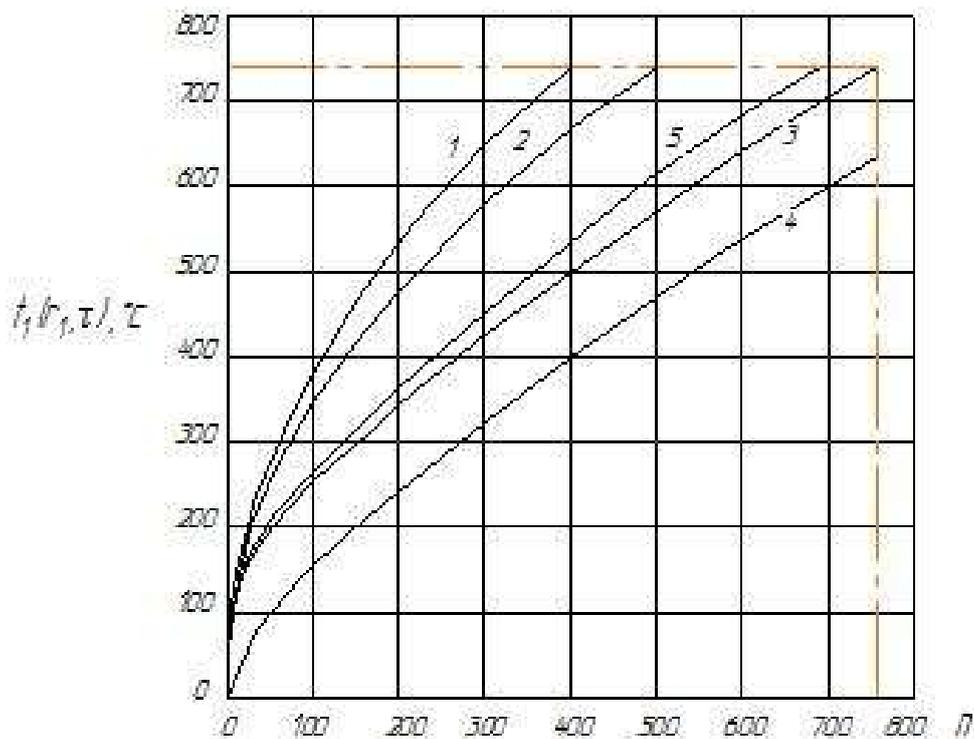


Рис. 3. Расчетные значения температуры

Возникает вопрос о состоянии алюминиевого кожуха при таком большом нагреве ствола при интенсивной стрельбе. Для ответа на этот вопрос достаточно понаблюдать за изменением расчетной температуры t_2 на границе раздела слоев. Ее график приведен на рис. 3 (кривая 4), откуда видно, что к моменту окончания отстрела предлагаемого ствола (достижения допустимой температуры на поверхности канала) температура t_2 не превосходит 640°C . Такую и большие температуры выдерживают современные алюминиевые сплавы на основе порошковой металлургии (САП, САС), сохраняя при этом достаточно высокие прочностные характеристики.

При практической реализации размеры лейнера и кожуха могут отличаться от рассмотренных, тем более, в связи с отличиями, например, связанными с введением в конструкцию ствола защитного стального кожуха и пр. Однако положительный эффект от использования в стволах пулеметов промежуточных слоев из алюминиевых сплавов представляется несомненным. Кривая 5 на рисунке рассчитана для трехслойного ствола композиции «сталь-алюминий-сталь», в которой наружный стальной слой предназначен для защиты алюминиевого кожуха от механических повреждений. Как видно из графика, такая конструкция имеет существенные преимущества по допустимому боекомплекту.

Заключение

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о перспективности применения алюминиевых сплавов в конструкции стволов автоматического оружия, функционирующего в условиях интенсивного нагружения. Одним из путей сохранения при этом

баллистических характеристик оружия и увеличения ресурса стволов является, помимо прочего, увеличение их теплоемкости при сохранении их прочностных параметров. Этому в достаточной мере могут соответствовать композиции из высокопрочных сталей и алюминиевых сплавов, нашедших широкое применение в различных отраслях машиностроения. Алюминиевые сплавы, обладая лучшими, по сравнению со сталью, теплофизическими параметрами, обеспечивают решение задачи повышения теплоемкости. Проведенные численные исследования подтверждают это предположение. Как показывают расчеты, предложенный ствол имеет двукратное преимущество по величине отстреливаемого боекомплекта по сравнению со стволом ПКМ и полуторакратное - по сравнению со стволом пулемета ПКП.

Список литературы

1. Пулеметы Калашникова модернизированные – ПКМ, ПКМС // Портал «Стрелковое оружие России»: сайт. Режим доступа: http://gunrf.ru/rg_pulemet_pkm_ru.html (дата обращения 01.10.2015).
2. 7,62-мм пулемет Печенег – ПКП (Россия) // Портал «Современная армия»: сайт. Режим доступа: <http://www.modernarmy.ru/article/164> (дата обращения 01.10.2015).
3. Землянигин Н.Н., Чернов Ю.В. Биметаллический ствол пулемета калибра 7,62 мм // Оборонная техника. 1986. № 6.
4. Конструкционные материалы: справочник / под ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990. 687 с.
5. Цветные металлы и сплавы. Алюминиевые сплавы // Matved2010.Narod.Ru: сайт. Режим доступа: <http://matved2010.narod.ru/Glava52.html#Zak522> (дата обращения 04.10.2015).
6. ТУ МО № А8112-72. Технические условия на изготовление и приемку модернизированного пулемета Калашникова ПКМ.
7. Орлов Б.В., Ларман Э.К., Маликов В.Г. Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий / под ред. Б.В. Орлова. М.: Машиностроение, 1976. 430 с.
8. Прус А.А., Ермолаев Б.И. РТМ 3-588-74. Металлы и сплавы. Справочные данные о физико-механических свойствах при различных температурах и условиях нагружения. 1975. 85 с.
9. Алферов В.В., Бакулин А.И., Орлов Б.В., Светлицкий В.А., Топчеев Ю.И., Устинов В.Ф., Хворостин А.Е. Проектирование ракетных и ствольных систем / под ред. Б.В. Орлова. М.: Машиностроение, 1974. 828 с.
10. Бурлов В.В., Грабин В.В., Козлов А.Ю., Лысенко Л.Н., Монченко Н.М., Сидоров А.И., Шмельков В.Б. Баллистика ствольных систем / под ред. Л.Н. Лысенко и А.М. Липанова. М.: Машиностроение, 2006. 460 с.
11. Сарымов И.В. Ствол автоматического оружия: пат. RU 2089813. 1997.

On the Forward Looking Aluminum Alloy Applications in Small Arms

V.S. Souslyayev^{1,*}, Yu.S. Chernov¹

[*suslyayevvs@gmail.com](mailto:suslyayevvs@gmail.com)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: the lifespan of the barrel, machinegun, the length of the continuous phase of the gun, aluminum alloy

The permanent tasks for improving automatic small arms are:

1. Reduced barrel wear (increased **lifespan**).
2. More tighten rate of fire (increased strings of burst and decreased pauses between them).
3. Increased ejection ammunition for a limited period of time.

These problems arise from the heating the barrel surface, which results in reduced mechanical characteristics of the barrel steel.

Basically, there are three ways of anti-heating:

1. Reduced heat flows from the powder gases to the barrel surface.
2. Dispersion of supplied heat into the environment when shooting.
3. Increased heat storage capacity of the barrel.

Heat flows can be reduced by using a liner made from material that has the thermal resistance greater than that of the steel. This is an option of the long-term perspective. The authors don't know works in this field.

A recently adopted national general-purpose machine gun design, manufactured by PKP ("Pecheneg"), uses the forced heat dissipation. There is no estimates of the efficiency of its cooling system available in information sources; in terms of physics of the process, in this design the efficient heat removal from the surface of the barrel is scarcely probable.

The paper estimates the proposed two-layer barrel effect:

- 1) Liner (inner layer) – barrel steel.
- 2) Housing - high-strength aluminium alloy.

The positive effect is due to increase in the heat capacity of the barrel with its appropriate strength being ensured. The barrels being in service with machine guns such as PK, PKM, etc., including a barrel of the PKP machine gun, have an excessive strength. This allows us to redistribute weight between the strong steel liner and the light housing of high heat capacity through allowable reduction of the barrel wall thickness owing to a certain decrease of strength.

Solving the heat conduction problems for the PKM and PKP machine gun barrels, and the proposed two-layer barrel allowed us to make estimates. A comparative analysis of the results

has shown that the suggested barrel has significant advantages, namely: allows firing almost a double ammunition of the PKM machine gun and a continuous shooting of one and a half ammunition of PKM machine gun. The solutions of the non-stationary heat conduction problem provided the estimates.

The results obtained suggest a promising use of modern high-strength and heat-resistant aluminium alloy in the design of the heat-loaded parts of small arms, and, especially, when manufacturing the barrels of the general-purpose machine guns and shell guns.

References

1. Pulemety Kalashnikova modernizirovannye – PKM, PKMS [PKM/PKMS Kalashnikov modernized machine gun]. Portal “Firearms Russia”: website. Available at: http://gunrf.ru/rg_pulemet_pkm_ru.html , accessed 01.10.2015.
2. 7,62-mm pulemet Pecheneg – PKP (Rossiya) [7.62mm Pecheneg machine gun – PKP (Russia)]. Portal “Modern Army”: website. Available at: <http://www.modernarmy.ru/article/164> , accessed 01.10.2015.
3. Zemlyanigin N.N., Chernov Yu.V. Bimetallic barrel of 7.62 mm machine gun. *Oboronnaya tekhnika = Defence equipment*, 1986, no. 6. (in Russian).
4. Arzamasova B.N., ed. *Konstruktsionnye materialy: spravochnik* [Structural materials: handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 687 p. (in Russian).
5. Tsvetnye metally i splavy. Alyuminievye splavy [Non-ferrous metals and alloys. Aluminium alloys]. Matved2010.Narod.Ru: website. Available at: <http://matved2010.narod.ru/Glava52.html#Zak522> , accessed 04.10.2015.
6. *TU MO № A8112-72. Tekhnicheskie usloviya na izgotovlenie i priemku modernizirovannogo pulemeta Kalashnikova PKM* [Min. of Defence Spec. № A8112-72. Specifications for manufacturing and acceptance of modernized PKM Kalashnikov machine gun]. (in Russian).
7. Orlov B.V., Larman E.K., Malikov V.G. *Ustroistvo i proektirovanie stvolov artilleriiskikh orudii* [Structure and design of barrels of artillery guns]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 430 p. (in Russian).
8. Prus A.A., Ermolaev B.I. *RTM 3-588-74. Metally i splavy. Spravochnye dannye o fiziko-mekhanicheskikh svoistvakh pri razlichnykh temperaturakh i usloviyakh nagruzheniya* [STM 3-588-74. Metals and alloys. Reference data on the physical and mechanical properties at different temperatures and loading conditions]. 1975. 85 p. (in Russian).
9. Alferov V.V., Bakulin A.I., Orlov B.V., Svetlitskii V.A., Topcheev Yu.I., Ustinov V.F., Khvorostin A.E. *Proektirovanie raketnykh i stvol'nykh sistem* [Design of rocket and barrel systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 828 p. (in Russian).
10. Burlov V.V., Grabin V.V., Kozlov A.Yu., Lysenko L.N., Monchenko N.M., Sidorov A.I., Shmel'kov V.B. *Ballistika stvol'nykh sistem* [Ballistics of barrel systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 460 p. (in Russian).

11. Sarymov I.V. *Stvol avtomaticheskogo oruzhiya* [Barrel of the automatic weapon]. Patent, no. 2089813 RU, 1997. (in Russian).