



УДК 623

doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-1



Open
Access

RESEARCH
ARTICLE

Анализ технического задела в области разработки и применения алюминиевых броневых материалов в современных системах вооружений

Дмитрий Борисович Крюков

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
ddbkkk@yandex.ru

Алексей Олегович Кривенков

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
krivenkov80@yandex.ru

Максим Сергеевич Гуськов

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
aspirantslpim@yandex.ru

Аннотация. Исследованы технологии бронирования военной техники с применением алюминиевых сплавов, которые стали легкой и эффективной заменой традиционной стальной броне. Основное внимание уделено ключевым характеристикам алюминиевых сплавов: высокой прочности при малом весе, устойчивости к коррозии и жесткости, что делает их идеальными для использования в бронетехнике. Описаны методы тестирования алюминиевой брони. Приведены примеры успешного применения алюминиевой брони в боевых условиях, подтверждающие ее надежность. Особое внимание уделено перспективным разработкам, таким как композитная броня и пеноалюминий, которые открывают новые возможности для повышения защиты и мобильности бронетехники. Подчеркивается важность использования инновационных композиционных материалов на основе высокопрочных алюминиевых сплавов с интерметаллическим упрочнением.

Ключевые слова: композиционные алюминиевые броневые материалы, бронезащита, пулестойкость, военная техника

Для цитирования: Крюков Д. Б., Кривенков А. О., Гуськов М. С. Анализ технического задела в области разработки и применения алюминиевых броневых материалов в современных системах вооружений // Инжиниринг и технологии. 2025. Т. 10 (1). С. 1–5. doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-1

Analysis of Technological Advancements in the Development and Application of Aluminum Armor Materials in Modern Weapon Systems

Dmitry B. Kryukov

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
ddbkkk@yandex.ru

Alexey O. Krivenkov

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
krivenkov80@yandex.ru

Maxim S. Guskov

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
aspirantslpim@yandex.ru

Abstract. The article explores the technologies of armoring military vehicles using aluminum alloys, which have become a lightweight and effective alternative to traditional steel armor. The main focus is on the key characteristics of aluminum alloys: high strength-to-weight ratio, corrosion resistance, and rigidity, making them ideal for use in armored vehicles. Methods for testing aluminum armor are described. Examples of the successful use of aluminum armor in combat



conditions are provided, confirming its reliability. Special attention is given to promising developments, such as composite armor and foam aluminum, which open up new possibilities for enhancing the protection and mobility of armored vehicles. The importance of using innovative composite materials based on high-strength aluminum alloys with intermetallic hardening is also emphasized.

Keywords: composite aluminum armor materials, armor protection, bullet resistance, military vehicles

For citation: Kryukov D.B., Krivenkov A.O., Guskov M.S. Analysis of Technological Advancements in the Development and Application of Aluminum Armor Materials in Modern Weapon Systems. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and Technology*. 2025;10(1):1–5. (In Russ.). doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-1

Современные технологии бронирования значительно продвинулись вперед, выйдя за пределы традиционных материалов. Начиная со второй половины XX века, получили широкое распространение боевые машины с бронезащитой из алюминиевых сплавов. Несмотря на кажущуюся мягкость и другие особенности алюминия, этот материал продемонстрировал свои значительные преимущества перед традиционной стальной броней и даже смог частично заменить ее в ряде областей. Интерес к алюминию как к материалу для бронирования возник в СССР в конце 1940-х годов.

Изначально советские специалисты сосредоточились на разработке легкой брони для авиации, а затем приступили к аналогичным проектам для флота. Лишь к концу 1950-х годов алюминиевые сплавы начали рассматриваться для применения в сухопутной бронетехнике. Подобные процессы в то же время происходили и в других странах, где также велись активные исследования в области легких броневых материалов.

К началу 1960-х годов советские и зарубежные металлурги разработали оптимальные составы алюминиевых сплавов с добавлением других металлов, которые обеспечивали необходимые показатели прочности и надежности. К середине 1960-х годов такие сплавы начали активно использоваться в реальных проектах легкой бронетехники. В одних случаях алюминий применялся как основной материал для бронирования, в других – комбинировался с другими металлами для достижения максимальной эффективности.

Алюминиевые сплавы доказали свою пригодность для создания легкой, но прочной брони, что особенно важно для повышения мобильности и маневренности боевых машин. Их использование позволило значительно снизить вес техники без ущерба для защиты, что стало ключевым фактором для разработки современных боевых бронированных машин (ББМ). Такие решения активно используются в бронетехнике по всему миру, демонстрируя свои преимущества в реальных боевых условиях. Среди наиболее известных примеров массового применения алюминиевой брони можно выделить:

- Американский бронетранспортер M113 – один из первых массовых образцов бронетехники с алюминиевой броней. Его корпус выполнен из алюминиевого сплава 5083 с добавлением магния. Более 80 тыс. таких машин были произведены, и многие из них до сих пор используются. M113 доказал свою эффективность во время Вьетнамской войны, где его легкая броня обеспечивала защиту от стрелкового оружия и осколков [1];

- Советская БМП-1, принятая на вооружение в 1966 году, стала первой советской боевой машиной пехоты с алюминиевой броней. Надмоторная часть ее корпуса была защищена алюминиевым сплавом 1901, способным выдерживать попадания бронебойных пуль калибром до 23 мм [2];

- Российские БМД-1 и БМП-3. БМД-1, созданная на основе алюминиевого сплава 1901, в 1976 году стала первой в мире машиной, десантированной с экипажем. Ее алюминиевый корпус обеспечил не только защиту, но и высокую прочность конструкции. БМП-3, разработанная с использованием алюминиевого сплава 1903, стала полностью алюминиевой боевой машиной, включая башню. Использование алюминия позволило снизить ее вес почти на треть по сравнению со стальной броней [3].

Эти примеры подтверждают, что алюминиевые сплавы остаются востребованным материалом в современных системах защиты, сочетая легкость, прочность и технологичность.

Алюминий в чистом виде – мягкий и легкий металл, но его сплавы с добавлением магния, цинка, меди и других элементов обладают уникальными свойствами.

Основные характеристики, которые делают алюминиевые сплавы идеальными для бронирования.

Во-первых, это высокая прочность при малом весе. Современные алюминиевые сплавы могут быть в 15–20 раз прочнее чистого алюминия. Например, сплав 5083, используемый в американских бронетранспортерах M113, обладает пределом прочности до 300 МПа. Хотя сталь все еще тверже



(предел прочности высокопрочных сталей достигает 1000 МПа), алюминиевая броня при той же массе оказывается толще, что компенсирует разницу в твердости [4].

Во-вторых, это легкость. Плотность алюминия составляет около $2,7 \text{ г/см}^3$, что почти в три раза меньше, чем у стали ($7,8 \text{ г/см}^3$). Это позволяет значительно снизить массу бронетехники, что критически важно для повышения ее тактико-технических характеристик, мобильности, проходимости и возможности десантирования.

В-третьих, это коррозионная стойкость. Алюминий естественным образом образует на своей поверхности оксидную пленку, которая защищает его от коррозии. В отличие от стали, алюминиевая броня не требует дополнительной защиты от ржавчины, что снижает затраты на обслуживание [5].

В-четвертых, это жесткость и конструктивная применимость. Алюминиевые сплавы обладают высокой жесткостью, что позволяет использовать их в качестве несущих элементов конструкции. Например, корпус БМД-1, выполненный из сплава броневое алюминиевого сплава 1901, не только защищает экипаж, но и выдерживает значительные механические нагрузки.

В Российском центре испытаний (РЦИ) при московском «НИИ стали» ежедневно проводятся десятки тестов с тем, чтобы оценить защитные свойства новых броневых алюминиевых сплавов [9]. Испытания включают в себя:

а) обстрел из стрелкового оружия и легких пушек калибром до 23 мм, при этом броневые панели устанавливают под разными углами и обстреливают из крупнокалиберных винтовок и легких пушек. После каждого выстрела специалисты оценивают степень поражения брони по 10-балльной шкале [6];

б) оценку характера разрушения броневой панели с использованием метода «керосиновой пробы». Этот простой, но эффективный метод позволяет быстро оценить целостность бронеплиты. Если керосин, нанесенный с одной стороны бронепанели, после отстрела просачивается на обратную сторону, это свидетельствует о наличии в ней сквозных микротрещин.

Высокая прочность и твердость броневых алюминиевых сплавов 1901 и 1903 достигаются за счет увеличения содержания в них цинка и магния. Российские разработчики придерживаются суммарного содержания этих элементов в пределах 7–9 %, что обеспечивает дополнительную прочность по сравнению с зарубежными аналогами, где этот показатель составляет 5–7 %. Однако увеличение содержания цинка и магния повышает склонность данных сплавов к коррозии под напряжением [11]. Для компенсации этого недостатка используются модифицирующие добавки, такие как хром и цирконий, а также уникальные режимы термической обработки.

Зарубежные сплавы, напротив, ориентированы на повышенную коррозионную стойкость, но при этом имеют умеренную прочность [7, 8]. Российские сплавы демонстрируют высокую живучесть, т.е. способность сохранять защитные свойства при многократном воздействии, что критически важно для бронированной техники.

Сегодня исследования в области разработки броневых алюминиевых сплавов продолжаются. Ученые работают над созданием новых материалов с повышенной коррозионной стойкостью, а также разрабатывают композитные алюминиевые брони.

Композитная броня представляет собой многослойный композиционный материал, где алюминиевые сплавы сочетаются с керамикой и полимерными материалами. Это позволяет повысить защиту техники от бронебойных пуль и кумулятивных снарядов.

Одной из перспективных разработок «НИИ стали» в области легкого бронирования на сегодня является пеноалюминий [10]. В основе технологии его получения лежит метод порошковой металлургии. Пористая алюминиевая матрица пеноалюминия состоит из высокопрочного алюминиевого сплава и нитрида титана (TiN_2). Пеноалюминий обладает высокой энергопоглощающей способностью и идеально подходит для защиты техники от мин и фугасов, что делает его перспективным материалом для использования в бронетехнике, предназначенной для действий в условиях городских боев. Использование пеноалюминия при изготовлении днища перспективной российской боевой машины пехоты нового поколения «Курганец-25» позволило снизить ее вес на 300 кг, существенно улучшив ее тактико-технические показатели.

Благодаря оптимизации состава и технологий обработки, российские броневые алюминиевые сплавы превосходят зарубежные аналоги, обеспечивая высокий уровень защиты при минимальной массе конструкции. Так, современные российские боевые машины БМД-4М и БТР-МДМ «Ракушка», относящиеся к технике воздушно-десантных войск (ВДВ), также являются ярким примером использования передовых композиционных броневых алюминиевых сплавов. Корпуса БМД-4М и БТР-МДМ



изготовлены с применением сверхпрочного алюминиевого сплава ПАС-1 нового поколения, разработки «НИИ стали», что обеспечивает надежную противопульную защиту и предотвращает поражение осколками экипажа внутри машины.

В Пензенском государственном университете на кафедре «Сварочное, литейное производство и материаловедение» разработан новый композиционный броневой материал на основе высокопрочного алюминиевого сплава В95 с интерметаллическим упрочнением [12]. В основу броневых материалов положено армирование его структуры перфорированными слоями титанового сплава ВТ1-0. Специальный режим термической обработки композита позволил сформировать на границах армирующих слоев и основы алюминиевой матрицы композита высокотвердые интерметаллические слои на основе алюминидов титана ($TiAl_3$) заданной толщины, способствующие разрушению баллистического объекта. Наличие перфораций в промежуточных титановых слоях между основными слоями алюминиевой матрицы композита позволило локализовать механизм развития хрупких трещин при баллистическом воздействии на материал, тем самым повысив живучесть самой алюминиевой брони. Композиционный материал изготавливается методом сварки взрывом, имеющим существенные преимущества, по сравнению с традиционными технологиями получения многослойных металлических материалов [13, 14].

Алюминиевая броня находит применение не только в военной, но и в гражданской сфере. Из нее изготавливают бронежилеты, шлемы для полицейских, автомобили для инкассаторов и даже защитные конструкции для банковских хранилищ.

Алюминиевые сплавы доказали свою эффективность в качестве материала для бронирования и получили широкое применение. Хотя они и не смогли полностью заменить традиционные стальные листы или отливки, в ряде случаев они стали отличной альтернативой. Благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая прочность при малом весе, устойчивость к коррозии и жесткость, алюминиевые сплавы стали важным компонентом современной бронетехники. Они обеспечивают надежную защиту, повышают мобильность и маневренность боевых машин, что особенно критично в условиях современного поля боя. Многочисленные испытания и реальное боевое применение подтвердили, что алюминиевая броня способна выдерживать серьезные нагрузки, сохраняя при этом легкость конструкции.

Разработчики продолжают совершенствовать характеристики брони, стремясь сделать ее еще прочнее, легче и надежнее. В научно-исследовательских центрах проводятся тесты, а в лабораториях создаются новые сплавы и композиционные материалы на основе сплавов алюминия, которые открывают дополнительные возможности для повышения уровня защиты. Алюминий, который когда-то считался слишком мягким для военных нужд, сегодня стал символом инноваций в области бронезащиты. Это наглядный пример того, как современные технологии способны превратить даже «неподходящие» материалы в ключевые элементы оборонных технологий. На сегодня заказчики и разработчики бронетехники имеют доступ к обширному перечню материалов, и алюминиевые сплавы занимают в этом списке важное место.

Список литературы

1. Технические характеристики бронетранспортера М113 // Министерство обороны США. URL: <https://www.army.mil/m113> (дата обращения: 22.11.2024).
2. Складов В. А., Гребенников С. Ф. Бронетанковая техника: история, конструкция, применение. М. : Воениздат, 2005. 320 с.
3. Федосеев С. В. Боевые машины пехоты и бронетранспортеры. М. : Экспринт, 2003. 256 с.
4. Гуляев А. П. Металловедение : учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М. : Металлургия, 1986. 544 с.
5. Колачев Б. А., Ливанов В. А., Елагин В. И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М. : Металлургия, 1981. 416 с.
6. Фишман Р. Секрет алюминиевой брони: самой легкой защиты для военной бронетехники. URL: <https://techinsider.ru> (дата обращения: 15.12.2024).
7. Jane's Armour and Artillery. 2020 Edition. Jane's Information Group, 2020. 720 p.
8. Hutchinson B., Ringer S. P. Aluminium Alloys for Armour Applications // Materials Science and Engineering: A. 2000. Vol. 280, № 1. P. 75–83.
9. Российский центр испытаний (РЦИ) : официальный сайт. URL: <https://www.rci-steel.ru> (дата обращения: 16.12.2024).
10. Современные алюминиевые сплавы для бронирования. М. : НИИ стали, 2022. 45 с.
11. Коррозионная стойкость алюминиевых сплавов // Металлы и сплавы. 2021. № 4. С. 12–18.



12. Крюков Д. Б. Аспекты получения легких броневых композиционных материалов с механизмом локализации хрупких трещин в структуре при баллистическом воздействии // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2023. № 1 (25). С. 20–28.
13. Крюков Д. Б. Структурные особенности и технология получения легких броневых композиционных материалов с механизмом локализации хрупких трещин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2022. Т. 24, № 3. С. 103–111.
14. Крюков Д. Б. Перспективные легкие трещиностойкие брони, полученные с применением технологии сварки взрывом // Упрочняющие технологии и покрытия. 2022. Т. 18. № 10 (214). С. 440–443.

References

1. Technical characteristics of the M113 armored personnel carrier. *Ministerstvo oborony SSHA = The US Department of Defense*. (In Russ.). Available at: <https://www.army.mil/m113> (accessed 22.11.2024).
2. Skljarov V.A., Grebennikov S.F. *Bronetankovaja tehnika: istorija, konstruktsija, primenenie = Armored vehicles: history, design, application*. Moscow: Voenizdat, 2005:320. (In Russ.)
3. Fedoseev S.V. *Boevye mashiny pehoty i bronetransportery = Infantry fighting vehicles and armored personnel carriers*. Moscow: Eksprint, 2003:256. (In Russ.)
4. Guljaev A.P. *Metallovedenie: uchebnik dlja vuzov. 6-e izd., pererab. i dop. = Metallurgy: a textbook for universities. 6th ed., revised and add.* Moscow: Metallurgija, 1986:544. (In Russ.)
5. Kolachev B.A., Livanov V.A., Elagin V.I. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka tsvetnyh metallov i splavov = Metal science and heat treatment of non-ferrous metals and alloys*. Moscow: Metallurgija, 1981:416. (In Russ.)
6. Fishman R. *Sekret aljuminievoj bronii: samoj legkoj zaschity dlja voennoj bronetehniki = The secret of Aluminum armor: the easiest protection for military armored vehicles*. (In Russ.). Available at: <https://techinsider.ru> (accessed 15.12.2024).
7. *Jane's Armour and Artillery*. 2020 Edition. Jane's Information Group, 2020:720.
8. Hutchinson B., Ringer S.P. Aluminium Alloys for Armour Applications. *Materials Science and Engineering: A*. 2000;280(1):75–83.
9. *Rossijskij tsentr ispytaniy (RTSI): ofitsialnyj sajt = Russian Testing Center (RCI) : official website*. (In Russ.). Available at: <https://www.rci-steel.ru> (accessed 16.12.2024).
10. *Sovremennye aljuminievyje splavy dlja bronirovanija = Modern aluminum alloys for booking*. Moscow: NII stali, 2022:45. (In Russ.)
11. Corrosion resistance of aluminum alloys. *Metally i splavy = Metal and alloys*. 2021;(4):12–18. (In Russ.)
12. Krjukov D.B. Aspects of obtaining light armor composite materials with a mechanism for localization of brittle cracks in the structure under ballistic impact. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Serija: Materialy. Konstruktsii. Tehnologii = Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies*. 2023;(1):20–28. (In Russ.)
13. Krjukov D.B. Structural features and technology of obtaining light armor composite materials with a mechanism for localization of brittle cracks. *Obrabotka metallov (tehnologija, oborudovanie, instrumenty) = Metalworking (technology, equipment, tools)*. 2022;24(3):103–111. (In Russ.)
14. Krjukov D.B. Promising lightweight crack-resistant armor produced using explosion welding technology. *Uprochnjajushchie tehnologii i pokrytija = Hardening technologies and coatings*. 2022;18(10):440–443. (In Russ.)

Поступила в редакцию / Received 24.03.2025

Принята к публикации / Accepted 15.04.2025