

# ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ



Научная статья  
УДК 614. 841

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-70-75>

## Структурная организация стали для обеспечения безопасности специальной техники

В. Н. Пустовойт ✉, Ю. В. Долгачев , И. В. Иванков 

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

✉ [fipm-dstu@mail.ru](mailto:fipm-dstu@mail.ru)

### Аннотация

**Введение.** В настоящее время в качестве бронезащитных элементов выступают различные неметаллические, металлокерамические и композитные материалы. Однако большинство бронезащитных элементов транспорта и средств индивидуальной защиты (СИБ) изготавливаются из стали, обладающей хорошей баллистической стойкостью, но высокой массой. В связи с этим актуальной является задача облегчения типовых защитных элементов. Это возможно при использовании материала, имеющего структурную организацию. Таковым является естественный ферритно-мартенситный композит (ЕФМК). Целью данной работы является оценка перспективности применения стали с ориентированной структурой в качестве эффективного защитного материала при воздействии высокоскоростным сосредоточенным ударом большой мощности.

**Материалы и методы.** Выявлены особенности и недостатки эффективных броневых сталей, проведен сравнительный анализ со сталью, ориентированной как ЕФМК. Проведена оценка состояния микроструктуры стали 14Г2 с разной температурой закалки (730 °С и 760 °С) методом микроструктурного анализа. Показаны перспективы применения низкоуглеродистой ферритно-мартенситной стали на основании закономерностей механики разрушения и сопоставления с экспериментально полученными данными на образце стали 14Г2 размерами 150×44×7 мм после испытания на пулестойкость патронами со стальным сердечником и бронебойными с вольфрамовым сердечником из винтовки СВД и автомата АК–74 калибра 7,62 мм и 5,45 мм соответственно.

**Результаты исследования.** Оценены возможности сопротивления разрушению стали с ориентированной ферритно-мартенситной структурой в сравнении с типовыми гомогенными и гетерогенными стальными материалами. Стойкость такой стали связана с характером развития разрушения, выраженном в торможении трещины при расслоении на границах феррит-мартенсит. При образовании расслоения трещина затрачивает энергию на расслоение и меняет свое направление, что в последующем приводит к полной остановке процесса разрушения.

**Обсуждение и заключение.** Недостатки броневых элементов из гомогенных и гетерогенных стальных материалов, связанных с высокой эффективной толщиной защитного элемента и трудоемким процессом получения стального пакета соответственно, могут быть решены применением ориентированной ферритно-мартенситной стали. Приведенные данные указывают на более высокую сопротивляемость разрушению ввиду особого механизма распространения трещины, что является актуальным в развитии бронетехники. Это позволяет снизить общую массу боевого транспорта, связанного со снижением эффективной толщины защитных элементов при сохранении требуемого класса стойкости высокоскоростному ударному нагружению, что позволит повысить их мобильность и снизить расход топлива.

**Ключевые слова:** стальной композит, феррит, мартенсит, высокоскоростной удар, сопротивление разрушению, термическая обработка, обеспечение безопасности специальной техники.

**Для цитирования.** Пустовойт, В. Н. Структурная организация стали для обеспечения безопасности специальной техники / В. Н. Пустовойт, Ю. В. Долгачев, И. В. Иванков // Безопасность техногенных и природных систем. — 2023. — № 1. — С. 70–75. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-70-75>

## Structural Organization of Steel to Ensure Special Equipment Safety

Viktor N. Pustovoi<sup>ID</sup>, Yuri V. Dolgachev<sup>ID</sup>, Ivan V. Ivankov<sup>ID</sup>

Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ [fipm-dstu@mail.ru](mailto:fipm-dstu@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** At present, great success has been achieved in the field of creating effective protective materials. Various non-metallic, metal-ceramic, and also composite materials act as armor elements. However, most of the armor elements of vehicles and personal protective equipment (PPE) are steels that, along with high ballistic resistance, have a high mass. In this regard, the relevance of the article is related to the possibility of lightening typical protective elements when using a material that has a structural organization like a natural ferrite-martensite composite (NFMC). The work objective is to evaluate the prospects of using steel with an oriented structure as an effective protective material when exposed to high-speed concentrated impact of high power in comparison with the steel materials used.

**Materials and Methods.** The features and disadvantages of effective armor steels are revealed, a comparative analysis is carried out with steel oriented as NFMC. The assessment of 14G2 steel microstructure state with different hardening temperatures (730°C and 760°C) was carried out by the method of microstructural analysis. In relation to the topic of the study, the prospects for the use of low-carbon ferritic-martensitic steel were shown based on the laws of fracture mechanics and their comparison with the experimental data obtained on a sample of 14G2 steel with dimensions of 150×44×7 mm after testing for bullet resistance by cartridges with a steel core and armor-piercing cartridges with a tungsten core made of SVD rifles and AK-74 assault rifles of 7.62 mm and 5.45 mm caliber, respectively.

**Results.** The possibilities of resistance to fracture of steel with an oriented ferritic-martensitic structure are evaluated in comparison with typical homogeneous and heterogeneous steel materials. The resistance of such steel is related to the nature of the development of fracture, expressed in the deceleration of the crack during delamination at the ferrite-martensite boundaries. When a delamination is formed, a crack expends energy on delamination and changes its direction, which subsequently leads to a complete stop of the fracture process.

**Discussion and Conclusion.** The disadvantages of armor elements made of homogeneous and heterogeneous steel materials, associated with a high effective thickness of the protective element and the laborious process of obtaining a steel sandwich, respectively, can be solved by using oriented ferritic-martensitic steel. The data presented indicate a higher fracture resistance due to a special crack propagation mechanism, which is relevant in the development of armored vehicles. This makes it possible to reduce the total mass of combat vehicles associated with a decrease in the effective thickness of protective elements while maintaining the required class of resistance to high-speed impact loading, which will increase their mobility and reduce fuel consumption.

**Key words:** steel composite, ferrite, martensite, high-speed impact, fracture resistance, heat treatment, ensuring the safety of special equipment.

**For citation.** V. N. Pustovoi, Yu. V. Dolgachev, I. V. Ivankov. Structural Organization of Steel to Ensure Special Equipment Safety. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2023, no.1, pp. 70–75. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-70-75>

**Введение.** Характерной тенденцией развития военной техники является перманентное совершенствование защитных материалов. Так, вместо толстого листового проката, переходят к созданию многослойных металлических, а также неметаллических и металлокерамических композиций. При этом процесс создания эффективных защитных материалов преследует две цели — снижение массы защитного элемента и повышение его баллистической стойкости. Именно эти взаимоисключающие факторы позволяют повысить мобильность боевых транспортных систем и обеспечить безопасность от воздействия различных огнестрельных и осколочных видов поражений. Для одновременного достижения вышеуказанных целей предлагается использовать в качестве эффективного защитного материала сталь со структурой, организованной как естественный феррито-мартенситный композит (ЕФМК).

**Материалы и методы.** Развитие указанных выше материалов начиналось со стремления повысить сопротивление высокоскоростному удару большой мощности горячекатаных гомогенных стальных листов с различным содержанием углерода и разной степенью легированности. Так, в работе по получению

пустотой стального материала<sup>1</sup>, отражены преимущества легированной углеродистой стали состава, %: углерод — 0,44–0,48; кремний — 1,2–1,6; марганец — 0,3–0,6; хром — 1,3–1,7; никель — 1,4–1,8; молибден — 0,2–0,4; железо — остальное. Эта сталь после закалки и низкого отпуска имеет твердость порядка 55–57 HRC и при толщине пластины от 4,0 мм обеспечивает 3-ий класс защиты от стальной пули ПС калибра 7,62 мм (патрон 57-Н-231) автомата АКМ и пули ПС (патрон 7Н6) калибра 5,45 мм автомата АК-74. Такой материал обладает малой эффективной толщиной (на 8–9 % меньше, по сравнению с типовыми сталями), однако его разрушение происходит по механизму хрупкого разрушения (обычно происходит раскол бронепластины). Кроме того, производство такой стали требует тщательного контроля химического состава. Повышение вязкости и смены характера разрушения требует снижения твердости материала, однако, если твердость ниже 48 HRC, при испытании пулями с термоупрочненным сердечником происходит пробитие материала, хотя разрушение является вязким.

Для устранения этого недостатка были созданы двух- и более слойные стальные композиции. Они изготавливаются методами сварки взрывом, пакетной прокатки или наплавки [1, 2]. Основные принципы разработки двухслойных материалов сводятся к получению высокой твердости лицевого слоя (порядка 58–60 HRC) и высокой вязкости тыльного слоя с сохранением твердости не менее 50 HRC. Испытания двухслойных стальных композиций показали, что при стрельбе из винтовки СВД (калибр 7,62 мм, патрон 7-БЗ-3, бронебойная зажигательная пуля БЗ2) имеет место непробитие листов при толщинах 10,2–10,6 мм. Но при более высокой стойкости данных материалов эффективная толщина, по сравнению с гомогенными стальными бронепластинами, практически в 2–2,5 раза больше.

Применение трехслойных композиций с прослойкой из низкоуглеродистой стали [3] дает возможность снизить толщину бронелиста до 8,9 мм. Однако существенным недостатком является сложный технологический процесс получения многослойных броневых листов. Для надежного сцепления применяется трудоемкая сварка взрывом, горячая прокатка с обжатием до 70 %, а в некоторых случаях — комбинированный способ с последующей термообработкой.

В настоящей работе показаны преимущества защитного материала в виде стали со структурой, организованной как ЕФМК.

**Результаты исследования.** Известная технология получения ЕФМК<sup>2</sup> заключается в контролируемой прокатке в межкритическом интервале температур ( $A_1$ – $A_3$ ) сталей с концентрацией углерода 0,1–0,2 % для ориентирования в направлении прокатки ферритной и аустенитной фазы при степени обжатия не менее 30 % и последующей закалке. Однако прокатка в данном интервале температур является достаточно трудоемкой, так как требует наличия мощного прокатного оборудования. Кроме того, при низкой степени обжатия не удастся получить строгой ориентации феррито-мартенситной структуры.

В то же время получение феррито-мартенситного композита возможно менее трудоемким способом. Строгая ориентировка структуры может быть получена применением следующего технологического режима<sup>3</sup>: горячая прокатка с обжатием не менее 70 % с последующим подстуживанием до межкритического интервала температур ( $A_{C1}$ – $A_{C3}$ ), выдержке в этом интервале для рафинирования фазы, закалка с последующим низким отпуском. Такая обработка не требует мощного прокатного оборудования и может осуществляться в обычном прокатном цехе. При этом необходимо контролировать содержание серы на верхнем уровне марочного состава (0,04–0,05 %) для образования достаточного количества сульфидов (Fe, Mn)S, которые при прокатке вытягиваются в тонкие пластины (рис. 1 а) и являются подложками, на которых образуется избыточный феррит (рис. 1 б), образуя вытянутые вдоль направления прокатки пластинчатые образования. Также ориентировано располагается и перлитная структурная составляющая (рис. 1 в).

<sup>1</sup> Камаев Е. А., Сахаров С. А. Высокопрочная броневая листовая сталь: патент 2185459 С1 Рос. Федерация: С22С 38/44 / № 2001124667/02 ; заявл. 03.09.01 ; опубл. 20.07.02 "

<sup>2</sup> Термическая и термомеханическая обработка стали и чугуна / А. В. Супов [и др.] // Металловедение и термическая обработка стали и чугуна. Справочник. М : Интермет Инжиниринг, 2007. Т. 3. 919 с

<sup>3</sup> Способ получения естественного ферритно-мартенситного композита: патент № 2495141 Рос. Федерация : С21D 8/00, С21D 8/02 / В. Н. Пустовойт [и др.]. № 2012119557/02 ; заявл. 11.05.12 ; опубл. 10.10.13. Бюл. № 28. 7 с

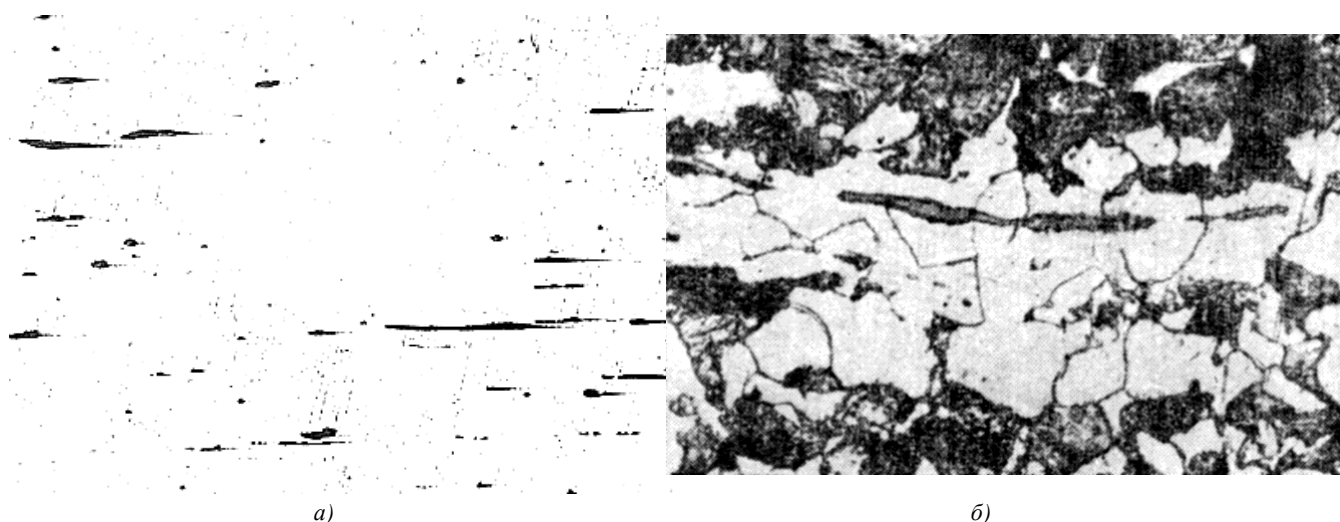


Рис. 1. Сталь 14Г2 со структурой ферритно-мартенситного композита: *а* — вытянутые вдоль направления прокатки сульфиды,  $\times 100$ ; *б* — зарождение феррита на сульфидной подложке,  $\times 300$

Варьируя температурой закалки из межкритического интервала, можно получить различные соотношения объемных долей феррита и мартенсита<sup>4</sup>, а также разную концентрацию углерода в мартенсите и, следовательно, разную твердость мартенситных пластин. В результате такого процесса получается ориентированная феррито-мартенситная структура, обеспечивающая анизотропию свойств материала (рис. 2).



Рис. 2. Сталь 14Г2 со структурой ЕФМК после закалки от 780 °С (29 % мартенсита),  $\times 360$

Теоретические расчеты [4] показывают, что слоистость (искусственная или естественная) повышает вязкость разрушения материала и уменьшает скорость распространения трещины.

Для структуры ЕФМК необходимо отметить, что мартенситные слои в ферритной матрице имеют конечную длину (дискретные волокна) и некоторую разориентировку слоев феррита и мартенсита. В таком случае, как отмечено в работе [5], высокое сопротивление разрушению обеспечивается при объемной доле упрочняющей фазы  $\sim 20\text{--}25\%$ , определенной длине волокон из упрочняющей фазы (мартенсит) больше некоторой критической величины ( $l_{кр} \geq 80$  мкм), а также разориентировке ферритных и мартенситных слоев не более 15.

Результаты испытаний [6] стальных пластин со структурой ЕФМК (размеры 150×44×7 мм) патронами со стальным сердечником и бронебойными с вольфрамовым сердечником из винтовки СВД и автомата АК–74 калибра 7,62 мм и 5,45 мм показали, что образец с малой толщиной ферритной прослойки и мартенситом с низким содержанием углерода (закалка от 760 °С) практически всегда разрушался. В то же время образец с большей толщиной ферритной прослойки и более высокоуглеродистым мартенситом (закалка от 730 °С) показал высокую баллистическую стойкость (рис. 2). Данный образец не разрушался после отстрела

<sup>4</sup> Лавриненко В. Ю., Посалина А. Е. Исследование влияния предварительной термической обработки на получение двухфазной ферритно-мартенситной структуры сталей 20 и 20Г2Р // Новые технологии в учебном процессе и производстве : мат-лы XX междунар. науч-тех. конф. Рязань, 2022. С. 111–115.

бронебойными пулями, происходило деформирование металла на 2–3 мм с рикошетированием снаряда, при этом на тыльной стороне образовывалась небольшая трещина.

Высокая баллистическая стойкость стали с такой структурой связана с особым механизмом развития разрушения в материале. Когда в процессе движения трещины она подходит к границе феррит-мартенсит, возникает расслоение в феррите (рис. 3), вследствие чего трещина меняет направление движения и затрачивает энергию на расслоение феррита. Последующее развитие разрушения приводит к изменению траектории трещины с расслоением по ферриту, остановкой движения трещины и релаксации напряжений в ее вершине.

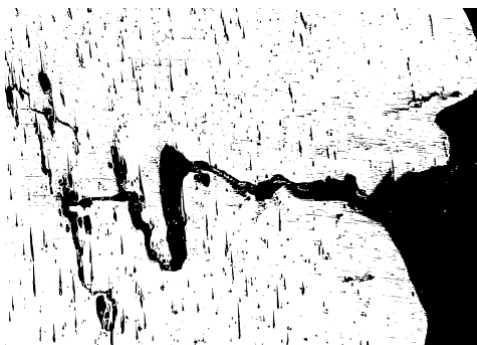


Рис. 3. Направление движения трещины в материале со структурой ЕФМК, имеющей вертикальную ориентацию слоев,  $\times 50$

Этот результат согласуется с данными работ [4, 7, 8], в которых указано, что в слоистом материале по поверхности раздела в процессе разрушения могут образовываться несплошности, переводящие трещину в менее выгодное для ее распространения положение и приводящие к торможению разрушения.

**Обсуждение и заключения.** Таким образом, результаты испытаний показывают, что применение стали со структурой ЕФМК обеспечивает высокий уровень баллистической стойкости при меньшей эффективной толщине и трудоемкости изготовления данного материала. Это указывает на ее преимущества по сравнению с однородными сталями и многослойными стальными композициями. Особый способ торможения разрушения при высокоскоростном локальном воздействии большой мощности обеспечивает более высокий порог живучести защиты, а снижение эффективной толщины способствует повышению мобильности боевого транспорта и личного состава за счет снижения общей массы защиты.

#### Список литературы

1. Перспективные стали для защиты специальной техники / В. В. Цуканов, А. Б. Милейковский, О. Э. Нигматулин, С. А. Савичев // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. — 2018. — № 1–2 (115–116). — С. 86–94.
2. Гладышев, С. А. Броневые стали / С. А. Гладышев, В. А. Григорян. — Москва : Интермет Инжиниринг, 2010. — 334 с.
3. Шишкин, Т. А. Комбинированный метод изготовления бронестали / Т. А. Шишкин, Л. Б. Первухин // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2020. — № 11(246). — С. 53–57.
4. Krausz, A. S. Fracture Kinetics of Crack Growth / A. S. Krausz. — Springer Netherlands, 2011. — 196 p.
5. Wood, W. A. The Study of Metal Structures and Their Mechanical Properties / W. A. Wood. — Elsevier Science, 2014. — 400 p.
6. Пустовойт, В. Н. Баллистическая стойкость стали со структурой естественного феррито-мартенситного композита / В. Н. Пустовойт, Ю. В. Долгачев, Ю. М. Домбровский // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 3. — С. 54–59. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-54-59>
7. Пустовойт, В. Н. Сценарий роста трещины в стали со структурой ферритно-мартенситного композита / В. Н. Пустовойт, В. В. Дука, Ю. В. Долгачев // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2017. — № 10 (205). — С. 118–121.
8. Structural Organization and Properties of a Natural Ferrite-Martensite Steel Composite / V. N. Pustovoit, Y. U. Dolgachev, Y. M. Dombrovskii, V. V. Duka // Metal Science and Heat Treatment. — 2020. — No. 62 (5-6). — P. 369-375. [10.1007/s11041-020-00570-9](https://doi.org/10.1007/s11041-020-00570-9)

Поступила в редакцию 09.01.2023

Поступила после рецензирования 16.01.2023

Принята к публикации 16.01.2023

*Об авторах:*

**Пустовойт Виктор Николаевич**, профессор кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета, (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, [ORCID](#), [fipm-dstu@mail.ru](mailto:fipm-dstu@mail.ru)

**Долгачев Юрий Вячеславович**, доцент кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета, (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, [ORCID](#), [yridol@mail.ru](mailto:yridol@mail.ru)

**Иванков Иван Вениаминович**, магистрант кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета, (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), магистрант, [ORCID](#), [yanya.ivankov.99@gmail.com](mailto:yanya.ivankov.99@gmail.com)

*Заявленный вклад авторов:*

В. Н. Пустовойт — формирование основной концепции, цели и задач исследования, научное руководство, подготовка текста, формирование выводов; Ю. В. Долгачев — проведение испытаний, обработка, анализ и обсуждение результатов исследования; И. В. Иванков — подготовка образцов для проведения металлографического анализа, доработка текста.

*Конфликт интересов*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*