

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ БРОНЕВОГО СИТАЛЛА В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

В. М. Медунецкий^{1*}, Ю. Ю. Меркулов², С. В. Солк³, Б. Н. Добряков⁴

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² НПО Спецматериалов, Ленинградская область, Сосновый бор, Россия

³ НИИ ОЭП, Ленинградская область, Сосновый бор, Россия

⁴ НИИ телевидения, Санкт-Петербург, Россия

* vm57med@yandex.ru

Аннотация. Показана возможность изготовления зеркальных оптических элементов и элементов конструкции из нового материала — бронеситалла. Использование бронеситалла обеспечивает защиту оптико-электронных приборов от механических повреждений высокоскоростными объектами. Рассмотрена технология получения бронеситалла и проведены эксперименты. Сделаны выводы о возможности совершенствования технологии с целью получения бронеситалла, прозрачного в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра.

Ключевые слова: оптическая керамика, бронеситалл, оптический элемент, оптическая поверхность, прозрачная броня

Ссылка для цитирования: Медунецкий В. М., Меркулов Ю. Ю., Солк С. В., Добряков Б. Н. Технологическая возможность применения броневое ситалла в приборостроении // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 6. С. 542–546. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-542-546.

TECHNOLOGICAL POSSIBILITY OF USING ARMORED GLASS CERAMICS IN INSTRUMENT ENGINEERING

V. M. Medunetskii^{1*}, Yu. Yu. Merkulov², S. V. Solk³, B. N. Dobryakov⁴

¹ ITMO University, St. Petersburg, Russia

² JSC Scientific and Production Association of Special Materials, St. Petersburg, Russia

³ JSC Research Institute of Optical-Electronic Instrumentation, Sosnovy Bor, Leningrad Region, Russia

⁴ JSC Television Scientific Research Institute, St. Petersburg, Russia

* vm57med@yandex.ru

Abstract. The possibility of manufacturing mirror optical elements and structural elements from a new material - armored glass ceramics - is shown. The use of armored glass ceramics ensures protection of optical-electronic devices from mechanical damage by high-speed objects. The technology for producing armored glass ceramics is considered and experiments are carried out. Conclusions are drawn about the possibility of improving technology in order to obtain armored glass ceramics that is transparent in the visible and near-infrared spectral ranges.

Keywords: optical ceramics, glassceramics, optical element, optical surface, transparent armor

For citation: Medunetskii V. M., Merkulov Yu. Yu., Solk S. V., Dobryakov B. N. Technological possibility of using armored glass ceramics in instrument engineering. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 6. P. 542–546 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-542-546.

В настоящее время все более актуальной становится задача защиты различных систем, в том числе оптико-электронных приборов (ОЭП), от механических повреждений высокоскоростными объектами. По нашему мнению, это вызвано:

1) необходимостью защиты приборов военного назначения от пуль и осколков в боевой обстановке [1];

2) увеличением числа космических аппаратов и количества космического мусора, обуславливающим рост вероятности их столкновения [2]. Также существует вероятность повреждения космических аппаратов метеороидами [3];

3) ростом террористической опасности [4] и, как следствие, необходимостью защиты все большего количества приборов, расположенных в общественных местах, например, камер видеонаблюдения.

Следует отметить, что на сегодняшний день накоплен большой опыт создания материалов и структур легкой бронезащиты, предназначенных для защиты от высокоскоростных пуль и осколков с поверхностной плотностью, не превышающей $50\text{--}80\text{ кг/м}^2$ [5]. Непрозрачные материалы могут использоваться для изготовления конструкций, которые предназначены для защиты механических и электронных компонентов приборов, прозрачные — для защиты непосредственно оптических элементов [6].

Все многообразие броневых структур можно разделить на следующие группы [5]:

1) текстильная броня (из тканей типа кевлар, тварон, дайнема и т.п.);
2) металлическая броня (сталь, алюминий, титан и различные сплавы);
3) керамическая броня (корунд, карбид бора, карбид кремния и др.);
4) органопластиковая броня (композитная броня на основе арамидных тканей или сверхвысокомодульного полиэтилена);

5) комбинированная многослойная броня (металлотекстильная, керамико-органопластиковая и др.);

6) прозрачная броня.

В настоящее время для защиты от высокотвердых поражающих элементов современных боеприпасов наиболее широко используется комбинированная броня. Но этот вид баллистической защиты технологически сложен и имеет высокую себестоимость. Защитные свойства текстильной брони недостаточны, они значительно ухудшаются в условиях повышенной влажности. Металлическая броня имеет большую массу. Баллистические свойства органопластиковой брони значительно зависят от влажности и температуры окружающей среды.

Наиболее перспективной считается керамическая броня [7]. Однако на сегодняшний день броневая керамика имеет либо невысокую стоимость и высокую плотность (корундовая керамика), либо невысокую плотность и высокую себестоимость (керамика из карбида бора) при сравнимых баллистических характеристиках [8, 9].

В работе [10] описана технология создания нового конструкционного материала на основе броневых ситалла (высокопрочной стеклокерамики). Слово „ситалл“ — производное от „стекло-кристалл“, оно появилось в 1960-х гг. в СССР, во времена так называемого „стеклокерамического бума“.

В отличие от разработанных ранее бронекерамик [11, 12] был выбран вариант стеклокерамики (бронеситалла) алюмосиликатлитиевой системы $\text{Li}_2\text{O}\text{--}\text{Al}_2\text{O}_3\text{--}\text{SiO}_2$. Выбор основан на следующих технико-экономических преимуществах:

1) стоимость исходного сырья (в зависимости от масштабов производства) — 25–30 долларов США за 1 кг стекломассы (соизмеримо со стоимостью сырья для производства 1 кг бронекерамики на основе Al_2O_3 . Все остальные широко применяемые (карбид кремния и карбид бора) значительно (в 4–15 раз) дороже;

2) технологический процесс производства бронеситалла разработан для реализации в одну рабочую смену (8 ч);

3) плотность бронеситалла ($2,56\text{ г/см}^3$) практически равна плотности карбида бора ($2,54\text{ г/см}^3$) и значительно меньше плотности карбида кремния ($3,15\text{ г/см}^3$) и корунда ($3,95\text{ г/см}^3$);

4) варка исходной стекломассы производится при средних температурах (1200–1300 °С);
 5) процесс производства изделий из бронеситалла аналогичен процессу производства обычного стекла (за исключением последней фазы — управляемой кристаллизации) и проще поддается автоматизации (в отличие от керамических технологий, где много ручного труда).

Технология производства бронеситалла включает следующие операции: смешивание шихты, варка стекла, формование, отжиг и кристаллизация изделий. Ситалловая шихта, в отличие от обычной стекольной, дополнительно содержит катализатор кристаллизации.

При апробации процесса варка стекла осуществлялась в воздушной атмосфере муфельной печи в тигле из керсила при температуре 1300 °С. Формование (выработка) стекла производилась при температуре 1000 °С в подогретые до 400 °С стальные формы. Отжиг осуществлялся при температуре 400 °С. Кристаллизация проводилась в два этапа при температуре 500 и 700 °С с выдержкой от 60 до 180 мин (для обеспечения образования максимального числа центров кристаллизации, необходимой степени закристаллизованности и заданного фазового состава).

Плотность полученного бронеситалла составила 2,56 г/см³. Значение плотности определялось гидростатическим взвешиванием. Баллистические испытания показали, что бронеситалл можно использовать в качестве фронтального слоя в защитных структурах класса Бр 4 с поверхностной плотностью около 35 кг/м².



Рис. 1

Был проведен ряд экспериментов по исследованию возможности использования бронеситалла для изготовления зеркал. Формообразование рабочих поверхностей осуществлялось по традиционной в оптическом приборостроении технологии: шлифование связанным инструментом, шлифование свободным абразивом и полирование. На заготовках размером 50 × 50 мм была получена плоская поверхность со следующими характеристиками: $Rq = 20 \text{ \AA}$, $N = 0,5\Delta N = 0,2$. На рис. 1 приведена фотография изготовленного экспериментального образца.

Эксперименты показали, что бронеситалл может быть использован также при изготовлении зеркал со сферическими и асферическими поверхностями. Это позволяет изготавливать составные зеркала с „сотовой“ структурой. Такое зеркало при попадании в него высокоскоростного объекта защищает остальные элементы конструкции. При повреждении, вызывающем неприемлемое ухудшение качества изображения, один или несколько сегментов могут быть удалены, для чего необходимо предусмотреть специальные механизмы.



Рис. 2

Бронеситалл также может быть использован для создания защитных корпусов ОЭП, которые будут защищать механические и электронные элементы конструкции. На рис. 2 показана экспериментальная конструкция в виде кольца из бронеситалла, полученная литьем в форму. Более сложная конструкция (с выборками, отверстиями и другими элементами конструкции) может быть получена путем дополнительной обработки заготовки инструментом для механической обработки оптических стекол [13].

В работе [14] приводится информация о достижениях иностранных специалистов в изготовлении стеклокерамики, в том числе прозрачной в видимом спектральном диапазоне, для использования ее в качестве брони. Проведенный анализ показал, что возможно совершенствование техно-

логии изготовления бронеситалла, которая позволит получить кристаллическую структуру с размерами кристаллов 0,05–0,1 мкм. Это позволит сделать бронеситалл прозрачным в видимом и ближнем ИК-диапазонах. Таким образом, имеется возможность изготавливать из бронеситалла не только зеркальные, но и линзовые оптические элементы.

Таким образом, по работе можно сделать следующие выводы:

- 1) экспериментально доказана принципиальная возможность изготовления зеркальных оптических элементов и защитных элементов конструкции из бронеситалла;
- 2) имеется возможность получить бронеситалл, прозрачный в видимом и ближнем ИК-диапазонах, при наличии соответствующей технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филатова А. О., Бородай В. В., Сильников Н. М., Борисов Д. В. Физические свойства и сравнительные характеристики прозрачной брони // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 09–10(123–124). С. 162–167.
2. Merkulov Yu. Yu., Solk S. V., Lebedev O. A. Protection of orbital station optics against high — speed damaging elements // Acta Astronautica. 2017. Vol. 135. P. 21–25.
3. Adushkin V., Kozlov S., Veniaminov S., Doronin A., Silnikov M. Natural and technogeneous contamination of near-Earth space // Acta Astronautica. 2017. Vol. 135. P. 6–9.
4. Ивановский В. С., Макаренко Н. Г., Яковлев Ю. С. Прозрачная броня в изделиях военной техники // Изв. Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2021. № 1(116). С. 133–138.
5. Кобылкин И. Ф., Селиванов В. В. Материалы и структуры легкой бронезащиты. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 161 с.
6. Солк С. В., Меркулов Ю. Ю., Лебедев О. А. Проблемы защиты оптико-электронных приборов от высокоскоростных поражающих элементов // Сб. тр. Междунар. конф. „Прикладная оптика–2016“. СПб, 2016. Т. 2. С. 144–148.
7. Сильников Н. М., Юрченко Н. М., Михайлин А. И., Гук И. В. Баллистические испытания органокерамических панелей на основе керамики „идеал“ // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2022. № 7–8(169–170). С. 156–166.
8. Hazell P. O. Advances in Ceramic Armour // Military Technology. 2009. Vol. 33, N 4. P. 118–126.
9. Беспалов И., Григорян В., Карпов А. Керамическая броня // Новости ВПК. 2012. № 26(443) [Электронный ресурс]: <<http://vpk-news.ru/articles/9011>>.
10. Меркулов Ю. Ю., Михайлин А. И., Сильников Н. М. Баллистическая стойкость броневого ситалла системы $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2022. № 7–8(177–178). С. 126–138.
11. Пат. РФ № 2176624. Стеклокерамика, способ ее получения и защитная конструкция на ее основе / Ю. Ю. Меркулов. 2001. Бюл. 34.
12. Пат. РФ № 2294517. Композиционный материал и способ изготовления композиционного материала (варианты) / Ю. Ю. Меркулов. 2007. Бюл. 6.
13. Справочник технолога-оптика / Под ред. М. А. Окатова. СПб: Политехника, 2004. 679 с.
14. Gallo L. S. A., Villas Boas M. O. C., Rodrigues A. C. M., Zantotto E. D., Melo F. C. L. Transparent glass-ceramics for ballistic protection: materials and challenges // Journal of Material Research and Technology. 2019. Vol. 8, N 3. P. 3357–3372.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Виктор Михайлович Медунецкий** — докт. техн. наук; Университет ИТМО; профессор;
E-mail: vm57med@yandex.ru
- Юрий Юрьевич Меркулов** — канд. техн. наук; НПО Спецматериалов; науч. сотр.;
E-mail: melas33@yandex.ru
- Сергей Вольдемарович Солк** — докт. техн. наук; НИИ ОЭП; зам. начальника отдела; E-mail: solk@sbor.net
- Борис Николаевич Добряков** — НИИ телевидения; инженер-технолог; E-mail: progsnob92@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.09.2023; одобрена после рецензирования 31.03.2024; принята к публикации 16.04.2024.

REFERENCES

1. Filatova A. O., Boroday V. V., Silnikov N. M., Borisov D. V. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskiye sredstva protivodeystviya terrorizmu* (Issues of Defense Technology. Series 16. Technical Means of Countering Terrorism), 2018, no. 09–10(123–124), pp. 162–167. (in Russ.)
2. Merkulov Yu. Yu., Solk S. V., Lebedev O. A. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 135, pp. 21–25.
3. Adushkin V., Kozlov S., Veniaminov S., Doronin A., Silnikov M. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 135, pp. 6–9.
4. Ivanovsky V. S., Makarenko N. G., Yakovlev Yu. S. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk* (News of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences), 2021, no. 1(116), pp. 133–138. (in Russ.)
5. Kobylkin I. F., Selivanov V. V. *Materialy i struktury legkoy bronezashchity* (Materials and Structures of Light Armor Protection), Moscow, 2014, 161 p. (in Russ.)
6. Salk S. V., Merkulov Yu. Yu., Lebedev O. A. *Prikladnaya optika–2016* (Applied Optics-2016), Proceedings of the International Conference, St. Petersburg, 2016, vol. 2, pp. 144–148. (in Russ.)
7. Silnikov N. M., Yurchenko N. M., Mikhailin A. I., Guk I. V. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskiye sredstva protivodeystviya terrorizmu* (Issues of Defense Technology. Series 16. Technical Means of Countering Terrorism), 2022, no. 7–8(169–170), pp. 156–166. (in Russ.)
8. Hazell P. O. *Military Technology*, 2009, no. 4(33), pp. 118–126.
9. <http://vpk-news.ru/articles/9011>. (in Russ.)
10. Merkulov Yu. Yu., Mikhailin A. I., Silnikov N. M. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskiye sredstva protivodeystviya terrorizmu* (Issues of Defense Technology. Series 16. Technical Means of Countering Terrorism), 2022, no. 7–8(177–178), pp. 126–138. (in Russ.)
11. Patent RU 2176624, *Steklokeramika, sposob yeye polucheniya i zashchitnaya konstruktsiya na yeye osnove* (Glass Ceramics, Method of Its Production and Protective Structure Based on It), Yu.Yu. Merkulov, Published 2001, Bulletin 34. (in Russ.)
12. Patent RU 2294517, *Kompozitsionnyy material i sposob izgotovleniya kompozitsionnogo materiala (varianty)* (Composite Material and Method of Manufacturing Composite Material (Options)), Yu.Yu. Merkulov, Published 2007, Bulletin 6. (in Russ.)
13. Okatov M. A., ed., *Spravochnik tekhnologa-optika* (Optical Technologist's Handbook), St. Petersburg, 2004, 679 p. (in Russ.)
14. Gallo I. S. A., Villas Boas M. O. C., Rodrigues A. C. M., Zanotto E. D., Melo F. C. L. *Journal of Material Research and Technology*, 2019, no. 3(8), pp. 3357–3372.

DATA ON AUTHORS

Viktor M. Medunetskiy	—	Dr. Sci.; ITMO University; Professor; E-mail: vm57med@yandex.ru
Yurii Yu. Merkulov	—	PhD; Scientific and Production Association of Special Materials; Researcher; E-mail: melas33@yandex.ru
Sergei V. Solk		Dr. Sci.; Research Institute of Optical-Electronic Instrumentation, Deputy Head of Department; E-mail: solk@sbor.net
Boris N. Dobryakov		Television Scientific Research Institute; process engineer; E-mail: progsnob92@yandex.ru

Received 17.09.2023; approved after reviewing 31.03.2024; accepted for publication 16.04.2024