

УДК: 698.3

DOI: 10.53816/23061456_2021_9–10_155

ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТ КАК МАТЕРИАЛ ДЛЯ СВЕТОПРОЗРАЧНЫХ БРОНЕКОНСТРУКЦИЙ

POLYMETHYL METHACRYLATE AS A MATERIAL FOR TRANSPARENT ARMORED STRUCTURES

С.Н. Васильева, канд. техн. наук И.В. Гук, канд. техн. наук Н.М. Сильников, Н.М. Юрченко

S.N. Vasilieva, Ph.D. I.V. Guk, Ph.D. N.M. Silnikov, N.M. Yurchenko

АО «НПО Спецматериалов»

Полиметилметакрилат (оргстекло, акриловое стекло) — один из наиболее активно используемых материалов для создания светопропускающих поверхностей в архитектуре, авиа- и судостроении. Получить широкое распространение ему удалось за счет своих уникальных механических свойств, обеспечивающих долговечность использования, а также пожаробезопасность проектируемых конструкций. В настоящее время полиметилметакрилат активно применяется для защиты от удара, осколков и пуль стрелкового оружия. В данной статье представлен обзор особенностей взаимодействия высокоскоростных ударников и полиметилметакрилата на основе информации, полученной с открытых источников.

Ключевые слова: полиметилметакрилат, ударник, пуля, проникание, разрушение.

Polymethylmethacrylate is one of the most widely used materials for creating transparent surfaces in architecture. It managed to get widespread due to its unique mechanical properties, which ensure durability of use, as well as fire safety of the designed structures. Currently, polymethyl methacrylate is actively used to protect against impact, shrapnel and small arms bullets. This article provides an overview of the features of the interaction of high-speed projectiles and polymethyl methacrylate based on information obtained from open sources.

Keywords: polymethylmethacrylate, plexiglass, bullet, penetration, fracture.

Введение

В последнее время при изготовлении широкого класса строительных конструкций активно используются и внедряются материалы, изготовленные из различных пластмасс. Достаточно широкое применение получили светопрозрачные конструкции с использованием полиметилметакрилата (ПММА) [1]. ПММА применяется вместо стёкол не только в строительстве, но также в авиационном, судостроении и медицине за счет своих механических свойств [2–4]:

- способности выдерживать высокие и низкие температуры — некоторые виды ПММА имеют рабочий диапазон температур от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуру воспламенения $460\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- хорошей светопрозрачности — пропускают до 92 % видимого света;
- устойчивости к растрескиванию, царапинам (при нанесении соответствующих покрытий), а также атмосферным воздействиям;
- способности во время высоких скоростей деформаций претерпевать переход от хрупкого к пластическому состоянию [5]. Это означа-

ет, что при взаимодействии высокоскоростного ударника со слоями ПММА последнее будет не просто трескаться и фрагментироваться, как обычное стекло, но и изменять траекторию движения ударника, за счет пластических деформаций в области контакта.

Это свойство позволило ПММА получить широкое распространение также при производстве светопрозрачных броневых конструкций.

Следует отметить, что при производстве конструкций из данного материала, его редко используют без добавок или наполнителей, так как в «чистом виде» стёкла из ПММА подвержены растрескиванию и склонны к появлению на них царапин. Вид добавок и наполнителей зависит от желания производителя или заказчика добавить различные свойства к ПММА: акрилатные сополимеры добавляют для повышения стабильности полимера во время обработки; бутилакрилат или соединения метакриловой кислоты позволяют увеличить температуру стеклования полимера; пластификаторы добавляют для снижения температуры стеклования или улучшения ударных свойств [6]. Однако не только использование примесей и добавок позволяют улучшить свойства полиметилметакрилатных стекол. Например, в ВИАМ были созданы метод и технология улучшения свойств ПММА с помощью физической модификации — ориентации: вытяжка стекла при температуре выше температуры размягчения — в области высокоэластического состояния. Механические характеристики ПММА АО-120С, полученного подобным образом, при температуре +20 °С приведены в [7]: предел прочности при растяжении — 82 МПа; относительное удлинение при разрыве — 15,3 %; модуль Юнга — 2,9 ГПа. Ранее использовавшиеся стекла для остекления самолетов СО-95-А, согласно ГОСТ 10667-97 [8], имели значения приведенных ранее характеристик, равные 66 МПа, 3 %, 2,9 ГПа соответственно. Новая технология производства стекла позволила не только улучшить механические характеристики стекол из ПММА, но и увеличить верхний предел диапазона рабочих температур с +60 °С до +130 °С.

Проникание пуль в полиметилметакрилат

С целью изучения защитных свойств полиметилметакрилата следует рассмотреть осо-

бенности проникания ударников/пуль в ПММА и предельные скорости пробития композиций разной толщины.

В исследовании [4] подробно описано поведение ПММА при испытаниях методом LECEI (loading edge cracks by edge impact), который заключается в ударе о край пластины с двойным надрезом ударником диаметром 20 мм. При испытаниях ударник проникает в край пластины размерами 40×80×60 мм³ со скоростями от 50 до 100 м/с. Целью указанных испытаний является изучение способности ПММА останавливать распространение трещин при высокоскоростном ударном взаимодействии. По результатам испытаний (рис. 1), был сделан вывод, что при увеличении скорости удара, образуется большее количество осколков образца, хотя ожидалось, что общая энергия, сообщаемая ПММА, будет поглощаться либо в виде энергии упругой деформации, либо в виде энергии разрушения, также предполагалось что часть энергии будет рассеиваться в виде тепла. Данные результаты говорят о том, что хрупкость ПММА, увеличивающаяся пропорционально скорости деформации, преодолевает эффекты термического разупрочнения. Несмотря на это, при фрактографическом исследовании трещин отмечается, что при увеличении скорости удара температура, вызванная диссипацией энергии, увеличивалась настолько, что это приводило к локальному плавлению ПММА в точке контакта ударник-преграда.

В статье [5] проникание в ПММА исследовалось с помощью ударников с различной формой головной части (ФГЧ). Для данных целей были выбраны ударники с: оживальной ФГЧ, тупоконечной (в качестве ударника был использован цилиндр) ФГЧ, остроконечной ФГЧ. На рис. 2 показаны испытываемые образцы с соот-

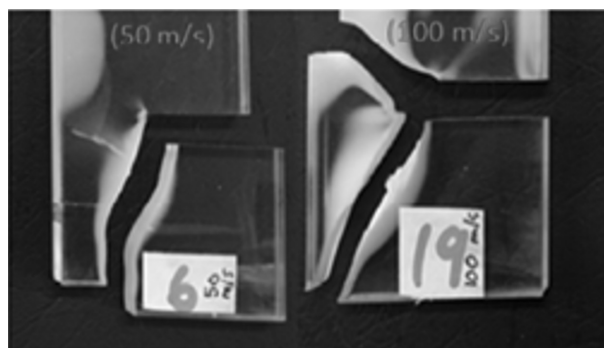


Рис. 1. Испытания LECEI [4]

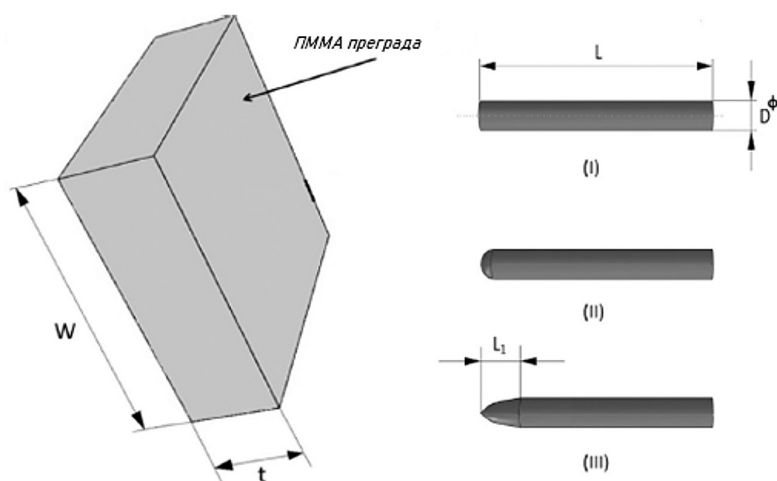


Рис. 2. Размеры преграды и ударников [5]: W — высота преграды; t — толщина преграды; L — длина ударника; L_1 — высота головной части ударника; D^ϕ — диаметр ударника

ветствующими геометрическими параметрами: толщина преграды из ПММА пластины 40 мм, высота 124 мм; для ударников диаметр составил 6 мм, длина ударника — 56 мм, длина оживальной части остроконечной пули составила 10 мм. Ударники с оживальной, остроконечной, цилиндрической формой головной части имели вес 12,4 г, 12,1 г, 11,4 г соответственно, а вес преграды составил 0,732 кг при плотности 1190 кг/м³.

При скоростях соударения 221 м/с, 221 м/с, 230 м/с для каждого из ударников, глубина про-

никания составила 8 мм, 10 мм, 19 мм соответственно. Процесс проникания ударников в пластину ПММА (без перфорации мишени) (рис. 3) в данной статье описывается как проходящий в три этапа:

Первый этап — это начальная стадия проникания головной части ударника, на протяжении которой преграда претерпевает пластические деформации. Пластичная область «окружает» головную часть ударника и в дальнейшем вызывает зарождение трещин;

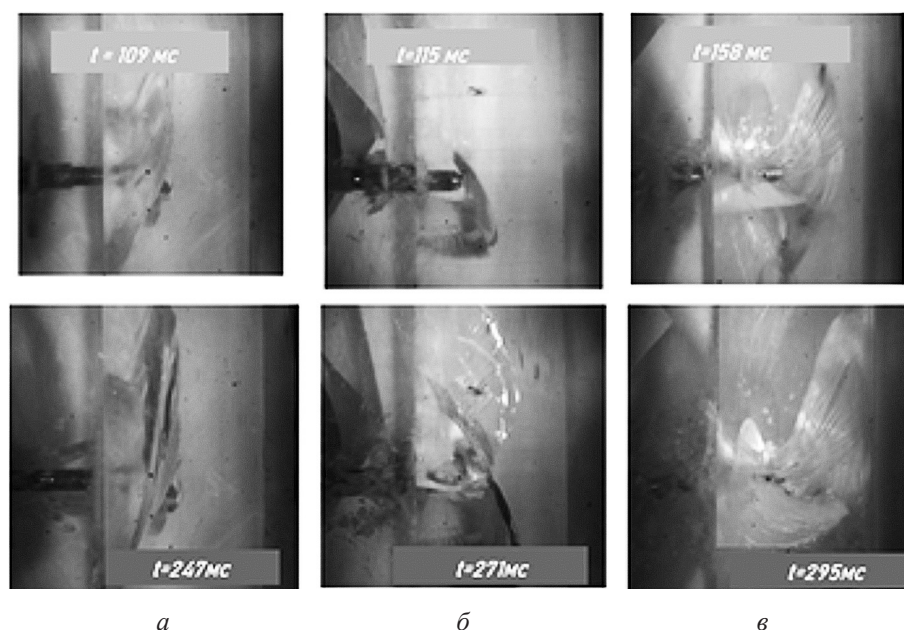


Рис. 3. Взаимодействие ударников и преграды из полиметилметакрилата [6] в определенные моменты времени от начала проникания: а — ударник с тупоконечной ФГЧ; б — ударник с оживальной ФГЧ; в — ударник с остроконечной ФГЧ

Второй этап — стадия проникания, когда ударник частично пробивает пластину и останавливается, достигая максимальной глубины проникания. Данный этап характеризуется развитием и ростом трещин, которые начинают распространяться как радиально, так и полусферически от траектории движения головной части ударника. Также при проникании ударника осколки ПММА отделяются от лицевой стороны преграды.

Третий этап — стадия, при которой ударник достигает максимальной глубины проникания и начинает двигаться назад. При достижении максимальной глубины проникания происходит упругий отскок ударника, однако трещины продолжают расти из-за волн напряжений в преграде.

Также в данной статье приведены фотографии преграды (рис. 4) после пробития ее ударниками с головной частью оживальной формы длиной 72 мм и скоростью 220 м/с.

В большинстве экспериментов, описанных в статье [6], полная перфорация пластины не достигалась, даже если радиально-распространяющиеся трещины вызвали ее раскалывание. Интересно то, что на конечном этапе проникания ударник всегда отскакивал вместо того,

чтобы остаться в материале пластины на месте полной потери скорости. Данное явление объясняется тем, что при проникании на границе ударник-преграда в материале происходит накопление энергии деформации, которая в результате преобразуется в кинетическую энергию, передаваемую ударнику.

В источнике [9] проводились испытания преград из ПММА производства Plastech Innovations толщиной 3 мм и 5 мм путем стрельбы по ним пулями калибра 5,5 мм и 4,5 мм длиной 840 мм с целью изучения образования трещин в материале. Достаточно хорошо описанные выше процессы проникания, позволяют не приводить в данной статье исследования образования трещин, описанные в статье [9], однако, не менее важными являются результаты, приведенные в источнике. Для удобства одни были сведены в табл. 1.

С целью выявления специфических особенностей ПММА проведены исследования [10–11], в которых выделяется свойство ПММА образовывать зоны свечения при высокоскоростных и ударных нагрузках. Подобная особенность наблюдается при скоростях проникания ударников 800–2000 м/с и при воздействии

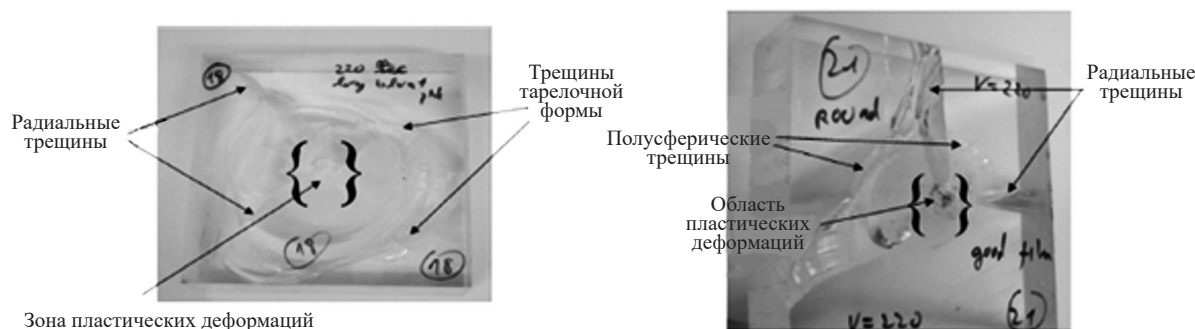


Рис. 4. Характеристика деформаций пластины после проникания в нее ударников длиной 72 мм с оживальной головной частью на скорости 220 м/с [6]

Таблица 1

Результаты экспериментов при стрельбе по ПММА [7]

| ПММА | Толщина | Калибр пули | Скорость | Диаметр отверстий | Результат |
|--|---------|-------------|-------------|-------------------|-------------|
| Произведено Plastech Innovations, Нью Дели – Индия | 3 мм | 5,5 мм | 230–240 м/с | 5,39 мм | Пробитие |
| | | 4,5 мм | | 4,80 мм | |
| | 5 мм | 5,5 мм | | 5,53 мм | Пробитие |
| | | 4,5 мм | | 5,71 мм | Не пробитие |

ударных волн на преграды из ПММА. В [10] особенность объясняется явлением отражения света при интенсивном трещинообразовании. Проведенное исследование также говорит о важной способности ПММА: кратерообразование при проникании высокоскоростного ударника возникает в результате хрупкого разрушения, образования трещин и выброса вещества в виде осколков. Кратерообразование в ПММА описывается понятием «лицевой откол». В отличие от тыльного откола, при котором обязательно образуется дискообразная тещина, а откольная пластина может и не вылететь, при лицевом отколе периферийные части вылетят обязательно, а центральная часть может остаться в виде выпучины. Это говорит о том, что при создании бронестекла из ПММА стоит учитывать методы крепления стекла в раме, для недопущения вторичного осколочного потока, с той же целью обеспечить подпор слою из ПММА более гибким материалом.

Следует отметить, что закрепление материала ПММА при проведении испытаний влияет на характер разрушения образца. В [12] исследуются характеристики ПММА с использованием пуансонов конической и сферической формы радиусом 3,175 мм. Рассматривается поведение материала размерами 152×152×50 мм³ при введении в него пуансонов. При проведении экспериментов авторы отметили, что при отсутствии внешних ограничений у блоков ПММА, наблюдается исключительно хрупкое разрушение материала, в то время как закреплённый материал демонстрирует поведение упругопластического типа. Данное исследование говорит о том, что во время проведения испытаний образцов стекла из полиметилметакрилата их необходимо крепить в соответствии с предполагаемым креплением в конструкции.

Явление рикошета при проникании в полиметилметакрилат

Достаточно широкому изучению подверглись не только процессы проникания в преграды из ПММА под прямым углом, но также и проникание в преграды расположенные под различными углами к вектору скорости ударника. Подобные исследования проводились с целью изучения явления рикошета.

Данное исследование изложено в статье [13], где с помощью численного моделирования в пакете программ ANSYS была исследована траектория проникания ударника диаметром 9,6 мм и длиной 35 мм, выполненного из стали 4340 с оболочкой из меди в полиметилметакрилат размерами 250×50×40 мм³. На рис. 5 показано численное моделирование проникания в преграду из ПММА ударника со скоростью 720 м/с и углом между вектором скорости и преградой 30°.

Как видно из рис. 5, при проникании ударника под углом большая часть мишени разрушается, за ней следуют большие трещины, сегментирование и, в результате, эжекция части преграды, находящейся над траекторией движения ударника в преграде. Результаты исследования [13] показали, что материал, при проникании в него ударника, разворачивает ударник в сторону лицевой части преграды.

Данное явление было подробно описано авторами статьи [14]. В своем исследовании они построили точную численную модель, которая была подтверждена результатами испытаний. В экспериментах производилась стрельба пулями калибра 7,62 мм массой от 3,5 г до 5,5 г с начальными скоростями 720 м/с – 800 м/с в преграды из ПММА различной толщины и под различными углами наклона к вектору скорости пули. На рис. 6 показаны рентгенографические снимки процесса проникания пули в преграду из полиметилметакрилата толщиной 20 мм, находящуюся под углом 30° к вектору скорости пули. Авторы статьи отмечают, что преграда, выполненная из поликарбоната той же толщины, не обеспечивает рикошета пули и полностью пробивается.

В качестве пояснения явления разворота оси ударника в сторону лицевой поверхности в полиметилметакрилате написано следующее (рис. 7): высокая прочность на сжатие позволяет ПММА оказывать большое асимметричное усилие на головную часть пули на первых этапах пробития, что в дальнейшем сильно отклоняет ее движение, а высокая хрупкость материала преграды позволяет обеспечить воздействие асимметричных сил при дальнейшем проникании. Воздействие асимметричных сил достигается тем, что материал вблизи входного отверстия разрушается из-за растяжения в результате волн напряжения, возникающих

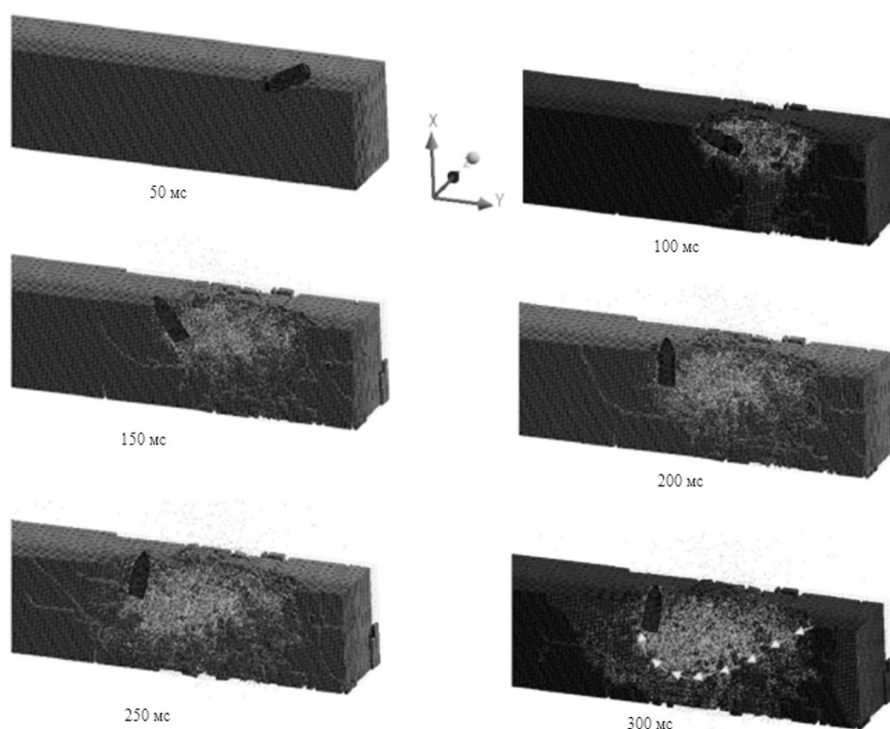


Рис. 5. Численное моделирование процесса проникания ударника в ПММА с углом между вектором скорости и плоскостью преграды 30° [13]

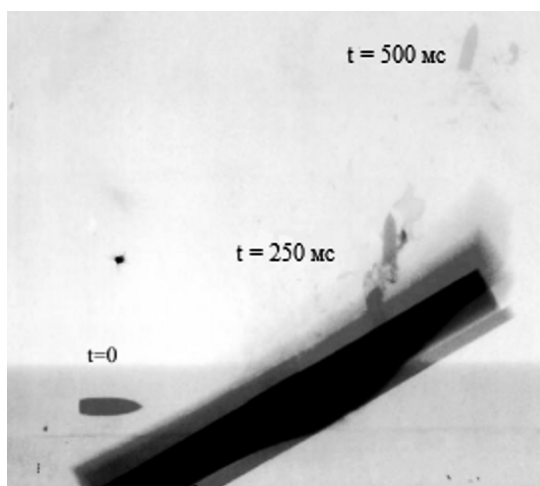


Рис. 6. Рикошет пули калибра 7,62 мм массой 3,5 г от пластины ПММА толщиной 20 мм [14]

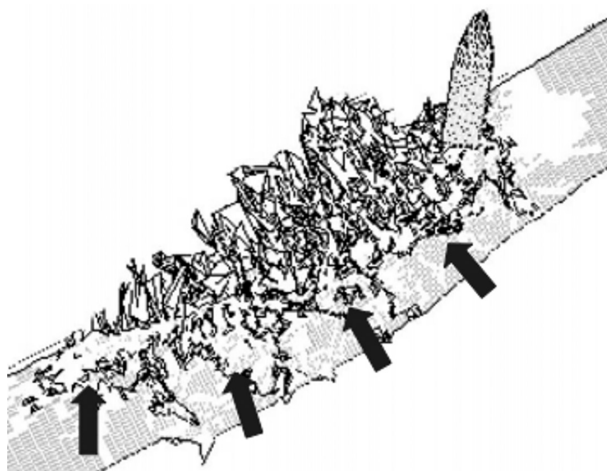


Рис. 7. Взаимодействие пули и пластины из ПММА [14]

на границе взаимодействия ударник-преграда в то время, как остальной материал в пластине остается нетронутым и непрерывно оказывает силовые воздействия на корпус пули, направляя вектор скорости её движения в сторону лицевой поверхности преграды.

Наиболее интересное исследование [15] — взаимодействие пули калибра 12,7 мм с тремя

преградами из ПММА различных размеров (размеры указаны на рис. 8) под углом 30° , со скоростью вхождения пули в пластину 928 м/с.

Так же, как и в предыдущих экспериментах, во время проникания пули в первую и вторую пластину наблюдается явление рикошета (от второй преграды), третья преграда претерпевает только хрупкие разрушения.

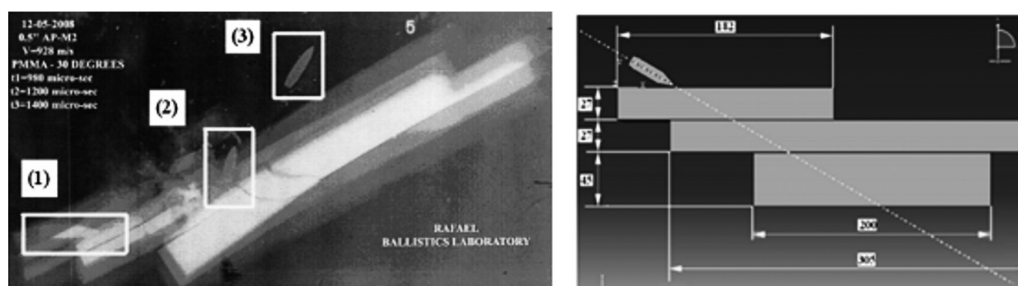


Рис. 8. Проникание пули калибра 12,7 мм в три пластины из ПММА [15]

Результаты экспериментов при стрельбе ударниками/пулями по преграде из полиметилметакрилата

Исследованию предельной скорости пробития ПММА различными видами ударников/пуль посвящено большое количество исследований, каждое из которых требует отдельного рассмо-

трения (постановки эксперимента, толщины образцов, угла подлета ударника/пули к преграде). В данном разделе статьи представлены наиболее содержательные эксперименты, результаты экспериментов сведены в табл. 2.

В статье [16] было проведено исследование проникания ударников в ПММА и поликарбонат (ПК) с целью изучения различий между ха-

Таблица 2

Сводные результаты проведенных экспериментов

| Характеристики ПММА | | | | Ударник / пуля | | | Угол, ° | Результат | | |
|---|----------|----------|---------------|--------------------|----------|----------|----------------------------------|---|---|-------------|
| ρ , кг/м ³ | a , мм | b , мм | c , мм | вид головной части | l , мм | d , мм | | | v , м/с | |
| 1190 | 124 | 40 | 56 | Оживальный | 6 | 6 | 142 | 90 | Не пробитие | |
| | | | | Остроконечный | | | 146 | | Не пробитие | |
| | | | | Оживальный | | | 221 | | Не пробитие | |
| | | | | Тупоконечный | | | 221 | | Не пробитие | |
| | | | Остроконечный | 72 | 6 | 230 | 90 | Не пробитие с растрескиванием материала до тыльной части пластины | | |
| | | | Тупоконечный | 72 | 6 | 220 | | Не пробитие с растрескиванием материала до тыльной части пластины | | |
| | | | Оживальный | 72 | 6 | 220 | | Не пробитие с растрескиванием материала до тыльной части пластины | | |
| ПММА производства Platesh Innovations, Нью Дели — Индия | | | 3 | Оживальный | | 5,5 | 230–240 м/с (начальная скорость) | 90 | Пробитие | |
| | | | | | | 4,5 | | | Пробитие | |
| | | | 5 | Оживальный | | 5,5 | | | 720–850 м/с (начальная скорость) | Пробитие |
| | | | | | | 4,5 | | | | Не пробитие |
| | 250 | 80 | 20 | | | 7,62 AP | 720–850 м/с (начальная скорость) | 30 | Рикошет | |
| | 250 | 50 | 80 | | | 7,62 AP | 720 | 30 | Рикошет | |
| | 182 | 80 | 27 | | | 12,7 | 720 | 30 | Рикошет, с не прониканием в третью пластину (хрупкое разрушение третьей пластины) | |
| | 305 | 80 | 27 | | | | | | | |
| | 200 | 80 | 45 | | | | | | | |

Примечание: ρ — плотность пластины; a — длина; b — ширина; c — толщина; l — длина ударника/пули; d — калибр/диаметр пули/ударника; v — скорость

рактором взаимодействия преграды и ударника, а также оценки возможности использования в качестве бронестекол двуслойных преград из ПММА и ПК. В связи с тем, что в данной статье интерес основан на применении ПММА в качестве преграды, то будут описаны подобные эксперименты. В качестве преграды в [16] был использован ПММА, выпущенный Cуго Industries под названием Acrylite FF, размерами $305 \times 305 \times 5,85$ мм³, ударные эксперименты проводились с использованием газовой пушки с диаметром ствола 25,4 мм с ударником из мартенситностареющей стали 350 с оживальной головной частью длиной 6,35 мм, сам ударник был 76,2 мм в длину и имел массу 104 г. Было выяснено, что ПММА разрушается при скорости удара примерно 15 м/с (рис. 9).

В исследовании [17] производились эксперименты с целью создания численной модели, которая будет точно описывать поведение ПММА во время высокоскоростного соударения. В качестве пороговой скорости для преграды из ПММА $100 \times 100 \times 10$ мм³ ударником диаметром 6 мм и длиной 20 мм представлена величина 70 м/с. Проведены испытания с использованием математической модели и натурные испытания, со скоростями ударника 70 м/с, 199 м/с, 383 м/с. Картина разрушения, полученная при использовании численного метода решения, совпала с полученной при проведении экспериментов (рис. 10).

Довольно интересные эксперименты были проведены в исследовании [18]. Преграда из ПММА размерами $102 \times 102 \times 3,175$ мм³ обстреливалась ударниками, в качестве которых использовались семнадцатигранные фрагменты

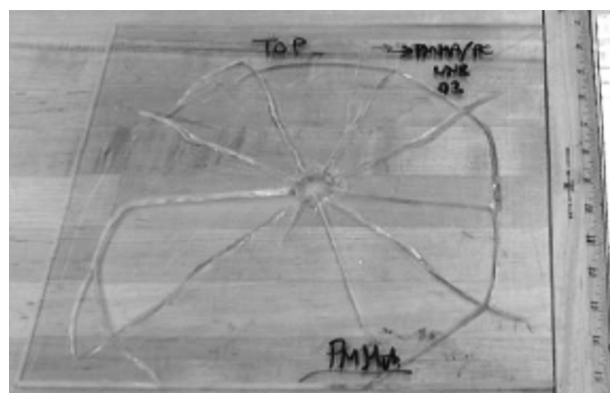


Рис. 9. Пробитие преграды ПММА ударником длиной оживальной головной части 6,35 мм [16]

массой 1,1 г пули $5,6 \times 15,6$ мм имитирующие осколки. Как и в предыдущем эксперименте, в качестве предельной скорости пробития была установлена величина от 70 м/с до 80 м/с. В преграду стреляли со скоростями 106,9 м/с, 397 м/с (рис. 11).

Авторы [19] исследования проводят изучение преград из ПММА и ПК, в которых, так же, как и в [18], в качестве ударника используют семнадцатигранные фрагменты $5,6 \times 15,6$ мм при стрельбе по преграде из ПММА толщинами 6, 12, 18 мм. В каждом из произведенных выстрелов, указанных на рис. 12, преграда пробивалась. Вместо предельной скорости пробития исследовалось количество энергии, затрачиваемое имитатором осколка на пробитие преграды (баллистическая энергия):

$$E = \frac{1}{2} M (V_s^2 - V_r^2),$$

где V_s — скорость соударения, м/с; V_r — скорость после вылета из преграды, м/с; M — масса ударника, кг.

При анализе результатов исследований [16–19] по снимкам (рис. 10–12) можно сделать вывод: с увеличением скорости ударника уменьшается объём хрупких разрушений в пластинах, — это следует из количества трещин, образовавшихся вокруг отверстий входа ударника.

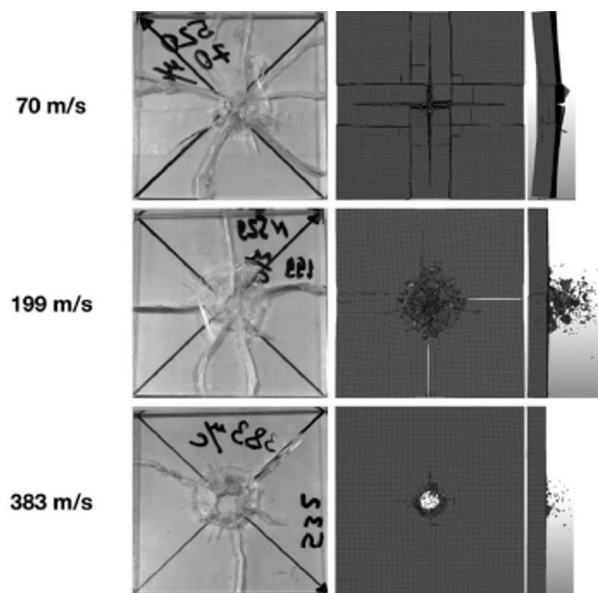


Рис. 10. Пробитие преграды из ПММА толщиной 10 мм ударником диаметром 6 мм [17]

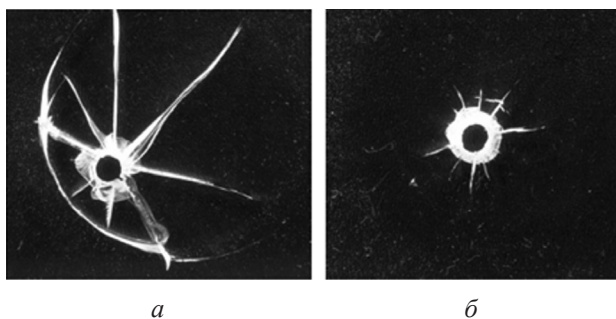


Рис. 11. Пробитие преграды из ПММА толщиной 3,175 мм ударником со скоростями: а — 106 м/с; б — 397 м/с [18]

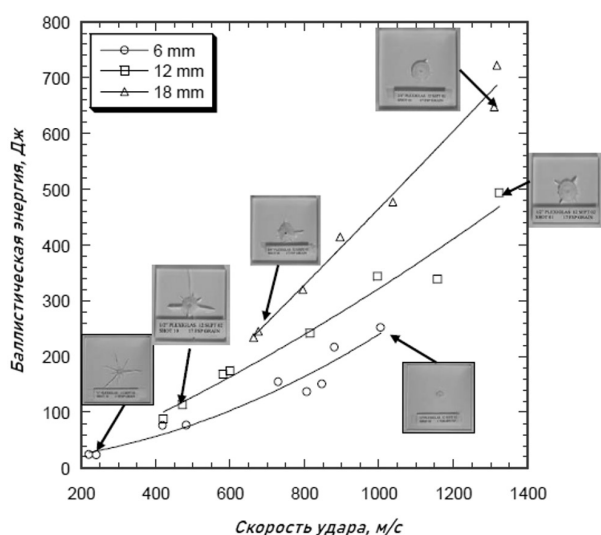


Рис. 12. Зависимость баллистической энергии от скорости удара при пробитии ПММА толщиной 6, 12, 18 мм [19]

Описанные результаты, говорят о том, что ПММА имеет низкую скорость пробития: преграда толщиной 5,85 мм пробивается ударником 25,4×7,62 мм со скоростью 15 м/с, в сравнении для поликарбоната при тех же условиях потребуется скорость ударника около 80 м/с. Однако, несмотря на низкие скорости пробития, ПММА обладает хорошей способностью к рикошетированию: ПММА толщиной 40 мм способен рикошетировать пули 7,62×51 мм со скоростью 720 м/с при угле между вектором скорости снаряда и преграды до 30°, в сравнении для поликарбоната при тех же условиях наблюдается рикошет до 20° [20]. Всё перечисленное указывает на то, что использование ПММА в качестве отдельного бронестекла нецелесообразно, однако требуется рассмотрение противоположных характеристик ПММА при условии его склеивания с другими полимерами или стеклами.

Проникание ударников и пуль в композиционные конструкции из полиметилметакрилата и поликарбоната

Обычно стандартное пуленепробиваемое стекло представляет собой комбинацию двух или более слоев материала: одного неподвижного и одного мягкого. Мягкий слой делает конструкцию более эластичной, позволяя ей гнуться, а не хрупко разрушаться в результате высокого прогиба [21]. В качестве мягкого слоя для ПММА предлагается использовать поликарбонат, так как он не склонен к хрупкому разрушению при проникании в него ударников.

Исследованию снижения скорости при проникании стального шарика в преграду из двух слоев (ПММА и ПК толщиной 0,5 мм каждый) посвящена статья [22], в которой рассмотрено снижение кинетической энергии стального шарика массой 0,51 г и диаметром 5 мм со скоростью удара 150 м/с после пробития двуслойной преграды. Предельные скорости пробития, определенные в данном исследовании, для ПММА и ПК 29,2 м/с и 133,7 м/с соответственно. В исследовании сделан вывод, что конструкция, состоящая из последовательности слоев ПК-ПММА, более эффективно рассеивает энергию шарика, нежели указанные слои, уложенные в обратном порядке. Преграда ПММА-ПК поглощает до 80 % энергии шарика, ПК-ПММА — до 60 %. Авторы делают вывод, что при увеличении скорости шарика у преграды уменьшается способность к рассеиванию энергии. Полученные результаты, говорят о том, что при увеличении скорости ударника или пули, пулестойкость преграды будет падать. Подобное объясняется увеличением температуры в момент соударения в точке преграда-ударник: подверженные изменению физических свойств в зависимости от температуры ПММА и ПК начинают претерпевать пластические деформации, что значительно уменьшает прочность каждого слоя.

Использование композиционного бронестекла при определенных температурах позволяет увеличить предельную скорость пробития преграды. В исследовании [19] приведено сравнение двух композиционных трехслойных пластин: в первой — лицевые слои выполнены из поликарбоната толщиной 3 мм, средний слой из полиметилметакрилата толщиной 12 мм, во

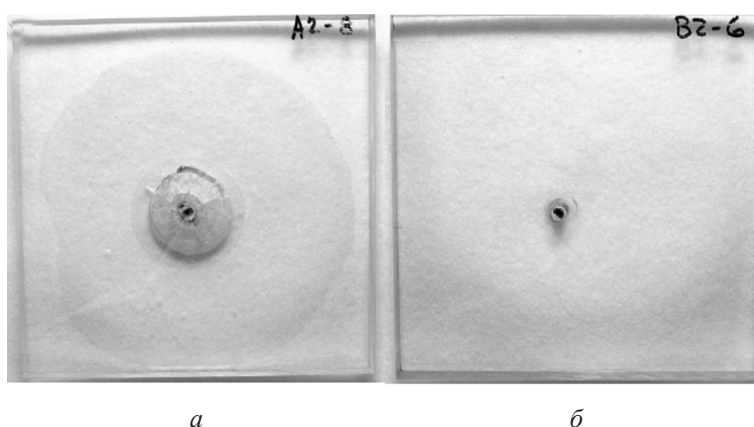


Рис. 13. Повреждения трехслойных пластин при проникании пули 5,6 мм массой 17 г:
 а — преграда со средним слоем из полиметилметакрилата; б — преграда со средним слоем из поликарбоната

второй — три слоя выполнены из поликарбоната, при соударении с пулей 5,6 мм массой 17 г. Использование среднего слоя выполненного из полиметилметакрилата позволяет увеличить предельную скорость пробития с 618 м/с (при использовании среднего слоя из ПК) до 846 м/с. Также приводятся фотографии с повреждениями данных пластин (рис. 13). В отличие от поликарбоната — полиметилметакрилат значительно растрескивается при проникании в него пуль, что способствует рассеиванию энергии ударника. Дополнительные слои поликарбоната также рассеивают энергию, а также удерживают осколки полиметилметакрилата от разлета.

Исследование поведения бронестекел, выполненных из полимеров, показывают, что важен не только порядок слоев, используемых в стекле, но и толщина связующего слоя. Исследование [19] показывает, что чем больше толщина связующего слоя, тем больше энергии поглощает стекло во время высокоскоростного взаимодействия. Данные выводы дают возможность предположить, что при выборе оптимальной толщины связующего слоя между поликарбонатом и полиметилметакрилатом можно добиться повышения пулестойкости всей бронеконструкции.

Выводы

По результатам обзора особенностей взаимодействия высокоскоростных ударников и полиметилметакрилата были получены:

1. Взаимодействие ПММА с высокоскоростными элементами сопровождается не только хрупкими разрушениями пластины, как это

можно наблюдать при проникании пули в обычное стекло, но также и пластическими, которые позволяют ПММА не дробиться на небольшие фрагменты, способные оказывать дополнительное поражающее воздействие;

2. ПММА обладает способностью рикошетировать пули с углами наклона около 30° (пули калибра 7,62 мм массой 3,5 г и толщиной преграды от 20 мм);

3. Указанные свойства, а также пожаростойкость, светопропускная способность и способность выдерживать различные атмосферные воздействия, позволяют рассматривать полиметилметакрилат с точки зрения перспективного бронематериала. Однако использование бронеконструкций выполненных полностью из полиметилметакрилата невозможно, так как ПММА обладает низкой скоростью пробития, поэтому предлагается его использование с другими полимерными стеклами.

Рассмотренные в статье исследования проникания ударников в конструкции, выполненные из ПММА и ПК, показывают возможность создания бронестекел из данных материалов, однако требуется проведение дополнительных исследований влияния толщины различных слоев указанных компонентов на предельную скорость пробития конструкций.

Литература

1. Божанов П.В., Трещев А.А. Определение прочностных критериев при возникновении пластических деформаций в поликарбонате // Журнал: «Инновации и инвестиции». 2018. С. 323–326.

2. Литовченко Д.И. Разработка составов и технологии пожаробезопасных светопрозрачных строительных конструкций и оргстекла // Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. — Саратов. 2014. 20 с.
3. Мекалина И.В., Богатов В.А., Тригуб Т.С., Сентюрин Е.Г. Авиационные органические стекла // Труды ВИАМ. 2013. № 11. 9 с.
4. Norazrina Mat Jali, Patrice Longere. Impact velocity dependence of the fragmentation of shock-resistant PMMA // Proceedings of the 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design Albufeira/Portugal. Editors J.F. Silva Gomes and S.A. Meguid. 2017. P. 1037–1042.
5. Rittel D., Dorogoy A. Impact of thick PMMA plates by long projectiles at low velocities. Part 1: Effect of head's shape // *Mechanics of materials*. 2013. P. 41–52.
6. Паламарчук А.А., Шишакина О.А., Кочуров Д.В., Аракелян А.Г. Современные технологии получения полиметилметакрилата // Международный студенческий научный вестник. 2018. 9 с.
7. Мекалина И.В., Сентюрин Е.Г., Климова С.Ф., Богатов В.А. Новые «серебростойкие» органические стекла // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. С. 45–48.
8. ГОСТ 10667-90 Стекло органическое листовое Технические условия. — М.: Издательство стандартов. 1990. 35 с.
9. Md Alim, Kailash Singh Negi, Sughosh Abhyankar, Neelesh Tiwari, Abhimanyu Harshey, Ankit Srivastava. Towards the investigation of shooting incidents: evaluation of fracture pattern on polymethylmethacrylate sheet made by .22” and .177” caliber air rifle // *Heliyon*. 2020. P. 1–7.
10. Кунижев Б.И., Ахриев А.С., Торшхоева З.С. Разрушение мишени из оргстекла высокоскоростным ударом и лазерным импульсом // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. 2008. С. 61–68.
11. Мамалимов Р.И., Щербаков И.П., Мамедов Р.К. Механолюминисценция кварца и органического стекла при ударном воздействии // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2013. С. 69–74
12. Satapathe S., Bless S. Deep Punching PMMA // *Experimental mechanics*. 1999. P. 31–37.
13. Shabnam Sadeghi Esfahlani. Ballistic performance of Polycarbonate and Polymethyl methacrylate under normal and inclined dynamic impacts // *Heliyon*. 2021. P. 1–10.
14. Rosenberg Z., Surujon Z., Yeshurun Y., Ashuach Y., Dekel E. Ricochet of 0.3” AP projectile from inclined polymeric plates // *International Journal of Impact Engineering*. 2003. P. 1–13.
15. Dorogoy A., Rittel D., Brill A. A study of impact in polymethylmethacrylate plates // *International Journal of Impact Engineering*. 2009. P. 285–294.
16. Allan C. Gunnarsson. Impact Response of PC/PMMA Composites // *Proceedings of the SEM Annual Conference*. 2010. P. 195–209.
17. Kazarinov N.A., Bratov V.A., Morozov N.F., Balandin Y.V., Iqbal M.A., Gupta N.K. Experimental and numerical analysis of PMMA impact fracture // *International Journal of Impact Engineering*. 2020. P. 1–6.
18. Song J.W., Hsieh A.J. Ballistic impact resistance of Monolithic, Hybrid and nanocomposites of PC and PMMA // *Materials Science*. 2002. P. 1–7.
19. Alex J. Hsieh, Daniel DeShepper, Paul Moy, Peter G. Dehmer, John W. Song. The Effects of PMMA on Ballistic Impact performance of Hybrid Hard/Ductile All-Plastic- and Glass-Plastic-Based Composites // *Army Research Laborator*. 2004. 26 p.
20. A. Dorogoy, D. Rittel, A.Brill. Experimentation and modeling of inclined ballistic impact in thick polycarbonate plates // *International Journal of Impact Engineering*. 2011. P. 804–814.
21. Moreno Minozzo. Vetri nell'automotive automotive glass // *Universita'degki study di padova*. 2013–2014. 73 p.
22. Kasano H. Ballistic impact performance of composite plate with and without bonding // *18th international conference on composite materials*. 2011. P. 1–5.

References

1. Bozhanov P.V., Treshchev A.A. Determination of strength criteria when plastic deformations occur in polycarbonate // *Magazine: «Innovation and Investment»*. 2018. P. 323–326.
2. Litovchenko D.I. Development of compositions and technologies of fire safety translucent building structures and olstge // *Abstract of the thesis for the degree of technical sciences*. — Saratov. 2014. 20 p.

3. Mekalina I.V., Bogatov V.A., Trigub T.S., Sentyurin E.G. Aviation organic glass // Proceedings of VIAM. 2013. № 11. 9 p.
4. Norazrina Mat Jali, Patrice Longere. Impact velocity dependence of the fragmentation of shock-resistant PMMA // Proceedings of the 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design Albufeira/Portugal. Editors J.F. Silva Gomes and S.A. Meguid. 2017. P. 1037–1042.
5. D. Rittel, A. Dorogoy. Impact of thick PMMA plates by long projectiles at low velocities. Part 1: Effect of head's shape // *Mechanics of materials*. 2013. P. 41–52.
6. Palamarchuk A.A., Shishakina O.A., Kochurov D.V., Arakelyan A.G. Modern technologies for obtaining polymethyl methacrylate // *International student scientific bulletin*. 2018. 9 p.
7. Mekalina I.V., Sentyurin E.G., Klimova S.F., Bogatov V.A. New «silver-resistant» organic glass // *Aviation materials and technologies*. 2012. P. 45–48.
8. GOST 10667-90 Sheet organic glass. Specifications. — M.: Publishing House of Standards. 1990. 35 p.
9. Md Alim, Kailash Singh Negi, Sugghosh Abhyankar, Neelesh Tiwari, Abhimanyu Harshey, Ankit Srivastava. Towards the investigation of shooting incidents: evaluation of fracture pattern on polymethylmethacrylate sheet made by .22” and .177” caliber air rifle // *Heliyon*. 2020. P. 1–7.
10. Kunizhev B.I., Akhriev A.S., Torshkoeva Z.S. Destruction of a Plexiglas target by a high-speed impact and a laser pulse // *Izvestiya vuzov. North Caucasian region. Natural Sciences*. 2008. P. 61–68.
11. Mamalimov R.I., Shcherbakov I.P., Mamedov R.K. Mechanoluminescence of quartz and organic glass upon impact // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie*. 2013. P. 69–74.
12. Satapathe S., Bless S. Deep Punching PMMA // *Experimental mechanics*. 1999. P. 31–37.
13. Shabnam Sadeghi Esfahlani. Ballistic performance of Polycarbonate and Polymethyl methacrylate under normal and inclined dynamic impacts // *Heliyon*. 2021. P. 1–10.
14. Rosenberg Z., Surujon Z., Yeshurun Y., Ashuach Y., Dekel E. Ricochet of 0.3” AP projectile from inclined polymeric plates // *International Journal of Impact Engineering*. 2003. P. 1–13.
15. Dorogoy A., Rittel D., Brill A. A study of impact in polymethylmethacrylate plates // *International Journal of Impact Engineering*. 2009. P. 285–294.
16. Allan C. Gunnarsson. Impact Response of PC/PMMA Composites // *Proceedings of the SEM Annual Conference*. 2010. P. 195–209.
17. Kazarinov N.A., Bratov V.A., Morozov N.F., Balandin Y.V., Iqbal M.A., Gupta N.K. Experimental and numerical analysis of PMMA impact fracture // *International Journal of Impact Engineering*. 2020. P. 1–6.
18. Song J.W., Hsieh A.J. Ballistic impact resistance of Monolithic, Hybrid and nanocomposites of PC and PMMA // *Materials Science*. 2002. P. 1–7.
19. Alex J. Hsieh, Daniel DeShepper, Paul Moy, Peter G. Dehmer, John W. Song. The Effects of PMMA on Ballistic Impact performance of Hybrid Hard/Ductile All-Plastic- and Glass-Plastic-Based Composites // *Army Research Laboratory*. 2004. 26 p.
20. A. Dorogoy, D. Rittel, A. Brill. Experimentation and modeling of inclined ballistic impact in thick polycarbonate plates // *International Journal of Impact Engineering*. 2011. P. 804–814.
21. Moreno Minozzo. Vetri nell'automotive automotive glass // *Universita' degli studi di padova*. 2013–2014. 73 p.
22. Kasano H. Ballistic impact performance of composite plate with and without bonding // *18th international conference on composite materials*. 2011. P. 1–5.