

Научная статья
УДК 621.317.329: 626.12
DOI: 10.34759/vst-2022-3-65-76

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ОРГСТЕКЛА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДОЖДЕВОГО КАПЛЕУДАРА

Мингун Ша¹, Ин Сунь²✉

¹Северо-западный политехнический университет,
г. Сиань, провинция Шэньси, Китайская Народная Республика

¹Научно-исследовательский институт дельты реки Янцзы
Северо-западного политехнического университета,
г. Тайцан, провинция Цзян Су, Китайская Народная Республика

²Ханчжоуский технический колледж Сяошань, Факультет машиностроения,
г. Ханчжоу, провинция Чже Цзян, Китайская Народная Республика

¹shamg2020@nwpu.edu.cn

²54497448@qq.com ✉

Аннотация. При полете летательных аппаратов (ЛА) через зону дождя на высокой скорости лобовое стекло и другие поверхности легко разрушаются из-за дождевой каплеударной эрозии. В статье представлены результаты исследования воздействия струйного удара на ориентированное и неориентированное оргстекло. При испытаниях использовалась одноструйная ударная платформа на основе газовой пушки. Результаты показывают, что при воздействии высокоскоростного струйного удара у ориентированного оргстекла в основном появляются повреждения в виде подповерхностных расслоений, а у неориентированного оргстекла — поверхностные повреждения. При постоянном увеличении скорости удара на двух образцах оргстекла появилось поверхностное отслаивание, причем отслаивание ориентированного оргстекла было более серьезным. Наблюдение за распространением волны напряжения и расширением повреждения внутри образца показало, что в подповерхностном расслоении ориентированного оргстекла преобладают волны сдвига.

Ключевые слова: оргстекло, удар жидкость—твердое тело, водяная струя, дождевое каплеударное повреждение, эрозия

Финансирование: работа выполнена при поддержке следующих грантов:

- Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2021JQ 081);
- Basic Research Programs of Taicang (TC2020JC14).

Для цитирования: Ша М., Сунь И. Исследование повреждений оргстекла летательных аппаратов в условиях высокоскоростного дождевого каплеудара // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 3. С. 65-76. DOI: 10.34759/vst-2022-3-65-76

Original article

STUDYING AIRCRAFT ORGANIC GLASS DAMAGES UNDER CONDITIONS OF HIGH-SPEED RAINDROPS SHOCK

Mingong Sha¹, Ying Sun² ✉¹Northwestern Polytechnical University (NPU)

Xi'an, Shaanxi, People's Republic of China

¹Yangtze River Delta Research Institute of NPU,

Taicang City, Jiangsu Province, People's Republic of China

²Hangzhou Xiaoshan Technician College, Department of Mechanical Engineering,

Hangzhou City, 311200, People's Republic of China

¹shamg2020@nwpu.edu.cn²54497448@qq.com ✉

Abstract

When an aircraft fly through a rain zone at high speed, the windshield and the advancing parts of other components, as well as the coating of the aircraft skin are being easily destroyed due to raindrop-shock erosion. In the studies of the aircraft damages from the raindrop-shock erosion, which is the most common at the subsonic speed, due to the low speed, the value of pressure generated by one impact is assumed negligible. Thus, hundreds or thousands of successive impacts are often required over a time period to cause damage to the surface of materials or structures. In this case, all researchers are paying attention to the mechanism of damage from the fatigue loading. Although the probability of raindrop shock of a supersonic speed occurring is low, its peak water hammer pressure impulse (up to the GPa level) far exceeds the strength of many materials, and one or more impacts are enough to damage the material or structure. At this time, much greater attention is being paid to the mechanism of the damage from shock loading.

Due to the advantages of the small size, ease of operation, and controlled test conditions, the single-jet generator is most widely used in the studies on the mechanism of damage to materials and the interaction of raindrop-shock erosion. The presented work considers a single-jet impact platform, based on a gas gun, which is capable of stable water jets generating with the speeds of 90-700 m/s and arc-like front section diameters of 4–7 mm. Then the test on the jet shock upon the oriented and non-oriented aviation organic glasses (Polymethyl methacrylate — PMMA) for are being conducted at various speeds. According to the experience, the optimal position of the organic glass sample setting while the raindrop-shock erosion testing is 10 mm from the nozzle.

The results indicate that at the high-speed jet shock impact damages in the form of surface stratification manifest themselves with the oriented organic glass, while with the non-oriented organic glass these damages are the surface ones. With constant impact velocity increasing, the surface stratification appeared on both organic glass samples, and stratification of the oriented organic glass at that was more serious. Observing the stress wave propagation and damage expanding inside the sample revealed that the shear waves prevailed in the subsurface stratification of the oriented organic glass.

Keywords: organic glass, liquid-solid impact, water jet, raindrops shock damage, erosion

Funding: the work was supported by the following grants:

— Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2021JQ 081);

— Basic Research Programs of Taicang (TC2020JC14).

For citation: Sha M., Sun Y. Studying Aircraft Organic Glass Damages under Conditions of High-Speed Raindrops Shock. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 65-76. DOI: 10.34759/vst-2022-3-65-76

Введение

Когда ЛА летят на высокой скорости через дождевое поле, на поверхность лобовых стекол, обтекателей антенн, инфракрасных иллюминаторов или гондол двигателей многократно воздействуют дождевые каплеудары, вызывающие эрозию [1—5]. Особенно острой эта проблема является применительно к военным самолетам [6]. Поэтому очень важно оценить коррозионную стойкость частей ЛА, на которые воздействуют дождевые каплеудары [7].

Полиметилметакрилат (ПММА) представляет собой высокомолекулярный полимерный материал. Благодаря своим превосходным оптическим свойствам, высокой механической прочности, небольшому удельному весу, низкой теплопроводности и простоте обработки и формования он широко используется для изготовления лобовых стекол, фонарей кабины и иллюминаторов самолетов [8, 9]. Однако у неориентированного оргстекла есть недостатки: оно плохо защищено от образования трещин, чувствительно к концентрации напряжений, у него низкие противоударные характеристики. Чтобы улучшить характеристики неориентированного оргстекла, провели двухосно вытяжку, охлаждение и затверждение при температуре стеклования T_g (105°C). Когда молекулярная цепь растянута и ориентирована, ориентированное оргстекло обладает лучшей стойкостью к растрескиванию и росту трещин, а также имеет более высокую ударную вязкость [10, 11]. Поэтому в настоящее время большинство прозрачных деталей самолетов изготавливаются из ориентированного оргстекла. Однако фонарь самолета в основном изготавливается из прозрачных деталей с однослойной конструкцией, при этом необходимо учитывать обзор пилота и требование малозаметности самолета, а форма фонаря относительно сложная. Поскольку ориентированно-растянутое оргстекло необходимо выдувать и формировать, его сложно изготовить, и на некоторых самолетах в качестве материала фонаря до сих пор используется неориентированное оргстекло [12]. Таким образом, оценка стойкости двух видов оргстекла к дождевой каплеударной эрозии имеет большое инженерное значение.

В последние несколько десятилетий многие ученые исследовали повреждения оргстекла летательных аппаратов в условиях высокоскоростного водоструйного удара [16, 17]. Bowden, Brunton [18] обобщили типичные формы разрушения поверхности полимеров, таких как поли-

метилметакрилат, включая центральную неповрежденную область, окруженную кольцевыми впадинами или трещинами и короткими кольцевыми трещинами. Кроме того, высокоскоростной удар жидкости также вызывает распространение волн напряжений внутри материала. Внутренние повреждения, вызванные взаимодействием волн напряжений, иногда бывают более серьезными, чем поверхностные повреждения. В случае ограниченной толщины материала каплеудар вызывает повреждение задней поверхности и центральной зоны из-за волны напряжений [19]. Чтобы проанализировать механизм внутреннего повреждения, многие ученые используют фотоупругость оргстекла для наблюдения за распространением волны внутреннего напряжения и процессом повреждения после каплеудара [20]. Bowden и др. [21] также объяснили взаимодействие волн напряжения посредством теоретического вывода. Кроме того, давление гидравлического удара, вызванное ударом жидкость—твердое тело, является трудным для изучения. Из-за сложности процесса удара исследование давления гидравлического удара находилось на теоретической стадии.

В этой статье обсуждаются результаты ударных испытаний ориентированного и неориентированного оргстекла для авиации с использованием высокоскоростных струй, создаваемых одноструйным устройством, и сравниваются характеристики повреждений. В то же время механизм повреждения образца был проанализирован путем наблюдения за волной внутреннего напряжения.

1. Теория высокоскоростного удара жидкость—твердое тело

Процесс удара жидкость—твердое тело состоит из двух стадий: стадии начального сжатия и стадии бокового впрыска, как показано на рис. 1. При начальном контакте высокоскоростная жидкость ударяется о твердую поверхность, и периферия контакта поверхности жидкости и твердого тела с большой скоростью распространяется на окружающую среду, а внутри жидкости и твердого тела генерируется волна напряжения [17, 18]. В это время скорость расширения границы контакта жидкости—твердого тела больше, чем скорость распространения волны напряжения внутри жидкости, а в центре жидкость сжимается, образуя переходное высокое давление, которое называется «давлением гидравлического удара» [23, 24].

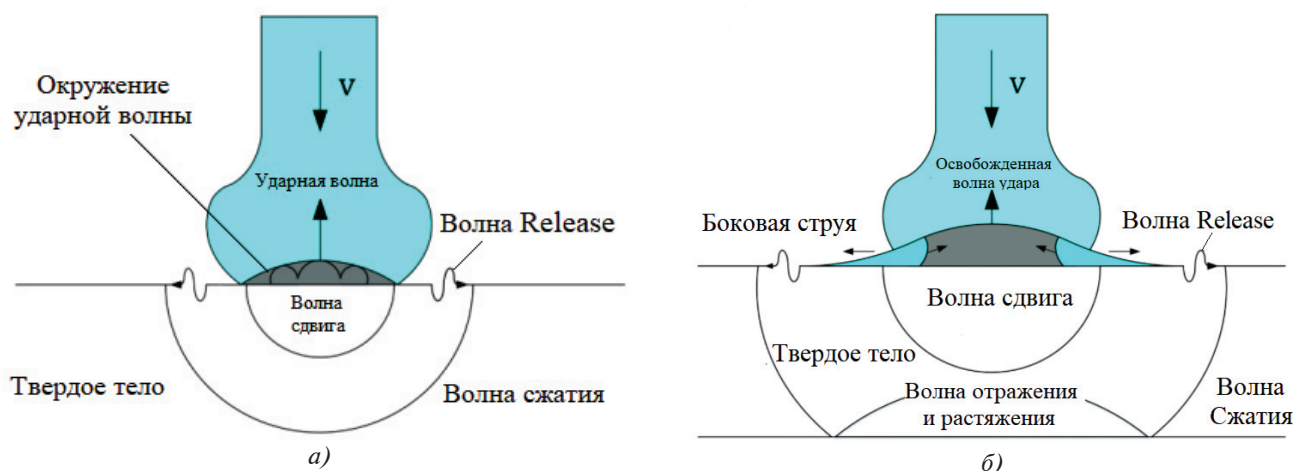


Рис. 1. Принципиальная схема процесса удара жидкость—твердое тело: *а* — начальная стадия сжатия; *б* — освобожденная стадия

Давление струи на твердое тело передается в незатронутую область внутри твердого тела посредством волн напряжений, включая продольные, поперечные волны и волны Release. Продольные и поперечные волны распространяются внутри твердого тела, а волны Release распространяются на поверхности твердого тела, как показано на рис. 1, *а*. Продольные волны распространяются в виде сжатия-растяжения и расширяются в передней части волны, вызывая радиальное растягивающее напряжение. В поперечных волнах движение частиц перпендикулярно направлению распространения, что вызывает напряжение сдвига и кольцевое растягивающее напряжение внутри твердого тела. Волны Release с вертикальной и горизонтальной составляющими вызывают напряжения растяжения и сдвига на поверхности материала [25]. Эти напряжения приводят к началу и распространению повреждения материала. Кроме того, отражение волн напряжений на свободной поверхности и взаимодействие внутри твердого тела могут привести к усилению волны, вызывающей повреждение внутри материала.

Когда скорость ударной волны внутри жидкости равна скорости расширения границы контакта жидкости—твердого тела, ударная волна покидает границу, и внутреннее высокое давление высвобождается в виде высокоскоростной боковой струи, как показано на рис. 1, *б*. Скорость боковой струи обычно в несколько раз превышает скорость удара жидкости. В то же время воздействие размывания и сдвига боковой струи на поверхность материала приводит к образованию трещин по окружности и даже к отслаиванию поверхности материала. После этого

жидкость образует устойчивый несжимаемый поток на поверхности твердого тела, а давление в точке центра контакта снижается до статического давления Бернулли.

2. Процесс испытания

2.1. Платформа для одноструйно-ударного испытания

Испытание проводилось на платформе, которая базируется на легкогазовой пушке с калибром 10 мм, схема показана на рис. 2. Принцип работы платформы: использует газ под высоким давлением для подачи пули в сопло из нержавеющей стали, в котором хранится вода, и создает высокоскоростные струи, сжимая воду в сопле. Перед испытанием в сопло предварительно впрыскивалось небольшое количество чистой воды, и оно закрывалось герметически неопреном. Скорость пули регулируется путем управления давлением в газовой камере, которая может создавать струю со скоростью от 90 до 700 м/с.

Для наблюдения за формой струи в режиме реального времени и расчета скорости струи, процесс удара наблюдали с помощью высокоскоростной камеры Phantom V711. С учетом четкости изображения и интервала съемки используемое значение частоты кадров составляет 21000 кадров в секунду.

На рис. 3 показан закон изменения скорости и формы струи. Видно, что скорость струи постепенно увеличивается после впрыскивания, диаметр струи постепенно увеличивается, и на головку струи воздействует сопротивление воздуха, придавая ей стабильную сферическую форму. Поскольку форма головки струи похожа на

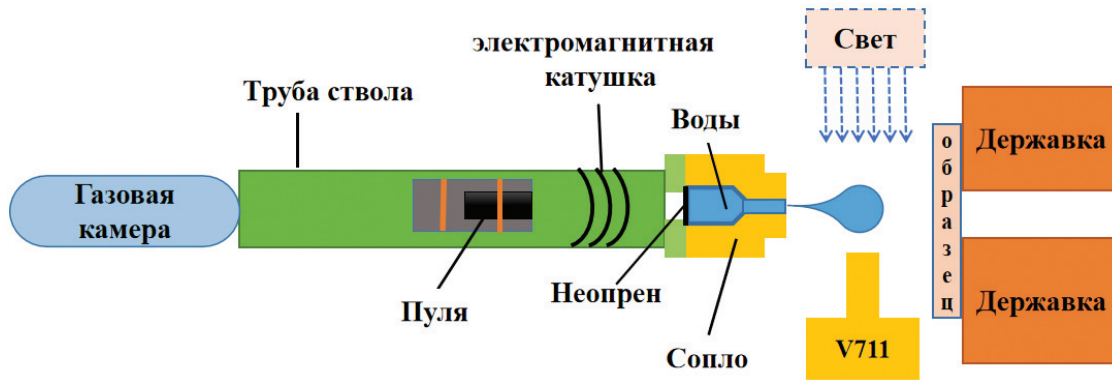


Рис. 2. Платформа для одноструйно-ударного испытания

форму капли дождя, струя может использоваться для имитации реального высокоскоростного каплеудара. Скорость струи и форма головки достигали стабильного состояния примерно в 10 мм от отверстия сопла, и струя постепенно рассеивалась по мере увеличения расстояния.

В данной работе с помощью этой платформы исследовалось повреждение ориентированного и неориентированного оргстекла для авиации при воздействии высокоскоростной струи. Параметры испытаний показаны в таблице. В испытаниях

использовалось сопло с диаметром 0,8 мм, а полученная струя имела диаметр около 4,5 мм.

2.2. Оргстекло для авиации

В исследовании размер образцов неориентированного и ориентированного оргстекла составлял 50×50 мм, а толщина 9 мм. Чтобы можно было наблюдать за распространением волны напряжения внутри материала, боковая поверхность образцов была отполирована.

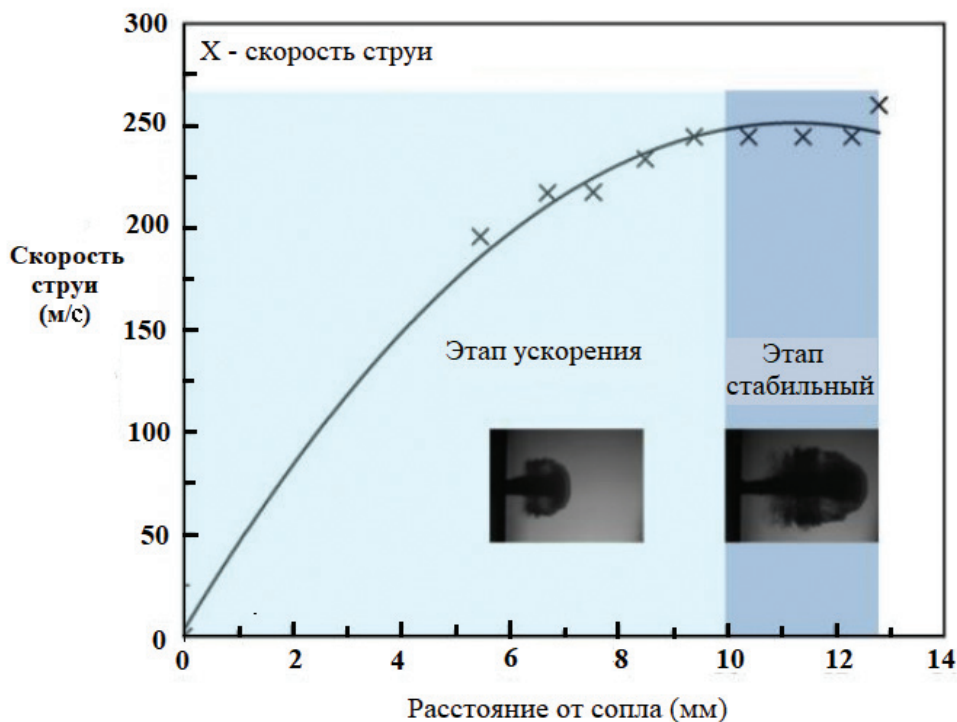


Рис. 3. Изменение формы и скорости струи в зависимости от перемещения

Параметры испытаний

Материалы для испытаний	Ориентированное и неориентированное оргстекло для авиации						
Скорость одиночного удара, м/с	160	220	290	320	390	450	520

3. Результаты

3.1. Типичная форма повреждения и характеристика образцов после удара

На рис. 4 представлены микроскопические изображения поверхности двух образцов оргстекла после струйного удара со скоростью 320 м/с. Хорошо видна разница между формами повреждения двух типов образцов. На рис. 4,а видно, что повреждение неориентированного оргстекла в основном сосредоточено на поверхности, включая почти круглую центральную неповрежденную область 1, кольцевую углубленную область 2 и периферийную короткую кольцевую трещину 3. Однако для ориентированного оргстекла, как показано на рис. 4,б, за пределами центральной неповрежденной области 1 в кольцевом углублении 2 появилась большая область микротрещи-

различными скоростями: рис. 5,а,в,д — неориентированное оргстекло, рис. 5,б,г,е — ориентированное оргстекло. Рисунки показывают, что при скорости удара 220 м/с поверхностное повреждение двух видов оргстекла незначительное, а площади повреждения близки. На неориентированном оргстекле видны поверхностные царапины, а в основной области диаметр повреждения составляет около 2,05 мм; на ориентированном оргстекле в основном видны внутренние трещины, а диаметр периферии трещин составляет около 1,93 мм.

В то же время видно, что поверхности двух видов оргстекла имеют небольшие повреждения от воздействия струй со скоростью 160 м/с, это значит, что порог скорости повреждения для них был ниже 160 м/с. Кроме того, порог скорости отслаивания на поверхности составляет от 320 до

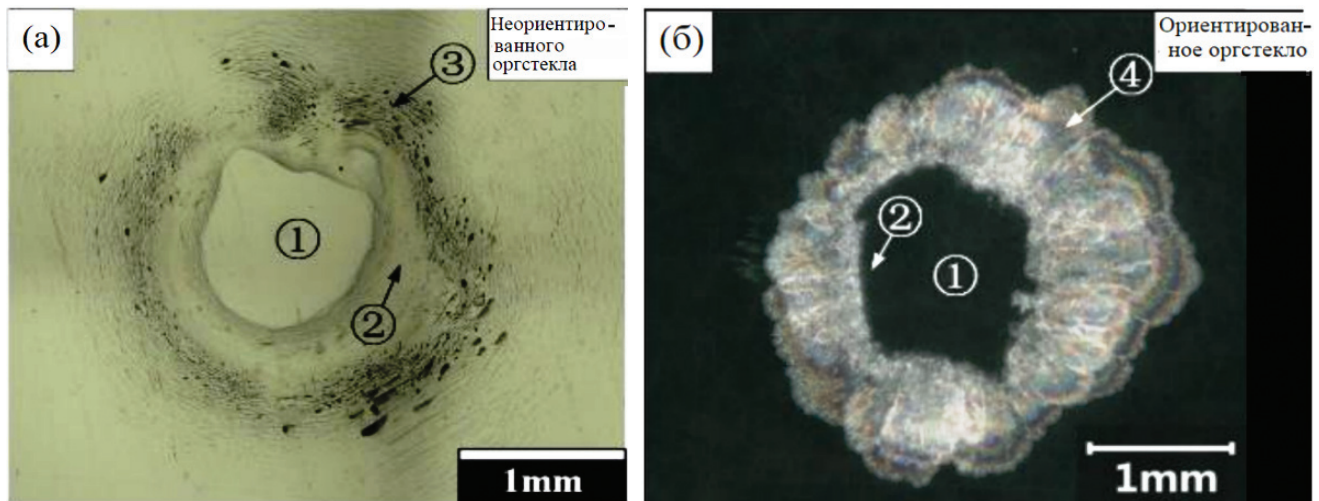


Рис. 4. Микроскопические изображения поверхности двух образцов оргстекла после удара струи

ны 4. Следует отметить отсутствие кольцевых коротких трещин, вызванных высокоскоростной боковой струйной эрозией, за пределом периферии неповрежденного участка. В то же время в зоне разрушения кольцевой микротрещины возник типичный для хрупких материалов речной узор, ряд ступеней располагались вдоль направления распространения трещины на поверхности речного узора и постепенно сливались в процессе расширения, образуя более явные ступени в дальнем конце поврежденного участка.

3.2. Повреждения из-за удара при различных скоростях струи

На рис. 5 показана морфология повреждения двух видов оргстекла под воздействием струй с

380 м/с, а отслаивание ориентированного оргстекла более серьезное, чем у неориентированного оргстекла при той же скорости удара. Поэтому предполагается, что неориентированное оргстекло более стойко к дождевой каплеударной эрозии.

На рис. 6 обобщен закон изменения площади повреждения двух образцов оргстекла (S_a — площадь центрального неповрежденного участка; S_b — площадь поврежденного участка) в зависимости от скорости удара струй, причем площадь повреждения представляет собой среднее значение результатов повторных испытаний. При сравнении установлено, что центральные неповрежденные площади двух образцов оргстекла не сильно различаются, а также не сильно меня-

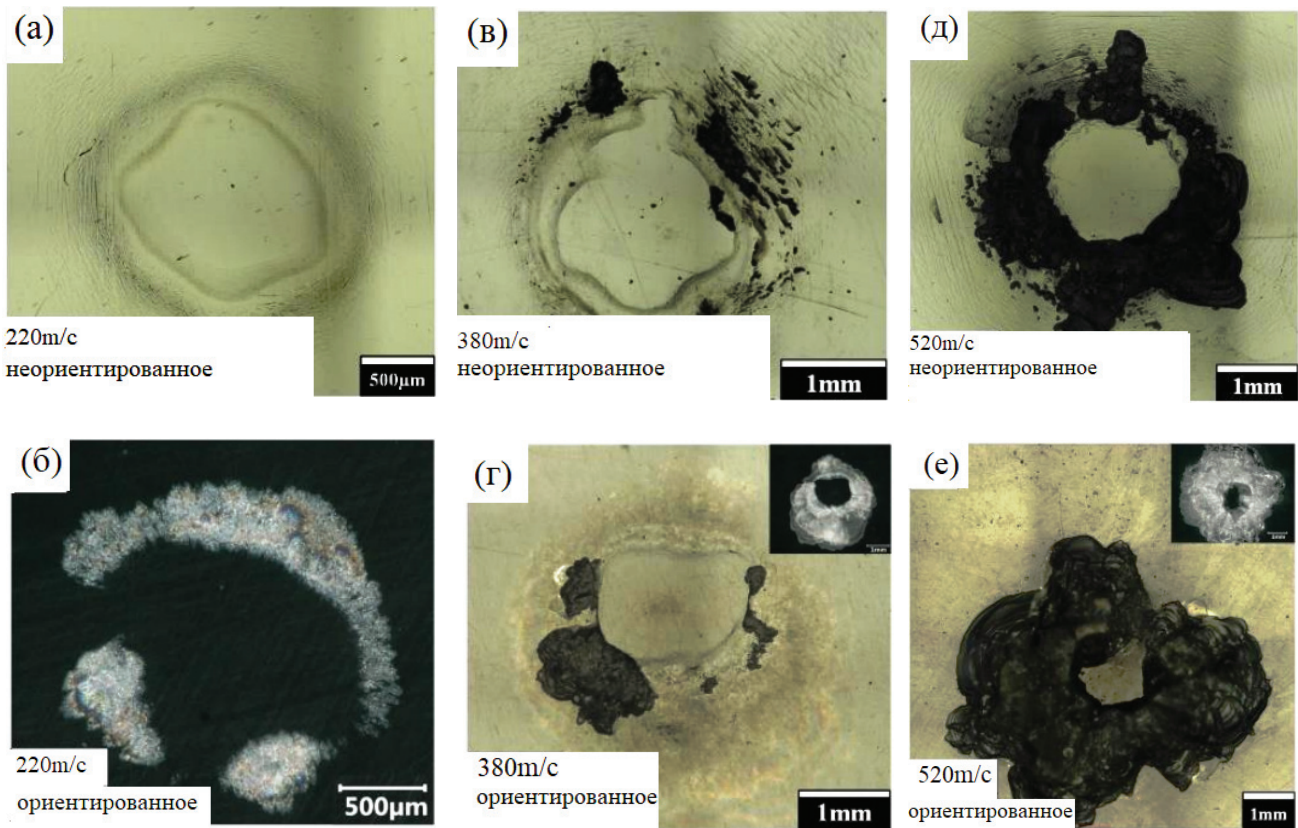


Рис. 5. Микроскопические изображения поверхности двух образцов оргстекла после удара струи

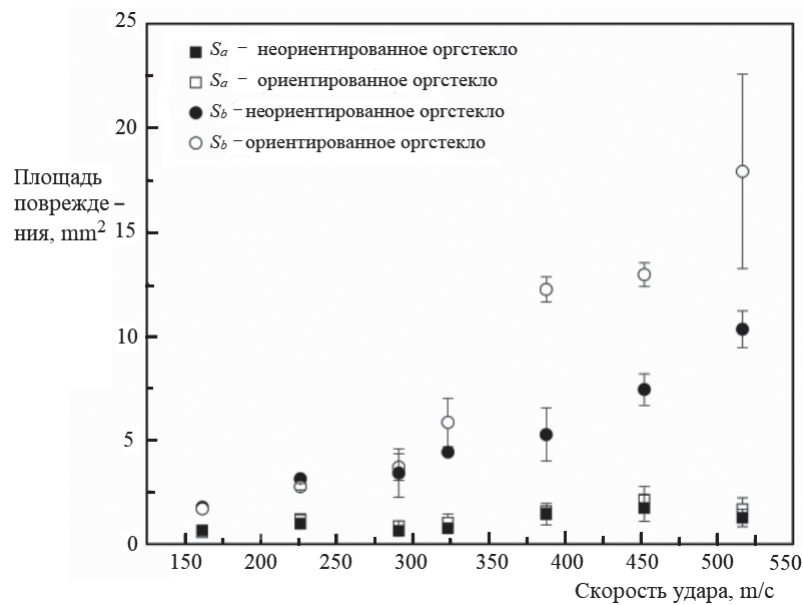


Рис. 6. Закон изменения площади повреждения в зависимости от скорости удара

ются с увеличением скорости удара и сохраняют относительно стабильное значение. Можно обнаружить, что S_b обоих оргстеклол возрастает с увеличением скорости удара. Когда скорость удара низкая (менее 320 м/с), площади повреждения двух образцов оргстекла медленно увеличиваются со скоростью удара, и между ними мало

различий при одинаковой скорости удара струи. Когда скорость превышает 320 м/с, площадь повреждения быстро увеличивается со скоростью удара, а площадь повреждения у ориентированного оргстекла намного больше, чем у неориентированного. Совмещая микроскопические изображения поверхности, показанные на рис. 5,

можно видеть, что при этой скорости удара отслаивание происходит постепенно на поверхности, и ориентированное оргстекло склонно к отслаиванию на большей площади при той же скорости удара.

3.3. Наблюдение за волной напряжения и исследование механизма повреждения

Существуют очевидные различия в режимах повреждения оргстекла после воздействия удара высокоскоростных струй. Для дальнейшего изучения механизма повреждения был проанализирован процесс распространения волны внутреннего напряжения в двух образцах. На рис. 7 представлено изображение распространения волны напряжений внутри двух образцов оргстекла при воздействии удара струи со скоростью 520 м/с.

При ударе струи волны сжатия и сдвига распространяются внутри образца, а волны Rayleigh распространяются на поверхности образца. Из-за разницы в скорости распространения волны сжатия и сдвига постепенно разделяются. Как показано на рис. 7,а, волны сжатия (С) наблюдались после удара струи об ориентированное оргстекло в течение 0,4 мкс, подповерхностное повреждение (Dr) появлялось при 0,6 мкс, а волны сдвига наблюдались при 0,8 мкс (S); между 1,2 и 1,4 мкс заканчивается процесс сжатия и появляются боковые струи. Наблюдая за процессом повреждения, можно обнаружить, что подповерхностное повреждение постепенно расширяется внутрь поверхности вдоль фронта волны сдвига на начальном этапе удара и происходит раньше,

чем генерация боковой струи. В это время, поскольку волна высвобождена, генерируемая высвобождением центральной зоны сжатия, еще не сформировалась, подповерхностное образование трещин в ориентированном оргстекле вызвано волной сдвига, генерируемой ударом.

На рис. 8,а и б показаны вид сбоку повреждения, снятого высокоскоростной камерой, и микрофотография повреждения поверхности после удара соответственно: повреждение серебряной подповерхности в виде межслоевых расслоений и угол между повреждением и поверхностью образца около 23°. У ориентированного оргстекла после направленного растяжения его молекулярные цепи имеют тенденцию располагаться параллельными слоями вдоль плоскости стекла, а расположение в плоскости неупорядоченное, что приводит к повышению механических характеристик ориентированного оргстекла по направлению параллельно плоскости растяжения, но межслойная прочность в направлении, перпендикулярном плоскости растяжения, снижается, проявляя анизотропию [27, 28]. При воздействии волн сдвига из-за малой межслойной прочности происходит разрыв молекулярных цепей вдоль промежуточного слоя, проявляющийся в виде расслоения.

С другой стороны, неориентированное оргстекло, как показано на рис. 7,б, имеет подповерхностное повреждение под действием волны сдвига на начальном этапе удара (Dr), но по сравнению с ориентированным оргстеклом подповерхностное повреждение чрезвычайно мало, а глу-

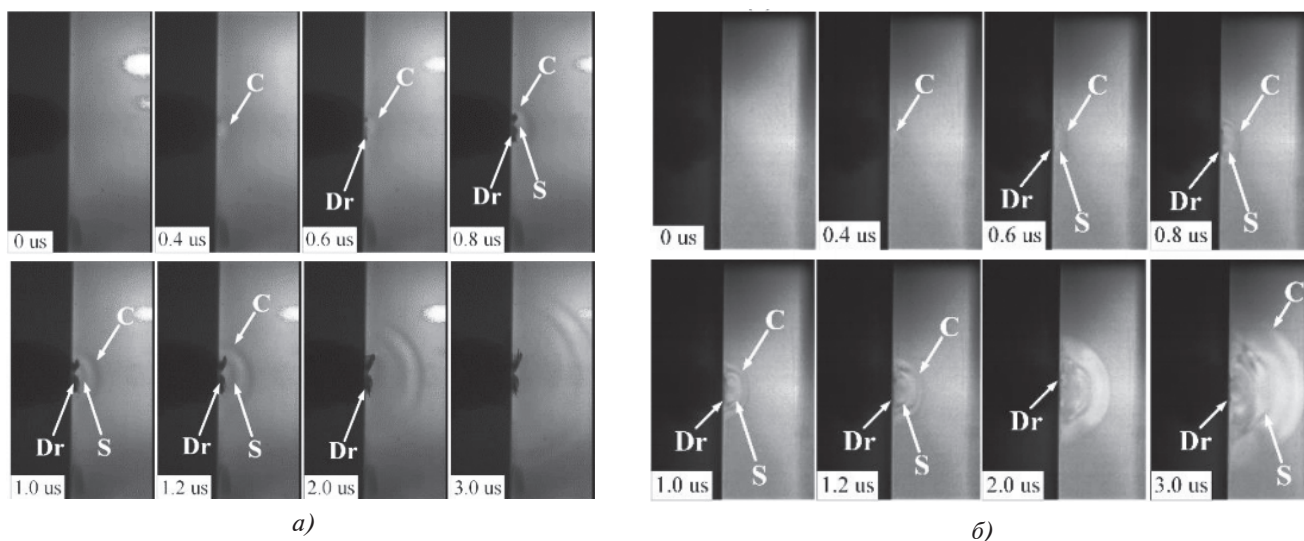


Рис. 7. Полученное высокоскоростной камерой изображение распространения волны напряжения в образцах из ориентированного (а) и неориентированного (б) оргстекла

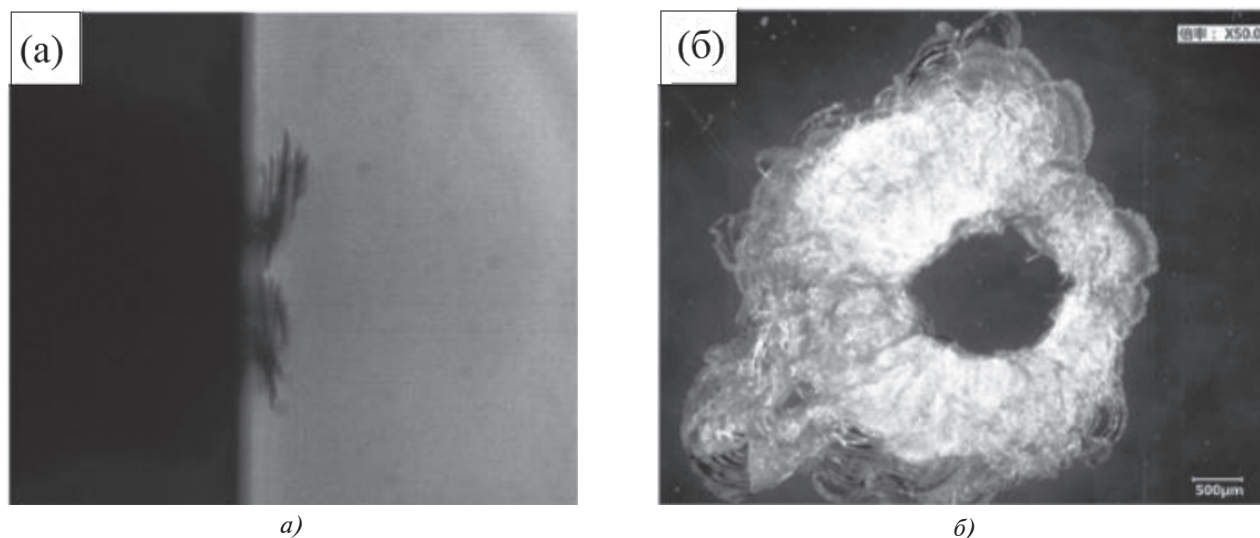


Рис. 8. Изображение в увеличенном масштабе повреждения ориентированного оргстекла: *a* — вид сбоку внутреннего повреждения, снятого высокоскоростной камерой; *б* — микрофотография поверхностного повреждения

бина более мелкая, повреждение почти перпендикулярно поверхности. Различие в подповерхностном повреждении также приводит к разнице в морфологии поверхностного отслаивания двух оргстекол под воздействием высокоскоростных струй. Для ориентированного оргстекла, поскольку для него характерно подповерхностное расслоение, при воздействии высокоскоростных струй боковые высокоскоростные струи будут проникать в трещины и поднимать вдоль подповерхностной трещины материал, что приводит к отслаиванию на большой площади, как показано на рис. 4,б. Для неориентированного оргстекла степень подповерхностного повреждения относительно низка. При боковой струйной эрозии степень отслаивания меньше, чем у ориентированного оргстекла.

Выводы

На основе газовой пушки создана одноструйная ударная платформа. Проведены испытания на струйный удар на различных скоростях по ориентированному и неориентированному оргстеклу для авиации. Основные выводы:

1. Оргстекло ориентированное и неориентированное при воздействии струи демонстрировало различные формы повреждения: ориентированное оргстекло — в основном в виде подповерхностного расслоения трещин, а неориентированное оргстекло — в виде поверхностного повреждения.

2. С увеличением скорости удара площадь повреждения двух образцов оргстекла постепенно

увеличивалась, и появлялись повреждения отслаивания. Ориентированное оргстекло более склонно к отслаиванию на большей площади повреждения при более высоких скоростях удара.

3. Путем наблюдения за распространением волны напряжения и поведением повреждения внутри образцов было обнаружено, что повреждение ориентированного оргстекла представляет собой повреждение подповерхностного расслоения из-за преобладания волны сдвига, и это также приводит к отслаиванию ориентированного оргстекла на большей площади, поскольку оно сильнее подвержено эрозии под воздействием боковой струи.

Список источников

1. Coad E.J., Pickles C.S.J., Seward C.R. et al. The Erosion Resistance of Infrared Transparent Materials // Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1998. Vol. 454. No. 1968, pp. 213-238. DOI: 10.1098/rspa.1998.0155
2. Coad E.J., Pickles C.S.J., Jilbert G.H., Field J.E. Aerospace erosion of diamond and diamond coatings // Diamond and Related Materials. 1996. Vol. 5. No. 6-8, pp. 640-643. DOI: 10.1016/0925-9635(95)00403-3
3. Seward C.R., Coad E.J., Pickles C.S.J., Field J.E. The liquid impact resistance of a range of IR-transparent materials // Wear. 1995. Vol. 186-187. Part 2, pp. 375-383. DOI: 10.1016/0043-1648(95)07150-4
4. Seward C.R., Pickles C.S.J., Marrah R., Field J.E. Rain erosion data on window and dome materials // Window and Dome Technologies and Materials III. 1992. Vol. 1760, pp. 280-290. DOI: 10.1117/12.130805

5. *Adler W.F., Hooker S.V.* Water drop impact damage in zinc sulfide // *Wear*. 1978. Vol. 48. No. 1, pp. 103-119. DOI: 10.1016/0043-1648(78)90141-2
6. *Fyall A.A.* Practical Aspects of Rain Erosion of Aircraft and Missiles // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1966. Vol. 260. No. 1110, pp. 161-167. URL: <https://www.jstor.org/stable/73547>
7. *Field J.E., Hand R.J., Pickles C.J.* Strength and Rain Erosion Studies of I.R. Materials // *Window and Dome Technologies and Materials*. 1989. Vol. 1112, pp. 306-315. DOI: 10.1117/12.960789
8. *Wang Z.Y., Wang Y.Q., Du X.X.* et al. Mechanical behavior and engineering application of PMMA // *The National Symposium on Structural Engineering*. 2015 (in Chinese).
9. *Deng X.Q., Li Z.Q., Zhao L.M.* et al. A review on mechanical behaviour of PMMA // *Mechanics in Engineering*. 2014. Vol. 36. No. 5, pp. 540-550 (in Chinese).
10. *Guo W.G., Shi F.F.* Deformation and failure behavior of MDYB-3 oriented PMMA glass under different loading conditions // *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*. 2008. Vol. 29. No. 06, pp. 112-120 (in Chinese).
11. *Qin R.X., Ou Y.C., Zhang B.J.* et al. The contrast of competitive properties between YB-3 and DYB-3 aviation sheet // *China building materials science & technology*. 2011. Vol. 01, pp. 29-31 (in Chinese).
12. *Zhang Z.L.* Design theory and application for transparency of aircraft canopy and windshield // *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*. 2005 (in Chinese).
13. *Field J.E.* ELSI conference: invited lecture: Liquid impact: theory, experiment, applications // *Wear*. 1999. Vol. 233-235, pp. 1-12. DOI: 10.1016/S0043-1648(99)00189-1
14. *Adler W.F., Boland P.L.* Multiparticle supersonic impact test program // *34th Annual International Technical Symposium on Optical and Optoelectronic Applied Science and Engineering (1990, San Diego, CA, USA)*. 1990. Vol. 1326, pp. 268-279.
15. *Tobin E.F., Young T.M., Raps D., Rohr O.* Comparison of liquid impingement results from whirling arm and waterjet rain erosion test facilities // *Wear*. 2011. Vol. 271. No. 9-10, pp. 2625-2631. DOI: 10.1016/j.wear.2011.02.023
16. *Adler W.F.* Rain impact retrospective and vision for the future // *Wear*. 1999. Vol. 233-235, pp. 25-38. DOI: 10.1016/S0043-1648(99)00191-X
17. *Obara T., Bourne N.K., Field J.E.* Liquid-jet impact on liquid and solid surfaces // *Wear*. 1995. Vol. 186-187. Part 2, pp. 388-394. DOI: 10.1016/0043-1648(95)07187-3
18. *Bowden F.P., Brunton J.H.* The Deformation of Solids by Liquid Impact at Supersonic Speeds // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1961. Vol. 263. No. 1315, pp. 433-450. URL: <https://www.jstor.org/stable/2414324>
19. *Bourne N.K., Obara T., Field J.E.* High-speed photography and stress gauge studies of jet impact upon surfaces // *Philosophical Transactions of the Royal Society A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1997. Vol. 355. No. 1724, pp. 607-623. DOI: 10.1098/rsta.1997.0028
20. *Shi H.H., Field J.E.* Stress wave propagation in solid material under high velocity liquid impingement // *Scientia Sinica Physica Mechanica Astronomica*. 2004. Vol. 34. No. 5, pp. 577-590 (in Chinese).
21. *Bowden F.P., Field J.E.* The brittle fracture of solids by liquid impact, by solid impact, and by shock // *Proceedings of the Royal Society A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1964. Vol. 282. No. 1390, pp. 331-352. DOI: 10.1098/rspa.1964.0236
22. *Grinspan A.S., Gnanamoorthy R.* Impact force of low velocity liquid droplets measured using piezoelectric PVDF film // *Colloids & Surfaces A: Physicochemical & Engineering Aspects*. 2010. Vol. 356. No. 1-3, pp. 162-168. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2010.01.005
23. *Lesser M.B., Field J.E.* The Impact of Compressible Liquids // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1983. Vol. 15, pp. 97-122. DOI: 10.1146/annurev.fl.15.010183.000525
24. *Heymann F.J.* On the Shock Wave Velocity and Impact Pressure in High-Speed Liquid-Solid Impact // *Journal of Fluids Engineering*. 1968. Vol. 90. No. 3, pp. 400-402. DOI: 10.1115/1.3605114
25. *Lu Y., Huang F., Liu X., Ao X.* On the failure pattern of sandstone impacted by high-velocity water jet // *International Journal of Impact Engineering*. 2015. Vol. 76. No. 2, pp. 67-74. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.09.008
26. *Meng Y., Yi W.J.* Design and calibration of PVDF stress gauge and its application in the impact test of concrete // *Journal of Hunan University (Natural sciences)*. 2009. Vol. 36. No. 12, pp. 1-5 (in Chinese).
27. *Chen J.* Analysis and improvement of test method for laminar shearing strength of stretched acrylic // *Journal of Gansu Lianhe University (Natural Sciences)*. 2009. Vol. 23. No. 6, pp. 29-33 (in Chinese).
28. *Fan J.J., Zhang W.F., Chen X.W.* Investigation of tensile fracture behavior of directional PMMA // *Journal of Aeronautical Materials*. 2006. Vol. 26. No. 5, pp. 106-108 (in Chinese).
29. *Gujba A.K., Hackel L., Kevorkov D., Medraj M.* Water droplet erosion behaviour of Ti-6Al-4V and mechanisms of material damage at the early and advanced stages // *Wear*. 2016. Vol. 358-359, pp. 109-122. DOI: 10.1016/j.wear.2016.04.008
30. *Wang Y.C., Chen Y.W.* Application of piezoelectric PVDF film to the measurement of impulsive forces generated by cavitation bubble collapse near a solid boundary // *Experimental Thermal & Fluid Science*. 2008, Vol. 32. No. 2, pp. 403-414. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2007.05.003

31. Zhang R., Zhang B., Lv Q. et al. Effects of droplet shape on impact force of low-speed droplets colliding with solid surface // *Experiments in Fluids*. 2019. Vol. 60. No. 64. DOI: 10.1007/s00348-019-2712-7

References

- Coad E.J., Pickles C.S.J., Seward C.R. et al. The Erosion Resistance of Infrared Transparent Materials. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, vol. 454, no. 1968, pp. 213-238. DOI: 10.1098/rspa.1998.0155
- Coad E.J., Pickles C.S.J., Jilbert G.H., Field J.E. Aerospace erosion of diamond and diamond coatings. *Diamond and Related Materials*, 1996, vol. 5, no. 6-8, pp. 640-643. DOI: 10.1016/0925-9635(95)00403-3
- Seward C.R., Coad E.J., Pickles C.S.J., Field J.E. The liquid impact resistance of a range of IR-transparent materials. *Wear*, 1995, vol. 186-187, part 2, pp. 375-383. DOI: 10.1016/0043-1648(95)07150-4
- Seward C.R., Pickles C.S.J., Marrah R., Field J.E. Rain erosion data on window and dome materials. *Window and Dome Technologies and Materials III*, 1992, vol. 1760, pp. 280-290. DOI: 10.1117/12.130805
- Adler W.F., Hooker S.V. Water drop impact damage in zinc sulfide. *Wear*, 1978, vol. 48, no. 1, pp. 103-119. DOI: 10.1016/0043-1648(78)90141-2
- Fyall A.A. Practical Aspects of Rain Erosion of Aircraft and Missiles. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1966, vol. 260, no. 1110, pp. 161-167. URL: <https://www.jstor.org/stable/73547>
- Field J.E., Hand R.J., Pickles C.J. Strength and Rain Erosion Studies of I.R. Materials, *Window and Dome Technologies and Materials*, 1989, vol. 1112, pp. 306-315. DOI: 10.1117/12.960789
- Wang Z.Y., Wang Y.Q., Du X.X., et al. Mechanical behavior and engineering application of PMMA, *The National Symposium on Structural Engineering*, 2015 (in Chinese).
- Deng X.Q., Li Z.Q., Zhao L.M. et al. A review on mechanical behaviour of PMMA. *Mechanics in Engineering*, 2014, vol. 36, no. 5, pp. 540-550 (in Chinese).
- Guo W.G., Shi F.F. Deformation and failure behavior of MDYB-3 oriented PMMA glass under different loading conditions. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, vol. 29, no. 06, pp. 112-120 (in Chinese).
- Qin R.X., OuY.C., Zhang B.J. et al. The contrast of competitive properties between YB-3 and DYB-3 aviation sheet. *China building materials science & technology*, 2011, vol. 01, pp. 29-31 (in Chinese).
- Zhang Z.L. Design theory and application for transparency of aircraft canopy and windshield, *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005 (in Chinese).
- Field J.E. ELSI conference: invited lecture: Liquid impact: theory, experiment, applications. *Wear*, 1999, vol. 233-235, pp. 1-12. DOI: 10.1016/S0043-1648(99)00189-1
- Adler W.F., Boland P.L. Multiparticle supersonic impact test program. *34th Annual International Technical Symposium on Optical and Optoelectronic Applied Science and Engineering (1990, San Diego, CA, USA)*, 1990, vol. 1326, pp. 268-279.
- Tobin E.F., Young T.M., Raps D., Rohr O. Comparison of liquid impingement results from whirling arm and waterjet rain erosion test facilities. *Wear*, 2011, vol. 271, no. 9-10, pp. 2625-2631. DOI: 10.1016/j.wear.2011.02.023
- Adler W.F. Rain impact retrospective and vision for the future. *Wear*, 1999, vol. 233-235, pp. 25-38. DOI: 10.1016/S0043-1648(99)00191-X
- Obara T., Bourne N.K., Field J.E. Liquid-jet impact on liquid and solid surfaces. *Wear*, 1995, vol. 186-187, part 2, pp. 388-394. DOI: 10.1016/0043-1648(95)07187-3
- Bowden F.P., Brunton J.H. The Deformation of Solids by Liquid Impact at Supersonic Speeds. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1961, vol. 263, no. 1315, pp. 433-450. URL: <https://www.jstor.org/stable/2414324>
- Bourne N.K., Obara T., Field J.E. High-speed photography and stress gauge studies of jet impact upon surfaces. *Philosophical Transactions of the Royal Society A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1997, vol. 355, no. 1724, pp. 607-623. DOI: 10.1098/rsta.1997.0028
- Shi H.H., Field J.E. Stress wave propagation in solid material under high velocity liquid impingement. *Scientia Sinica Physica Mechanica Astronomica*, 2004, vol. 34, no. 5, pp. 577-590 (in Chinese).
- Bowden F.P., Field J.E. The brittle fracture of solids by liquid impact, by solid impact, and by shock. *Proceedings of the Royal Society A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1964, vol. 282, no. 1390, pp. 331-352. DOI: 10.1098/rspa.1964.0236
- Grinspan A.S., Gnanamoorthy R. Impact force of low velocity liquid droplets measured using piezoelectric PVDF film. *Colloids & Surfaces A: Physicochemical & Engineering Aspects*, 2010, vol. 356, no. 1-3, pp. 162-168. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2010.01.005
- Lesser M.B., Field J.E. The Impact of Compressible Liquids. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1983, vol. 15, pp. 97-122. DOI: 10.1146/annurev.fl.15.010183.000525
- Heymann F.J. On the Shock Wave Velocity and Impact Pressure in High-Speed Liquid-Solid Impact. *Journal of Fluids Engineering*, 1968, vol. 90, no. 3, pp. 400-402. DOI: 10.1115/1.3605114

25. Lu Y., Huang F., Liu X., Ao X. On the failure pattern of sandstone impacted by high-velocity water jet. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, vol. 76, no. 2, pp. 67-74. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.09.008
26. Meng Y., Yi W.J. Design and calibration of PVDF stress gauge and its application in the impact test of concrete. *Journal of Hunan University (Natural sciences)*, 2009, vol. 36, no. 12, pp. 1-5 (in Chinese).
27. Chen J. Analysis and improvement of test method for laminar shearing strength of stretched acrylic. *Journal of Gansu Lianhe University (Natural Sciences)*, 2009, vol. 23, no. 6, pp. 29-33 (in Chinese).
28. Fan J.J., Zhang W.F., Chen X.W. Investigation of tensile fracture behavior of directional PMMA. *Journal of Aeronautical Materials*, 2006, vol. 26, no. 5, pp. 106-108 (in Chinese).
29. Gujba A.K., Hackel L., Kevorkov D., Medraj M. Water droplet erosion behaviour of Ti–6Al–4V and mechanisms of material damage at the early and advanced stages. *Wear*, 2016, vol. 358-359, pp. 109-122. DOI: 10.1016/j.wear.2016.04.008
30. Wang Y.C., Chen Y.W. Application of piezoelectric PVDF film to the measurement of impulsive forces generated by cavitation bubble collapse near a solid boundary. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2008, vol. 32, no. 2, pp. 403-414. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2007.05.003
31. Zhang R., Zhang B., Lv Q. et al. Effects of droplet shape on impact force of low-speed droplets colliding with solid surface. *Experiments in Fluids*, 2019, vol. 60, no. 64. DOI: 10.1007/s00348-019-2712-7

Статья поступила в редакцию 29.06.2022; одобрена после рецензирования 13.07.2022; принята к публикации 17.07.2022.

The article was submitted on 29.06.2022; approved after reviewing on 13.07.2022; accepted for publication on 17.07.2022.