

Труды МАИ. 2022. № 126

Trudy MAI, 2022, no. 126

Научная статья

УДК 531.39

DOI: [10.34759/trd-2022-126-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-10)

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ
КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА
ОТ ДОЖДЕВОЙ КАПЛЕУДАРНОЙ ЭРОЗИИ**

Ша Мингун¹✉, Сунь Ин²

¹Северо-Западный политехнический университет,

Западная дорога дружбы, 127, Сиань, 710072, Китайская Народная Республика

¹Научно-исследовательский институт дельты реки Янцзы Северно-Западного политехнического университета, Новый город науки и образования, 27, Тайцан, 215400, Китайская Народная Республика

²Ханчжоуский технический колледж Сяошань, Южная дорога Тонхуэй, 448, Ханчжоу, 311200, Китайская Народная Республика

¹shamg2020@nwpu.edu.cn✉

Аннотация. Когда летательный аппарат (ЛА) проходит через зону дождя на

большой скорости, при воздействии дождевой каплеударной эрозии поверхность ЛА повреждается или отслаивается ^[1,2]. Несмотря на то, что капли дождя малы по размеру и массе, их многократное попадание на поверхность ЛА приведет к снижению прочности материала, ухудшению физико-механических свойств и, таким образом, повлияет на функциональность конструкционных материалов, в результате приводит к повреждению обтекателя, элементов теплозащит, руля направления и поверхности покрытия конструкции, соответственно изменяется геометрия поверхности конструкции самолета, что серьезно снижает безопасность полета. На базе легко-газовой пушки первого уровня для испытания материала на дождевую эрозию была построена одноструйная ударная платформа. Одноструйно-ударного испытания с различными скоростями и диаметрами было проведено на композитном ламинате с матрицей из углеродного волокна и смолы. Результаты показывают, что типичная морфология повреждения композитного материала при действии одноструйной воды выглядит следующим образом: поверхность удара вогнута, центр практически не поврежден, вокруг него формируется кольцеобразная зона повреждения, в основном состоит из удара смолы, растрескивания матрицы и не большого разрыва волокна. Внутренние повреждения состоят из растрескивания матрицы и межслойного расслоения. Размер повреждения имеет типичную анизотропию, а продольный размер больше поперечного, с увеличением скорости и диаметра струи, размеры поверхностного кольцевого повреждения и внутреннего повреждения увеличиваются как наружу, так и площадь кольцевого повреждения и внутреннего расслоения также увеличивается. Взаимодействие сжатия и разгрузки давления гидравлического удара, сдвига боковой струи и волны напряжения

является основным механизмом одноструйного ударного разрушения для КОМПОЗИТОВ.

Ключевые слова: жидкостно-твердое воздействие, водяная струя, композиционный материал, каплеударная 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 Мингун, Сунь Ин. Экспериментальное исследование повреждений конструкции из композитных материалов высокоскоростного летательного аппарата от дождевой каплеударной эрозии // Труды МАИ. 2022. № 126.

DOI: [10.34759/trd-2022-126-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-10)

Original article

EXPERIMENTAL STUDY OF DAMAGE TO THE STRUCTURE OF COMPOSITE MATERIALS OF HIGH-SPEED AIRCRAFT FROM RAINDROP IMPACT EROSION

Sha Mingong^{1✉}, Sun Ying²

¹Northwestern Polytechnical University,

710072, 127, West Youyi Road, Beilin District, Xi'an Shaanxi, P.R.China

¹Yangtze River Delta Research Institute of NPU.215400, 27, Zigang Road, Science and Education New Town, Taicang City, Jiangsu Province, P.R. China

²Department of Mechanical Engineering, Hangzhou Xiaoshan Technician College, 448

Tonghui South Road, Hangzhou City, 311200, P.R. China

shamg2020@nwpu.edu.cn✉

Abstract: Bodies moving at very high speeds through a rain-field can experience severe damage caused by the impingement of raindrops on their surfaces. This effect is usually referred to as “rain erosion”. Rain erosion has been a concern of the aviation industries for many decades, and rain erosion resistance is one extremely important parameter of the interaction of materials with the flight environment. In this paper, a single waterjet impact test platform was established based on the first-stage light gas gun in order to conduct the rain erosion tests on materials. Its principle was that the gas gun launches a metallic projectile to impact the water storage chamber sealed by the rubber piston, and then the liquid was driven from the small nozzle to form a high-speed waterjet. The apparatus could generate stable waterjets with speeds of 200–600 m/s, diameters of 4–7 mm and a smooth circular-arc head, which simulated a waterdrop with the same diameter. A series of single waterjet impact tests were carried out on a symmetrically cross-ply carbon-fiber-reinforced composite (CFRP) laminate under different waterjet velocities and diameters. The results show that the typical damage modes of CFRP laminates impacted by single waterjets are as follows. The impacted surface is depressed, and the surface damage consists of resin removal, matrix cracking, minor fiber fracture and fiber exposure around the rim of a central undamaged region. The internal damage range gradually expands from the impact surface to the bottom ply, mainly composed of intralaminar matrix cracking with a pyramid shape and interlaminar delamination with a diamond shape. Both the surface and internal damage are more extensive in the longitudinal than the transversal direction, thus presenting typical.

Keywords: liquid-solid impact, water jet, composite material, drop impact erosion

Funding: the work was supported by:

-Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2021JQ 081)

-Basic Research Programs of Taicang (TC2020JC14).

For citation: Mingong Sha, Ying Sun. Experimental study of damage to the structure of composite materials of high-speed Aircraft from raindrop impact erosion. *Trudy MAI*, 2022, no. 126. DOI: [10.34759/trd-2022-126-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-10)

Введение

Когда ЛА летит над облаками с высокой скоростью, поверхность конструкции будет постоянно подвергаться воздействию дождевой каплеударной эрозии, вызванное чрезвычайно высокой относительной скоростью между ними, это легко вызвать повреждение или даже отслоение поверхности материала. Для поверхности обшивки с невидимым покрытием это также вызовет такие проблемы, как выход из строя невидимости, сокращение жизненного цикла ЛА. Что касается проблемы дождевой эрозии, более ранние исследования начались в 1940-х и 1950-х годах, и ее можно абстрагировать как проблему высокоскоростного удара жидкости-твердого тела. Engel^[3] изучал механизм процесса дождевой эрозии, и высокоскоростной удар капли был эквивалентен низкоскоростному удару шара из мягкого металла. В 1960-х годах, лаборатория от имени Cavendish разработала первый аппарат с одноструйным ударом (single impact jet apparatus, SIJA)^[4], который использовался для исследования высокоскоростного удара жидкости-твердого тела экспериментальным путем, а затем исследования дождевой эрозии перешли в стадию высокоскоростного

развития. Adler^[5] проанализировал исследования удара капли с точки зрения повреждения материала и полагал, что из-за выкрашивания материала трудно иметь теорию, позволяющую разумно предсказать повреждение материалов ударом капли. Поэтому сложно будет построена количественная связь между макроскопическими механическими свойствами и повреждением от дождевой. Field^[6] рассмотрел проблему взаимодействия жидкости с твердым телом с точки зрения базовой теории и многопрофильных приложений, экспериментального оборудования, такого как струйные устройства и высокоскоростные камеры, а также результаты повреждения материала от каплеударной эрозии, и указал, что в начальный период на стадии соударения сверхзвуковое расширение периферии контакта является основной причиной повреждений при столкновении жидкости-твердого тела. SHI H H^[7], MAO J R^[8] начали экспериментальные исследования дождевой эрозии в конце 20-го века, используя сверхзвуковой генератор жидкостной струи собственной разработки и поляризованную оптическую систему для изучения воздействия динамики оргстекла (ПММА) в высокоскоростных струях. SUN B^[9] и ZHANG D^[10,11] провели исследование численного моделирования высокоскоростного столкновения жидкости с твердым телом с помощью установленной нелинейной волновой модели и применили результаты исследования к инженерной практике. Wang Z J^[12] провели испытание оптических материалов на дождевую каплеударную эрозию и построили экспериментальную платформу с вращающимся рычагом, скорость его вращения может достигать до 1570 об/мин, а осевая скорость образца составляет 200 м/с, что обеспечивает эффективное средство для исследования дождевой эрозии материалов.

В дополнение к дождевой каплеударной эрозии ЛА, технические области

водяной эрозии лопаток паровых турбин и гидроабразивной резки связаны с проблемой высокоскоростного удара жидкости-твердого тела. Поэтому большое инженерное значение имеет глубокое исследование механизма динамического поведения жидкостей и материалов при высокоскоростном соударении жидкости-твердого тела. С ростом применения композитных материалов в аэрокосмической и других областях необходимо проводить систематические исследования повреждений композитных материалов от дождевой каплеударной эрозии.

1. Теория высокоскоростного удара жидкости - твердого тела

Процесс удара жидкости-твердого тела можно разделить на две стадии: сжатие жидкости и боковое впрыскивание. Во-первых, в начальный период контакта жидкости с твердой поверхностью, как показано на рис. 1(а), скорость контактной границы между каплями и твердой поверхностью выше, чем скорость ударной волны внутри капли, и ударная волна контактная граница препятствует формированию огибающей поверхности, которая содержит жидкость внутри границы раздела сжимается, образуя переходное высокое давление. Если не учитывать деформацию твердого тела, центральное давление капли, ударяющей о твердую плоскость, равно:

$$p = \rho_1 c_1 v \quad (1)$$

Это давление называют «давлением гидроудара»^[13-15], где v - скорость удара, а ρ_1 - плотность, c_1 - волновая скорость жидкости. Если рассматривать упругость твердого тела, то согласно волновой теории напряжений существуют^[20]:

$$p_c = \frac{\rho_1 c_1 \rho_s c_s}{\rho_1 c_1 + \rho_s c_s} v \quad (2)$$

где ρ_s и c_s - плотность и скорость волны твердого тела соответственно.

Теоретически, если это напряжение превышает предел текучести материала, существует вероятность повреждения материала. В настоящей работе для исследуемых композиционных материалов ρ_s и c_s можно оценить по следующим формулам^[16]:

$$\rho_s = \rho_f \varphi_f + \rho_m \varphi_m \quad c_s = \sqrt{E_{22} / \rho_s} \quad (3)$$

где φ - объемная доля, нижние индексы f и m обозначают волокно и матрицу соответственно, а E_{22} - эквивалентный модуль Young's, перпендикулярный направлению волокна. Давление гидравлического удара создается в пределах заданного радиуса контакта, определяемого выражением^[17]:

$$R = \frac{rv}{c_1} \quad (4)$$

где: r – радиус кривизны водяной капли.

Когда скорость ударной волны внутри капли приближается к скорости границы контакта жидкости-твердого тела, ударная волна отрывается от ограничения и сбрасывает давление, а сформированная волна растяжения разгрузки распространяется внутрь жидкости и материала. Соответственно, как показано на рис. 1(б) удар жидкости-твердого тела переходит во вторую стадию, сжатая жидкость быстро выбрасывается после разгрузки волны, а граница контакта расширяется к свободной поверхности со скоростью звука воды, и жидкость образует боковую струю вдоль поверхности твердого тела. Скорость боковой струи

обычно в несколько раз превышает начальную скорость удара жидкости-твердого тела. В то же время поперечные волны и волны Рэлея также будут распространяться внутрь и на поверхность материала соответственно, что легко вызвать выкрашивание поверхности материала и распространение микротрещин.

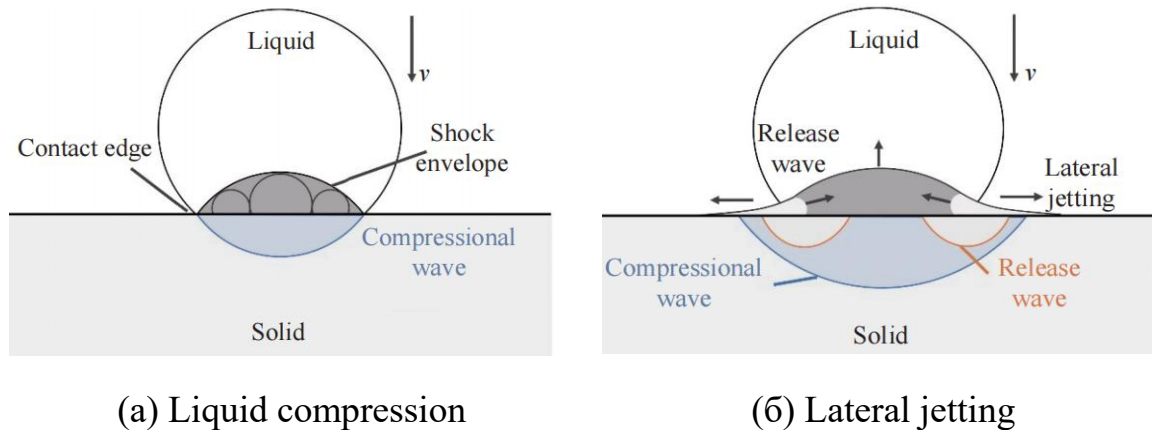


Рис.1 Принципиальная схема процесса удара жидкости-твердого тела

Когда волна сжатия, генерируемая поверхностью жидкости-твердого тела, отражается обратно к центру жидкости, сброс давления гидроудара считается завершенным, а время продолжительности всего давления гидроудара определяется выражением:

$$\tau = \frac{3rv}{2c_1^2} \quad (5)$$

После этого жидкость постепенно образует на поверхности твердого тела устойчивую несжимаемую жидкость, а давление в центральной точке поверхности твердого тела долгое время будет сохраняться на низком значении, которое определяется статическим давлением Bernoulli:

$$p_i = \frac{\rho_1 v^2}{2} \quad (6)$$

Стоит отметить, что в момент высокоскоростного удара капли сильное сжатие

может существенно изменить скорость распространения ударной волны в жидкости, количественную оценку этого эффекта можно дать:

$$c_1 = c_0 + kv \quad (7)$$

В формуле: c_0 - скорость звука воды (около 1500 м/с), k - константа, при скорости удара $v < 1000$ м/с можно принять $k=2$ [18].

Из приведенного выше вывода можно обнаружить, что величина давления гидравлического удара не имеет ничего общего с диаметром капли воды, а продолжительность этого давления и радиус контакта принимаются как зависят от диаметра капли и скорости удара, а также от скорости сжимаемой волны жидкости.

2. Платформа для испытаний на удар с одноструйным каплем

Используемая одноструйная платформа для испытаний на удар основана на принципе генерации струйной установки (single impact jet apparatus, SIJA) Cavendish лаборатории, и на модификации легкогазовой пушки с калибром 10 мм. Как показано на рис. 2, платформа состоит из 3 основных частей: первая часть представляет собой пусковое устройство, которое используется для запуска высокоскоростных пуль, включая воздушную камеру, ствол пушки, пуледержатель с уплотнительным кольцом. (①) и пуля (②), эжектор (④) и т. д.; часть 2 - для возникновения струй, включая полость для хранения воды (⑤) и кронштейны, приспособления для образцов (⑦), и т. д.; часть 3 - это дополнительное измерительное оборудование, которое можно отрегулировать в соответствии с планом и целью контроля, например, катушка электромагнитной индукции (③) для измерения скорости пули и система высокоскоростной камеры (⑥), которая измерит

форму струи. Перед экспериментом в полости из нержавеющей стали заранее хранилось определенное количество чистой воды, а отверстие в конце полости закрывалось неопреновой резиной подходящего размера и толщины, а затем металлическая пуля приводилась в движение высоко-давлением газа ударит по уплотнительной резине, и огромная кинетическая энергия, генерируемая ударом, окажется в полости образует мгновенное высокое давление, которое заставляет жидкость выбрасываться из небольшого сопла, тем самым формируя высокоскоростной водяная струя.

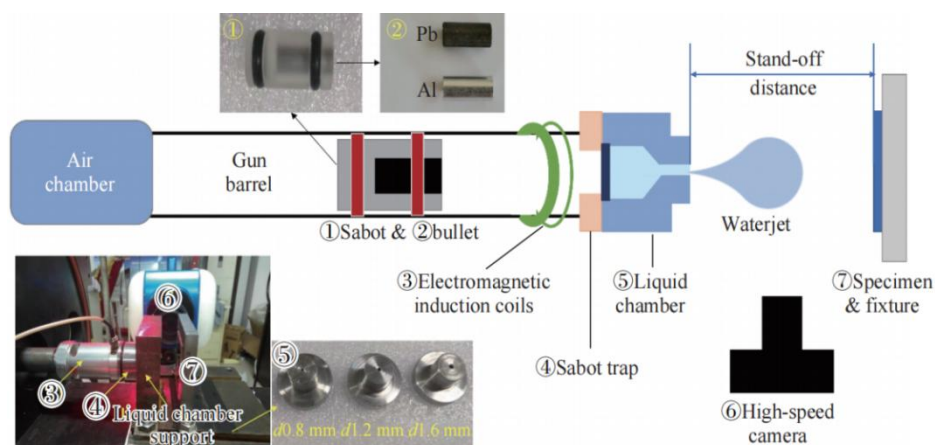


Рис. 2 Устройство для испытания на удар с одноструйным каплем

Для реализации водяных струй с разными диаметрами, были спроектированы три водоаккумулирующие полости с диаметрами сопел 0,8, 1,2 и 1,6 мм. Пули были изготовлены из алюминия или свинца и имели цилиндрическую форму с диаметром 5 мм и длиной 10 мм. Измерить скорость металлических пуль парой катушек электромагнитной индукции, когда пуля достигает до выхода из ствола пушки, две катушки индуктивности, установленные на выходе пушки, будут воздействовать на металлическую пулю, а магнитное поле изменится, чтобы генерировать два импульсных сигнала. Разница во времени между ними получается через устройство

сбора данных, и вычисляется скорость движения пули. Используя технологию высокоскоростной обработки изображений камеры Phantom V711 для визуализации формы водяной струи, разрешение изображения составляет 128×128 , а интервал съемки составляет 4,75 мкс; В соответствии с соотношением между точками пикселей калибровочного образца и фактическим расстоянием можно рассчитать диаметр и скорость струи.

При одноструйном ударном испытании форма и скорость струи постоянно изменяются в процессе распространения в воздухе после выброса. Необходимо найти подходящее положение для установки образца, поэтому необходимо изучить изменение формы струи со перемещением. На рис. 3 представляет собой непрерывное изображение, когда скорость струи воды составляет 325 м/с. Установлено, что струя имеет цилиндрическую форму, когда она только выбрасывается из сопла (①); полость загружается, определенный объем воды выбрасывается с большей скоростью, движется в воздухе и постепенно образует водяной туман в форме «грибоводяной головки» (③); С продолжением движения капли струи, мелкие капли впереди тормозятся и рассеиваются наружу за счет сопротивления воздуха, а идущие следом мелкие капли воды ускоряются и вылетают из сопла, образуя новую форму головки струи, таким образом показывая макроскопически стабильный центр скорости "водяной массы". Группа окружена замедляющимся "водяным туманом" (④ ~ ⑤ на рис. 3). В итоге гладкая и регулярная передняя кромка струи будет быстро распространяться из-за неустойчивости Taylor (⑥ на рис. 3), после чего водяная струя по существу

превратится в дискретные капли воды в воздухе, которые больше не могут быть проведено испытание на каплеударную эрозию^[19,20].

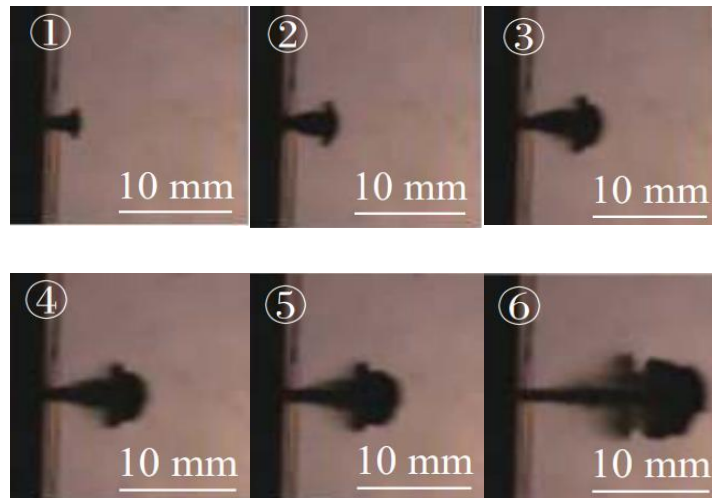
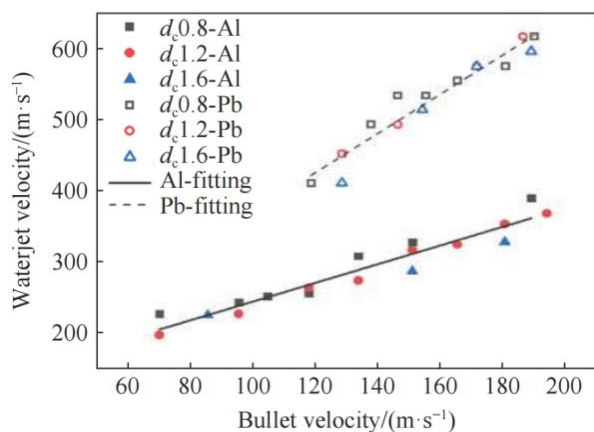
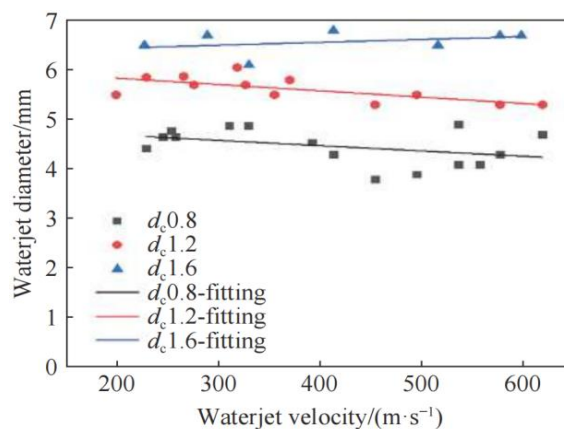


Рис.3 Закон изменения формы струи

Некоторые выводы представлены: (1) Устройство может генерировать стабильную струю воды со скоростью 200-600 м/с и диаметром 4-7 мм, форма струи воды имеет хорошую повторяемость, особенно скорость 400 м/с должна создаваться при стрельбе алюминиевыми пулями, а водяная струя со скоростью более 400 м/с создается при стрельбе свинцовыми пулями; (2) соотношение скорость струи к пули составляет примерно 2 - 3. Отношение скорости струи, создаваемой свинцовыми пулями к скорости пули, составляет 3 - 5, как показано на рисунке 4 (а). разные скорости струи могут быть достигнуты подбором материала и скорости пули, при этом диаметр сопла мало влияет на скорость струи; (3) при одной и той же скорости струи диаметр увеличивается с увеличением диаметра сопла, как на рис. 4(б).



(а) Зависимость между скоростью пули и скоростью водяной струи



(б) Зависимость между скоростью и диаметром водяной струи

Рис.4 Результаты испытаний водяной струи для одноструйного генератора

3. Испытание водно-струйного высокоскоростного каплеудара на композит с матрицей из углеродного волокна

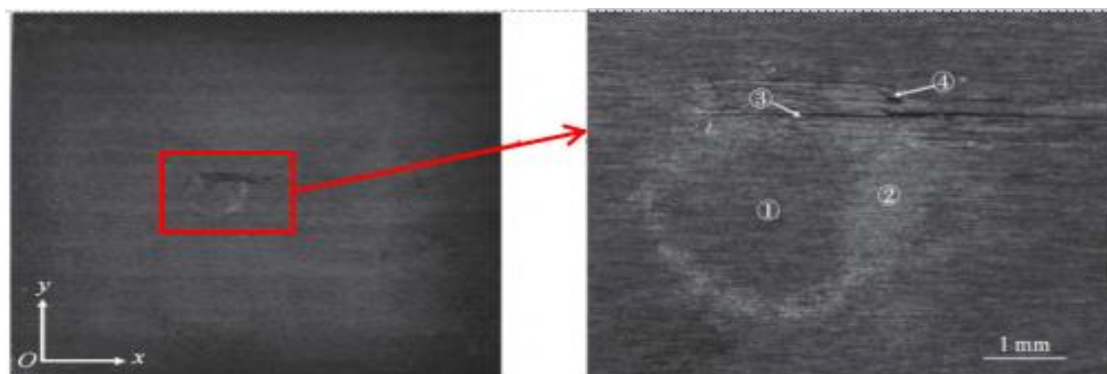
Используемый композитный материал с матрицей из углеродного волокна и эпоксидной смолы изготовлен по однонаправленному тканевому препрегу T700/7901 методом автоклавного формования, а параметры материала показаны в таблице 1. Всего в образце 8 слоев, последовательность слоев - $[0, 90]_{2s}$, длина и ширина образца - 28 мм, средняя толщина - 1,1 мм. При испытании образец зажимался на жестком приспособлении с задним отверстием длиной и шириной 16 мм, а ударная поверхность была перпендикулярна направлению струи.

Таблица 1. Механические параметры односторонней плиты T700/7901

Объемная доля волокна, $\varphi/\%$	$E_{11}/$ ГПа	$E_{22}/$ ГПа	$G_{12}/$ ГПа	V_{12}	$X_t/$ МПа	$X_c/$ МПа	$Y_t/$ МПа	$Y_c/$ МПа	$S_{12}/$ МПа
66	115	9	3,3	0,33	2300	1050	42	143	116

3.1 Наблюдение и характеристика типичного повреждения образцов после удара

На рис. 5 представлено изображение поверхности образца после одноструйной воды со скоростью 557 м/с и диаметром 6,3 мм. Результаты микроскопии показали, что поврежденная область состояла из почти круглой неповрежденной центральной области (① на рис. 5(б), диаметр около 1,8 мм) и обесцвеченного «кольца разрушения» с отслоением смолы (②). треснул матрицы (③) и несколько волокон оборваны (④). «Затухание» в кольцевой области вызвано обнажением волокна и подповерхностное рассеяние, вызванное удалением смолы из поверхностного слоя. Размер этого кольцевого повреждения больше в продольном направлении, чем в поперечном, и является анизотропным. Стоит отметить, что диаметр крайней кромки поверхностного повреждения (3,63 мм) меньше диаметра ударной струи, т.е. деформация имеет типичную локальность. Форма поверхности кольцевого повреждения была измерена вдоль направления волокна и перпендикулярно направлению волокна, соответственно, как показано на рис. 6, продольная форма представляет собой вогнутую форму «U». Ямка имеет ширину около 4,2 мм и глубину около 25 мкм, а поперечная форма представляет собой «V» углубление с глубиной до 65 мкм, что обусловлено растрескиванием матрицы на месте ③.



(а) Образец после каплеударного воздействия

(б) Микроскопическое изображение повреждения поверхности

Рис.5 Результаты микроскопического наблюдения характерных повреждений на поверхности композитных образцов после одноструйной воды.

На рис. 7 показаны результаты С-сканирования образца, причем разные цвета представляют разные глубины, на которые может достигать отраженный сигнал, т. е. глубину расслоения. Хорошо видно, что вблизи центра удара имеется веретенообразный диапазон расслоения, длиной в продольном направлении 13,67 мм и в поперечном направлении 9,73 мм, который также проявляет явную анизотропию, причем чем ближе к нижней поверхности, тем больше диапазон расслаивания. По сравнению с рисунком 5 можно заметить, что диапазон повреждений от расслоения может быть в несколько раз больше, чем размер повреждений поверхности, поэтому повреждение из-за высокоскоростной дождевой эрозии для композитных ламинатов недостаточно точно количественно определить степень повреждения от дождевой эрозии поверхностным кольцевым повреждением. Чтобы более наглядно наблюдать за внутренними повреждениями образца, образец был разрезан вдоль оси поверхностного кольца, и после шлифовки мелкой наждачной бумагой, поверхность среза наблюдалась под оптическим микроскопом,

как показано на рисунке 8. Можно обнаружить, что внутренние повреждения в основном состоят из растрескивания матрицы и межслоевого расслоения, а от ударной поверхности к основанию область повреждений постепенно расширяется, демонстрируя форму «пирамиды»; после локального увеличения видно, что растрескивается матрица в слое, обычно проявляется по всему слою макроскопическая трещина связана с повреждением расслоения двух соседних слоев, причем чем ближе к нижней поверхности, тем больше длина и ширина трещины.

На рис. 9 приведена схема типичной морфологии повреждений композитного образца после воздействия высокоскоростной водной струи с указанием размеров поверхностных и внутренних повреждений, где размер поверхностных повреждений D_2 представляет собой минимальный диаметр без повреждения в центральном диапазоне, а D_1 представляет собой диаметр самого внешнего края от поверхностного повреждения; размер внутреннего повреждения L_x представляет собой продольную длину в области расслоения, L_y - поперечную длину в области расслоения, а S_{xy} - площадь в области расслоения. В таблице 2 представлены результаты испытаний при различных скоростях и диаметрах струи и будут подробно проанализированы ниже.

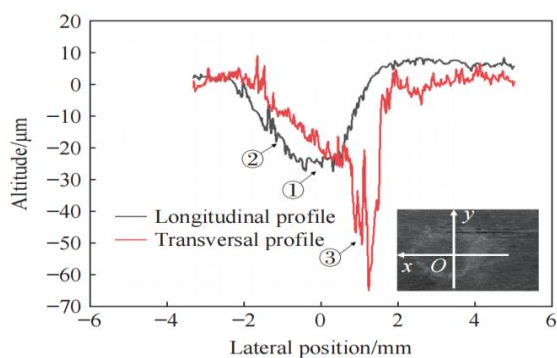


Рис. 6 Форма поверхностного повреждения в кольцевой зоне

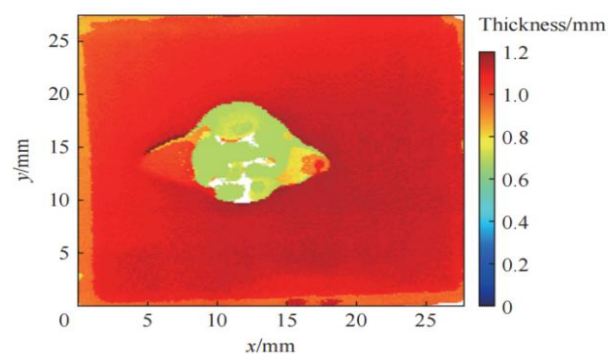


Рис. 7 Результаты С-сканирования образца после одноструйного каплеудара

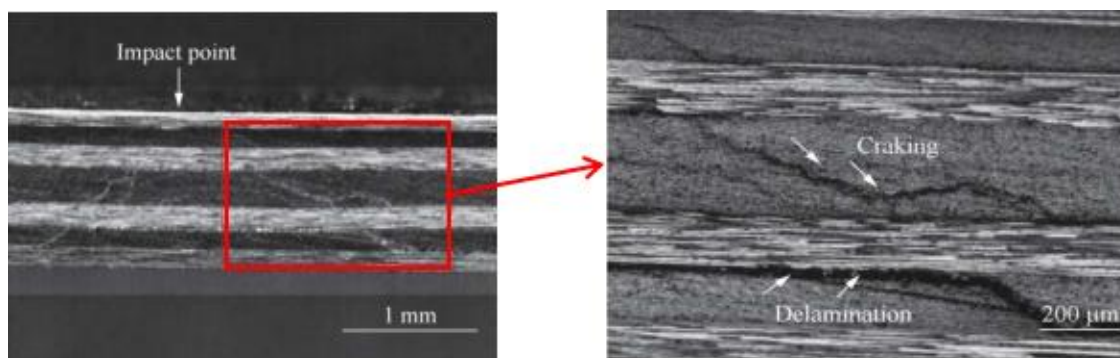


Рис. 8 Результаты микроскопии поперечного сечения, перпендикулярной поверхности.

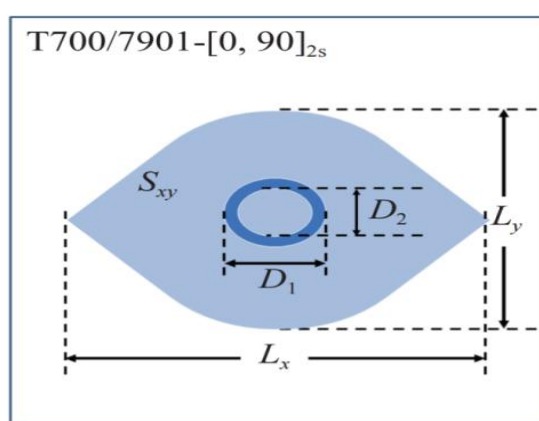


Рис. 9 Схематическая диаграмма типичной морфологии повреждений при воздействии водной высокоскоростной струи на образцы из композита

Таблица 2 Результаты разрушения композитных образцов каплеударом с различной скоростью и диаметром

№	V/(m/s)	d/mm	D_2 /mm	D_1 /mm	L_x /mm	L_y /mm	S_{xy} /mm ²
1	300	5.7	0	0	0	0	0
2	343	4.9	0	0	0	0	0
3	343	5.7	0.74	2.07	2.004	2.406	3.139
4	386	5.7	0.89	2.25	4.431	3.302	10.138
5	407	4.9	0.75	2.26	1.886	2.484	3.398
6	407	5.7	1.18	2.9	5.303	4.699	17.049

7	428	4.9	0.96	2.39	4.636	2.897	7.776
8	428	5.7	1.41	3.02	7.103	5.222	25.113
9	428	6.7	1.50	3.27	9.154	6.147	31.531
10	471	4.9	1.05	2.49	4.454	4.301	15.379
11	514	6.7	1.59	3.54	11.935	7.246	45.216
12	557	4.9	1.51	2.76	12.024	8.049	45.173
13	557	5.7	1.80	3.63	12.579	9.732	75.772
14	557	6.3	1.90	3.77	13.673	10.963	88.678

3.2 Результаты испытаний струи при различных скоростях струи

На рисунке 10 представлены результаты испытаний струи с различными скоростями при диаметре струи 5,7 мм. Видно, что при скорости 343 м/с на поверхности почти не видно повреждений, и наблюдается лишь небольшое количество отслоений, обнаружено внутри центра удара в пределах около 2 мм повреждения, при увеличении скорости до 407 м/с на поверхности появилось типичное кольцевое повреждение с преобладанием удаления смолы, а также расширилась зона внутреннего расслоения, приняв овальную форму; когда скорость достигает до 557 м/с, поверхностное кольцевое повреждение более серьезное, кольцевая ширина увеличивается, не только расширяется диапазон удаления смолы, но и матрица растрескивается вдоль направления волокна, зона повреждения внутреннего расслоения еще больше увеличивается и представляет собой веретенообразной формы.

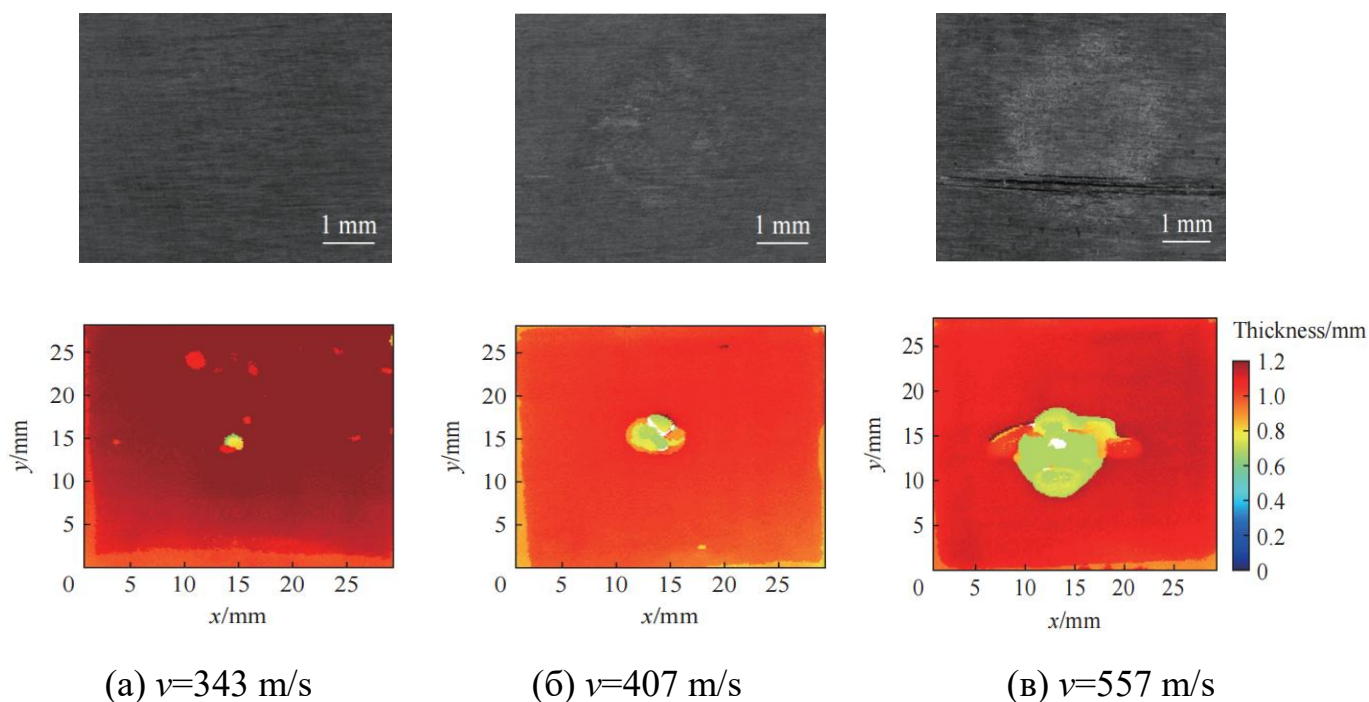


Рис.10 Результаты микроскопии и С-сканирования струйного удара на композитный образец с диаметром 5,7 мм при различных скоростях

3.3 Результаты испытаний при различных диаметрах струи

На рисунке 11 представлены результаты испытаний струи с различными диаметрами при скорости 557 м/с. Видно, что с увеличением диаметра струи размер кольцевого повреждения продолжает увеличиваться наружу, а площадь удаления смолы в кольцо увеличивается и постепенно начинается растрескивание матрицы вдоль направления волокон (от (а) к (б)), а также увеличиваются размер и количество трещин (от (б) к (в)); повреждение внутреннего расслоения постоянно имело типичную веретенообразную форму, но увеличение диаметра струи приводит к соответствующему увеличению площади повреждения от расслоения.

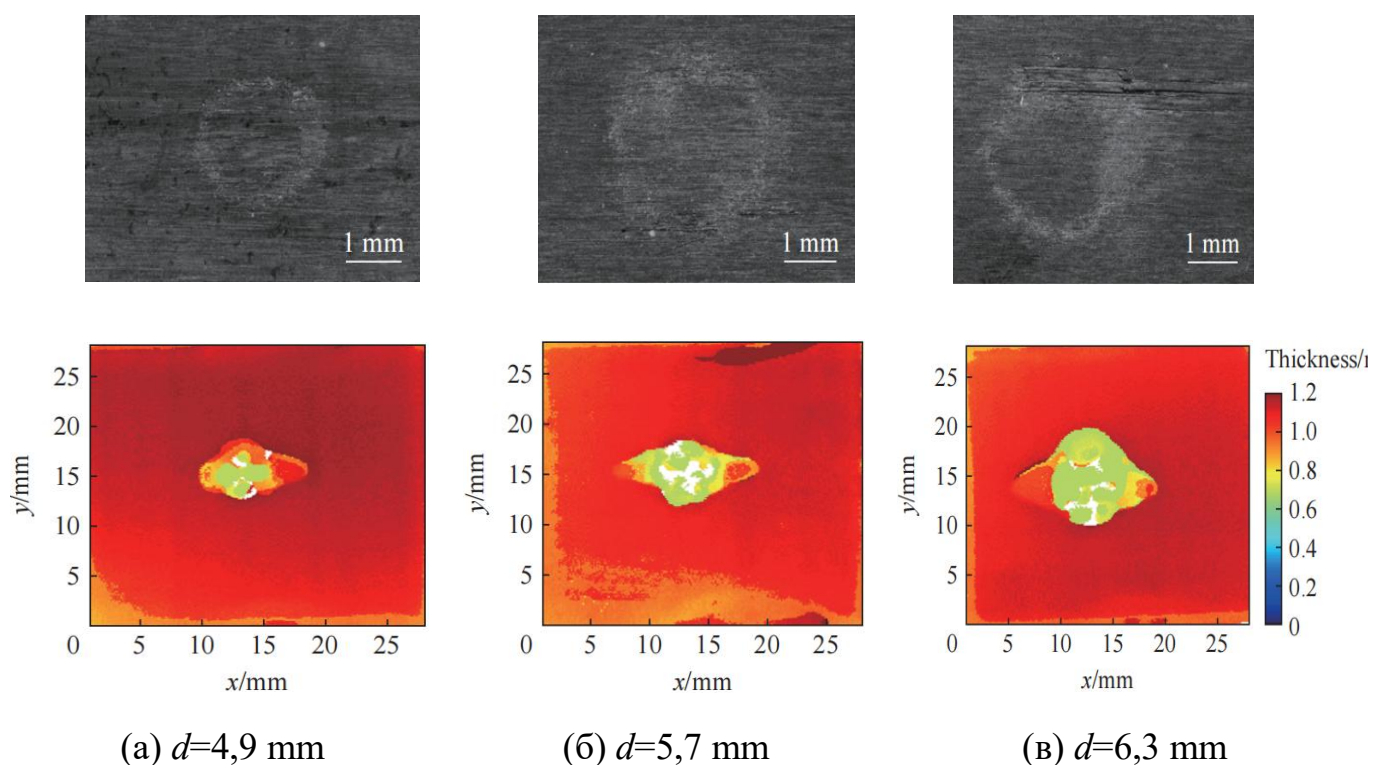


Рис.11 Результаты микроскопии и С-сканирования струйного удара на композитный образец с различными диаметрами при скорости 557 м/с

4. Выводы

На экспериментальной платформе типичный композитный ламинат с матрицей из углеродного волокна и смолы был подвергнут испытанию на одноструйный удар при различных скоростях и диаметрах струи. Результаты испытаний показывают, что типичное повреждение композитного листа при одноструйном каплеударе имеет следующие законы:

(1) Поверхность удара вогнута из-за давления гидравлического удара, а центр почти не поврежден, волна растяжения разгрузки на границе контакта вызывает кольцевое повреждение вокруг центральной области, происходит повреждения в различных формах: как удаление смолы, растрескивание матрицы и небольшое количество разрыва волокна в кольце, в том числе ударение смолы происходит под действием сдвига высокоскоростных боковых струй.

(2) Внутреннее повреждение в основном состоит из растрескивания матрицы и межслойного расслоения, а из-за распространения и взаимодействия волн напряжения диапазон повреждения постепенно расширяется от ударной поверхности к поверхности дна, а повреждение в слое наблюдается на вертикальной поверхности имеет форму «пирамиды», на параллельной поверхности межслойное расслоение имеет форму «веретена».

(3) Из-за анизотропии продольных и поперечных механических свойств композитного образца размеры повреждений на поверхности и внутри также имеют типичную анизотропию, причем продольный размер больше поперечного.

(4) Как поверхностное кольцевое повреждение, так и внутреннее повреждение расширяются наружу с увеличением скорости и диаметра струи, а площадь кольцевого повреждения и внутреннего расслоения также увеличиваются.

(5) Размер неповрежденной зоны в кольцевом центре поверхности можно предсказать, умножив диаметр границы контакта давления гидроудара на безразмерную функцию поврежденности.

Список источников

1. Юдин Д.А. Результаты численного моделирования конструкций изделий, при ударе о жидкую и твердую преграды // Труды МАИ. 2019. № 107. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=107913>
2. Вербицкий А.Б. Сидоренко А.С. Динамическое деформирование конструкции авиационного изделия при аварийном соударении с преградой // Труды МАИ. 2014. № 78. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=53502>

3. Engel O.G. Waterdrop collision with solid surface // Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1955, vol. 54(5), pp. 281–298. DOI: [10.6028/jres.054.033](https://doi.org/10.6028/jres.054.033)
4. Bowden F.P., Brunton J.H. The deformation of solids by liquid impact at supersonic speeds // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1961, vol. 263(1315), pp. 433–450. DOI: [10.1098/rspa.1961.0172](https://doi.org/10.1098/rspa.1961.0172)
5. Adler W.F. Rain impact retrospective and vision or the future // Wear, 1999, vol. 233–235, pp. 25–38. DOI: [10.1016/S0043-1648\(99\)00191-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00191-X)
6. Field J.E. ELSI conference: invited lecture: liquid impact: theory, experiment, applications // Wear, 1999, vol. 233/234/235, pp. 1–12. DOI: [10.1016/S0043-1648\(99\)00189-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00189-1)
7. Shi H.H., Field J.E. Stress wave propagation in solid material under high velocity liquid impingement // Scientific Sinica G: Physica Mechanica & Astronomica, 2004, vol. 34(5), pp. 577–590. DOI: [10.3969/j.issn.1674-7275.2004.05.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-7275.2004.05.010)
8. Mao J.R., Shi H.H., Yu M.Z. et al. Experimental study on hydrodynamic characteristics of droplets impinging on solid surfaces // Mechanics in Engineering, 1995, vol. 17(3), pp. 52–54. DOI: [10.6052/1000-0992-1995-071](https://doi.org/10.6052/1000-0992-1995-071)
9. Sun B., Yan Y.P., Zhang D. et al. A two dimensional nonlinear shock model for the collision between a liquid drop and elastic plane // Chinese Journal of Applied Mechanics, 1996, vol. 13(3), pp. 33–38.
10. Zhang D., Xie Y.H., Zhou Q.L. Study on the impact between liquid drop and elastic solid // Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, vol. 39(6), pp. 75–78, 85. DOI: [10.3321/j.issn:0577-6686.2003.06.017](https://doi.org/10.3321/j.issn:0577-6686.2003.06.017)

11. Zhang D., Xie Y.H. Numerical model for blade fatigue life of liquid corrosion in steam turbine // Proceedings of the CSEE, 2004, vol. 24(10), pp. 189–192. DOI: [10.3321/j.issn:0258-8013.2004.10.036](https://doi.org/10.3321/j.issn:0258-8013.2004.10.036)
12. Wang Z.J., Chen X.M., Huang Q. Raindrop Erosion Test of Aircraft Optical Window/Cover Materials [C] // Proceedings of the 6th National Conference on Experimental Fluid Mechanics. Taiyuan, Chinese Society of Mechanics, Chinese Society of Aerodynamics, 2004, pp. 190–194.
13. Cook S.S. Erosion by water-hammer [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical // Physical and Engineering Sciences, 1928, vol. 119(783), pp. 481–488. DOI: [10.1098/rspa.1928.0107](https://doi.org/10.1098/rspa.1928.0107)
14. 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(1390), pp. 331–352. DOI: [10.1098/rspa.1964.0236](https://doi.org/10.1098/rspa.1964.0236)
15. 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(1724), pp. 607–623. DOI: [10.1098/rsta.1997.0028](https://doi.org/10.1098/rsta.1997.0028)
16. Springer G.S., Yang C.I. Model for the rain erosion of fiber reinforced composites // AIAA Journal, 1975, vol. 13(7), pp. 877–883. DOI: [10.2514/3.60463](https://doi.org/10.2514/3.60463)
17. Engel O.G. Damage produced by high-speed liquid-drop impacts // Journal of Applied Physics, 1973, vol. 44(2), pp. 692–704. DOI: [10.1063/1.1662246](https://doi.org/10.1063/1.1662246)

18. Heymann F.J. On the shock wave velocity and impact pressure in high-speed liquid-solid impact // *Journal of Basic Engineering*, 1968, vol. 90(3), pp. 400–402. DOI: [10.1115/1.3605114](https://doi.org/10.1115/1.3605114)
19. Seward C.R., Pickles C.S.J., Field J.E. Single- and multiple-impact jet apparatus and results [C] // *Proceedings Volume 1326, Window and Dome Technologies and Materials II*. San Diego: SPIE, 1990, pp. 280–290. DOI: [10.1117/12.22507](https://doi.org/10.1117/12.22507)
20. Burson-Thomas C.B., Wellman N.R., Harvey T.J. et al. Water droplet erosion of aeroengine fan blades: the importance of form // *Wear*, 2019, vol. 426, pp. 507–517. DOI: [10.1016/j.wear.2018.12.030](https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.030).

References

1. Yudin D.A. *Trudy MAI*, 2019, no. 107. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=107913>
2. Verbitskii A.B. Sidorenko A.S. *Trudy MAI*, 2014, no. 78. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=53502>
3. Engel O.G. Waterdrop collision with solid surface, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1955, vol. 54(5), pp. 281–298. DOI: [10.6028/jres.054.033](https://doi.org/10.6028/jres.054.033)
4. Bowden F.P., Brunton J.H. The deformation of solids by liquid impact at supersonic speeds, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1961, vol. 263(1315), pp. 433–450. DOI: [10.1098/rspa.1961.0172](https://doi.org/10.1098/rspa.1961.0172)
5. Adler W.F. Rain impact retrospective and vision or the future // *Wear*, 1999, vol. 233–235, pp. 25–38. DOI: [10.1016/S0043-1648\(99\)00191-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00191-X)

6. Field J.E. ELSI conference: invited lecture: liquid impact: theory, experiment, applications, *Wear*, 1999, vol. 233/234/235, pp. 1–12. DOI: [10.1016/S0043-1648\(99\)00189-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00189-1)
7. Shi H.H., Field J.E. Stress wave propagation in solid material under high velocity liquid impingement, *Scientific Sinica G: Physica Mechanica & Astronomica*, 2004, vol. 34(5), pp. 577–590. DOI: [10.3969/j.issn.1674-7275.2004.05.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-7275.2004.05.010)
8. Mao J.R., Shi H.H., Yu M.Z. et al. Experimental study on hydrodynamic characteristics of droplets impinging on solid surfaces, *Mechanics in Engineering*, 1995, vol. 17(3), pp. 52–54. DOI: [10.6052/1000-0992-1995-071](https://doi.org/10.6052/1000-0992-1995-071)
9. Sun B., Yan Y.P., Zhang D. et al. A two dimensional nonlinear shock model for the collision between a liquid drop and elastic plane, *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 1996, vol. 13(3), pp. 33–38.
10. Zhang D., Xie Y.H., Zhou Q.L. Study on the impact between liquid drop and elastic solid, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, vol. 39(6), pp. 75–78, 85. DOI: [10.3321/j.issn:0577-6686.2003.06.017](https://doi.org/10.3321/j.issn:0577-6686.2003.06.017)
11. Zhang D., Xie Y.H. Numerical model for blade fatigue life of liquid corrosion in steam turbine, *Proceedings of the CSEE*, 2004, vol. 24(10), pp. 189–192. DOI: [10.3321/j.issn:0258-8013.2004.10.036](https://doi.org/10.3321/j.issn:0258-8013.2004.10.036)
12. Wang Z.J., Chen X.M., Huang Q. Raindrop Erosion Test of Aircraft Optical Window/Cover Materials [C], *Proceedings of the 6th National Conference on Experimental Fluid Mechanics*. Taiyuan, Chinese Society of Mechanics, Chinese Society of Aerodynamics, 2004, pp. 190–194.

13. Cook S.S. Erosion by water-hammer [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1928, vol. 119(783), pp. 481–488. DOI: [10.1098/rspa.1928.0107](https://doi.org/10.1098/rspa.1928.0107)
14. 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(1390), pp. 331–352. DOI: [10.1098/rspa.1964.0236](https://doi.org/10.1098/rspa.1964.0236)
15. 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(1724), pp. 607–623. DOI: [10.1098/rsta.1997.0028](https://doi.org/10.1098/rsta.1997.0028)
16. Springer G.S., Yang C.I. Model for the rain erosion of fiber reinforced composites, *AIAA Journal*, 1975, vol. 13(7), pp. 877–883. DOI: [10.2514/3.60463](https://doi.org/10.2514/3.60463)
17. Engel O.G. Damage produced by high-speed liquid-drop impacts, *Journal of Applied Physics*, 1973, vol. 44(2), pp. 692–704. DOI: [10.1063/1.1662246](https://doi.org/10.1063/1.1662246)
18. Heymann F.J. On the shock wave velocity and impact pressure in high-speed liquid-solid impact, *Journal of Basic Engineering*, 1968, vol. 90(3), pp. 400–402. DOI: [10.1115/1.3605114](https://doi.org/10.1115/1.3605114)
19. Seward C.R., Pickles C.S.J., Field J.E. *Single- and multiple-impact jet apparatus and results [C]*, *Proceedings Volume 1326, Window and Dome Technologies and Materials II*. San Diego: SPIE, 1990, pp. 280–290. DOI: [10.1117/12.22507](https://doi.org/10.1117/12.22507)
20. Burson-Thomas C.B., Wellman N.R., Harvey T.J. et al. Water droplet erosion of aeroengine fan blades: the importance of form, *Wear*, 2019, vol. 426, pp. 507–517. DOI: [10.1016/j.wear.2018.12.030](https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.030)

Статья поступила в редакцию 25.07.2022

Статья после доработки 27.07.2022

Одобрена после рецензирования 21.08.2022

Принята к публикации 12.10.2022

The article was submitted on 25.07.2022; approved after reviewing on 21.08.2022;
accepted for publication on 12.10.2022