DOI: 10.15593/2224-9982/2018.54.01
УДК 62-192:620.178.76

Л.В. Воронов[1], L.A. Coles[2], М.Ш. Нихамкин[1], V.V. Silberschmidt[2], С.В. Семенов[1], Б.П. Болотов[1]

[1] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия
[2] Вольфсоновская инженерная школа механики и производства
Университет Лафборо, графство Лестершир, Великобритания

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ УГЛЕПЛАСТИКА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В АВИАСТРОЕНИИ

Представлены результаты экспериментального исследования баллистического повреждения широко используемого в авиастроении слоистого углепластика на основе углеродной ткани и эпоксидного связующего. Методика исследования состоит в динамическом нагружении исследуемой пластины-образца при высокоскоростном столкновении со снарядом-ударником и определении полей динамических деформаций на поверхности пластины, а также в анализе внешних и внутренних повреждений образца. Исследовались деформации и повреждения, вызванные ударами двух типов снарядов: твердый (сталь) и фрагментируемый (лед) со скоростями до 500 м/с. Исследование проводилось на специальной установке на базе пневматической пушки и двух высокоскоростных видеокамер. Для получения полей динамических деформаций образцов использовался метод корреляции цифровых изображений. Для исследования повреждения внутри образцов использовалась трехмерная рентгеновская компьютерная томография.

В результате проведенного исследования получены количественные экспериментальные данные о закономерностях баллистического деформирования и повреждения углепластика. Твердые ударники создают локализованное повреждение пластин вплоть до сквозного пробивания, тогда как удар фрагментируемым снарядом того же размера даже при существенно большей кинетической энергии не приводит к сквозному повреждению. В случае удара льдом может возникать обширное скрытое повреждение в виде расслоения ламината, которое при последующей эксплуатации детали может привести к ее поломке. Для обоих типов ударников и при различных уровнях их кинетической энергии поле динамических деформаций на тыльной поверхности пластины имеет две характерные зоны: круглая зона растягивающих деформаций в центре и кольцевая область сжимающих деформаций вокруг нее.

Полученные количественные экспериментальные данные о закономерностях повреждения, пространственном распределении и изменении во времени динамических деформаций могут быть использованы для разработки и проверки математических моделей баллистического повреждения слоистых углепластиков.

Ключевые слова: баллистическое повреждение, композиты армированные волокном, рентгеновская томография, динамическая деформация, метод корреляции цифрового изображения

L.V. Voronov[1], L.A. Coles[2], M. Sh. Nikhamkin[1], V.V Silberschmidt[2], S.V. Semenov[1], B.P. Bolotov[1]

[1] Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation
[2] Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Loughborough University, Leicestershire, United Kingdom

EXPERIMENTAL STUDY OF IMPACT DAMAGE OF CARBON-EPOXY PLASTIC FOR AVIATION STRUCTURES

Laminated carbon fiber reinforced composite widely used in aviation and made from an equally strong carbon fabric and epoxy binder ballistic damaging is presented.

The method of investigation consists in the dynamic loading of the plate-specimen during a high-speed collision with a projectile, determining the fields of dynamic deformations on the surface of the plate and analysis of external and internal damage of specimen. Deformations and damaging of two types of projectiles were investigated: solid (steel) and fragmenting (ice) with speed up to 500 m/s. Investigation was provided using special test rig with air gun and two high speed cameras. Specimens dynamic deformation fields determination were produced using digital image correlation method (DIC). Visualization of specimen's internal damage were carried out with three-dimensional X-ray computed tomography.

Quantitative experimental data about the principles of ballistic deformation and damage of carbon fiber were obtained. Solid projectiles create localized damage of plates (up to penetration), whereas the impact of fragmenting projectile of the same size even with significantly higher kinetic energy doesn't result to through damage. In case of an ice impact, extensive latent

damage can occur in the form exfoliation of laminate, which in the subsequent operation of the part can lead to its failure. For both types of projectiles and different levels of their kinetic energy dynamic deformation field on the rear surface of the plate has two characteristic zones: a circular zone of tensile deformations in the center and an annular region of compressive deformations around it.

The obtained quantitative experimental data about principles of damaging, spatial distribution and dynamic deformations variation in time can be used to develop and test mathematical models of layered carbon fibers ballistic damage.

Keywords: impact damage, fiber-reinforced composites, X-ray tomography dynamic deformations, digital image correlation.

Введение

За последние несколько десятилетий полимерные композиционные материалы (ПКМ), в частности армированные волокном композиты (fibre-reinforced composites – FRC), нашли применение во многих областях, включая автомобильную, аэрокосмическую, энергетическую, спортивную. Применение ПКМ позволяет существенно снизить вес конструкции благодаря высоким удельным прочностным и жесткостным характеристикам. Известно, например, что использование ПКМ в конструкции планера самолетов Boeing 787 достигает по весу 50 %, Airbus A380 – 30 %, Airbus A350 – 50 % [1, 2]. Широкое применение ПКМ предусматривается при создании отечественных самолетов и авиационных двигателей нового поколения [3–5]. Такие элементы авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), как лопатки ротора и статора вентилятора, детали корпуса, мотогондолы, часто изготавливаются из угле- и стеклопластиков.

Условия эксплуатации деталей самолетов и ГТД могут включать в себя ударные (баллистические) нагрузки, что иногда приводит к их серьезному повреждению и аварийным последствиям. Примерами типичной баллистической нагрузки на детали самолета и ГТД являются удары градом, камнями, птицами, мусором с взлетно-посадочных полос и т.д. В результате элемент конструкции получает повреждения, которые выступают как концентраторы напряжений, инициирующие последующее разрушение деталей [6–11]. Становится все более важным понимать влияние условий ударной нагрузки на поведение ПКМ с точки зрения динамической деформации, появление видимых и скрытых повреждений.

В последние годы предпринимались значительные усилия, направленные на то, чтобы описать поведение ПКМ при динамическом нагружении. В работах [12–14] приведены обзоры экспериментальных и расчетных работ в этом направлении. В экспериментальных исследованиях применялись традиционные для испытаний металлов копры, а также баллистические установки [15].

Для численного моделирования процессов соударения широко применяют метод конечных элементов в нестационарной динамической постановке, реализованный, например, в коммерческих пакетах LSDYNA и ABAQUS. При этом наибольшую сложность представляет выбор модели поведения материала при высоких скоростях деформации [11].

Для выявления ударных повреждений используются традиционные методы неразрушающего контроля: ультразвуковой, рентгеновский, рентгеновская компьютерная томография (КТ) [16-18].

Важным аспектом исследования динамического поведения конструкций из ПКМ при ударном нагружении является понимание процессов их контактного взаимодействия со снарядом-ударником. Большая часть экспериментальных и численных исследований была сфокусирована на возникающей деформации и повреждениях, вызванных твердыми (обычно стальными) снарядами [18–20]. В последние годы появились исследования процессов повреждения ПКМ ледяными снарядами [22] и влияния на процесс соударения их фрагментации [23, 24]. Но, как правило, анализ наведенного повреждения ограничен визуальным контролем или использованием разрушающих методов для изучения внутреннего повреждения [25–29]. В некоторых работах для исследования повреждений использовалась рентгеновская томография [15–17, 30]. Для измерения динамической деформации перспективным является метод цифровой корреляции изображений Digital Image Correlation- DIC) [31, 32].

Сравнение результатов опубликованных исследований затруднительно из-за разнообразия как исследуемых материалов, так и методик исследований.

Цель настоящей работы – получение количественных экспериментальных данных, пригодных для верификации математических моделей, о баллистическом повреждении используемого в авиастроении слоистого углепластика твердым (сталь) и фрагментируемым (лед) ударником.

Методика экспериментов

Методика исследования состоит в динамическом нагружении исследуемой пластины-образца при высокоскоростном столкновении с ударником и определении полей динамических деформаций на поверхности пластины, а также в последующем анализе внешних и внутренних повреждений образца. Консольно закрепленный образец подвергается удару по нормали к поверхности сферическим ударником, движущимся со скоростью *V* (рис. 1).

Образцы для испытаний представляют собой пластины размером 195 мм × 195 мм с толщиной 5,6 мм. Они состоят из 10 слоев полимерного композиционного материала, изготовленного из эпоксидного углеперпрега на основе ткани из углеродного волокна с саржевым плетением 2×2 и связующего IMP530R. Десять слоев сформированы в ламинат, состоящий из двух поверхностных слоев (T300 3K) и 8 средних слоев (T300 12K) с конфигурацией укладки 0°/90° плотностью 1600 кг/м^3. Все образцы изготавливали с использованием автоклавного процесса, отверждали в вакууме при 120 °C со скоростью 1,5 °C в мин и выдержкой 160 мин при давлении 0,62 МПа.

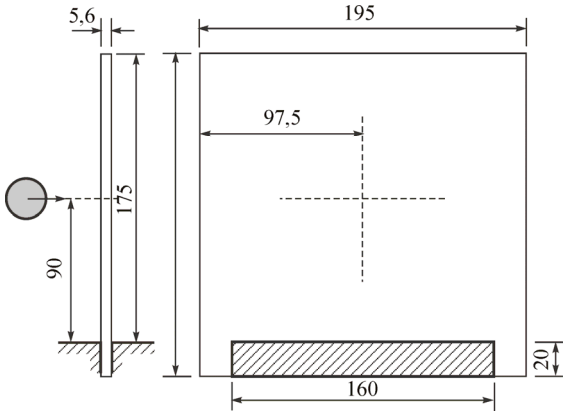
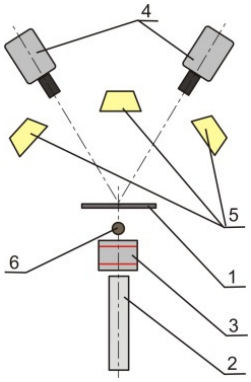


Рис. 1. Схема нагружения образца

Исследование проводилось в лаборатории динамической прочности ГТД Пермского национального исследовательского университета на специально разработанной баллистической экспериментальной установке на базе пневматической пушки [31–32] (рис. 2). Ударник *6* сжатым воздухом разгоняется в разгонной трубе пневматической пушки *2*, проходит через сетку лазерных лучей измерителя скорости *3* и ударяется в поверхность образца *1*. Процесс соударения регистрируется с тыльной поверхности образца с двух ракурсов двумя синхронизированными высокоскоростными камерами Photron Fastcam SA5 *4*, расположенными под углом ±25° к вектору скорости ударника. Установка позволяет проводить эксперименты с ударниками из различных материалов диаметром 25 и 50 мм, реализовывать скорости соударения до 500 м/с и видеорегистрацию с разрешением до 750 тысяч кадров в секунду. Ввиду малой длительности экспозиции установка оборудована мощным осветительным комплексом *5*. Эксперимент контролируется персональным компьютером через интерфейс PXI с помощью программного обеспечения, работающего в среде LabVIEW.

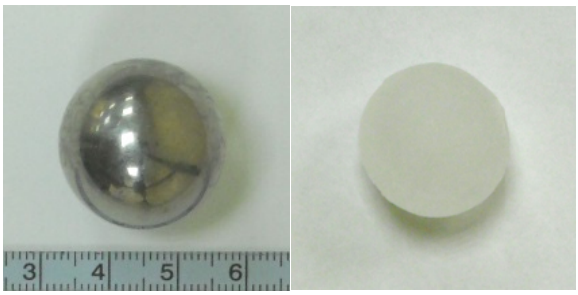
Для определения полей динамических деформаций методом цифровой корреляции изображений на тыльную поверхность образца специальными красками наносится спекл-структура, изображение которой регистрируется в процессе соударения двумя скоростными видеокамерами. Обработка результатов методом DIC состоит в покадровом анализе полученных цифровых изображений спекл-структуры в последовательные моменты времени и проводится с применением программного обеспечения Vic-3D. В описываемых экспериментах видеорегистрация проводилась с частотой 60 тыс. кадров в секунду и пространственным разрешением 512×512 пикселей. На основании предварительных экспериментов выбраны сле-

а



б

Рис. 2. Внешний вид испытательной установки (*а*) и схема позиционирования видеокамер (вид сверху) (*б*): *1* – образец; *2* – пневматическая пушка; *3* – устройство измерения скорости снаряда; *4* – высокоскоростные видеокамеры; *5* – осветительный комплекс; *6* – ударник



а *б*

Рис. 3. Стальной (*а*) и ледяной (*б*) ударники

дующие параметры DIC: локальная область распознавания изображения (subset) – 15×15 пикселей, шаг – 2 пикселя.

Эксперименты проводили с двумя видами ударников в форме шара (рис. 3): твердым (стальным) и фрагментируемым (лед). Стальные ударники имели диаметр 23,8 мм и массу 54,7 г. Ледяные ударники готовили послойным замораживанием при температуре –20 °С, они имели диаметр около 25 мм и массу 7,5 г.

Скорости соударения были выбраны таким образом, чтобы получить три уровня повреждения в образцах – незначительные, средние и крупные с пробиванием образца. Эти уровни скорости и соответствующие им уровни кинетической энергии ударников приведены в таблице.

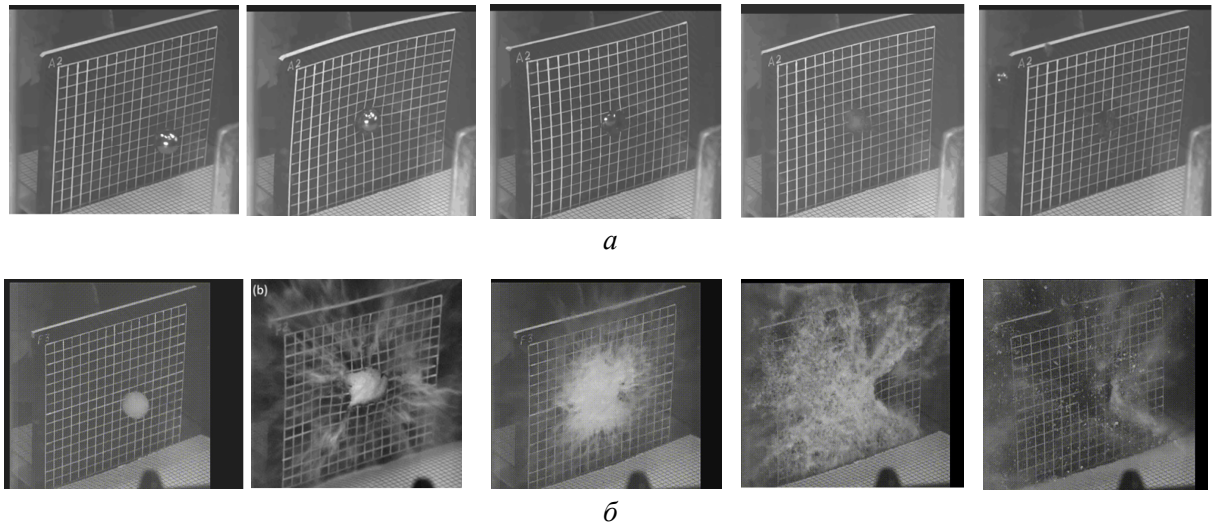
Уровни скоростей ударника

Уровень повреждения образца	Уровень скорости ударника	Стальной ударник		Ледяной ударник	
		Скорость, м/с	Энергия, ч Дж	Скорость, м/с	Энергия, ч Дж
Незначительное	Низкий	60	98,5	300	337,5
Среднее	Средний	75	153,8	400	600,0
Крупное	Высокий	90	221,5	500	937,5

Для выявления скрытых повреждений и определения их параметров все образцы были исследованы методом рентгеновской микротомографии с использованием системы Metris 160 H-XT в лаборатории Университета Лафборо (Великобритания). Каждое сканирование проводилось при параметрах 140 кВ и 130 мкА с использованием вольфрамовой мишени с 2650 проекциями рентгенографии, полученными при вращении на 360° для каждого образца, при экспозиции 500 мс. Для каждой проекции выполнялось осреднение по 8 изображениям, чтобы уменьшить влияние погрешностей. Сканирование для каждого образца поводилось в объеме 180 мм × 140 мм × 20 мм при пространственном разрешении 97 мкм.

Анализ повреждений образцов

На рис. 4 показан пример покадровой видеозаписи процесса соударения образца со стальным и ледяным ударниками при высоких (в соответствии с таблицей) уровнях скорости. Основное различие этих двух процессов соударения состоит в том, что стальной ударник, не разрушаясь сам, вызывает деформирование и последующее пробивание образца. Ледяной ударник, напротив, в процессе соударения разрушается сам и, несмотря на то, что он имеет уровень кинетической энергии в 4 раза больше, чем стальной, не пробивает образец; значительная часть кинетической энергии расходуется на его разрушение. Площадь контакта ударника с образцом при соударении в случае ледяного ударника значительно больше, чем у стального, что, как будет показано ниже, определяет различие в характере повреждения. После завершения контакта ударника с образцом на видеозаписях процесса соударения видно распространение волн изгибных деформаций образца и его затухающие колебания.



а

б

Рис. 4. Покадровая видеозапись процесса соударения образца со стальным (*а*) и ледяным (*б*) ударником при высоком уровне скоростей соударения

Анализ повреждения образцов после баллистических испытаний продемонстрировал два разных типа повреждения стальными и ледяными ударниками: локализованные и проникающие повреждения от стальных ударников и обширные повреждения передней поверхности образца – в случае ледяных. Типичное повреждение образцов при высоких уровнях скорости соударения показано на рис. 5. При соударении со стальным ударником при скорости соударения 90 м/с произошло пробивание образца, на тыльной поверхности видно значительное повреждение в виде двух перпендикулярных разрывов с отгибом краев отверстия; при этом повреждение локальное: размер повреждения незначительно превышает диаметр ударника. При соударении с ледяным ударником на скорости 480 м/с пробивание образца не происходит, но как на фронтальной, так и на тыльной поверхностях образца визуально определяются незначительные повреждения наружных слоев; при этом видно, что зона контакта на фронтальной поверхности образца значительно больше размера ударника.

Исследование повреждений образцов после испытаний методом рентгеновской томографии показали следующее. Основными видами внутренних повреждений образцов являются расслоение и разрыв волокон. Для всех трех уровней скорости стального ударника облако повреждений оставалось локализованным даже при увеличении энергии ударника, тогда как для ледяного ударника с ростом энергии оно увеличивалось. На трехмерной рентгеновской томографии (рис. 6) поврежденные зоны выглядят серыми, тем темнее, чем больше поврежденность слоев. В случае стального ударника темная зона более локализована в центре образца, где на-

ряду с расслоением имеет место разрыв волокон. В случае ледяного ударника темная зона распространена по значительной части фронтальной поверхности с меньшим градиентом интенсивности, и повреждение имеет характер расслоения верхних слоев.

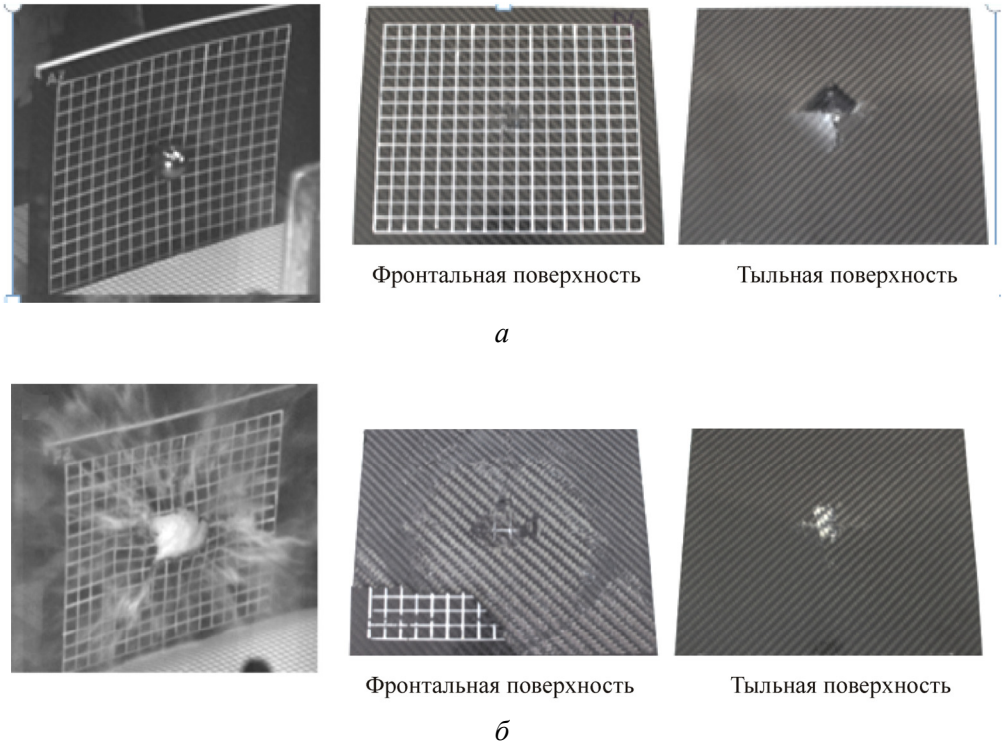


Рис. 5. Типичные примеры повреждения в композитных образцах при соударении со стальным, скорость 90 м/с (*а*) и ледяным, скорость 480 м/с (*б*) ударниками

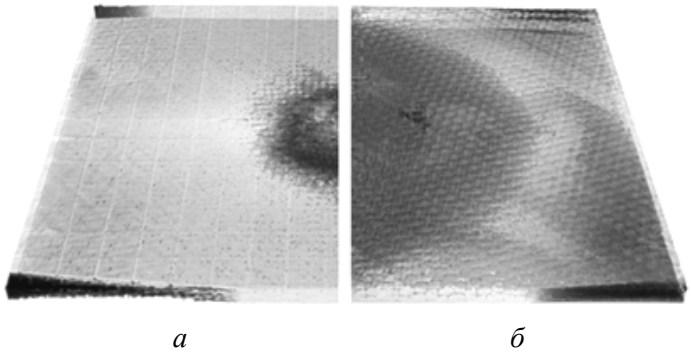
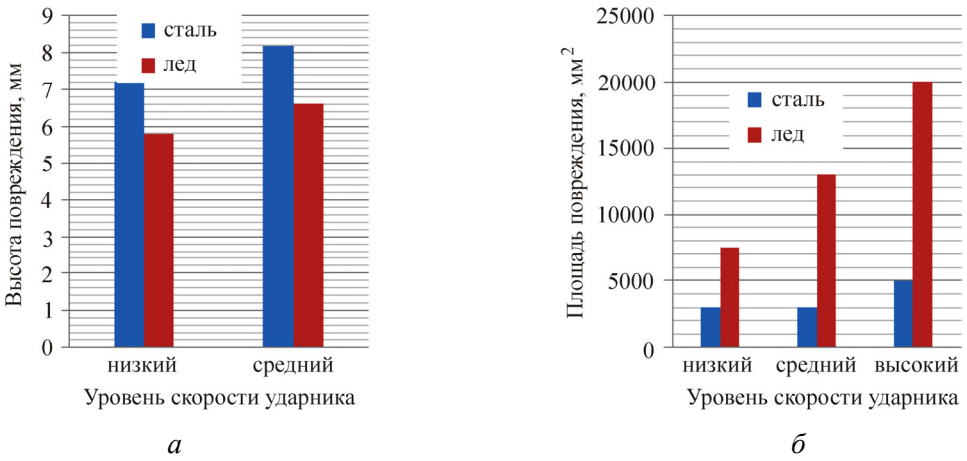


Рис. 6. Типичные примеры внутренних повреждений в образцах при соударении со стальным (*а*) и ледяным (*б*) ударником

Анализ горизонтальных и вертикальных сечений рентгеновских томограмм каждого образца позволил приблизительно оценить размеры внутренних баллистических повреждений. На рис. 7 показаны усредненные значения высоты и площади повреждений для различных уровней скорости ударника и двух типов используемых ударников. В случае ледяного ударника высота повреждения в вертикальной плоскости меньше, чем в случае стального. В случае ледяного ударника видимое повреждение меньше, но область расслаивания больше, чем в случае стального.



а *б*

Рис. 7. Максимальная высота (*а*) и площадь (*б*) повреждений в образцах

Анализ динамических деформаций

Поля динамических деформаций в образцах в процессе соударения были получены методом цифровой корреляции изображений.

На рис. 8 приведена в качестве примера покадровая расшифровка полей динамических деформации ε_{yy} на тыльной поверхности образца в различные моменты времени соударения с ледяным ударником, скорость соударения 300 м/с. На рис. 9, *а* для этого же примера показано изменение во времени деформации ε_{yy} на тыльной поверхности в точке соударения. В первые 100 микросекунд от момента касания ударником образца его деформация быстро возрастает, после чего начинается разрушение ударника и деформация начинает спадать; дальнейший характер изменения во времени деформации соответствует переходу к колебательному процессу. Максимальная деформация достигает 1,2 %, а максимальная скорость деформации – около 400 1/с.

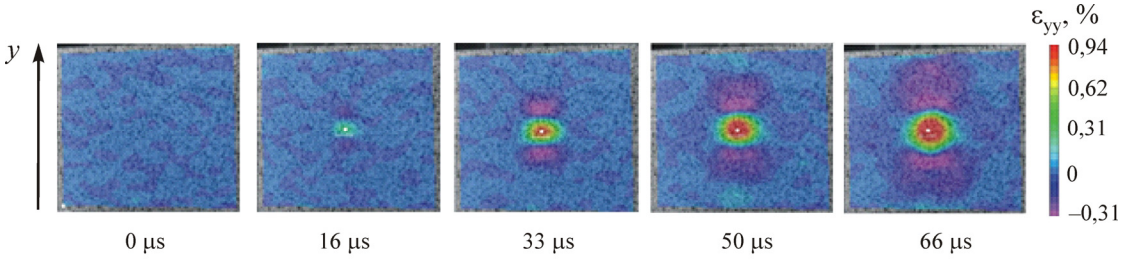
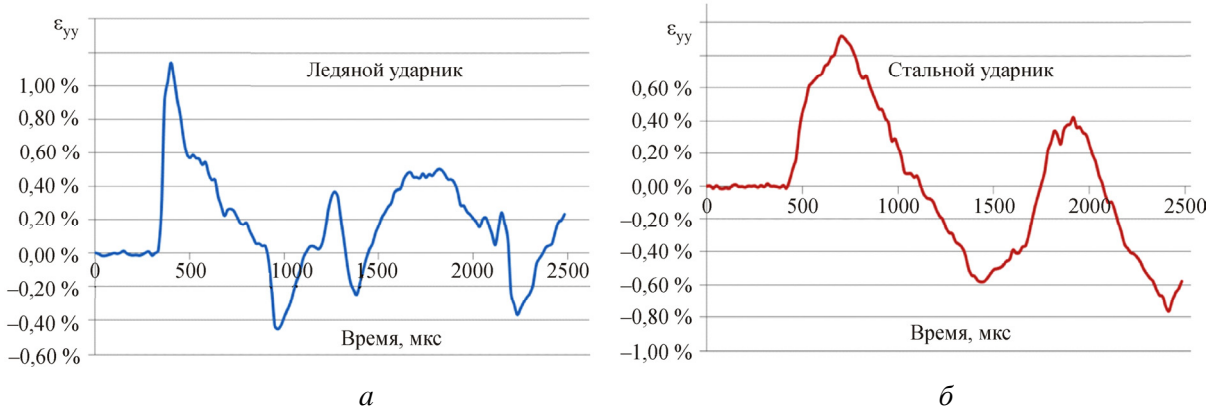


Рис. 8. Пример полученных методом цифровой корреляции изображений динамических полей деформации ε_y на тыльной поверхности образца в различные моменты времени соударения с ледяным ударником, скорость соударения 300 м/с

На рис. 9, *б* показано изменение во времени деформации ε_{yy} в той же точке в случае стального ударника при скорости 78 м/с. В этом случае не происходит пробивание образца, но время соударения больше, чем в случае ледяного ударника. Деформация достигает максимального значения приблизительно через 300 микросекунд после начала соударения. Максимальная деформация составила около 1 %, а максимальная скорость деформации 100 1/с. Затем происходит отскок ударника, и начинаются колебания образца.

Поле динамических деформаций на задней поверхности образца в момент максимальной деформации, типичное и для стальных, и для ледяных ударников, показано на рис. 10. Видны две зоны: круглая зона растягивающих деформаций диаметром около 60 мм вокруг точки соударения и кольцевая область сжимающих деформаций вокруг нее. В приведенном примере максимальная растягивающая деформация составила около 1 %, сжимающая – 0,4 %.



а *б*

Рис. 9. Пример изменения во времени деформации ε_{yy} на тыльной поверхности образца в точке соударения с ледяным ударником при скорости 300 м/с (*а*) и стальным ударником при скорости 78 м/с (*б*)

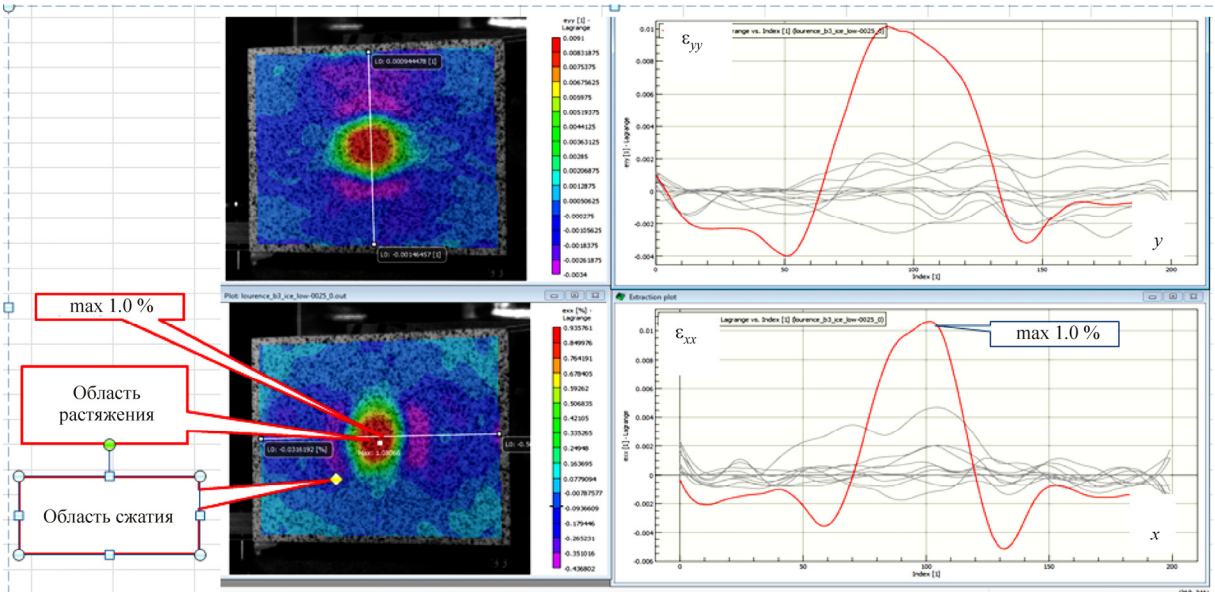


Рис. 10. Пример поля динамических деформаций на задней поверхности образца в момент максимальной деформации. Стальной ударник, скорость 78 м/с

Заключение

В результате проведенного исследования получены количественные и качественные экспериментальные данные о закономерностях баллистического деформирования и повреждения твердым (сталь) и фрагментируемым (лед) снарядом пластин из слоистого углепластика на основе углеродной ткани и эпоксидного связующего.

Твердые (стальные) ударники создают локализованное повреждение пластин-образцов вплоть до сквозного пробивания, тогда как удар фрагментируемым снарядом того же размера даже при существенно большей кинетической энергии не приводит к сквозному повреждению; энергия расходуется на его разрушение в процессе соударения, при этом площадь контакта с образцом существенно больше. В случае удара льдом может возникать обширное скрытое повреждение в виде расслоения ламината, которое при последующей эксплуатации детали может привести к ее поломке. Эти закономерности в целом сохраняются для одного и того же материала ударника на разных уровнях его кинетической энергии. Для обоих типов ударников и различных уровнях их кинетической энергии поле динамических деформаций на тыльной по-

верхности пластины имеет две характерные зоны: круглая зона растягивающих деформаций в центре и кольцевая область сжимающих деформаций вокруг нее.

Полученные количественные экспериментальные данные о закономерностях повреждения, пространственном распределении и изменении во времени динамических деформаций могут быть использованы для разработки и проверки математических моделей баллистического повреждения слоистых углепластиков.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта №С-26/790 от 21.12.2017.

Acknowledgments

The reported study was partially supported by the government of Perm Krai, research project No. C-26/790 from 21.12.2017

Библиографический список

1. Келли А. Инженерный триумф углеволокон // Композиты и наноструктуры. – 2009. – № 1. – С. 38–49.

2. Савин С.П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолетов семейства МС-21 // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук. – 2012. – Т. 14, № 4(2). – С. 686–693.

3. Стреляев Д.В., Умушкин Б.П., Никонов В.В. Перспективные композиционные материалы в конструкциях авиационной и космической техники. – М.: Изд-во МГТУ ГА, 2012. – 73 с.

4. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестн. Рос. акад. наук. – 2002. – Т. 72, № 1. – С. 3–12.

5. Технологии и задачи механики композиционных материалов для создания лопатки спрямляющего аппарата авиационного двигателя / А.Н. Аношкин, В.Ю. Зуйко, Г.С. Шипунов, А.А. Третьяков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 4. – С. 5–44.

6. Friedrich L.A., Preston Jr, J.L. Impact Resistance of Fiber Composite Blades Used in Aircraft Turbine Engines. – May 1973, NASA CR–134502, PWA-4727. – URL: http://ntrs.nasa.gov/ (accessed 5 August, 2014).

7. Materials, Manufacturing and Test Development of a Composite Fan Blade Leading Edge Subcomponent for Improved Impact Resistance / S.G. Miller, K.M. Handschuh, M.J. Sinnott, L.W. Kohlman, G.D. Roberts, R.E. Martin, C.R. Ruggeri, J.M. Pereira // NASA/TM. – 2015. – No. 2015-218340. – 20 p.

8. Nikhamkin M., Semenova I., Voronov L. Foreign object damage and fatigue strength loss in compressor blades // Proceedings of ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air GT2008, Berlin. – 2008. – № GT2008-514931.

9. Semenova I., Voronov L., Nikhamkin M. Effect of Blade Geometry and Foreign Object Kinetic Energy on Blades Damage // Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air.GT2008. – Glasgow, UK. – 2010, June 14–18. – № GT2010-22425.

10. Нихамкин М.Ш., Семенова И.В. Концентрация напряжений в лопатках компрессора при повреждении их посторонними предметами // Изв. выс. учеб. завед. Авиационная техника. – 2011. – № 4. – С. 15–18.

11. Моделирование повреждения посторонними предметами полых лопаток вентилятора ГТД / М.Ш. Нихамкин, И.В. Семенова, О.Л. Любчик, И.Л. Гладкий // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук. – 2011. – Т. 13, № 1–2. – С. 326–329.

12. Azzam A., Li W. The low-velocity impact damage resistance of the composite structures – a review // Rev. Adv. Mater. Sci. – 2015. – Vol. 40. – P. 127–145.

13. Abrate S. Impact on Composite Structures. – Cambridge University Press, 2005. – 304 p.

14. Abrate S., Castanié B., Rajapakse Y. Dynamic Failure of Composite and Sandwich Structures. – Springer Science & Business Media, 2012. – 643 p.

15. ASTM D7136 / D7136M. Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event // ASTM International, West Conshohocken, PA. – 2015.

16. Crupi V., Epasto G., Guglielmino E. Computed Tomography analysis of damage in composites subjected to impact loading // Fracture and Structural Integrity. – 2011. – No. 17. – P. 32–41.

17. Ларин А.А., Резниченко В.И. Применение рентгеновской томографии для контроля агрегатов летательных аппаратов из композиционных материалов // Труды МАИ. – 2012. – № 52. – С. 1–11.

18. Characterization of the Damage Mechanism of Composites against Low Velocity Ballistic Impact Using Computed Tomography (CT) Techniques / E. Yılmaz, M.G. Gökçen, A. Demirural, T. Baykara // Res. Dev.Material Sci. – 2017. – No. 1(5). RDMS.000522. – P. 1–5.

19. Varas D., Lopez-Puente J., Zaera R. Experimental and numerical study of high velocity impacts on carbon/epoxy laminates // DYMAT-2009. – 2009. – P. 1799–1805.

20. Lee J., Soutis C. Prediction of Impact-Induced Fiber Damage in Circular Composite Plates // Appl. Compos. Mater. – 2005. – No. 12. – P. 109–131. – URL: https://doi.org/10.1007/s10443-004-7767-8

21. Pearson M.R., Eaton M.J., Featherston C.A., Holford K.M. Pullin R. Impact Damage Detection and Assessment in Composite Panels using Macro Fibre Composites Transducers // Journal of Physics: Conference Series. – 2011. – № 305(012049).

22. Analysis of ice impact process at high velocity / J. Pernas-Sánchez, J.A. Artero-Guerrero, D. Varas, J. López-Puente // Experimental Mechanics. – 2015. – No. 55. – P. 1669–1679.

23. Kim H., Welch D.A., Kedward K.T. Experimental investigation of high velocity ice impacts on woven carbon/epoxy composite panels // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2003. – No. 34. – P. 25–41.

24. Appleby-Thomas G.J., Hazell P.J., Dahini G. On the response of two commercially-important CFRP structures to multiple ice impacts // Composite Structures. – 2011. – No. 93. – P. 2619–2627.

25. Nunes L.M., Paciornik S., d'Almeida J.R.M. Evaluation of the damaged area of glass-fiber-reinforced epoxy-matrix composite materials submitted to ballistic impacts // Composites Science and Technology. – 2004. – No. 64. – P. 945–954.

26. Sevkat E. Experimental and numerical approaches for estimating ballistic limit velocities of woven composite beams // International Journal of Impact Engineering. – 2012. – No. 45. – P. 16–27.

27. Ballistic impact performance of composite targets / N.S. Shaktivesh, Ch.V. Nair, S. Kumar, N.K. Naik // Materials & Design. – 2013. – No. 51. – P. 833–846.

28. Ballistic impact behavior of hybrid composites / K.S. Pandya, J.R. Pothnis, G. Ravikumar, N.K. Naik // Materials & Design. – 2013. – No. 44. – P. 128–135.

29. Quasi-static penetration and ballistic properties of kenaf–aramid hybrid composites / R. Yahaya, S.M. Sapuan, M. Jawaid, Z. Leman, E.S. Zainudin // Materials & Design. – 2014. – No. 63. – P. 775–782.

30. The effect of shear strength on the ballistic response of laminated composite plates / K. Karthikeyan, B.P. Russell, N.A. Fleck, H.N.G. Wadley, V.S. Deshpande // European Journal of Mechanics - A/Solids. – 2013. – No. 42. – P. 35–53.

31. Experimental finding of dynamic deformation fields in metal and composite plates under impact / M. Nikhamkin, L. Voronov, I. Gladkiy, B.P. Bolotov // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2015. – № 2. – P. 103–115.

32. Nikhamkin M., Voronov L., Gladkiy I. Experimental investigations of high-speed impact damage of carbon fibre for turbojet engine elements // Structures of composite materials. – 2015. – No. 4(140). – P 74–80.

References

1. Kelli A. Inzhenernyy triumf uglevolokon [Engineering triumph of carbon fiber]. *Composites and nanostructures*, 2009, no. 1, pp. 38-49.

2. Savin S.P. Primeneniye sovremennykh polimernykh kompozitsionnykh materialov v konstruktsii planera samoletov semeystva MS-21 [The use of modern polymer composite materials in the design of the airframe of the MS-21 family aircraft]. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 14, no. 4(2), pp. 686-693.

3. Strelyayev D.V., Umushkin B.P., Nikonov V.V. Perspektivnyye kompozitsionnyye ma-terialy v konstruktsiyakh aviatsionnoy i kosmicheskoy tekhniki [Perspective composite materials in the constructions of aviation and space technology]. Moscow: Moscow State Technical University, 2012, P. 73.

4. Kablov E.N. Aviatsionnoye materialovedeniye: itogi i perspektivy [Aviation Materials Science: Results and Prospects]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2002, Vol. 72, no. 1, pp. 3-12.

5. Anoshkin A.N., Zuyko V.YU., SHipunov G.S., Tret'yakov A.A. Tekhnologii i zadachi mekhaniki kompozitsionnykh materialov dlya sozdaniya lopatki spryamlyayushchego apparata aviatsionnogo dvigatelya

[Technologies and problems of mehanics of composite materials for the creation of a blade of rectifying apparatus of an aircraft engine]. PNRPU Mechanics Bulletin, 2014, No. 4, pp. 5-44.

6. Friedrich L.A., Preston Jr, J.L. Impact Resistance of Fiber Composite Blades Used in Aircraft Turbine Engines, May 1973, NASA CR–134502, PWA-4727. URL: http://ntrs.nasa.gov/ Accessed August 5, 2014.

7. Miller S.G., Handschuh K.M., Sinnott M.J., Kohlman L.W., Roberts G.D., Martin R.E., Ruggeri C.R., and Pereira J.M. Materials, Manufacturing, and Test Development of a Composite Fan Blade Leading Edge Subcomponent for Improved Impact Resistance. NASA/TM–2015-218340. 20 p.

8. Nikhamkin M., Semenova I., Voronov L. Foreign object damage and fatigue strength loss in compressor blades. Proceedings of ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air GT2008, 2008, Berlin, GT2008-514931.

9. Semenova I., Voronov L., Nikhamkin M. Effect of Blade Geometry and Foreign Object Kinetic Energy on Blades Damage. Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air.GT2008, 2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22425.

10. Nikhamkin M.SH., Semenova I.V. Kontsentratsiya napryazheniy v lopatkakh kompressora pri povrezhdenii ikh postoronnimi predmetami [Concentration of stresses in the compressor blades if they are damaged by foreign objects]. Russian Aeronautics, 2011, no. 4, pp. 15-18.

11. Nikhamkin M.SH., Semenova I.V., Lyubchik O.L., Gladkiy I.L. Modelirovaniye po-vrezhdeniya postoronnimi predmetami polykh lopatok ventilyatora GTD [Simulation of damage by foreign objects of the hollow blades of the GTE fan]. Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2011, vol. 13, no. 1-2, pp. 326-329.

12. Azzam A., Li W. The low-velocity im pact damage resistance of the composite structures - a review. Rev. Adv. Mater. Sci., Vol. 40 (2015), pp.127-145.

13. Abrate S. Impact on Composite Structures, Edited by Cambridge University Press (2005). 304 p.

14. Abrate S., Castanié B., Rajapakse Y. Dynamic Failure of Composite and Sandwich Structures. Springer Science & Business Media, 2012, 643 p.

15. ASTM D7136 / D7136M. Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

16. Crupi V., Epasto G., Guglielmino E. Computed Tomography analysis of damage in composites subjected to impact loading. Fracture and Structural Integrity, 17 (2011), pp. 32-41.

17. Larin A.A., Reznichenko V.I. Primeneniye rentgenovskoy tomografii dlya kontrolya agregatov letatelnykh apparatov iz kompozitsionnykh materialov [Application of X-ray tomography to control aggregates of aircraft from composite materials]. *Trudy MAI*, Iss. 52, pp. 1-11.

18. Yılmaz E., Gökçen M.G., Demirural A., Baykara T. Characterization of the Damage Mechanism of Composites against Low Velocity Ballistic Impact Using Computed Tomography (CT) Techniques. Res. Dev.Material Sci. 2017, 1(5). RDMS.000522. Pp. 1-5.

19. Varas D., Lopez-Puente J. Zaera R. Experimental and numerical study of high velocity impacts on carbon/epoxy laminates. DYMAT 2009 (2009), pp. 1799-1805.

20. Lee J., Soutis C. Prediction of Impact-Induced Fibre Damage in Circular Composite Plates. Appl. Compos. Mater. (2005) 12, pp. 109-131. URL: https://doi.org/10.1007/s10443-004-7767-8

21. Pearson M.R., Eaton M.J., Featherston C.A., Holford K.M. Pullin R. Impact Damage Detection and Assessment in Composite Panels using Macro Fibre Composites Transducers. Journal of Physics: Conference Series, 2011, vol. 305(012049).

22. Pernas-Sánchez J., Artero-Guerrero J.A, Varas D., López-Puente J. Analysis of ice impact process at high velocity. *Experimental Mechanics*, 2015, no. 55, pp. 1669-1679.

23. Kim H., Welch D.A., Kedward K.T. Experimental investigation of high velocity ice impacts on woven carbon/epoxy composite panels. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2003, no. 34, pp. 25-41.

24. Appleby-Thomas G.J., Hazell P.J., Dahini G. On the response of two commercially-important CFRP structures to multiple ice impacts. *Composite Structures*, 2011, no. 93, pp. 2619-2627.

25. Nunes, L.M., Paciornik, S., d'Almeida, J.R.M. Evaluation of the damaged area of glass-fiber-reinforced epoxy-matrix composite materials submitted to ballistic impacts. *Composites Science and Technology*, 2004, no. 64, pp. 945-954.

26. Sevkat E. Experimental and numerical approaches for estimating ballistic limit velocities of woven composite beams. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, no. 45, pp. 16-27.

27. Shaktivesh N.S., Nair Ch.V., Kumar S., Naik N.K. Ballistic impact performance of composite targets. *Materials & Design*, 2013, no. 51, pp. 833-846.

28. Pandya K.S., Pothnis J.R., Ravikumar G., Naik N.K. Ballistic impact behavior of hybrid composites. *Materials & Design*, 2013, no. 44, pp. 128-135.

29. Yahaya R., Sapuan S.M., Jawaid M., Leman Z., Zainudin E.S. Quasi-static penetration and ballistic properties of kenaf–aramid hybrid composites. *Materials & Design*, 2014, no. 63, pp. 775-782.

30. Karthikeyan K., Russell B.P., Fleck N.A., Wadley H.N.G., Deshpande V.S. The effect of shear strength on the ballistic response of laminated composite plates. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 2013, no. 42, pp. 35-53.

31. Nikhamkin M., Voronov L., Gladkiy I. Bolotov B.P. Experimental finding of dynamic deformation fields in metal and composite plates under impact. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2 (2015), pp. 103-115.

32. Nikhamkin M., Voronov L., Gladkiy I. Experimental investigations of high-speed impact damage of carbon fibre for turbojet engine elements. *Structures of composite materials*, 2015, no. 4(140), pp. 74-80.

Сведения об авторах

Воронов Леонид Васильевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Авиационные двигатели» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: leonid-v-voronov@yandex.ru).

Лоуренс Коулз (Лафборо, Великобритания) – аспирант, Вольфсоновская инженерная школа механики и производства, Университет Лафборо (Великобритания, графство Лестершир, г. Лафборо, Эшби Роад, LE11 3TU, +44 1509 227504, e-mail: L.A.Coles@lboro.ac.uk)

Нихамкин Михаил Шмерович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой «Авиационные двигатели» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: nikhamkin@mail.ru).

Зильбершмидт Вадим Владимирович (Лафборо, Великобритания) – PhD, профессор механики материалов, Вольфсоновская инженерная школа механики и производства, Университет Лафборо (Великобритания, графство Лестершир, г. Лафборо, Эшби Роад, LE11 3TU, +44 1509 227504, e-mail: V.Silberschmidt@lboro.ac.uk).

Семенов Сергей Валерьевич (Пермь, Россия) – ассистент кафедры «Авиационные двигатели» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: sergey.semyonov@mail.ru).

Болотов Борис Павлович (Пермь, Россия) – младший научный сотрудник кафедры «Авиационные двигатели» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: vyrd@inbox.ru).

About the authors

Leonid V. Voronov (Perm, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Associate Professor of Aircraft Engine Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: leonid-v-voronov@yandex.ru).

Lourence A. Coles (Loughborough, UK) – PhD Student, Wolfson School of Mechanical, Electrical and Manufacturing Engineering, Loughborough University (Ashby Road, Loughborough, Leics., LE11 3TU, UK, e-mail: V.Silberschmidt@lboro.ac.uk).

Mikhail Sh. Nikhamkin (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, vice-chief of Aircraft Engine Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: nikhamkin@mail.ru).

Vadim V. Silbershmidt (Loughborough, UK) – PhD, professor of material mechanics, Wolfson School of Mechanical, Electrical and Manufacturing Engineering, Loughborough University (Ashby Road, Loughborough, Leics., LE11 3TU, UK, e-mail: V.Silberschmidt@lboro.ac.uk).

Sergey V. Semenov (Perm, Russian Federation) – Lecturer in Aircraft Engine Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: sergey.semyonov@mail.ru).

Boris P. Bolotov (Perm, Russian Federation) – Junior Research Fellow of Aircraft Engine Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: vyrd@inbox.ru).

Получено 17.08.2018