



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 2, 2015

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2015.2.06

УДК 620.17

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КОМПОЗИТНЫХ ПЛАСТИНАХ ПРИ УДАРЕ

М.Ш. Нихамкин, Л.В. Воронов, Б.П. Болотов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 27 марта 2015 г.

Принята: 1 мая 2015 г.

Опубликована: 30 июня 2015 г.

Ключевые слова:

высокоскоростной удар, баллистическое повреждение, динамические деформации, поле деформаций, метод корреляции цифровых изображений, бесконтактное определение деформаций

АННОТАЦИЯ

Цель исследования состоит в разработке и верификации методики экспериментального определения динамических полей деформации при изучении процессов ударного повреждения и разрушения пластин.

Разработана экспериментальная установка, реализующая динамическое нагружение исследуемой пластины при высокоскоростном столкновении с ударником и определение полей динамических деформаций на поверхности пластины. Использован метод корреляции цифровых изображений (Digital Image Corelation) в сочетании со скоростью видеосъемкой, реализованный в аппаратно-программном комплексе Vic-3D.

Проведены две серии экспериментов, различающиеся материалом и размерами исследуемых пластин-образцов, материалом и скоростью ударника. Приведены результаты экспериментального определения полей динамических деформаций на поверхности алюминиевой пластины при высокоскоростном соударении со сферическим стальным ударником и пластины из углепластика при соударении с ледяным ударником. Результаты представлены в виде покадровой записи полей компонент тензора динамических деформаций и временных зависимостей для деформаций в отдельных точках пластины. Реализованы скорости деформации до $1,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. Получена оценка деформации при высокоскоростном разрушении исследованного углепластика.

Достоверность полученных методом корреляции цифровых изображений результатов подтверждена непосредственным измерением остаточных деформаций в пластине.

Описанная методика позволяет получать детальную экспериментальную информацию о процессах высокоскоростного деформирования металлов и композиционных материалов. Эта информация представляет интерес для экспериментальной верификации моделей деформационного поведения и разрушения материалов при высоких скоростях деформации. В частности, она дает возможность получать необходимые для верификации моделей деформирования и деформационных критериев разрушения данные при двухосном напряженном состоянии. Методика может быть использована для отработки расчетных методов и экспериментального изучения закономерностей баллистического повреждения и разрушения ответственных элементов конструкций типа пластин, в частности, при повреждении посторонними предметами деталей самолетов и двигателей, пробивании бронезащиты.

© ПНИПУ

© **Нихамкин Михаил Шмерович** – доктор технических наук, профессор, e-mail: nikhamkin@mail.ru

Воронов Леонид Васильевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: leonid-v-voronov@yandex.ru

Болотов Борис Павлович – младший научный сотрудник, e-mail: vyrd@inbox.ru

Mikhail Sh. Nikhamkin – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: nikhamkin@mail.ru

Leonid V. Voronov – PhD in Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: leonid-v-voronov@yandex.ru

Boris P. Bolotov – Junior Researcher Fellow, e-mail: vyrd@inbox.ru

EXPERIMENTAL FINDING OF DYNAMIC DEFORMATION FIELDS IN METAL AND COMPOSITE PLATES UNDER IMPACT

M. Nikhamkin, L. Voronov, B. Bolotov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 27 March 2014
Accepted: 1 May 2015
Published: 30 June 2015

Keywords:

high-speed impact,
ballistic damage, dynamic
deformation, deformation field,
the method of digital image
correlation, non-contact
detection of deformations

ABSTRACT

The purpose of research is to develop and verify methods of experimental determination of the dynamic strain fields in the study of impact damage and destruction of the plates.

An experimental rig that realizes dynamic load of the studied plate at high-speed impact with a projectile and determination of dynamic strain fields on the plate surface is developed. The method is based on digital image correlation procedure in combination with a high-speed video recording that implemented using hardware-software Vic-3D complex.

The investigation is performed in two series of experiments with different materials and dimensions of the test plates and with different materials and speed of the projectile. The experimentally obtained fields of the dynamic strain for the high-speed impact of the aluminum plate and a spherical steel projectile and for the carbon fiber plate and ice projectile are presented. The results are presented in the form of time-lapse recording of the tensor component fields of dynamic deformation and time dependences of deformations at certain points of the plate. The implemented deformation rate is up to $1,5 \cdot 10^3 \text{ sec}^{-1}$. The state of strain for carbon-fiber composite during high speed destruction is obtained.

The reliability of the digital image correlation method results is confirmed by direct measurement of residual deformations in the plate.

The described method provides detailed experimental data about the processes of high-speed deformation for metals and composite materials. This data is of interest for experimental verification of deformation and destruction models behavior of materials at high strain rates. In particular, it provides an opportunity to obtain the necessary data for verification of deformation models and failure criteria of deformation under biaxial stress state. This method can be used for mathematical models testing and experimental investigation of the ballistic damage and destruction dependences of critical structural elements in cases of foreign objects damage of aircraft and engines parts or armor piercing.

© PNRPU

Введение

К числу важнейших направлений экспериментальной механики деформируемого твердого тела относится изучение закономерностей деформирования и разрушения материалов при высоких скоростях деформации. Интерес к динамическим свойствам конструкционных материалов вызван, в частности, тем, что при создании объектов космической, авиационной, автомобильной техники необходимо учитывать возможные штатные или аварийные ситуации, сопряженные с воздействиями ударного характера. Наиболее известное инженерное приложение в этой области – исследование процессов пробивания бронезащиты [1–5]. Другое важное приложение – предотвращение повреждений элементов самолетов и двигателей посторонними предметами (Foreign Object Damage – FOD) при столкновении с птицами, градом и т.д. [6–12].

Для численного моделирования процессов соударения широко применяют программные продукты ANSYS, LS-DYNA и другие, реализующие метод конечных элементов в нестационарной динамической постановке. При этом наибольшую сложность представляет выбор модели поведения материала при высоких скоростях деформации. В коммерческих программных продуктах реализован ряд моделей разной степени сложности, различающиеся как кругом учитываемых факторов, так и количеством подлежащих экспериментальному определению параметров [7, 8, 10–14]. Наиболее часто используются для описания поведения металлов модели Купера-Саймондса (Cowper-Symonds), Джон-

сона-Кука (Johnson-Cook), Гурсо (Gurson), для применения которых необходимо знать 5–12 параметров.

Экспериментальное определение параметров моделей материалов предполагает проведение специальных испытаний образцов при высоких скоростях деформации. Для получения динамических диаграмм одноосного растяжения (сжатия) в диапазоне скоростей деформации до 10^4 с^{-1} проводят испытания образцов методами Тейлора, Гопкинсона–Кольского, а также раздачу кольцевых или трубчатых образцов внутренним импульсным давлением [14–18]. Распространение получаемых таким образом данных на случаи анизотропных материалов или неодноосного напряженного состояния требует проведения дополнительных исследований.

В условиях ударного деформирования и разрушения конструктивных элементов типа пластин при пробивании бронезащиты или повреждении посторонними предметами деталей самолетов и двигателей реализуется не одноосное напряженно-деформированное состояние. Для определения параметров моделей материалов применительно к таким условиям проводят испытания в близких условиях – при ударе стальным шаром-ударником по пластине-образцу [3, 4, 19–25].

В работе [19] на основе экспериментов по ударному пробиванию металлических пластин стальным шаром получены данные о скоростном упрочнении стали и меди при скоростях деформации порядка 10^4 с^{-1} . В работе [20] на основе подобных экспериментов верифицирована модель поведения при ударе для алюминиевого сплава, в работах [24, 25] – для титановых сплавов. В работах [3, 4] эксперименты проводили на композиционных материалах. В качестве параметров, используемых для верификации расчетных данных по результатам экспериментов, обычно используются геометрические параметры повреждения и их зависимости от скорости удара. Для более надежной верификации стремятся расширить круг этих параметров, в частности измеряют остаточные деформации в зоне соударения [22–25]. Особый интерес представляет величина предельной пластической деформации при разрушении, непосредственно используемая в моделях поведения материалов и существенно зависящая от скорости деформации. Деформации в зоне повреждения пластины определяют [22–25] по искажению сетки, предварительно нанесенной на поверхность пластины. Таким методом остаточные деформации удается определять со значительной погрешностью, для ее снижения необходимы сетки с мелким шагом, нанесение которых сопряжено с техническими трудностями.

Цель настоящей работы состоит в отработке методики экспериментального определения динамических полей деформации при исследовании процессов ударного повреждения пластин с использованием метода корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation – DIC) в сочетании со скоростной видеосъемкой. Идея этого бесконтактного оптического метода [26] состоит в цифровой регистрации и последующем анализе изменений во времени спекл-структуры, предварительно нанесенной на поверхность пластины. Основное достоинство метода – возможность получения полей компонент тензора деформаций на поверхности пластины как функций времени.

1. Методика экспериментов и оборудование

Методика исследования состоит в динамическом нагружении исследуемой пластины при высокоскоростном столкновении с ударником и определении полей динамических напряжений на поверхности пластины. Консольно закрепленная пластина-образец под-

вергается удару по нормали к поверхности сферическим ударником, движущимся со скоростью V .

Проведены две серии экспериментов, различающиеся материалом и размерами исследуемых пластин-образцов, материалом и скоростью ударника. Каждая серия экспериментов состояла из предварительных экспериментов для отработки методики и контрольного эксперимента.

В первой серии экспериментов в качестве образца использовалась пластина из алюминиевого сплава толщиной 4 мм прямоугольной формы с размерами 208×279 мм. Ударник – стальной шар диаметром 23,8 мм. Скорость соударения в контрольном эксперименте $V = 73$ м/с.

Во второй серии экспериментов образец – пластина 200×300 мм толщиной 4,65 мм. Материал пластины – углепластик на основе равнопрочной углеродной ткани (24 слоя с укладкой $[0]_n$), пропитанной эпоксидным связующим. Ударник – ледяной шар диаметром 25 мм. Скорость соударения в контрольном эксперименте $V = 288$ м/с.

В процессе подготовки пластины-образца на его тыльную поверхность наносится контрастная случайная спекл-структура с размером пятен 0,05–1,0 мм. Для получения спекл-структуры поверхность пластины предварительно покрывается белой матовой краской, а затем поверх нее распыляется черная матовая краска.

Экспериментальные исследования проводились с использованием специальной установки на базе пневматической пушки и аппаратно-программного комплекса цифровой корреляции изображений Vic-3D (рис. 1). В процессе эксперимента 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 между собой высокоскоростными камерами Photron Fastcam SA5 4, расположенными под углом $\pm 25^\circ$ к вектору скорости повреждающего предмета. Запуск камер синхронизирован со срабатыванием клапана пневматической пушки через компьютерную систему управления экспериментом на базе PXI-контроллера с набором специальных модулей сопряжения разработки National Instruments. Установка позволяет проводить эксперименты с ударниками из различных материалов диаметром 25 и 50 мм, реализовывать скорости соударения до 500 м/с, видеорегистрацию – с разрешением до $7,5 \cdot 10^5$ кадров в секунду. Ввиду малой длительности экспозиции установка оборудована мощным осветительным комплексом 5.

Испытываемый образец устанавливался в прецизионное зажимное устройство с моментом затяжки 100 Н·м. Зажимное устройство неподвижно крепилось на массивном основании. В описываемых экспериментах видеорегистрация проводилась с частотой $2,5 \cdot 10^4$ кадров в секунду и разрешением 512×512 пикселей. Частота кадров видеорегистрации в проводимых исследованиях выбрана из условий достаточного разрешения, максимального качества изображения спекл-структуры при созданной освещенности и не является предельной.

Для исследования механизма разрушения ледяного шара при соударении с пластиной из углепластика в нескольких предварительных экспериментах выполнялась скоростная видеозапись процесса с лицевой стороны. Процесс фиксировался в проекции на горизонтальную плоскость и в аксонометрической проекции под углом 45° .

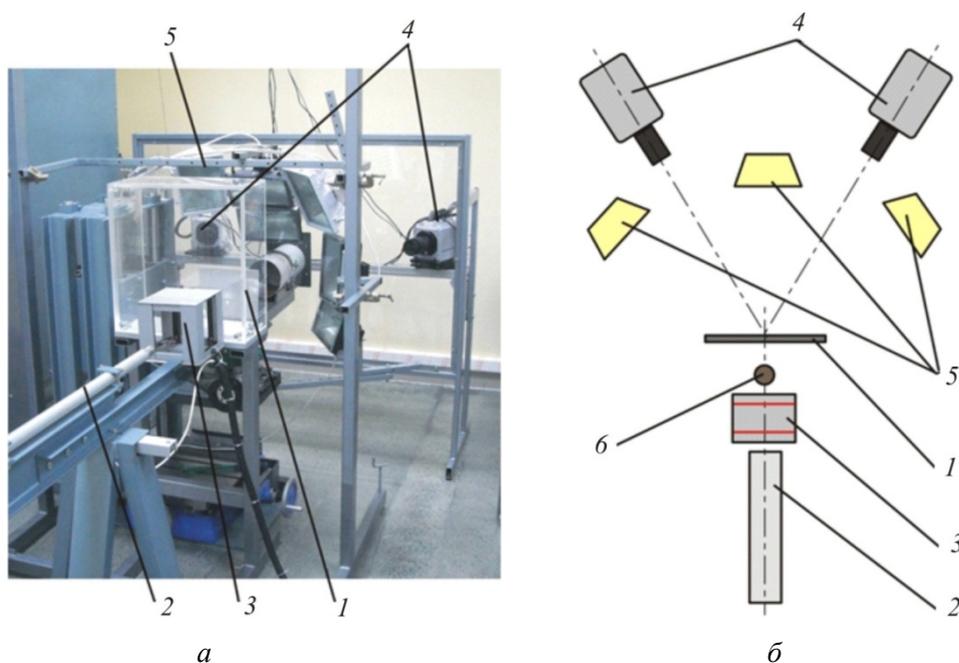


Рис. 1. Экспериментальная установка: *а* – общий вид; *б* – схема; 1 – экспериментальный образец; 2 – пневматическая пушка; 3 – измеритель скорости; 4 – высокоскоростные камеры; 5 – осветительный комплекс; б – ударник

Обработка результатов для получения полей деформаций состоит в анализе полученных цифровых изображений спекл-структуры на тыльной поверхности образца в последовательные моменты времени на основе DIC и проводится покадрово с применением программного обеспечения Vic-3D. Параметры метода корреляции цифровых изображений определены на этапе постобработки предварительных экспериментов соударения стального ударника с алюминиевой пластиной и составляют: локальная область (подмножество) 15×15 пикселей, шаг 2 пикселя (Subset 15, Step 2).

2. Результаты и обсуждение

Программное обеспечение комплекса Vic-3D представляет результаты в виде компьютерной анимации или покадровой временной последовательности полей перемещений и компонент тензора деформаций на поверхности образца. Результаты могут быть представлены в виде графиков изменения перемещений или деформаций во времени для одной точки или области (симуляция тензодатчика) или распределений по любой произвольной линии на объекте. Ниже приведены результаты исследований динамических деформаций пластин на примере контрольного эксперимента из каждой серии.

На рис. 2 приведены полученные в результате эксперимента поля динамических деформаций ϵ_{yy} и ϵ_{xx} на поверхности образца из алюминиевого сплава и их распределения вдоль вертикальной и горизонтальной прямых, проходящих через проекцию точки контакта. Показаны последовательные картины деформаций с интервалом по времени 40 мкс. В начальный момент в зоне соударения на тыльной поверхности пластины появляется локальная область растягивающих деформаций ϵ_{yy} и ϵ_{xx} , окруженная кольцевой областью деформаций сжатия. Максимальные растягивающие деформации (как ϵ_{yy} , так и ϵ_{xx})

более чем в 2,5 раза превосходят деформации сжатия. По мере продвижения ударника деформированная зона увеличивается. Через 120 мкс максимальные деформации достигают 95% максимальной величины (рис. 3). Скорость деформации, реализованная в этой серии экспериментов составляет около $1,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$.

По результатам, полученным методом цифровой корреляции изображений, после завершения процесса соударения пластина остается изогнутой с максимальным перемещением в вершине деформированной зоны 25,5 мм в направлении удара (рис. 4, а). Этот результат подтверждается непосредственным измерением: максимальное перемещение в соответствующей точке составило 26,3 мм. Стальной шар-ударник не получает остаточных деформаций. На рис. 4, б показаны поля остаточных деформаций, зафиксированных методом цифровой корреляции изображений через 0,02 с с момента соударения. Вокруг точки соударения на тыльной поверхности пластины имеется локальная зона диаметром около 25 мм, в которой остались значительные растягивающие деформации ϵ_{yy} и ϵ_{xx} . Эти результаты хорошо согласуются с теоретическими представлениями. Хорошая воспроизводимость метода подтверждается сравнением деформаций на поверхности пластины ϵ_{yy} и ϵ_{xx} в двух экспериментах с близкими скоростями соударения ($V = 69 \text{ м/с}$ и $V = 73 \text{ м/с}$). Расхождение составило 8,7 %, причем большему значению скорости соответствуют большие значения деформации.

С целью верификации полученных результатов при проведении контрольного эксперимента был произведен непосредственный обмер спекл-изображений на тыльной поверхности пластины из алюминиевого сплава в зоне соударения перед и после соударения. Обмер выполнен с использованием измерительного микроскопа Mahr MM 320 с погрешностью не более 0,002 мм. При обмере криволинейная поверхность деформированного образца в зоне измерений ориентировалась по нормали к оптической оси микроскопа. Таким образом, измерения выполнены в проекции на плоскость, касательную к поверхности образца в зоне измерения. Деформации ϵ_{yy} и ϵ_{xx} определены как отношение изменения линейного размера между характерными точками спекл-структуры до и после соударения к исходной величине в направлении соответствующих осей. В силу малой кривизны поверхности ошибка линейных измерений не превышает 0,2 %. Результаты измерений показаны на рис. 5. Средние значения деформации в точке соударения на тыльной поверхности образца, определенные в результате непосредственного обмера, $\epsilon_{yy} = 12,0 \%$ и $\epsilon_{xx} = 10,05 \%$. Соответствующие значения, полученные с использованием метода корреляции цифровых изображений, $\epsilon_{yy} = 11,18 \%$ и $\epsilon_{xx} = 11,2 \%$ (см. рис. 4, б). Таким образом, расхождение в определении деформаций двумя независимыми методами для ϵ_{yy} не превышает 6,8 и 10,3 % – для ϵ_{xx} .

Процесс соударения пластины из углепластика с ледяным шаром носит принципиально иной характер, чем при ударе стальным шаром по алюминиевой пластине. На примере видеозаписи процесса соударения, полученной в результате предварительных экспериментов (рис. 6, а), видно, что ледяной шар разрушается в момент соударения с образованием мелких фрагментов, движущихся преимущественно в радиальном направлении от точки соударения.

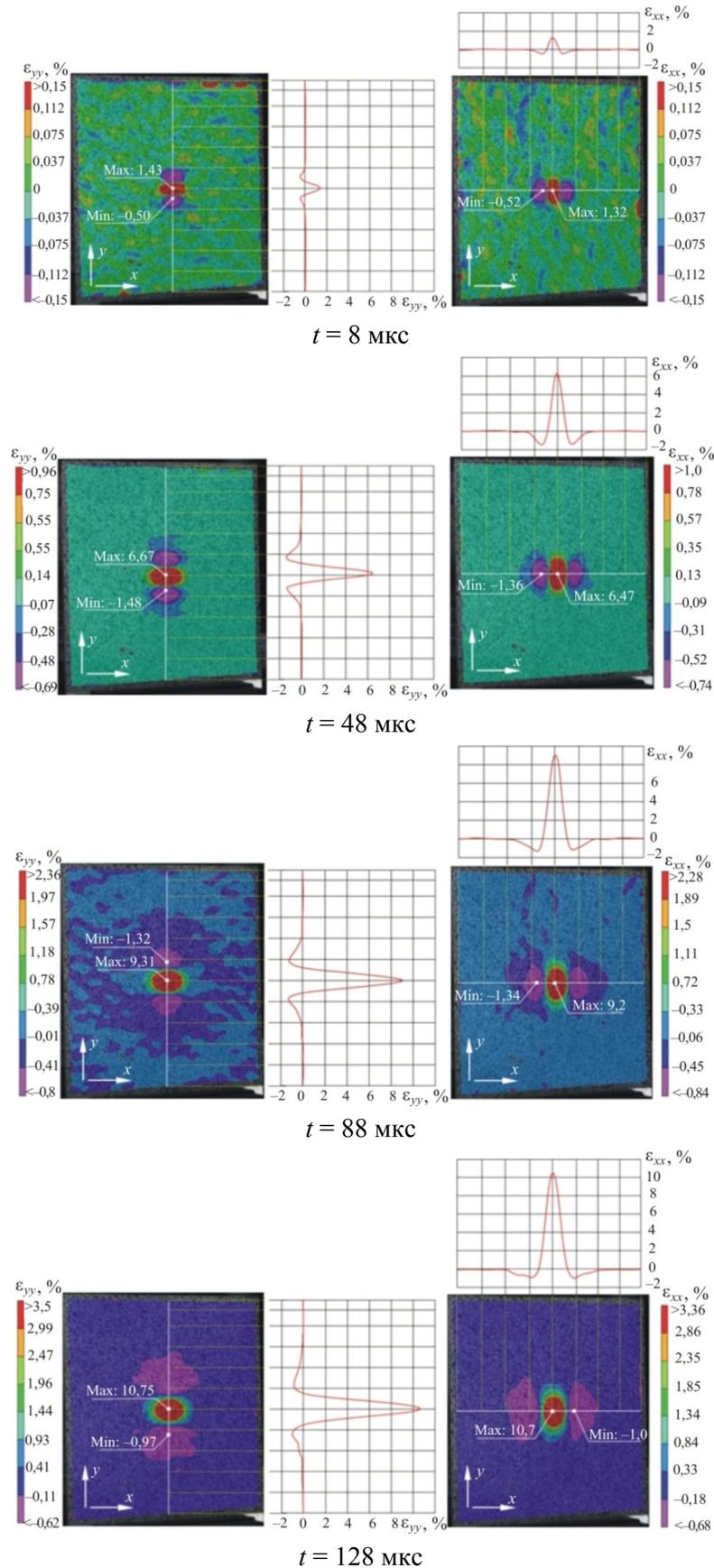


Рис. 2. Поля динамических деформаций ϵ_{yy} и ϵ_{xx} на тыльной поверхности пластины из алюминиевого сплава в последовательные моменты времени после соударения со стальным шаром

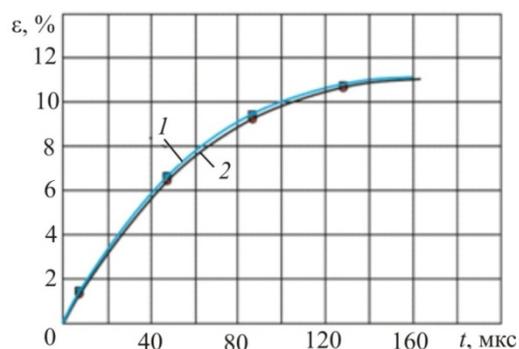


Рис. 3. Изменение во времени компонент тензора деформации ϵ_{yy} (1) и ϵ_{xx} (2) в пластине из алюминиевого сплава

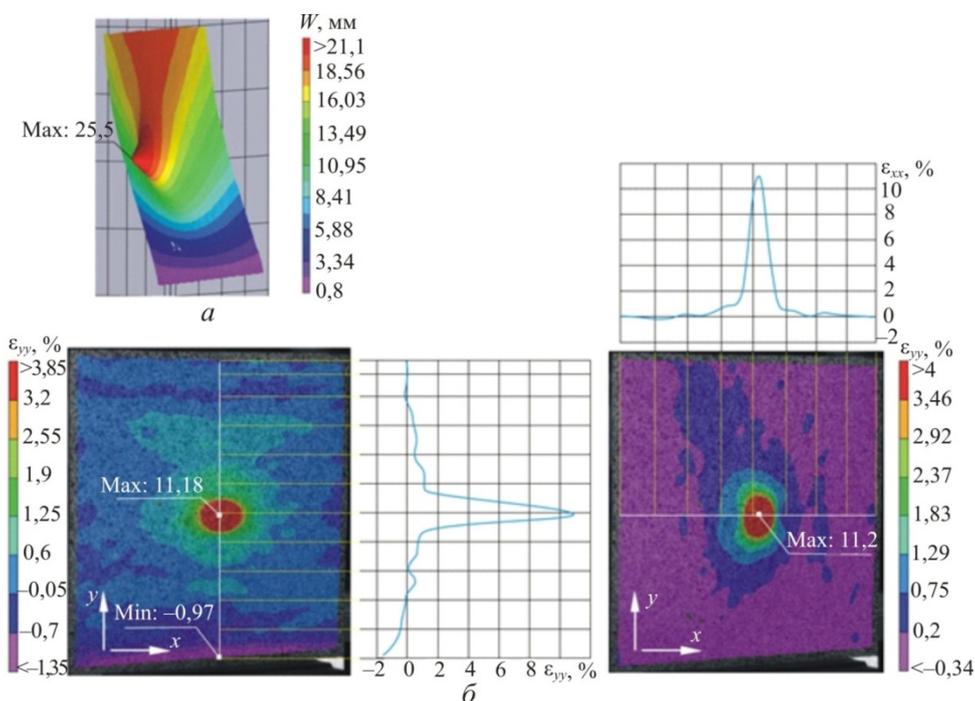


Рис. 4. Поля остаточных перемещений в направлении оси z в пластине из алюминиевого сплава (а) и остаточных деформаций ϵ_{yy} , ϵ_{xx} на ее тыльной поверхности (б) после соударения со стальным шаром

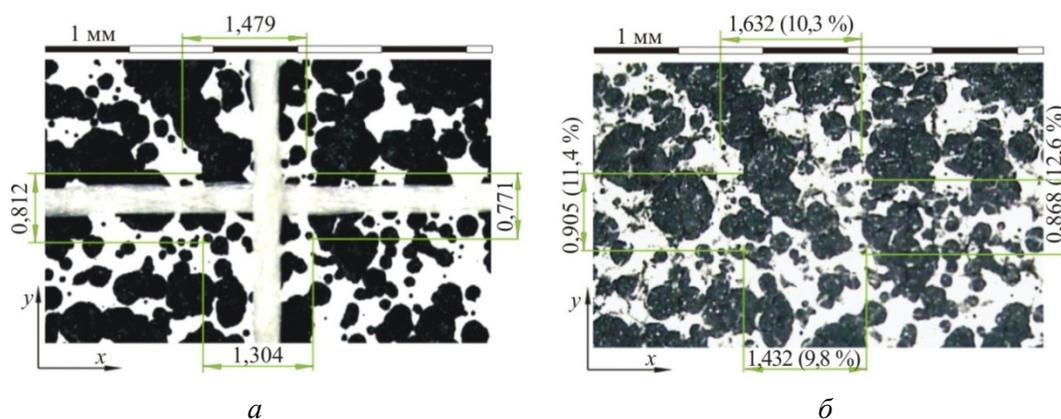


Рис. 5. Результаты обмера спекл-изображений на тыльной поверхности пластины из алюминиевого сплава до соударения (а) и после соударения (б)

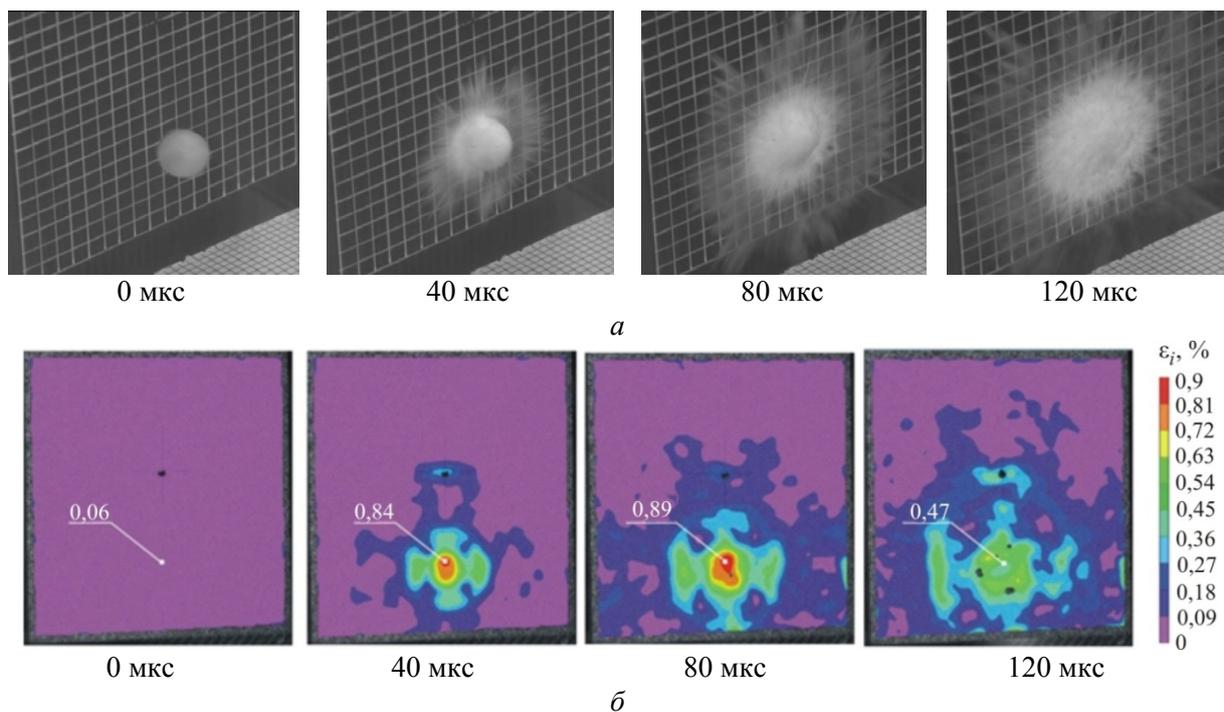


Рис. 6. Процесс соударения пластины из углепластика с ледяным шаром $\varnothing 25$ мм:
 а – последовательные фрагменты видеозаписи; б – поля интенсивности динамических деформаций ϵ_i на тыльной поверхности образца

Поведение углепластиковой пластины-образца также принципиально отличается от рассмотренного в первой серии экспериментов случая. На рис. 6, б видно распространение волны деформации. На начальном этапе поле интенсивности деформации ϵ_i имеет крестообразную форму, которая постепенно превращается в окружность. Интенсивность деформаций в точке соударения в течение 50–60 мкс увеличивается, достигая вблизи точки соударения $\epsilon_i = 0,95$ %, а затем, по мере разрушения ледяного ударника, начинает спадать (рис. 7). Максимальная скорость деформации, реализованная в этой серии экспериментов, составляет около $0,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. Через 0,036 с после начала соударения интенсивность деформаций ϵ_i не превосходит 0,13 %, т.е. можно считать, что остаточные деформации практически не возникают. При визуальном контроле на тыльной поверхности пластины макроскопических повреждений не зафиксировано.

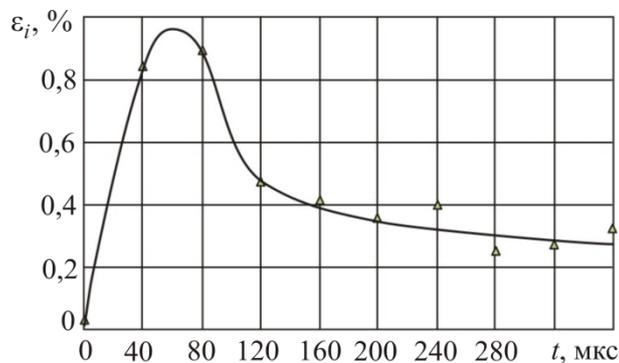


Рис. 7. Изменение во времени деформаций ϵ_i в точке соударения

Полученные данные о динамических деформациях пластины позволяют для исследованного углепластика дать оценку деформации разрушения при скоростном (скорость деформации до $0,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$) нагружении $\varepsilon_i > 0,95 \%$. Следует отметить, что деформация разрушения при квазистатическом одноосном растяжении для этого углепластика по данным [27] составляет 1,1–1,2 %.

Выводы

Описанная методика экспериментального определения динамических деформаций в пластинах при ударе, основанная на методе корреляции цифровых изображений (DIC) в сочетании со скоростной видеосъемкой, позволяет получать детальную информацию о процессах высокоскоростного деформирования металлов и композиционных материалов. Эта информация в виде полей компонент тензора деформаций как функций времени представляет интерес для экспериментальной верификации моделей деформационного поведения и разрушения материалов при высоких скоростях деформации. В частности, она дает возможность получать необходимые для верификации моделей деформирования и деформационных критериев разрушения данные при двухосном напряженном состоянии.

Описанная методика может быть использована для отработки расчетных методов и экспериментального изучения закономерностей баллистического повреждения и разрушения ответственных элементов конструкций типа пластин, в частности, при повреждении посторонними предметами деталей самолетов и двигателей, пробивании бронезащиты и т.д.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (договор № 02.G25.31.0016) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Библиографический список

1. Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. Материалы и структуры легкой бронезащиты. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2014. – 191 с.
2. Белов Н.Н., Копаница Д.Г., Югов Н.Т. Математическое моделирование динамической прочности конструкционных материалов. Физика ударных волн. Динамическое разрушение твердых тел // SST. – 2010. – Т. 3. – 318 с.
3. Компьютерное моделирование пробивания составных преград из керамики на металлической подложке / А.В. Андреев, В.В. Милявский, Ф.А. Акопов, Г.С. Безручко, Л.Б. Боровкова, Г.Е. Вальяно [Электронный ресурс] // Исследовано в России. – 2011. – С. 469–479. – URL: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2011/035.pdf>.
4. Динамика удара / Дж.А. Зукас, Т. Николас, Х.Ф. Свифт, Л.Б. Грещук. – М.: Мир, 1985. – 296 с.
5. Наумов И.В., Болух В.Ф., Бреславский Д.В. Деформирование и разрушение пластин при нагружении цилиндрическим ударником // Механiка та машинобудування. – 2010. – № 1. – С. 107–116.
6. Hudak S.J., Chell G.G. A Damage Tolerance Approach to FOD Based on the ‘Worst Case Notch’ Concept // Proceedings of the 4th National Turbine Engine High Cycle Fatigue Conference, Monterey, CA, 1999. – P. 14–19.

7. Nowell D., Duó P., Stewart I.F. Prediction of fatigue performance in gas turbine blades after foreign object damage // *International Journal of Fatigue*. – 2003. – Vol. 25. – P. 963–969.

8. Foreign Object Damage to Fan Rotor Blades of Aeroengine. Part II: Numerical Simulation of Bird Impact / Yupu Guan, Zhenhua Zhao, Wei Chen, Deping Gao // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2008. – Vol. 21. – P. 328–334.

9. Spanrad S., Tong J. Characterization of foreign object damage (FOD) and early fatigue crack growth in laser shock peened Ti-6AL-4V aerofoil specimens // *Procedia Engineering*. – 2010. – Vol. 2. – Iss. 1. – P. 1751–1759. – URL: <http://www.elsevier.com/elsevier-products/procedia>

10. Нихамкин М.Ш., Воронов Л.В., Семенова И.В. Экспериментальное исследование процесса повреждения лопаток ГТД посторонними предметами // *Авиационная промышленность*. – 2010. – № 3. – С. 16-19.

11. Нихамкин М.Ш., Семенова И.В., Любчик О.Л., Гладкий И.Л. Моделирование повреждения посторонними предметами полых лопаток вентилятора ГТД // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2011. – Т. 13, № 1(2). – С. 326–329.

12. Нихамкин М.Ш., Воронов Л.В., Любчик О.Л. Моделирование методом сглаженных частиц повреждения посторонними предметами полый лопатки вентилятора газотурбинного двигателя [Электронный ресурс] // *Труды МАИ*. – 2013. – № 71. – С. 8. – URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=46954>

13. Dietenberger M., Buyuk M., C-D Kan. Development of a high strain-rate dependent vehicle model. LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg. 2005. – В-III-1-10.

14. Моделирование поведения титанового сплава BT20 при ударном взаимодействии / Е.В. Ломакин, А.М. Брагов, А.Ю. Константинов, М.Е. Колотников, П.А. Моссаковский, Л.А. Костырева, Ф.К. Антонов // *Вестник Нижегород. гос. ун-та им. Н.И. Лобачевского*. – 2011. – № 1. – С. 129–132.

15. Методы исследования свойств материалов интенсивных динамических нагрузках / под общ. ред. М.В. Жерноклетова; РФЯЦ-ВНИИЭФ. – Саров, 2005. – 428 с.

16. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies / J.E. Field, S.M. Walley, W.G. Proud, H.T. Goldrein, C.R. Siviour // *International Journal of Impact Engineering*. – 2004. – No. 30. – P. 725–775.

17. Брагов А.М., Кадони Э., Крушка Л. Современные методы динамических испытаний материалов // *Вестник Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского*. – 2011. – № 4 (5). – С. 2039–2040.

18. Совместное влияние температуры и скорости деформации на предел текучести сплава Э110 / П.В. Федотов, Л.П. Лошманов, А.В. Костюхина, А.В. Салатов, О.А. Нечаева, М.М. Астахов // *Заводская лаборатория*. – 2012. – Т. 78, № 6. – С. 54–59.

19. Qasim H.S. Strain Rate Effect on the Failure Strain and Hardness of Metallic Armor Plates subjected to High Velocity Projectile Impact // *Journal of Engineering Science and Technology*. – 2006. – Vol. 1. – No. 2. – P. 166–175.

20. Gupta N.K., Iqbal M.A., Sekhon G.S. Experimental and numerical studies on the behavior of thin aluminum plates subjected to impact by blunt-and hemispherical-nosed projectiles // *Int. J. Impact. Eng.* 2006. – Vol. 32. – P. 1921–1944.

21. Small caliber projectiles ting steel plates, numerical calculations and physical characterizations of constitutive models / B. Bernhardsson, S. Mousavi, P. Appelgren, S. Leonardsson // *Proceedings of the 27th International Symposium on Ballistics*. Freiburg, Germany, April 22-26. 2013. – P. 1334–1354.

22. Сапожников С.Б. Форенталь М.В. Определение динамического предела текучести методом индентирования листовых образцов // *Динамика машин и рабочих процессов: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. 13–15 октября 2004 г.* – Челябинск, 2005. – С. 137–138.

23. Форенталь М.В. Динамика локального деформирования и разрушения металлической пластины // *Вестник Южно-Урал. гос. ун-та*. – 2009. – № 33. – С. 4–11.

24. Экспериментальная верификация моделей деформационного поведения и высокоскоростного разрушения титанового сплава BT6 / М.Ш. Нихамкин, Л.В. Воронов, О.Л. Любчик, И.Л. Гладкий // *Известия Самар. науч. центра РАН*. – 2011. – Т. 13, № 4(4). – С. 991–997.

25. Validation of Ti-6AL-4V Alloy Mechanical Behavior Models for Conditions of Impact Damage of Turbine Engine Fan Blade / Nikhamkin M., Voronov L., Semenova I., Lubchik O. // *Advanced Materials Research*. – 2013. – Vol. 746. – P. 422-427.

26. Michael A. Sutton, J.-J. Orteu, Hubert W. Schreier. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements // Basic Concepts, Theory and Applications*. – Springer Science+Business Media, LLC, 2009. – 250 p.

27. Технологии и задачи композиционных материалов для создания лопатки спрямляющего аппарата авиационного двигателя / А.Н. Аношкин, В.Ю. Зуйко, Г.С. Шипунов, А.А. Третьяков // *Вестник ПНИПУ. Механика*. – 2014. – № 4. – С. 5–44. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.4.01

References

1. Kobylkin I.F., Selivanov V.V. *Materialy i struktury legkoi bronzashchity* [Materials and Structures of light armor]. Moscow: Bauman MSTU, 2014. 191 p.

2. Belov N.N., Kopanitsa D.G., Iugov N.T. *Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskoi prochnosti konstruktsionnykh materialov* [Mathematical modeling of the dynamic strength of structural materials]. *Fizika udarnykh voln. Dinamicheskoe razrushenie tverdykh tel. SST*, 2010, vol. 3. 318 p.

3. Andreev A.V., Miliavskii V.V., Akopov F.A., Bezruchko G.S., Borovkova L.B., Valiano G.E. *Kompiuternoe modelirovanie probivaniia sostavnykh pregrad iz keramiki na metallicheskoj podlozhke* [Computer modeling of the composite ceramic barrier on the metal substrate penetration]. *Issledovano v Rossii*, 2011, pp. 469-479, available at: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2011/035.pdf>

4. Zukas Dzh. A., Nikolas T., Swift X. F., Greshchuk L. B. *Dinamika udara* [Strike Dynamics]. Moscow: Mir, 1985. 296 p.

5. Naumov I.V., Boliukh V.F., Breslavskii D.V. *Deformirovanie i razrushenie plastin pri nagruzhении tsilindricheskim udarnikom* [Deformation and fracturing of plates during cylindrical projectile loading]. *Mekhanika ta mashinobuduvannia*, 2010, vol. 1, pp. 107-116.

6. Hudak S.J., Chell G.G., A Damage Tolerance Approach to FOD Based on the ‘Worst Case Notch’ Concept. *Proceedings of the 4th National Turbine Engine High Cycle Fatigue Conference*, Monterey, CA. 1999.

7. Nowell D., Duó P., Stewart I.F. Prediction of fatigue performance in gas turbine blades after foreign object damage. *International Journal of Fatigue*, 2003, vol. 25, pp. 963-969.

8. Guan Yupu, Zhao Zhenhua, Chen Wei, Gao Deping. Foreign Object Damage to Fan Rotor Blades of Aeroengine. Part II: Numerical Simulation of Bird Impact. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2008, vol. 21, pp. 328-334.

9. Spanrad S., Tong J. Characterization of foreign object damage (FOD) and early fatigue crack growth in laser shock peened Ti-6AL-4V aerofoil specimens. *Procedia Engineering*, April 2010, vol. 2, iss. 1, pp. 1751-1759, available at: <http://www.elsevier.com/elsevier-products/procedia>

10. Nikhamkin M.Sh., Voronov L.V., Semenova I.V. *Eksperimentalnoe issledovanie protsessa povrezhdeniia lopatok GTD postoronnimi predmetami* [Experimental study of gas turbine engine blades damaged by foreign objects]. *Aviatsionnaia promyshlennost*, 2010, vol. 3, pp. 16-19.

11. Nikhamkin M.Sh., Semenova I.V., Liubchik O.L., Gladkii I.L. *Modelirovanie povrezhdeniia postoronnimi predmetami polykh lopatok ventilatora GTD* [Modeling of GTE hollow fan blades foreign object damaging]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2011, vol. 13, no. 1(2), pp. 326-329.

12. Nikhamkin M.Sh., Voronov L.V., Liubchik O.L. *Modelirovanie metodom sglazhennykh chastits povrezhdeniia postoronnimi predmetami poloi lopatki ventilatora gazoturbinnogo dvigatel'ia* [Modeling of damaging of the gas turbine engine hollow fan blades with foreign object by smoothed particle method]. *Trudy MAI*, 2013, no. 71, p. 8, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=46954>

13. Diitenberger M. Buyuk M., C-D Kan. Development of a high strain-rate dependent vehicle model. *LS-DYNA Anwenderforum*. Bamberg, 2005, B-III-1-10.

14. Lomakin E.V., Bragov A.M., Konstantinov A.Iu., Kolotnikov M.E., Mossakovskii P.A., Kostyreva L.A. Antonov F.K. Modelirovanie povedeniia titanovogo splava VT20 pri udarnom vzaimodeistvii [Modeling of the behavior of titanium alloy VT20 in shock interaction]. *Vestnik Nizhegorodskogo gosudarstvennogo universiteta imeni N.I. Lobachevskogo*, 2011, no. 1, pp. 129-132

15. Batkov Iu.V. Metody issledovaniia svoistv materialov intensivnykh dinamicheskikh nagruzkakh [Methods of material properties study in intensive dynamic loads]. Russian Federal Nuclear Center, All-Russian research institute of experimental physics, 2005. 428 p.

16. Field, J.E., Walley, S.M., Proud, W.G., Goldrein, H.T. & Siviour, C.R. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, no. 30, pp. 725-775.

17. Bragov A.M., Kadoni E., Krushka L. Sovremennye metody dinamicheskikh ispytani materialov [Modern methods of materials dynamic testing]. *Vestnik Nizhegorodskogo gosudarstvennogo universiteta imeni N.I. Lobachevskogo*, 2011, no. 4 (5), pp. 2039-2040.

18. Fedotov P.V., Loshmanov L.P., Kostiukhina A.V., Salatov A.V., Nechaeva O.A., Astakhov M.M. Sovmestnoe vliianie temperatury i skorosti deformatsii na predel tekuchesti splava E110 [Combined effect of temperature and strain rate on the yield strength of the E110 alloy]. *Zavodskaiia laboratoriiia*. 2012, vol. 78, no. 6, pp. 54-59.

19. Qasim H.S. Strain Rate Effect on the Failure Strain and Hardness of Metallic Armor Plates subjected to High Velocity Projectile Impact. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2006, vol. 1, no. 2, pp. 166-175.

20. Gupta N.K., Iqbal M.A., Sekhon G.S. Experimental and numerical studies on the behavior of thin aluminum plates subjected to impact by blunt-and hemispherical-nosed projectiles. *Int. J. Impact. Eng.*, 2006, vol. 32, pp. 1921-1944.

21. Bernhardsson B., Mousavi S., Appelgren P., Leonardsson S. Small caliber projectiles ting steel plates, numerical calculations and physical characterizations of constitutive models. *Proceedings of the 27th International Symposium on Ballistics*. Freiburg, Germany, April 22-26, 2013, pp. 1334-1354.

22. Sapozhnikov S.B., Forental M.V. Opredelenie dinamicheskogo predela tekuchesti metodom indentirovaniia listovykh obraztsov [Determination of the dynamic yield stress by indentation layer samples]. *Vserossiiskaia nauchnotekhnicheskaiia konferentsiia "Dinamika mashin i rabochikh protsessov": 13-15 okt. 2004 g. Cheliabinsk*, 2005. P. 137-138.

23. Forental M.V. Dinamika lokalnogo deformirovaniia i razrusheniia metallicheskoii plastiny [The dynamics of local deformation and fracture of the metal plate]. *Vestnik Iuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2009, no. 33, pp. 4-11.

24. Nikhamkin M.Sh., Voronov L.V., Liubchik O.L., Gladkii I.L. Eksperimentalnaia verifikatsiia modelei deformatsionnogo povedeniia i vysokoskorostnogo razrusheniia titanovogo splava VT6 [Experimental verification of the deformation behavior models and high-speed fracturing of titanium alloy VT6]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2011, vol. 13, no. 4(4), pp. 991-997.

25. Nikhamkin M., Voronov L., Semenova I., Lubchik O. Validation of Ti-6AL-4V Alloy Mechanical Behavior Models for Conditions of Impact Damage of Turbine Engine Fan Blade. *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 746, pp. 422-427.

26. Michael A. Sutton, J.-J. Orteu, Hubert W. Schreier. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. *Basic Concepts, Theory and Applications*. Springer Science+Business Media, LLC, 2009.

27. Anoshkin A.N., Zuiko V.Iu., Shipunov G.S., Tretyakov A.A. Tekhnologii i zadachi kompozitsionnykh materialov dlia sozdaniia lopatki spriamliaiushchego apparata aviatsionnogo dvigatelia [Technologies and problems of composite materials mechanics for production of outlet guide vane for aircraft engine]. *PNRPU Mekhaniks Bulletin*, 2014, no. 4, pp. 5-44. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.4.01