

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ

Моссаковский П. А.¹, Костырева Л. А.¹, Инюхин И. В.¹, Чистяков П. В.¹, Королькова О. П.¹, Макаров П. В.²

¹НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, kostyle@inbox.ru

²АО «ОДК», г. Москва

Ключевые слова: диаграмма нагружения, пластичность, разрушение, Гопкинсон

В области авиадвигателестроения в задачах динамической прочности, сопряжённых с высокоскоростными процессами деформирования и разрушением, таких как: оценка последствий обрыва рабочей лопатки вентилятора, попадание на вход двигателя птиц и посторонних предметов и т. п. – в последнее время широко используются методы прямого компьютерного моделирования. Вместе с тем корректность получаемых оценок обеспечивается тем, какие модели материалов закладываются в расчёт и каким образом идентифицируются параметры выбранных моделей.

В работе выполнено комплексное экспериментально-вычислительное исследование механических свойств ряда конструкционных металлов (титановые сплавы ВТ3-1, ВТ8-1, ВТ20 и сталь 15Х16К5Н2МВФАБ-Ш). С целью построения истинных статических диаграмм нагружения были проведены эксперименты на растяжение (установка Zwick Z100, максимальное растягивающее усилие – 10 т) и на кручение сплошных круговых цилиндрических образцов. Начальный участок диаграммы, ограниченный областью однородного НДС, определялся непосредственно по данным эксперимента (рис. 1).

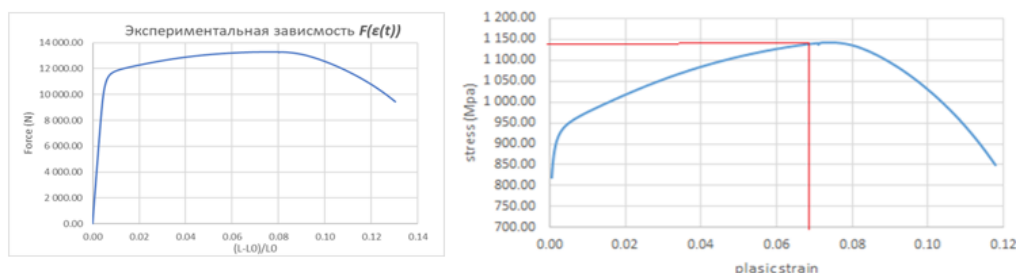


Рис.1 – Экспериментально полученная кривая (слева) и начальный участок диаграммы (справа)

Последующие участки диаграммы с учётом локализации деформаций в шейке и вплоть до разрушения строились при помощи численной процедуры решения обратной задачи с представлением продолжения начального участка диаграммы в виде гладкой однопараметрической кусочно-степенной функции (1)

$$\sigma_k(\varepsilon^p) = a_k(\varepsilon^p + b_k)^{p_k}, \quad 0 \leq p_k \leq 1 \quad (1)$$

Оптимальное значение параметра p_k подбиралось путём минимизации отклонения силовых и кинематических величин (растягивающей силы, диаметра шейки и длины образца) в эксперименте и расчёте в каждый момент времени (для всех испытанных материалов отклонение не превышало 5 %). Похожая схема была использована для построения диаграмм деформирования в эксперименте на кручение.

Для исследования динамических свойств материалов наиболее широко применяется в экспериментальной практике метод разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) [1]. В работе выполнена серия РСГ испытаний и их модификаций на динамическое сжатие, растяжение и сдвиг (рис. 2, данная модификация была разработана и запатентована авторами исследования [2]). Для восстановления кривых нагружения обычные экспериментальные данные с тензодатчиков дополнялись информацией, полученной методом цифровой корреляции изображений (DIC). Оттуда же определялись некие целевые функции (например, соотношение

между удлинением рабочей части и сужением в шейке образца), которые должны были быть достигнуты и в соответствующем виртуальном эксперименте. В результате были построены «скоростные» кривые нагружения и критерии разрушения материалов в зависимости от вида НДС. При этом, в отличие от традиционных гипотез, учитывалась неоднородность полей напряжений и деформаций рабочей части испытываемых образцов, вызванных образованием шейки или бочки в тестах на растяжение и сжатие, соответственно, что требовало построения сложных поверхностей разрушения материалов.

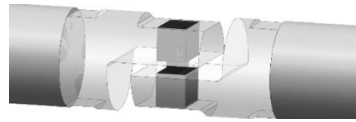


Рис.2 – Дополнительная оснастка и вид образца в испытаниях на динамический сдвиг

В результате проведенного исследования выявлена скоростная чувствительность материалов: повышение их пределов упругости и снижение касательных модулей с ростом скорости деформаций. Также показано существенное влияние вида нагружения для некоторых материалов как на кривые нагружения, так и на величину предельной деформации.

Список литературы

1. Kolsky N. Stress Waves in Solids. – Dover Publications, 1963. – (Dover Books on Physics). – ISBN 9780486610986.
2. Моссаковский П. А., Костырева Л. А. О новом способе экспериментального исследования материалов на динамический сдвиг при высокоскоростном деформировании / Проблемы прочности и пластичности. 2018. Т. 80. № 1. С. 127-135.

Сведения об авторах

Моссаковский Павел Александрович, к.ф.-м.н., в.н.с. Область научных интересов: пластичность при конечных деформациях, динамическая прочность, разрушение.

Костырева Лилия Александровна, к.ф.-м.н., н.с. Область научных интересов: определяющие соотношения моделей материалов, вычислительная механика.

Инюхин Александр Валерьевич, н.с. Область научных интересов: машинное обучение.

Королькова Олеся Павловна, студент. Область научных интересов: механические свойства материалов в зависимости от вида напряжённого состояния.

Чистяков Петр Владимирович, к.ф.-м.н., в.н.с. Область научных интересов: экспериментальная механика.

Макаров Павел Александрович, канд. техн. наук, заместитель генерального конструктора. Область научных интересов: динамическая прочность, аэроупругость.

EXPERIMENTAL COMPUTATIONAL STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF CONSTRUCTION MATERIALS UNDER HIGH-SPEED LOADING

Mossakovsky P.A.¹, Kostyreva L.A.¹, Inyuhin A.V.¹, Chistyakov P.V.¹, Korolkova O.P.¹, Makarov P.V.²

¹Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, kostyle@inbox.ru

²United Engine Corporation, Moscow, Russia

Keywords: stress-strain curve, strain rate, plasticity, failure, split Hopkinson bar

A comprehensive experimental-computational study of the mechanical properties of structural metals was done. True static stress-strain diagrams were constructed by approximation in the area of localization of deformations (necking area) by using a piecewise-power law function. To study the dynamic properties the split Hopkinson bar (SPHB) tests for compression, tension and shear were performed. As a result, the rate sensitivity was revealed, i.e. an increase of yield strength and a decrease of tangent modulus with an increase in the strain rate.