

Установка для испытания полимеров на сжатие на основе разрезного стержня Гопкинсона

Compression testing machine for polymers based on the split Hopkinson bar



А. Ю. Колыванов,
преподаватель
✉ kolyvanov_ayu@voenmeh.ru

A. Yu. Kolyvanov,
teacher



С. А. Мешков,
к. т. н., доцент
✉ meshkovcergery@mail.ru

S. A. Meshkov,
candidate of technical sciences, docent

Кафедра инжиниринга и менеджмента качества, Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова
Department of engineering and quality management, Baltic state technical university «Voенmeh» n. a. D. F. Ustinov

Данная статья содержит информацию об испытательном стенде с разрезным стержнем Гопкинсона для проведения испытаний материалов на сжатие в диапазоне скоростей 10^3 - 10^4 с⁻¹. Описаны конструкция и характеристики испытательного стенда.

This article contains information about a test bench with a split Hopkinson rod for testing materials in compression in the speed range 10^3 - 10^4 s⁻¹. The design and characteristics of the test bench are described.

Ключевые слова: разрезной стержень Гопкинсона, метод Кольского, динамическое сжатие, испытания.

Keywords: split Hopkinson bar, Kolsky method, dynamic compression, tests.

Введение

В условиях развития аддитивных технологий возникает необходимость исследования механических свойств материалов и структур, получаемых этими методами. Свойства некоторых из этих материалов могут в значительной степени изменяться в зависимости от скорости деформации [1].

Для проведения испытаний на сжатие со скоростями более 10^3 с⁻¹ применим метод Кольского. В данном методе сжатие образца, зажатого между рабочими торцами двух механических волноводов, происходит при отражении волны деформации от рабочего торца одного из волноводов [2]. Волна деформации в волноводе может создаваться при соударении с ним ударника, под действием переменных магнитных полей или с применением различных пиросредств. Регистрация волн напряжения в волноводах на сегодняшний день чаще всего осуществляется с применением тензодатчиков и цифровой регистрирующей аппаратуры. Построение диаграмм деформирования осуществляется с применением компьютерных программ.

Обзор литературы

Вопрос проведения испытаний по методу Кольского подробно рассматривался в одной из работ А. М. Брагова. «РСГ и его модификации используются для определения динамических прочностных и деформационных свойств широкого круга хрупких материалов, таких как горные породы, керамики и бетоны, как при нормальной, так и при повышенной температурах» [3, с. 16]. Описанные в данном труде методы послужили основой для создания и будут применяться для модернизации установки, которая будет описана далее.

Конструкция и принцип работы оборудования

Устройство стенда на основе разрезного стержня Гопкинсона представлено на рис. 1.

Стенд имеет два волновода из сплава АМг-6 диаметром 25 мм. Первый имеет длину 1000 мм, второй 800 мм. Первый волновод закреплен в неподвижных кронштейнах через резиновые прокладки. Предполагается заменить их на втулки скольжения и установить амортизирующий упор, препятствующий смещению всего волновода вперед. Второй волновод установлен на амортизирующих кронштейнах с витыми пружинами, размещенных на тележках, движущихся по направляющим. Это позволяет механически развязать волновод со станиной, снизить изгибные деформации и воздействие креплений на распространение волны по волноводу, а также обеспечить его откат после окончания сжатия образца.

Все элементы стенда смонтированы на станине, представляющей собой чугунную балку треугольного сечения, удлиненную П-образным стальным профилем для установки на него пневматической пушки. Станина установлена на столе на двух чугунных призмах через виброгасящие прокладки из пенорезины.

Пневматическая пушка, разгоняющая ударник, установлена на регулируемых кронштейнах с механизмом отката ствола. Кронштейны позволяют регулировать положение ствола для достижения его соосности с волноводом. Механизм отката был установлен для предотвращения мгновенной передачи импульса отдачи на станину. До установки механизма отката наблюдалось смещение всей установки во время разгона ударника. Из-за этого второй волновод, развязанный со станиной, оставаясь на месте, выходит из контакта с образцом до начала нагружения образца. Установка

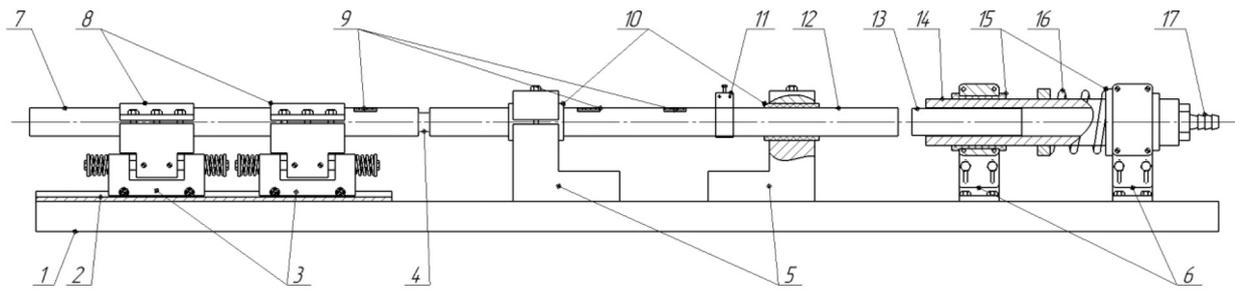


Рис. 1. Принципиальная схема стенда

- 1 — станина; 2 — направляющая; 3 — тележки отката второго волновода; 4 — образец; 5 — кронштейны первого волновода; 6 — регулируемые кронштейны ствола разгонного устройства; 7 — второй волновод; 8 — амортизирующие кронштейны второго волновода; 9 — тензодатчики; 10 — резиновые прокладки; 11 — пьезодатчик запуска осциллографа; 12 — первый волновод; 13 — ударник; 14 — ствол разгонного устройства; 15 — направляющие механизма отката ствола разгонного устройства; 16 — пружина механизма отката; 17 — штуцер для подачи сжатого воздуха

механизма отката позволила собрать весь стенд на одной станине и устанавливать на виброопорах без жесткого закрепления к фундаменту, облегчить его и, при необходимости, перемещать силами персонала лаборатории.

Возникновение задач, связанных с динамическими испытаниями материалов, вызвало необходимость создания в одной из лабораторий кафедры О2 БГТУ «Военмех» стенда с разрезным стержнем Гопкинсона.

Подача сжатого воздуха в ствол пневматической пушки осуществляется устройством на основе ресивера и поршневого клапана (рис. 2). Давление задается вручную по манометру. Воздух в ресивер закачивается компрессором. Максимальное рабочее давление установки составляет $7,4 \text{ кг/см}^2$. Для приведения клапана в закрытое положение на него подается давление через вентиль 2, которое его закрывает, и клапан фиксируется поворотом вала спускового механизма. При этом вентиль 5 открыт, а вентили 3 и 6 закрыты. Ударник возвращается в начало ствола при помощи шомпола. Для проведения нагружения вентиль 2 закрывается, открываются вентили 3 и 6. Вентилем 4 давление в ресивере спускается до необходимого, после чего поворачивается вал спускового механизма и происходит выстрел [4].

Ударник представляет собой дюралюминиевый цилиндр с плоским торцом. При столкновении ударника с началом первого волновода происходит передача

импульса с формированием области (волны) упругой деформации в волноводе, движущейся по нему со скоростью распространения продольной волны в материале волновода. При отражении волны от нагружающего конца первого волновода, торец совершает перемещение со скоростью, пропорциональной механическому напряжению в волне.

На находящийся между волноводами образец во время отражения волны от торца первого волновода действует сила, сжимающая его. Эта сила передается на второй волновод и формирует в нем импульс напряжения (рис. 3). Под действием полученного импульса второй волновод откатывается и перестает взаимодействовать с образцом раньше, чем отраженная волна в первом волноводе вновь дойдет до нагружающего конца. Это позволяет избежать многократного нагружения испытуемого образца.

Для регистрации импульсов с тензодатчиков используется цифровой запоминающий осциллограф. Запуск осциллографа осуществляется по сигналу пьезоэлектрического датчика, закрепленного в начале первого волновода. Пьезоэлемент генерирует заряд под действием поперечной деформации волновода в зоне прохождения по нему продольной волны сжатия.

Сигнал передается по экранированным проводам. Экраны проводов, заземление осциллографа и источников питания, металлические конструкции установки и общие выводы всех применяемых электронных схем присоединены к одному заземлению [2, 5].

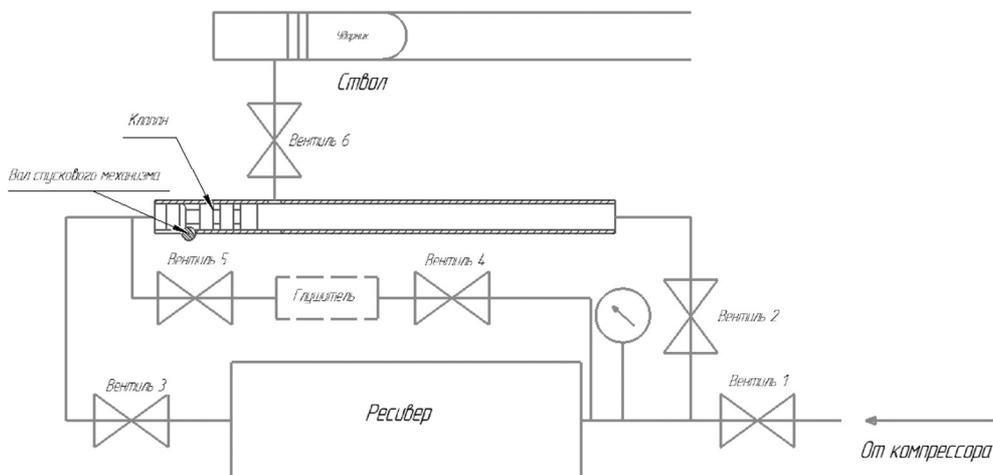


Рис. 2. Принципиальная схема разгонного устройства



Рис. 3. Осциллограмма сигнала тензодатчика первого волновода (канал 1, нижний) и тензодатчика второго волновода через усилитель (канал 2, верхний)

Так как некоторые испытуемые материалы имеют жесткость и прочность значительно меньшие, чем материал волновода, импульс, возникающий во втором волноводе может иметь слишком малую амплитуду для точной регистрации сигнала тензодатчика на фоне различных электрических помех. Для решения данной проблемы был собран усилитель на основе операционного усилителя к1407уд2. Усилитель позволил повысить уровень сигнала, а также избавиться от помех на частотах более 200 кГц.

Обработка результатов испытаний

Обработка результатов испытаний производится при помощи программы, созданной в среде LabVIEW. Данные, записанные осциллографами в файл формата «.csw» преобразуются программой в массивы данных, соответствующие отсчету времени и сигналам каналов осциллографов.

Созданная программа позволяет на основе сигналов тензодатчиков определить скорость деформации образца, рассчитать деформацию образца и напряжение в нем в каждый момент времени, построить диаграмму деформация/напряжение, определить предел прочности и другие пиковые значения на диаграмме при наличии таковых, а также рассчитать энергию, поглощенную образцом в процессе сжатия. Форма отображения результатов расчета представлена на рис. 4.

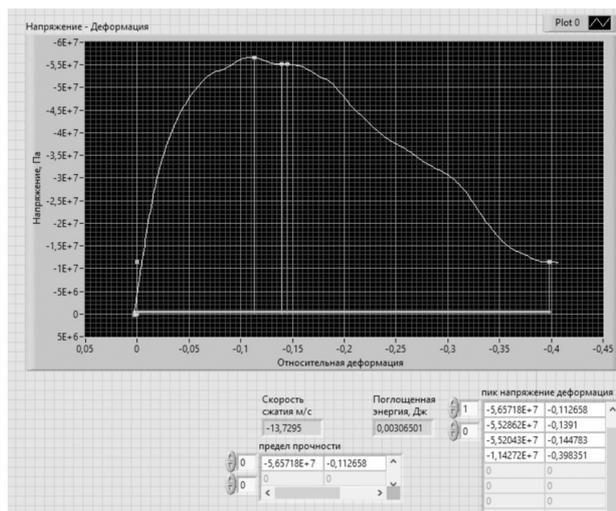


Рис. 4. Представление результатов расчета программой результатов испытаний образца, полученного с применением FDM-технологии

Возможность выделения пиковых значений на диаграмме важна в случаях, когда разрушение образца происходит в несколько стадий и необходимо автоматически определить максимальное напряжение и относительную деформацию на каждой стадии разрушения. В частности, это касается испытаний образцов, имеющих сложную пространственную структуру.

Заключение

На данный момент, установка позволяет проводить испытания различных полимерных материалов с пределом прочности не менее 1,5 МПа. Для испытания материалов с меньшей прочностью или с размерами элементарного объема (ячейки), не позволяющими испытывать данным методом, существуют приспособления, позволяющие увеличить размер испытуемого образца [6]. Дальнейшая модернизация установки будет направлена на борьбу с возникновением изгибных колебаний волноводов и на достижение возможности придания нужной формы нагружающему импульсу, что важно для обеспечения постоянной скорости сжатия при испытании высокопрочных материалов.

Список использованных источников

1. А. Ю. Кольванов, С. В. Дьяченко, С. В. Балабанов и др. Исследование физико-механических свойств полимерных материалов с геометрией ТППМЭ типа примитив Шварца при динамических нагрузках//XXI Молодежная научная конференция ИХС РАН «Функциональные материалы: синтез, свойства, применение», посвященная 75-летию юбилею Института химии силикатов им. И. В. Гребенщикова (с международным участием). Тезисы докладов конференции, г. Санкт-Петербург, 5-7 декабря 2023 г. СПб: ООО «Издательство «ЛЕМА», 2023. С. 69-70.
2. Г. Кольский. Волны напряжения в твердых телах. М.: Издательство иностранной литературы, 1955. 194 с.
3. А. М. Брагов, А. К. Ломунов. Использование метода Кольского для исследования процессов высокоскоростного деформирования материалов различной физической природы: монография. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2017. 148 с.
4. А. Ю. Кольванов, М. Ф. Жаркой. Пневматический узел разгона бойка волноводного ударного стенда//Иновационные технологии и технические средства специального назначения. Труды X11 общероссийской научно-практической конференции. В 2-х т. Т. 2. Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ». СПб., 2020.
5. М. Л. Дайчик. Методы и средства натурной тензометрии: справочник. М.: Машиностроение, 1989.
6. С. А. Мешков, А. Ю. Кольванов. Расширение области применения стенов на основе разрезного стержня Гопкинсона//Иновации. 2022. № 5 (283). С. 74-77.

References

1. A. Yu. Kolyvanov S. V. Dyachenko, S. V. Balabanov et al. Study of the physical and mechanical properties of polymer materials with the geometry of TPPME of the primitive Schwartz type under dynamic loads//XXI Youth Scientific Conference of the Institute of Chemical Chemistry of the Russian Academy of Sciences «Functional materials: synthesis, properties, application», dedicated to the 75th anniversary of the Institute of Silicate Chemistry n. a. I. V. Grebenshchikov (with international participation). Abstracts of conference reports. St. Petersburg, December 5-7, 2023. St. Petersburg: LEMA Publishing House LLC, 2023. P. 69-70.
2. G. Kolsky. Stress waves in solids. M.: Publishing house of foreign literature, 1955. 194 p.
3. A. M. Bragov, A. K. Lomunov. Using the Kolsky method to study the processes of high-speed deformation of materials of various physical nature: monograph. Nizhny Novgorod: Publishing house of UNN, 2017. 148 p.
4. A. Yu. Kolyvanov, M. F. Zharkoy. Pneumatic unit for accelerating the striker of a waveguide shock stand//Innovative technologies and special-purpose technical means. Proceedings of the X11 All-Russian Scientific and Practical Conference in 2 vols. Vol. 2. Library of the journal «Voenmeh. Bulletin of BSTU». SPb, 2020.
5. M. L. Daichik. Methods and means of full-scale strain gauge: handbook. M.: Mashinostroenie, 1989.
6. S. A. Meshkov, A. Yu. Kolyvanov Expanding the scope of applications of stands based on a split Hopkinson rod//Innovations. 2022. № 5 (283). P. 74-77.