

# Расширение области применения стендов на основе разрезного стержня Гопкинсона

Expansion the scope of application of stands based on the split Hopkinson bar

doi 10.26310/2071-3010.2022.284.5.009



**С. А. Мешков,**

к. т. н., доцент  
✉ meshkovcergey@mail.ru

**S. A. Meshkov,**

candidate of technical sciences, docent



**А. Ю. Колыванов,**

ассистент  
✉ kolyvanov\_aiu@voenmeh.ru

**A. Yu. Kolyvanov,**

assistant

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург  
Baltic state technical university «Voенmeh» n. a. D. F. Ustinov, Saint Petersburg

Актуальность данной работы заключается в необходимости проведения испытаний малоплотных материалов на динамическое сжатие в лаборатории, оснащенной стендом с разрезным стержнем Гопкинсона. Цель работы — модернизация испытательного стенда для обеспечения возможности проведения вышеуказанных испытаний, а также разработка других способов применения стенов такого типа. Предлагаемые в статье технические решения могут быть применены в области испытаний материалов и изделий, подвергаемых экстремальным механическим воздействиям.

The relevance of this work lies in the need to test low-density materials for dynamic compression in a laboratory equipped with a stand with a split Hopkinson rod. The purpose of the work is to modernize the test bench to enable the above tests, as well as to develop other ways to use benches of this type. The technical solutions proposed in the article can be applied in the field of testing materials and products subjected to extreme mechanical stress.

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

**Keywords:** split Hopkinson bar, Kolsky method, dynamic compression, testing, inertial loading.

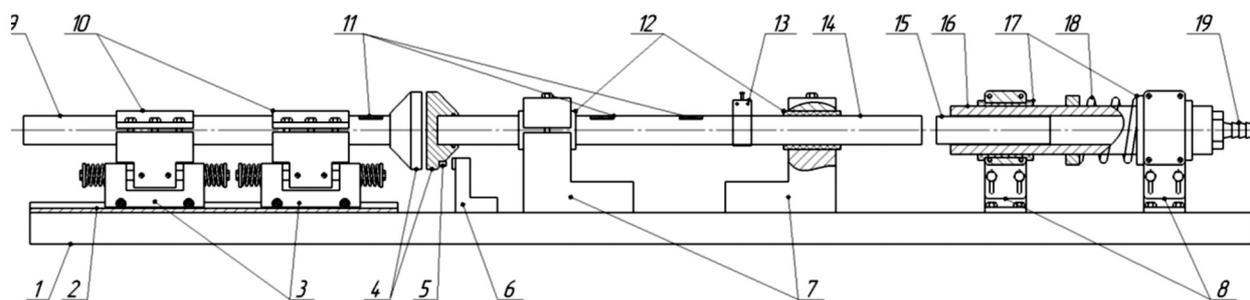
Для обеспечения надежного функционирования изделий, работающих в экстремальных условиях и подвергающихся значительным ударным, вибрационным и другим динамическим нагрузкам, исключительно важно точное определение механических свойств применяемых материалов и контроль их качества. Одним из применяемых в данном случае методов являются испытания на сжатие. При этом статических испытаний недостаточно, так как часто механические свойства материала меняются в зависимости от скорости сжатия.

В области исследования динамических свойств материалов получил распространение метод Кольского [1], заключающийся в измерении величины деформации образца под действием усилия, возникающего при переходе через него волны деформации из одного механического стержня-волновода в другой [3]. Чаще всего, стенды для данного метода испытаний представляют собой станину, на которой на подвижных опорах устанавливаются два металлических волновода. Между их рабочими торцами помещается образец материала, имеющий форму диска или цилиндра. Для создания волны деформации в первом волноводе, с торцом волновода соударяется ударник, разгоняемый при помощи пневматической пушки. Между торцом волновода и ударником могут размещаться деформируемые прокладки. Также для создания волны деформации могут применяться различные пиросредства. При достижении волной торца первого волновода, на образец начинает действовать сила, передающаяся через него на второй волновод. Так как образец деформируется,

часть волны отражается от рабочего торца первого волновода в виде волны растяжения. Прямая и обратная волны в первом волноводе, а также прямая во втором, измеряются при помощи тензодатчиков, показания которых регистрируются осциллографом. Исходя из полученных данных, может быть построена диаграмма деформация/напряжение для данного материала при данной скорости сжатия.

Этот метод имеет свои ограничения, связанные со свойствами испытуемых материалов. Образцы малоплотных материалов будут разрушаться, или сжиматься при усилиях, не способных создать во втором волноводе напряжений, достаточных для их точного измерения тензодатчиками. Также перемещение торца первого волновода при однократном прохождении волны может быть недостаточно для достижения необходимой величины деформации. Такими материалами могут быть различные виды пенобетона, вспененные полимеры и другие материалы, имеющие выраженные демпфирующие свойства.

Вопрос испытаний малоплотных материалов с применением одной из модификаций метода Кольского рассматривался в одной из работ А. М. Брагова. «При испытаниях на сжатие малоплотных материалов (древесина, пенопласты, высокопористые керамики и т. д.) из-за большой разницы в акустических жесткостях мерных стержней и образца амплитуда отраженного от образца импульса составляет 80-90% амплитуды исходной падающей волны. Этот отраженный импульс, дойдя до переднего (нагружаемого) торца первого мерного стержня, отражается обратно (по-



Обозначения: 1 – станина; 2 – направляющая; 3 – тележки отката второго волновода; 4 – расширители; 5 – неодимовый магнит; 6 – кронштейн с датчиком Холла; 7 – кронштейны первого волновода; 8 – регулируемые кронштейны ствола разгонного устройства; 9 – второй волновод; 10 – амортизирующие кронштейны второго волновода; 11 – тензодатчики; 12 – резиновые прокладки; 13 – пьезодатчик запуска осциллографа; 14 – первый волновод; 15 – ударник; 16 – ствол разгонного устройства; 17 – направляющие механизма отката ствола разгонного устройства; 18 – пружина механизма отката; 19 – штуцер для подачи сжатого воздуха

Рис. 1. Принципиальная схема стана

сколькx контакта с ударником уже нет) и, достигнув образца, нагружает его вторично. Такие циклы нагрузки повторяются многократно, пока этот импульс совсем не затухнет. Таким образом, образец во время одного испытания нагружается много раз, получая в каждом цикле определенную деформацию» [1, с. 64]. Предложенный способ дает возможность значительно увеличить относительную деформацию образца, однако процесс происходит прерывисто, а также требует большой длины второго волновода, что значительно увеличивает размеры установки.

### Конструкция и принцип работы оборудования

В лаборатории БГТУ «Военмех» был создан стенд с разрезным стержнем Гопкинсона, и в последствии модернизирован для испытаний пенобетона. Его принципиальная схема представлена на рис. 1.

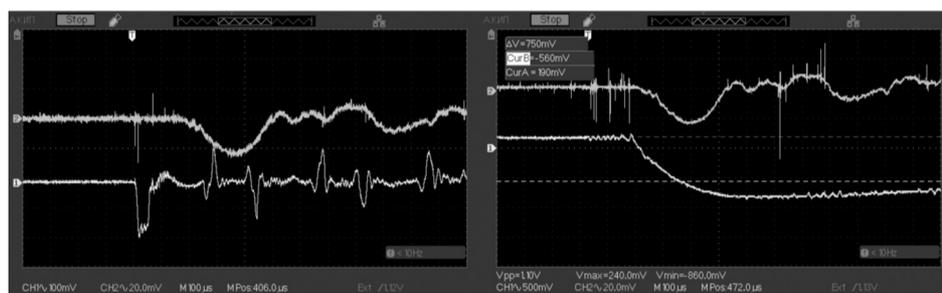
Все элементы стана смонтированы на единой станине, представляющей собой чугунную балку треугольного сечения. На ней закреплены кронштейны пневматической пушки и первого волновода. Первый волновод закреплен в неподвижных кронштейнах через резиновые прокладки. Второй волновод установлен на амортизирующих кронштейнах с витыми пружинами, размещенных на тележках, движущихся по направляющим. Это позволяет механически развязать волновод со станиной, снизить воздействие креплений на распространение волны по волноводу,

а также обеспечить его откат после окончания сжатия образца. Волноводы выполнены из сплава АМГ-6 и имеют диаметр 25 мм.

Пневматическая пушка, разгоняющая ударник, установлена на кронштейнах с механизмом отката ствола. Механизм был установлен для предотвращения резкой передачи импульса отдачи на станину. Без данного устройства станина начинает двигаться при разгоне ударника, что вызывает перемещение второго волновода и нарушение его контакта с образцом. Установка механизма отката позволила устанавливать стенд на виброопорах без жесткого закрепления к фундаменту, облегчить его и, при необходимости, перемещать силами персонала лаборатории.

Подача сжатого воздуха в ствол пневматической пушки осуществляется устройством на основе ресивера и поршневого клапана. Давление задается вручную по манометру. Воздух в ресивер закачивается компрессором. Также это же устройство используется в составе другого ударного волноводного стана, предназначенного для испытаний электронных компонентов на ударостойкость [2].

Возможность испытания материалов значительно менее прочных и упругих, чем материал волноводов была обеспечена увеличением площади сечения образца. Для этого на рабочие торцы волноводов были установлены расширители, между торцами которых устанавливается образец. Расширители изготовлены из того же сплава, что и волноводы, и удерживаются



А: канал 1 – сигнал тензодатчика первого волновода; канал 2 – сигнал тензодатчика второго волновода;  
Б: канал 1 – сигнал тензодатчика второго волновода; канал 2 – сигнал датчика Холла

Рис. 2. Осциллограммы сигналов

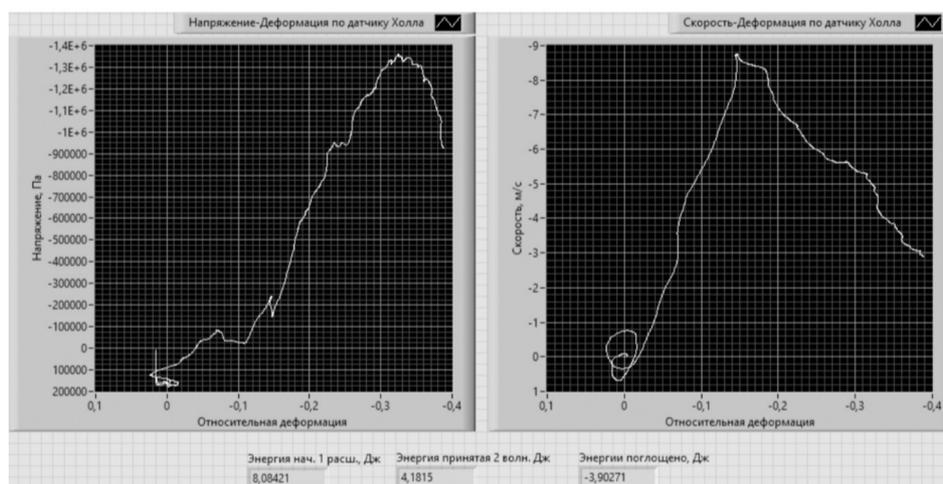


Рис. 3. Графики деформация/напряжение и деформация/скорость сжатия для образца пенобетона, полученные на стенде с применением расширителей и датчика Холла

на концах волноводов под действием силы трения уплотнителей и разрежения, создаваемого внутри при перемещении расширителя по волноводу.

Доходя до рабочего торца первого волновода, волна передает часть своего импульса первому расширителю. При этом расширитель приобретает импульс, равный разнице импульсов прямой и обратной волн в первом волноводе, и отскакивает от торца. Образец сжимается между расширителями. Сила передается от образца через второй расширитель на второй волновод, создавая в нем волну сжатия, измеряемую тензодатчиком. Перемещение первого расширителя при этом измеряется при помощи датчика Холла, закрепленного на станине и неодимового магнита, закрепленного на расширителе. Для датчика предварительно определяется зависимость напряжения на выходе от расстояния до магнита. Следует отметить, что при этом необходимо использовать магнит минимально возможных размеров и массы, так как слишком крупный магнит разрушается или отрывается под действием ускорения в начале движения расширителя. Ускорение было измерено при помощи тензодатчика и дифференциатора [4, 5], и составляло до 100000 G. В описанной установке использован цилиндрический магнит длиной 3 мм и диаметром 5 мм, установленный в цилиндрическое углубление на расширителе и закрепленный эпоксидным клеем. Более крупные магниты, закрепляемые винтом, расклевываются спустя 10-15 запусков установки.

Следует отметить, что расширители могут быть установлены на стенд не только для обеспечения проведения испытаний некоторых материалов, но и для преобразования формы волны сжатия, проходящей по стержням. Для этого между расширителями необходимо установить прокладку, свойства которой будут определять изменение формы импульса. При этом, при отражении волны от свободного торца второго волновода, он будет совершать ускоренное перемещение. Это может быть применено при проведении испытаний различных изделий электронной техники на ударостойкость [6]. На изделие, закрепленное на торце волновода, можно обеспечить воздействие импульса ударного ускорения амплитудой порядка  $10^3$ - $10^4$  G, и длительностью до 300 мкс.

### 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. Из сигнала тензодатчика, закрепленного на первом волноводе, вычисляется скорость перемещения торца первого волновода и импульс, переданный первому расширителю. Из сигнала тензодатчика, расположенного на втором волноводе, вычис-

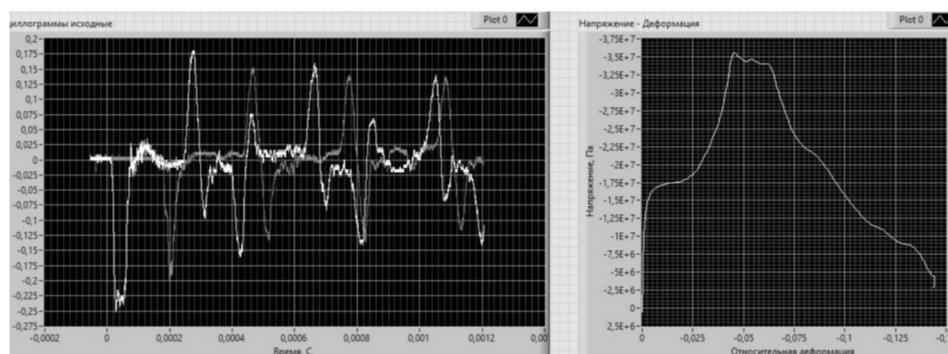
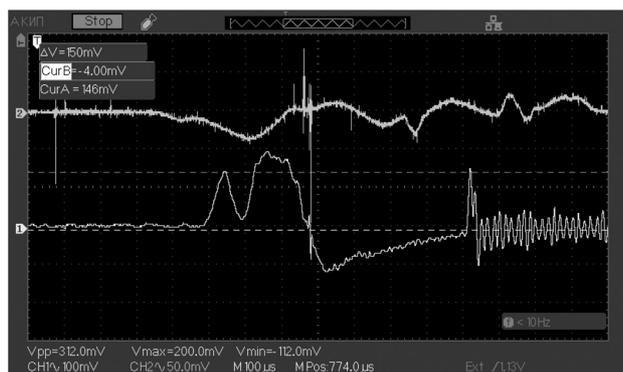


Рис. 4. Сигналы тензодатчиков и диаграмма деформация/напряжение для образца фотополимера, полученные методом Кольского



Канал 1 — сигнал акселерометра;  
канал 2 — сигнал тензодатчика второго волновода

Рис. 5. Оциллограмма импульса ударного ускорения

ляется сила, действующая на образец. По значениям сигнала датчика Холла, с учетом его градуировочной характеристики, определяется перемещение первого расширителя, из которого, с учетом деформации второго волновода, вычисляется деформация образца. Из показаний тензодатчиков первого и второго волноводов вычисляется энергия, полученная первым расширителем, а также принятая вторым волноводом. Из их разницы возможно определение энергии, затраченной на сжатие образца.

В ходе проверки пригодности метода к использованию, были проведены испытания образцов пенобетона с применением расширителей на стенде. При помощи написанной программы были обработаны сигналы тензодатчиков и датчика Холла. Оциллограммы сигналов приведены на рис. 2. Диаграммы деформация/напряжение и деформация/скорость сжатия полученные таким способом для образцов пенобетона размером  $40 \times 40 \times 10$  мм при начальной скорости сжатия 9 м/с, приведены на рис. 3. При этом важно отметить, что толщина испытуемого образца должна быть выбрана так, чтобы весь процесс его сжатия занимал меньше времени, чем необходимо волне, чтобы дойти до свободного торца второго волновода, и, отразившись

от него дойти до тензодатчика. В противном случае, будут возникать искажения сигнала.

Также была составлена программа для обработки результатов, полученных классическим методом, без применения расширителей. Таким способом, например, проводятся исследования динамических свойств фотополимеров, используемых при 3D-печати. Разработанные программные средства были применены при обработке результатов испытаний образцов фотополимера, проведенных классическим методом. Сигналы тензодатчиков, полученные при таком испытании и диаграмма деформация/напряжение приведены на рис. 4.

Для проверки метода преобразования формы волны и получения импульса ударного ускорения большой длительности, был проведен эксперимент. Между расширителями была помещена войлочная прокладка толщиной 10 мм. На свободный торец второго волновода был установлен акселерометр на отскакивающем приспособлении. Измерение производилось при помощи пьезоэлектрического акселерометра АП-15, согласующего усилителя ПУНЖ-1-002 [7] и цифрового запоминающего осциллографа. Был получен импульс ударного ускорения, оциллограмма которого приведена на рис. 5. Пиковое его значение достигает 2000 G, а длительность действия ускорения 300 мкс. Для создания требуемой формы импульса необходимо подобрать подходящий материал и толщину прокладки между расширителями.

Таким образом, с применением предложенных технических средств, стенды на основе разрезного стержня Гопкинсона могут быть доработаны для испытаний малоплотных материалов, а также для испытаний электронных компонентов на ударостойкость и ударопрочность. Методы показали свою работоспособность, но при этом необходимо продолжение исследований для повышения достоверности результатов испытаний.

Возможность проведения испытаний малоплотных материалов позволит проводить исследования материалов, применяющихся при демпфировании ударных и вибрационных воздействий, а также контролировать их качество.

#### Список использованных источников

1. 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.
2. Г. Кольский. Волны напряжения в твердых телах. М.: Издательство иностранной литературы, 1955. 194 с.
3. А. Ю. Кольванов, М. Ф. Жаркой. Пневматический узел разгона бойка волноводного ударного стенда//Иновационные технологии и технические средства специального назначения. Труды Х11 общероссийской научно-практической конференции в 2-х т. Т. 2. Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», 2020.
4. А. Ю. Кольванова. Способ измерения ударного ускорения, воспроизводимого волноводным ударным стендом, при помощи тензодатчика//Фундаментальные основы баллистического проектирования: VIII Всероссийская научно-техническая конференция. СПб: Изд-во БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, 2022. С. 75.
5. М. Л. Дайчик. Методы и средства натурной тензометрии: справочник. М.: Машиностроение, 1989.
6. ГОСТ Р 53190-2008 «Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на удар с воспроизведением ударного спектра». М.: Изд-во стандартов, 2008.
7. В. С. Пеллинец. Измерение ударных ускорений. М.: Изд-во стандартов, 1975. 288 с.

#### References

1. 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.
2. G. Kolsky. Stress waves in solids. M.: Publishing house of foreign literature, 1955. 194 p.
3. 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 volumes. Vol. 2. Library of the journal «Voemeh. Bulletin of BSTU», 2020.
4. A. Yu. Kolyvanova. A method for measuring shock acceleration reproduced by a waveguide shock stand using a strain gauge//Fundamental principles of ballistic design: VIII All-Russian scientific and technical conference. St. Petersburg: Publishing house of BSTU «Voemeh» n. a. D. F. Ustinova, 2022. P. 75.
5. M. L. Daichik. Methods and means of full-scale strain gauge: handbook. M.: Mashinostroenie, 1989.
6. GOST R 53190-2008 «Methods of testing for resistance to mechanical external influencing factors of machines, devices and other technical products. Impact tests with reproduction of the shock spectrum». M.: Publishing house of standards, 2008.
7. V. S. Pellinets. Measurement of shock accelerations. Moscow: Publishing House of Standards, 1975. 288 p.