DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-4-66-70

УДК (UDC) 620.175.25

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МОМЕНТА КРУЧЕНИЯ ПРИ НАГРУЖЕНИИ МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ БРИДЖМЕНА

© Равиль Валинурович Чурбаев¹, Дмитрий Иванович Вичужанин²

¹ Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия; e-mail: churbaevravit@gmail.com

² Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

Статья поступила 23 января 2018 г.

Представлен способ измерения крутящего момента при нагружении материала методом П. Бриджмена. Он заключается в осевом сжатии с большой силой исследуемого образца между двумя пуансонами. Одновременно на сжатый образец дополнительно воздействует один из пуансонов, вращающийся относительно другого. Давление в таких экспериментах может достигать 5 ГПа и более. Поэтому пуансоны изготавливают из закаленной стали или твердого сплава. Предложенное устройство состоит из универсального корпуса, двух пуансонов, преобразовательных модулей, полого цилиндра и упругого тонкого диска. Устройство монтируют на установке сложного нагружения, которая имеет плунжера вращения и осевого перемещения. Пуансоны закреплены в корпусах. В зависимости от условий эксперимента минимальный рабочий диаметр пуансонов (и соответственно исследуемого образца) составляет 5 мм, а максимальный — 15 мм; в особых случаях он может быть более 15 мм. Момент кручения при нагружении исследуемого образца в этом устройстве измеряется преобразовательными модулями. Для повышения чувствительности эти модули вынесены за габариты универсального корпуса и расположены на большом расстоянии от опорных поверхностей устройства. Оригинальное конструктивное исполнение преобразовательного модуля обеспечивает неизменность положения точки действия силы от вращения пуансона в плоскости, перпендикулярной к ее оси. Такая особенность преобразовательного модуля позволяет его тензометрическим резисторам деформироваться упругим сжатием только от силы, вызванной вращением пуансона. Гарантированное исключение нежелательных помех дает возможность качественно измерить момент кручения. Предлагаемое устройство в экстремальных условиях обеспечивает высокую чувствительность и требуемое качество измерения крутящего момента.

Ключевые слова: высокое давление; экстремальное воздействие; момент кручения; метод П. У. Бриджмена; тензометрия; деформация; сжатие.

A DEVICE FOR MEASURING THE TORQUE UPON LOADING THE SUBSTANCE BY THE METHOD OF P. W. BRIDGMAN

© Ravil V. Churbaev¹, Dmitrii I. Vichuzhanin²

¹ Institute of physics metals of the Ural Branch of the Russian Academy of Science, Yekaterinburg, Russia; e-mail: churbaevravit@gmail.com

² Institute of Engineering Science of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.

Submitted January 23, 2018.

A method for measuring the torque upon loading of the substance by the method of P. U. Bridgman is presented. The method provides a strong axial compression of the substance between two punches. At the same time, the compressed substance is additionally exposed to an external action resulted from rotation of one plunger relative to another. The pressure in such experiments can reach 5 GPa or more. The punches are made of hardened steel or hard alloy. The proposed device is a simple and holistic mechanism. It consists of a universal shell, shell, two punches, converter modules, a hollow cylinder and an elastic thin disc. The device is mounted on a unit of complex loading which has a plunger of rotation and axial displacement. The punches are fixed in the shells. The working diameter of the punches and, correspondingly, of the test sample, depending on the experimental conditions, ranges from 5 to 15 mm. In special cases the diameter can be more than 15 mm. The torque of loaded sample in this device is measured by transducing modules. To increase the sensitivity, the transducing modules are placed beyond the universal shell and are located far from the supporting surfaces of the device. The original design of the transducing module ensures the independence of the force point from the rotation of the punch in the plane perpendicular to the force axis. This feature of the transducing module provides deformation of tensometric resistors under the impact of elastic compression only

from the force resulted from the punch rotation. The guaranteed elimination of undesirable interferences allows a qualitative measuring of the torque. The proposed device provides high sensitivity under extreme conditions and desired quality of torque measurements.

Keywords: high pressure, extreme impact, torque, method of P. W. Bridgman, strain gauge measurements, deformation, compression.

Многообразие характера поведения материала, обнаруженное при механическом воздействии на него в условиях высокого давления, по-прежнему вызывает интерес ученых к подобным исследованиям. Одним из способов такого воздействия на образец, впервые использованным Перси Уильямс Бриджменом [1], можно считать его осевое сжатие с очень большой силой между вращающимися относительно друг друга пуансонами высокого давления. Давление в таких экспериментах может достигать 5 ГПа и более.

Высокие давления получают с помощью пуансонов из закаленной стали или твердого сплава, которые закрепляют в среднем цилиндре, наковальне и поршне вдоль их общей оси. Этот способ нередко используют исследователи [2 – 5] и в научных публикациях упоминают его как метод П. У. Бриджмена.

П. У. Бриджмен использовал устройство, состоящее из трех цилиндров: средний цилиндр, вращающийся вокруг своей оси, сжимался между неподвижным цилиндром — наковальней и подвижным в осевом направлении цилиндром — поршнем. Такое конструктивное исполнение устройства позволяет проводить на нем эксперименты, используя лишь простой пресс; механизм для вращения среднего цилиндра может быть установлен независимо от прессы. Важно, чтобы все три цилиндра имели общую ось симметрии, а их поверхности контакта с исследуемым образцом были перпендикулярны этой оси. Для проведения эксперимента одновременно использовали два образца в виде тонких дисков. Один из образцов устанавливали между поршнем и средним цилиндром, а второй — между средним цилиндром и наковальней.

В устройстве П. У. Бриджмена для исключения возможности выталкивания среднего цилиндра из зоны нагружения использован специальный механизм — узел трения. Он удерживает средний цилиндр на наковальне и поршне, снижая величины перекоса и смещения относительно единой оси симметрии.

П. У. Бриджмен с помощью такой установки изучил механические свойства многих металлов и сделал полезные выводы. Полученные данные способствовали дальнейшим исследованиям особенностей механического поведения различных металлов и сплавов. Для этого используют установки как с двумя, так и с тремя пуансонами.

В работе [8] описано устройство с двумя пуансонами для измерения момента кручения в процессе нагружения материала методом П. У. Бриджмена. Конструкция этого измерительного устройства требует центрирующих колец. К недостаткам устройства следует отнести его существенное биение — до 0,03 мм, сниженную жесткость крепления измерительных элементов, повышенные требования к образцам и их размещению относительно оси вращения пуансонов. Для устранения случайных погрешностей конструкции устройства дополнительные упругие элементы закрепляют на его опорных поверхностях.

В настоящее время для синтеза новых материалов и изучения материалов, обладающих специфическими свойствами, необходима техника, обладающая высокими чувствительностью и качеством измерения.

В данной работе описано устройство, отвечающее этим требованиям. Оно разработано с учетом геометрии и размеров рабочего пространства установки сложного нагружения (УСН) [9]. УСН оснащена механизмом вращения пуансона, поэтому в течение многих лет используется для исследования различных материалов методом П. У. Бриджмена [6, 7].

Предлагаемое устройство содержит только два цилиндра, поэтому для проведения экспериментов применяют лишь одну пару пуансонов. Его отличительные особенности: датчики вынесены за габариты корпуса и закреплены на большом расстоянии от опорных поверхностей устройства; оригинальное конструктивное исполнение преобразовательного модуля — измерительного датчика. Устройство (рис. 1) состоит из корпуса 3 и универсального корпуса 14, соединенных с плунжерами 1 и 9 установки сложного нагружения [9] и зафиксированных от окружного смещения относительно плунжеров стопорами 2 и 11, пуансонов 15 и 16, преобразовательного модуля 6, полого цилиндра 12 и упругого тонкого диска 13.

Корпус 14 дополнительно зафиксирован от осевого смещения относительно плунжера 9 стопорами 10. Конструкция корпуса 14 и способ его крепления исключают появление нежелательных биений в процессе нагружения материалов между пуансонами 15 и 16. Корпус 14 условно можно разделить на три части — А, В, С. Часть А выполняет функцию крепежной детали. С по-

Рис. 1. Схема устройства для измерения силы вращения пуансона 16

мощью нее корпус 14 неподвижно устанавливается на плунжере 9, кроме того, на самой части А закреплены рычаги-консоли 8. Неподвижный по отношению к частям В и С рычаг-консоль 8 на свободном крае имеет двусторонние плоские поверхности параллельные друг другу и оси рычага 8.

Часть В — элемент, который в процессе нагружения образца 4 деформируется упруго. Она имеет форму длинного цилиндра: длина L больше его наружного диаметра D_1 . К поверхности этого цилиндра приклеены чувствительные преобразователи — тензорезисторы 5 и 7, реагирующие на упругие деформации.

Тензорезисторы часто применяют для измерения механических напряжений и деформаций, поскольку они обладают линейной функцией преобразования, имеют малые габариты и массу, простую конструкцию [10, 11]. Их существенным недостатком является низкая чувствительность.

Часть С корпуса 14 и корпус 3 представляют собой короткие массивные цилиндры. Длина цилиндра меньше их наружного диаметра в семь раз. В центре, вдоль оси этих цилиндров, имеются углубления для закрепления в них пуансонов 15 и 16 высокого давления.

Модуль 6 закреплен на полой цилиндрической части 12 (см. рис. 1) и является измерительным датчиком (рис. 2), преобразующим механические параметры нагружения в электрический сигнал.

Рис. 2. Схема измерительного датчика — преобразовательного модуля: 8 и 14 — то же, что на рис. 1

Он состоит из корпуса 17, упругого стержня 18 и тензорезисторов 19. Последние приклеены к поверхности стержня 18 таким образом, чтобы их нити были параллельны его оси. Один конец упругого стержня 18 неподвижно закреплен в корпусе 17, а другой — свободен и имеет на торце выпуклую сферическую поверхность.

Цилиндр 12 (см. рис. 1) соединен с частью С корпуса 14 через тонкий диск 13, являющийся пружиной, которая с ничтожно малой силой постоянно прижимает корпус 17 к рычагу 8. Точка К является проекцией линии контакта корпуса 17 и рычага 8. Рычаг 8 неподвижен относительно плунжера 9, поэтому и положение датчика 6 при осевом движении плунжера 9 остается неизменным относительно рычага 8.

Датчик 6 установлен на цилиндре 12 таким образом, чтобы упругие стержни 18 были расположены по обе стороны от рычага 8 (см. рис. 2). Ось упругого стержня перпендикулярна плоской поверхности рычага. Упругий стержень 18 и рычаг 8 находятся в постоянном контакте в точках М и N. В процессе нагружения исследуемого образца положения М и N — точек приложения силы вращения на плоской поверхности рычага 8 — остаются неизменными.

Исследуемый образец 4 сжимается пуансонами 15 и 16. Для этого плунжер 9 перемещается к плунжеру 1, в результате чего в зоне нагружения возникает высокое давление. Тогда плунжер 1, а также и пуансон 15 начинают вращаться по ходу (Ω_{CW}) или/и против хода (Ω_{CCW}) часовой стрелки. Величина силы, необходимая для вращения плунжера 1, зависит от давления, свойств исследуемого материала и характеристик контактных поверхностей в зоне нагружения.

Момент от силы вращения пуансона 16 пытаются повернуть корпус 14 и плунжер 9 в направлении вращения плунжера 1. Согласно конструкции УСН плунжер 9 может перемещаться только в осевом направлении, поэтому и часть А корпуса 14 не совершает никаких других перемещений, кроме осевого. Поэтому от действия момента кручения пуансона 16 поворачивается на некоторый угол часть С, упруго деформируя часть В. Вели-

чина угла поворота части *C* зависит от геометрических размеров, формы и свойств материала части *B*. Длину *L* и наружный диаметр *D*₁ части *B* определяют с учетом несущей способности, устойчивости и необходимости получения как можно большей упругой деформации при меньших величинах момента силы вращения.

При повороте части *C* торец упругого стержня 18, закрепленный на корпусе 17 датчика 6, неизбежно движется к свободному торцу, упертому в плоскую поверхность рычага 8 в точках соприкосновения *M* и *N*. В результате такого действия упругий стержень 18 сжимается. Эта упругая деформация преобразуется тензорезисторами 19 в электрический сигнал. Знак сигнала не зависит от направления вращения пуансона 16, поскольку упругие стержни 18 всегда испытывают только осевое сжатие.

При повороте части *C* вокруг общей оси устройства на некоторый угол нити тензорезистора 19 деформируются больше, чем нити тензорезистора 5, так как *D*₂ > *D*₁. Поэтому при измерении силы кручения пуансона 16 чувствительность датчика 6 выше, чем датчика 5, и контролируется соотношением *D*₂ к *D*₁ и углом расположения тензорезисторов 5 на поверхности части *B* к общей оси устройства. Измерительные характеристики датчиков 5 и датчика, описанного в работе [8], почти аналогичны.

Диаметр *D*₂ может быть достаточно большим, чтобы обеспечить требуемую чувствительность при измерении момента силы кручения пуансона 16. Теоретически датчик 6 можно установить на сколь угодно большом удалении от оси устройства.

Общая высота устройства составляет 352 мм, наружный диаметр цилиндра 12 — 400 мм, расстояние *D*₂ между датчиками 6 — 810 мм, максимальный диаметр рабочей поверхности пуансонов 15 и 16 — 15 мм, а минимальный диаметр — 5 мм. Поэтому в зависимости от условий эксперимента диаметр образца находится в интервале от 5 до 15 мм. В особых случаях максимальные диаметры рабочей поверхности пуансонов, а следовательно, и нагружаемого образца могут быть больше 15 мм.

Исследования проводили на образце из меди марки МВ. Перед началом вращения пуансона 16 образец сжимали пуансонами 15 и 16 давлением 5 ГПа. Давление оценивали как среднее — делением усилия сжатия образца меди на площадь контактируемой поверхности. Среднее напряжение, которое возникает в меди при повороте пуансона 16 на 1,3°, равно 0,47 ГПа. Его оценивали делением момента кручения на пластический полярный момент сопротивления всего поперечного сечения образца.

Рис. 3. Зависимость момента вращения пуансона высокого давления 16 от угла его поворота при нагружении меди МВ

Зависимости момента кручения пуансона 16 $M_{кр}$ от угла его поворота Ω , измеренные датчиками 5 и 6, представлены на рис. 3 кривыми 1 и 2 соответственно.

Кривая 1, полученная датчиком 5, находится ниже кривой 2, записанной с помощью датчика 6. Запись кривых $M_{кр}(\Omega)$ этими датчиками осуществлялась одновременно, что свидетельствует о том, что чувствительность датчика 6 выше, чем датчика 5, в 11,4 раза.

Таким образом, описано устройство, обладающее высокой чувствительностью и обеспечивающее качественное измерение момента кручения в процессе нагружения образца методом П. Бриджмена. Для материалов, находящихся в экстремальных условиях нагружения, высокая чувствительность устройства является значимой характеристикой, позволяющей правильно определить их механические свойства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бриджмен П. У. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. — М.: Издательство иностранной литературы, 1955. — 444 с.
2. Валиев Р. З., Александров И. В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. — М.: Логос, 2000. — 272 с.
3. Алехин В. П. Новая технология получения нанокристаллических материалов / Деформация и разрушение. 2005. № 6. С. 35 – 38.
4. Корзников А. В., Тюменцев А. Н., Дитенберг И. А. О предельных минимальных размерах зерен, формирующихся в металлических материалах, полученных при деформации кручением под давлением / Физика металлов и металловедение. 2008. Т. 106. № 4. С. 433 – 438.
5. Добаткин С. В., Рохлин Л. Л., Попов М. В., Добаткина Т. В., Никитина Н. И., Тарытина И. Е. Поведение при отжиге стареющих сплавов системы Mg – Sn, подвергнутых интенсивной пластической деформации / Металловедение и термическая обработка материалов. 2009. № 5. С. 18 – 23.
6. Dobromyslov A. V., Churbaev R. V. Synthesis of nanocrystalline and amorphous alloy from elementary powders by intensive plastic deformation under high pressure / International Journal of Modern Physics. 2010. B. 24. N 6. P. 722 – 729.

7. Носкова Н. И., Чурбаев Р. В., Филлипов Ю. И. Нанокристаллические тонкослойные композиционные покрытия: получение, структура и свойства / Изв. вузов. Черная металлургия. 2016. № 4. С. 264 – 270.
8. Иванов С. М., Печина Е. А., Ладьянов В. И., Дорофеев Г. А., Пилюгин В. П., Кузьминых Е. В. Измерение момента кручения в процессе интенсивной пластической деформации в наковальнях Бриджмена / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 7. Ч. 1. С. 49 – 51.
9. Чурбаев Р. В., Колмогоров В. Л., Буркин С. П., Талущ Г. Г. Установка сложного нагружения для исследования материалов при высоких регулируемых давлениях / Заводская лаборатория. 1989. Т. 55. № 9. С. 98 – 99.
10. Методы и средства тензометрии и их применение в народном хозяйстве. Сборник трудов. — М.: Издательство АН СССР, 1989. — 382 с.
11. Электрические измерения / Под ред. А. В. Фремке и Е. М. Душина. — Л.: Энергия, 1980. — 392 с.
4. Korznikov A. V., Tyumentsev A. N., Ditenberg I. A. On the limiting minimum size of grains formed in metallic materials produced by high-pressure torsion / Physics of Metals and Metallography. 2008. Vol. 106. N 4. P. 418 – 423.
5. Dobatkin S. V., Rokhlin L. L., Popov M. V., Dobatkin T. V., Nikitina N. I., Tarytina I. E. Annealing behavior of aging alloys of the Mg-Sn system subjected to severe plastic deformation / Metalloved. Term. Obrab. Mater. 2009. N 5. P. 18 – 23 [in Russian].
6. Dobromyslov A. V., Churbaev R. V. Synthesis of nanocrystalline and amorphous alloy from elementary powders by intensive plastic deformation under high pressure / International Journal of Modern Physics. 2010. B. 24. N 6. P. 722 – 729.
7. Noskova N. I., Churbaev R. V., Fillipov Yu. I. Thin — layer nanocrystalline composite coatings: production, structure and properties/ Steel in Translation. 2016. N 4. P. 264 – 269.
8. Ivanov S. M., Pechina E. A., Lad'yanov V. I., Dorofeev G. A., Pilyugin V. P., Kuz'minykh E. V. Measurements of torque during severe plastic deformation in Bridgman anvil / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2013. Vol. 79. N 7. Part 1. P. 49 – 51 [in Russian].
9. Churbaev R. V., Kolmogorov V. L., Burkin S. P., Taluts G. G. The mechanism of the complex load for research of materials at adjusted high pressure / Zavod. Lab. 1989. Vol. 55. N 9. P. 98 – 99 [in Russian].
10. Methods and means of strain gauges and their application in the national economy: collections of works. — Moscow: Izd. AN SSSR, 1989. — 382 p. [in Russian].
11. Electrical measurements / A. V. Fremke, E. M. Dushnin, eds.. — Leningrad: Energiya, 1980. — 392 p. [in Russian].

REFERENCES

1. Bridgman P. W. Studies in Large Plastic Flow and Fracture. — London – New York: McGraw-Hill, 1952. — 432 p.
2. Valiev R. Z., Aleksandrov I. V. Nanostructured materials obtained by intense plastic deformation. — Moscow: Logos, 2000. — 272 p. [in Russian].
3. Alekhin V. P. New technology for producing the nanocrystalline materials / Deform. Razrush. Mater. 2005. N 6. P. 35 – 38 [in Russian].