

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-6-59-62

УДК (UDC) 620.17:531.741

УГЛОМЕР ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА КРУЧЕНИЕ

© Александр Дмитриевич Хван, Дмитрий Владимирович Хван,
Алексей Алексеевич Воропаев, Юрий Борисович Рукин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия; e-mail: tpm@vorstu.ru

Статья поступила 11 июля 2017 г.

В обработке металлов давлением широко используют различного рода измерительные устройства. В статье представлена разработанная и изготовленная конструкция угломера для измерения угловых деформаций при упругом и пластическом кручении круглых образцов, в основу которого положен принцип работы планетарного механизма без подвижного солнечного центрального колеса. Угломер создан на основе конструкции угломера Бояршинова, в которую добавлены круглый транспортер с делениями от 0 до 360° и вращающаяся на оси стрелка для фиксации углового перемещения. Использование планетарной передачи позволило значительно повысить точность измерения углов поворота поперечных сечений образца друг относительно друга на расстоянии расчетной длины. В целях уменьшения веса угломера его основные детали были изготовлены из алюминиевого сплава Д16Т. При этом номинальные диаметры окружностей центрального колеса и сателлита составили соответственно $D_1 = 220$ мм, $D_3 = 20$ мм; модуль зацепления $m = 1$ мм; число зубьев на колесе равно 220, а на сателлите — 20. На крутильной машине КМ-50 проведены лабораторные испытания угломера на цилиндрическом образце диаметром 15 мм и рабочей длиной 120 мм из стали 40Х, результаты которых позволили определить упругий модуль сдвига с отклонением ~2,5 % от его справочного значения. По опытным данным построена диаграмма кручения, на основе которой по формуле П. Людвига получена диаграмма сдвига $\tau = \tau(\gamma)$. Эта диаграмма пересчитана с использованием теории пластичности Мизеса в кривую упрочнения материала $\sigma = \sigma(e)$. Полученные механические характеристики позволяют сделать вывод о достаточной точности измерения угловых перемещений с помощью данного угломера. Исходя из этого, разработанный угломер можно рекомендовать в качестве испытательной техники для определения механических характеристик материала в условиях сдвиговых деформаций. Угломер достаточно прост в исполнении и при эксплуатации.

Ключевые слова: угломер; угловые деформации; пластическое кручение; круглые образцы.

ANGLE GAGE FOR TORSION TESTING

© Alexander D. Khvan, Dmitry V. Khvan, Alexey A. Voropaev, Yuriy B. Rukin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; e-mail: tpm@vorstu.ru

Submitted July 11, 2017.

Processing of metals by pressure suggests using of various measuring devices. We developed and manufactured a device for measuring angular deformations upon elastic and plastic torsion of circular specimens. The design is based on the operation principle of the planetary mechanism without a movable solar central wheel. Design of the device is based on the Boyarshinov concept added with a round protractor with a graduated scale from 0 to 360° and rotating needle placed on the axis to indicate the angular displacement. The use of the planetary gear significantly improves the accuracy of measuring the angles of rotation of the cross sections of the sample relative to each other at a distance of the calculated length. To low the weight of the device, the main parts were made of aluminum alloy D16T. Rated diameters of the central wheel and satellite are $D_1 = 220$ mm, $D_3 = 20$ mm, respectively; the linkage module $m = 1$ mm; the number of teeth on the wheel and satellite is 220 and 20, respectively. Laboratory tests of the device were carried out on a KM-50 torsional machine using a cylindrical sample with a diameter of 15 mm and a working length of 120 mm made of steel 40Kh. The results provided determination of the elastic shear modulus with a deviation of ~2.5% of the reference value. Experimental data were used to plot the torsion diagram and then to get shear diagram $\tau = \tau(\gamma)$ according to P. Ludwik's formula. This diagram was transformed into the hardening curve $\sigma = \sigma(e)$ using von Mises theory of the plasticity. The obtained mechanical characteristics allowed us to draw a conclusion on the essential accuracy of measuring angular displacements using the developed device. Thus, the

developed and easy to use device can be recommended as testing equipment for determination of the mechanical characteristics of materials under conditions of shear deformations.

Keywords: angle gage; angular deformation; elastic and plastic torsion; circular specimens.

Существующие конструкции угломеров для проведения испытаний на кручение цилиндрических образцов могут быть использованы только для измерения упругих перемещений. Однако для исследований сопротивляемости материалов пластическому сдвигу очень часто возникает необходимость измерения неупругих конечных деформаций в целях, например, построения диаграммы сдвига или оценки эффекта Баушингера по результатам испытаний на реверсивное кручение. При этом, как правило, закручивают круглые образцы сплошного сечения, так как тонкостенные трубки вследствие потери устойчивости деформировать на большие относительные углы нельзя.

Нередко в лабораторной практике при испытаниях на кручение угловые перемещения измеряют с точностью отсчета в один градус по транс-

портиру крутильной машины, установленному на ней соосно с деформируемым образцом. При этом определяют относительный поворот поперечных сечений, разделяющих головки образца и его рабочую часть и отстоящих друг от друга на расстоянии рабочей длины l_p . В связи с проявлением краевого эффекта согласно принципу Сен-Венана это угловое перемещение не будет точно соответствовать относительному повороту поперечных сечений в образце, расстояние между которыми равно расчетной длине l_0 . Поэтому диаграммы сдвига исследуемых материалов, построенные по указанным данным, будут в какой-то мере отличаться от истинных.

В работе предлагается конструкция угломера для исследования пластического кручения цилиндрических образцов. На рис. 1 представлены схема (а) и фотография (б) угломера, представляющего собой планетарную передачу.

Угломер включает кольцо 1, изготовленное как одно целое с центральным колесом, имеющим расчетный диаметр D_1 . С центральным колесом по цилиндрической поверхности диаметром D_2 по подвижной посадке сопряжено водило 2, имеющее два жестко скрепленных с ним в диаметральной плоскости кронштейна 3, на одном из которых параллельно оси кольца 1 установлена по неподвижной посадке ось 4. Сателлит 5 с расчетным диаметром D_3 неподвижно соединен по торцевой поверхности соосно с круглым транспортом 6, имеющим шкалу с ценой деления в один градус, и установлен по подвижной посадке на ось 4. На последней размещен также по подвижной посадке с возможностью фиксации указатель 7, предназначенный для отсчета угловых перемещений по транспорту 6. Кольцо 8 соединено с кронштейном 9, в отверстие которого вставлен с возможностью закрепления на нем параллельно оси образца цилиндрический шток 10.

В целях увеличения передаточного числа, необходимого для повышения точности определения деформаций при закручивании образцов, транспортер 6 закрепляют на сателлите 5, а не на центральном колесе.

При сборке угломера вначале устанавливают кольца 1 и 8 соосно с испытуемым образцом в его поперечных сечениях, отстоящих друг от друга на расстоянии l_0 . Кольца крепят тремя ввернутыми в них под углом 120° винтами 11 с острыми коническими концами. Затем шток 10 свободным концом вставляют в отверстие второго крон-

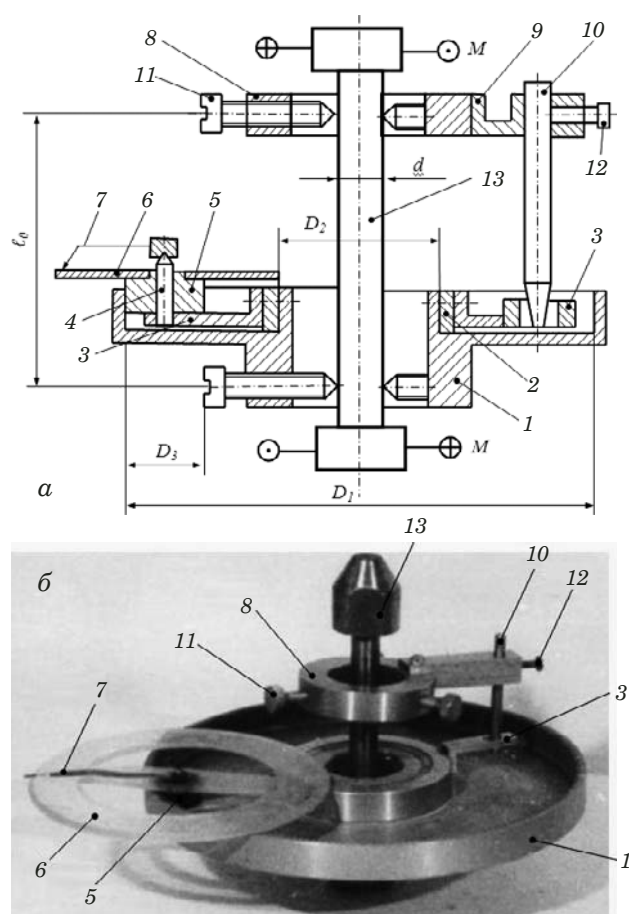


Рис. 1. Конструктивная схема угломера (а) и его внешний вид: 1 — кольцо; 2 — водило; 3 — кронштейн; 4 — ось; 5 — сателлит; 6 — транспортер; 7 — указатель; 8 — кольцо; 9 — верхний кронштейн; 10 — шток; 11 — винт (М5); 12 — винт (М3); 13 — образец

штейна 3 для реализации кинематической взаимосвязи колец 1 и 8, образующих совместно с водилом 2 и сателлитом 5 планетарную передачу. Для упрощения совместной сборки колец на испытуемом образце в кронштейне 3 для соединения его со штоком 10 выполняют сквозной паз, вытянутый в радиальном направлении, шириной менее диаметра штока; свободную концевую часть штока изготавливают в форме усеченного конуса. Зазор в окружном направлении между боковыми стенками паза в кронштейне 3 и штоком выбирают перемещением последнего вдоль оси отверстия кронштейна 9. Шток закрепляют в кронштейне с помощью винта 12.

Простейший одноступенчатый планетарный механизм обычно состоит из двух центральных колес — подвижного (называемого солнечным) и неподвижного, сателлита и водила. На рис. 2, а приведена кинематическая схема такого механизма, передаточное число которого равно отношению угловой скорости солнечного колеса к угловой скорости водила [1]. Габаритные размеры данного механизма в основном определяются расчетным диаметром неподвижного центрального колеса. При его заданных параметрах, уменьшая размеры подвижного центрального колеса, можно увеличить передаточное число.

Для нормальной работы механизма требуется высокая точность изготовления его элементов и их сборки. Следует отметить, что применение планетарной передачи для проведения испытаний на кручение привело бы к существенному усложнению элементов конструкции из-за наличия солнечного центрального колеса. Поэтому преимущество планетарного механизма, касающееся получения большого передаточного числа при его малых габаритах, практически нельзя было бы использовать для повышения точности измерения угловых перемещений. В связи с этим в угломере, представленном на рис. 1, рассматривается планетарная передача без солнечного центрального колеса. При этом кинематическая цепь передачи сокращается на одну ступень, значительно упрощается конструкция угломера, поскольку не требуется относительно высокая точность изготовления его элементов и их сборки на испытуемом образце. Это является существенным фактором, обеспечивающим достаточную простоту и точность измерения перемещений при испытаниях на кручение. Кинематическая схема рассматриваемого устройства представлена на рис. 2, б. В данном случае передаточное число

$$i_{23} = \omega_2 / \omega_3, \quad (1)$$

где ω_2 и ω_3 — соответственно угловые скорости сателлита и водила.

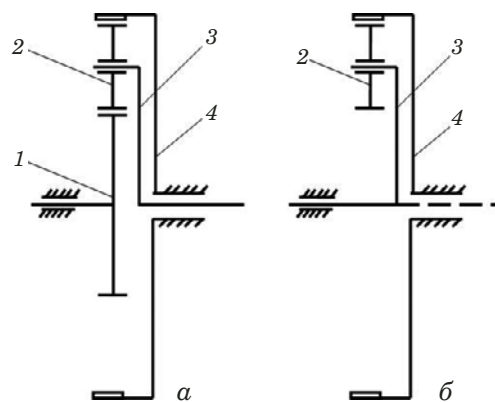


Рис. 2. Кинематические схемы исходного (а) и предлагаемого (б) планетарного механизма: 1 — подвижное центральное колесо; 2 — сателлит; 3 — водило; 4 — неподвижное центральное колесо

Образец 13 в сборе с угломером (см. рис. 1) устанавливается головками в захваты испытательной машины и нагружается моментом M . При его закручивании кольцо 8 с кронштейном 9, штоком 10 и соединенное с ним через кронштейн 3 водило 2 будут поворачиваться относительно кольца 1. Благодаря наличию планетарной передачи сателлит 5, вращаясь на оси 4, будет обкатываться по сопрягаемой с ним расчетной поверхности центрального колеса. Заодно с сателлитом повернется также и транспортер 6 на соответствующий угол, который отсчитывается по указателю 7. Взаимный поворот поперечных сечений закручиваемого образца, в которых крепятся кольца 1 и 8, определяется с учетом неподвижности одного из них относительно другого по формуле

$$\varphi = \varphi_1 / i_{23}, \quad (2)$$

где φ_1 — измеренный по транспортеру угол в градусах. Принимая во внимание то обстоятельство, что за один оборот водила сателлит должен полностью обкатать центральное колесо по сопрягаемой с ним расчетной цилиндрической поверхности и совершить при этом D_1/D_3 оборотов, а также учитывая (2), можно записать данное выражение в виде

$$\varphi = \varphi_1 D_3 / D_1. \quad (3)$$

Для проведения испытаний для угломера была изготовлена планетарная зубчатая передача с внутренним зацеплением, характеризующаяся следующими кинематическими параметрами: номинальные диаметры делительных окружностей центрального колеса и сателлита — $D_1 = 220$ мм, $D_3 = 20$ мм; модуль зацепления $m = 1$ мм; число зубьев на колесе — 220, а на сателлите — 20. Номинальный диаметр D_2 сопрягаемых цилиндрических поверхностей водила и

колеса принят равным 70 мм. Все основные детали угломера в целях уменьшения его веса изготавливали из алюминиевого сплава Д16Т. Опыты проводили на крутильной машине КМ-50 закручиванием образца из стали 40Х диаметром 15 мм и рабочей длиной $l_p = 120$ мм. При этом кольца 1 и 8 крепили тремя закаленными стальными винтами М6 на образце в поперечных сечениях, отстоящих друг от друга на расстоянии $l_0 = 80$ мм.

Для проверки точности измерения упругих угловых перемещений с помощью предлагаемого угломера определяли по данным опыта модуль сдвига, значение которого для исследованной стали составило $7,8 \cdot 10^4$ МПа, что меньше справочного значения ($8 \cdot 10^4$ МПа) на 2,5 %. В целях проверки достоверности полученных экспериментальных данных были сопоставлены также пластические деформации сдвига γ на рабочей поверхности образца после полной его разгрузки, определенные с помощью угломера и рассчитанные по формуле

$$\gamma = \operatorname{tg} \xi, \quad (4)$$

где ξ — измеренный на инструментальном микроскопе БМИ-1 угол между риску (шириной и глубиной ~ 20 мкм), нанесенной до нагружения на рабочую поверхность образца параллельно его оси, и последней. Расчет сдвиговой деформации по данным, полученным с помощью предлагаемого угломера, проводили по формуле

$$\gamma = \pi \phi d / 360 l_0, \quad (5)$$

где d — диаметр образца; ϕ — угол, определенный по формуле (4).

На рис. 3 приведена диаграмма сдвига $\tau = \tau(\gamma)$ (1), построенная по результатам дифференцирования диаграммы кручения $M = M(\gamma)$ согласно формуле П. Людвига [2]. Здесь же представлена кривая упрочнения $\sigma = \sigma(e)$ (2), построенная с учетом соотношений теории пластичности [3]

$$\sigma = \tau / \sqrt{3}; \quad e = \gamma / \sqrt{3}. \quad (6)$$

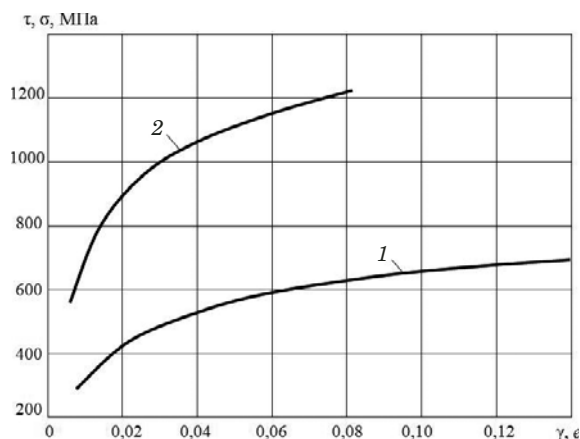


Рис. 3. Диаграмма сдвига (1) и кривая упрочнения (2)

Таким образом, приведенные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о достаточно высокой точности измерения угловых перемещений с помощью рассмотренного угломера как при упругих, так и при пластических деформациях. В связи с этим угломер рекомендован к применению при испытаниях круглых образцов на кручение.

Разработанная конструкция угломера для замера угловых деформаций при пластическом кручении круглых образцов позволяет определять основную характеристику подвергаемых пластической обработке давлением металлов — кривую упрочнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов М. Н. Детали машин. М.: Высшая школа, 2000. — 383 с.
2. Людвик П. Основы технологической механики. Расчеты на прочность. Вып. 15. — М.: Машиностроение, 1970. — 197 с.
3. Ишлинский А. Ю., Ивлев Д. Д. Математическая теория пластичности. — М.: Физматлит, 2003. — 704 с.

REFERENCES

1. Ivanov M. N. Machine parts. — Moscow: Vysshaya shkola, 2000. — 383 p. [in Russian].
2. Ludvik P. Fundamentals of engineering mechanics. Strength calculations. Issue 15. — Moscow: Mashinostroyeniye, 1970. — 197 p. [in Russian].
3. Ishlinskiy A. Yu., Ivlev D. D. The mathematical theory of plasticity. — Moscow: Fizmatlit, 2003. — 704 p. [in Russian].