

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.385:620.175.2

Универсальная установка ТТМ-200 для проведения испытаний на кручение

А. В. Дроздов^{а,1}, В. В. Кутняк^а, А. Н. Неговский^а, Д. Г. Вербило^б

^а Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^б Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина

¹ drozdov@ipp.kiev.ua

Разработана универсальная автоматизированная установка ТТМ-200 для проведения испытаний на кручение, имеющая высокие технические характеристики. Создано программное обеспечение, включающее программы TorsionTest для проведения испытаний на кручение и TorsionCalc для расчета механических характеристик при этом виде испытаний, что существенно упрощает автоматизацию процессов испытаний и соответствующих расчетов.

Ключевые слова: кручение, модуль сдвига, крутящий момент, угол закручивания.

Введение. Испытания конструкционных материалов на кручение являются одним из основных методов оценки физико-механических свойств материалов, что позволяет определить ряд физико-механических характеристик пластичных, малопластичных и хрупких материалов в условиях чистого сдвига. При таких испытаниях пластическая деформация распределяется равномерно по длине образца, а его цилиндрическая форма сохраняется вплоть до разрушения без образования шейки. Это позволяет выполнить расчет истинной диаграммы деформирования при кручении, что может быть определяющим при разработке новых конструкционных материалов.

С другой стороны, принятие в Украине законов о сертификации и техническом контроле продукции обуславливают необходимость использования специализированных испытательных машин для определения физико-механических характеристик материалов, в том числе при испытаниях на кручение. Учитывая, что в Украине производство подобных машин отсутствует, а зарубежные испытательные машины достаточно дорогие, в ГП “СКТБ ИПП НАН Украины”, которое имеет опыт изготовления и экспортных поставок специализированных испытательных комплексов, для проведения испытаний на кручение была разработана и изготовлена универсальная установка ТТМ-200. Универсальность установки заключается в возможности испытаний не только стандартных цилиндрических или трубчатых образцов, но и тонкой металлической проволоки. Установка обеспечивает получение всего комплекса механических свойств материалов, предусмотренного отечественными [1] и зарубежными [2–5] стандартами. При ее разработке были проанализированы известные за рубежом установки аналогичного назначения, учтены технические требования к испытательным машинам, которые содержатся в существующих нормативно-технических материалах по обычным испытаниям металлических образцов на кручение [1, 2] и проволоки на простое и реверсивное кручение [3–5]. К таким требованиям относятся обеспечение широкого диапазона и высокой разрешающей способности

измерений крутящего момента и угла закручивания, возможность свободного перемещения одного из захватов вдоль оси образца с созданием контролируемой осевой нагрузки при испытании проволоки и др. С учетом этого и была создана универсальная установка ТТМ-200 для проведения испытаний образцов на кручение. В ее конструкции использованы прецизионные комплектующие изделия и измерительные устройства наиболее известных мировых производителей.

Описание установки ТТМ-200. Установка представляет собой электромеханическое устройство, управляемое от персонального компьютера. Крутящий момент прикладывается к поперечному сечению образца, причем один из захватов вращается, а другой – может либо совершать свободное перемещение вдоль продольной оси образца (режим свободного вращения), либо быть зажатым в продольном направлении (зависит от выбора оператора). В режиме свободного вращения к образцу может прикладываться контролируемая предварительная осевая нагрузка. Система измерений и управления в комплексе с персональным компьютером обеспечивают управление процессом испытаний, а также измерение и обработку экспериментальных данных. Конструкция установки позволяет установить (при необходимости) сменные термо- и криокамеры для проведения испытаний при повышенных или низких температурах. Установка содержит модуль нагружения, блок управления и компьютерный стол с персональным компьютером, монитором и принтером (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид установки ТТМ-200 для проведения испытаний на кручение.

Конструкция модуля нагружения имеет опорную станину, на которой установлен конический мотор-редуктор (КБ 67R/CM71M) фирмы SEW Eurodrive (Германия) в специальном низколюфтовом исполнении. Мотор-редуктор обеспечивает приложение к образцу при скорости его вращения до 60 об/мин крутящих моментов до 200 Н·м. Особенности данного мотор-редуктора являются его компактность, высокая стойкость к знакопеременным и радиальным нагрузкам, а также низкое значение люфта (меньше 6 угл. мин). Образцы в захватах закрепляются с помощью прецизионных цанговых патронов с набором зажимных цанг фирмы Bison-Bial (Польша). Цанговые патроны гарантируют зажим образцов с цилиндрическими головками с приложением крутящих моментов до 40 Н·м и образцов со специальной (шестигранной) формой головки – до 200 Н·м. Один из цанговых патронов крепится на выходном валу мотор-редуктора, который жестко закреплен на опорной станине, другой – располагается на передвижной каретке, которая может перемещаться в осевом направлении по шариковой линейной направляющей производства фирмы Rexroth Bosch Group (Германия), обеспечивающей повышенную стойкость к кручению и минимальное осевое трение.

Для фиксации передвижного захвата в любом положении по длине линейной направляющей в каретке предусмотрен специальный зажимной механизм. К образцу может прикладываться контролируемая осевая нагрузка, которую обеспечивает управляемый силовой механизм, включающий двигатель-редуктор и цифровой измерительный прибор ВНТ 30/10 с датчиком усилия.

Блок-схема установки ТТМ-200 приведена на рис. 2. Крутящий момент в образце создается с помощью управляемого привода, в который входят приводной преобразователь MOVIDRIVE MDX61B с полной выходной мощностью 4,9 кВА и мотор-редуктор КТ 67R/CM71M, содержащий синхронный серводвигатель CM71M со встроенным инкрементальным датчиком угла поворота. Такой привод обеспечивает регулирование скорости вращения в диапазоне 0,02...60 об/мин (0,002...6,3 рад/с).



Рис. 2. Блок-схема установки ТТМ-200.

Для измерения угла закручивания образца используются прецизионный оптический угловой датчик RGH-20 фирмы Renishaw (Великобритания) с разрешающей способностью 1 мкм и кольцевой энкодер диаметром 52 мм (рис. 3,а), который размещен на выходном валу мотор-редуктора. Угловая разрешающая способность датчика составляет 0,14 угл. мин ($4,07 \cdot 10^{-5}$ рад).



Рис. 3. Внешний вид датчиков угла закручивания RGH-20 (а) и крутящего момента MA-20 (б).

Крутящий момент измеряется тремя сменными датчиками MA-20 (рис. 3,б) фирмы Tilkom Ltd (Беларусь) с номинальным крутящим моментом 2, 20 и 200 Н·м. Это обеспечивает высокую точность его измерения в широком диапазоне при испы-

тании образцов различных типоразмеров, включая тонкую проволоку (предел допускаемой основной погрешности датчиков $\pm 0,2\%$). Выходные сигналы датчиков преобразуются в аналоговые сигналы с помощью декодеров Т24.

Для преобразования сигналов от датчиков крутящего момента и угла закручивания, а также для формирования сигналов управления установкой используется многофункциональный адаптер РЮ-821 производства фирмы ISP DAS (Тайвань), который устанавливается в РСІ шину персонального компьютера. Адаптер РЮ-821 обеспечивает аналого-цифровое преобразование сигналов от датчиков с частотой 40 кГц и формирование аналогового управляющего сигнала для преобразователя MDX 61В, задающего скорость вращения выходного вала мотор-редуктора КТ 67R/СМ71М. Для минимизации влияния помех по каналу измерения крутящего момента оцифрованные сигналы с помощью соответствующего программного обеспечения подвергаются статистической обработке, которая заключается в усреднении полученных отсчетов каждые 20 мс. Это позволяет существенно уменьшить случайную составляющую погрешности, подавить помехи от действия питающей сети переменного тока и получить разрешающую способность измерений крутящего момента не хуже 0,005% его номинального значения. Ввод в персональный компьютер цифровых сигналов от углового датчика RGH-20 и вывод управляющих команд для преобразователя MDX 61В обеспечиваются специально разработанным устройством цифровой обработки, которое размещено внутри персонального компьютера и подключено к цифровым входам/выходам адаптера РЮ-821.

Контроль осевой нагрузки при испытании проволоки осуществляется цифровым прибором ВНТ 30/10 с измерительным вибродатчиком. Величина осевой нагрузки регулируется с помощью двигателя переменного тока с редуктором в пределах 0...200 Н.

Программное обеспечение установки ТТМ-200 включает программы TorsionTest для проведения испытаний с накоплением и сохранением первичных данных испытаний и TorsionCalc для последующего расчета механических характеристик материала.

Описание программы TorsionTest. Пользовательский интерфейс программы TorsionTest приведен на рис. 4. В верхней части интерфейса расположены индикаторы крутящего момента и угла закручивания образца, панель управления приводом установки с грубой и точной регулировкой скорости вращения и кнопками включения привода с заданием направления вращения. Панель управления приводом предназначена для выполнения подготовительных операций с образцом, тестирования или проведения испытаний в ручном режиме, а также для изменения скорости нагружения или прерывания испытаний в автоматическом режиме. В левой части интерфейса расположена панель процедур испытания, которая служит для последовательного выполнения подготовительных процедур при испытании на кручение. Большую часть интерфейса занимает графическое окно с диаграммой крутящий момент – угол закручивания образца, которая выводится на экран дисплея в режиме реального времени в процессе испытаний образцов. В нижней части интерфейса расположены панели осей X (угол закручивания образца) и Y (крутящий момент), которые позволяют установить необходимый масштаб представления диаграммы или задать автоматический режим ее отображения, при котором масштаб по осям диаграммы автоматически изменяется в реальном масштабе времени в соответствии с зарегистрированными максимальными величинами.

Учитывая особенности испытаний на кручение, для получения достоверных результатов, исключения ошибок оператора и облегчения процесса проведения испытаний все процедуры на соответствующей панели выстроены в строгую последовательность (рис. 4) и выполняются сверху вниз. На каждом этапе подготовки или проведения испытания интерфейс содержит виртуальные кнопки, которые подсвечиваются, если операция доступна в данный момент для выполнения. Последова-

тельность процедур включают выбор установленного сменного датчика крутящего момента, обнуление показаний последнего при освобождении одного из концов образца из захвата. Затем следуют ввод типа и размеров образца, процедура зажима его концов в захватах, что может привести к появлению момента, особенно при испытании образца с шестигранными головками. На этом этапе в программе предусмотрена процедура автоматической разгрузки образца, после которой устанавливается требуемая начальная скорость нагружения и запускается процедура испытания с регистрацией измеряемых величин крутящего момента и угла закручивания, отображаемых в графическом окне программы в виде диаграммы кручения в реальном времени. Следует заметить, что для записи упругого участка диаграммы кручения, когда угловая деформация крайне мала и необходимо получить представительный массив экспериментальных точек, с учетом ограниченного быстродействия измерительных систем установки задается небольшая скорость кручения, а далее по мере нагружения и появления на диаграмме нелинейного участка и участка текучести скорость кручения значительно увеличивается с целью сокращения времени испытания. Включение более высокой скорости нагружения на участке текучести производится оператором. Так, при испытаниях цилиндрических образцов из стали Ст. 3 диаметром 5 мм и длиной рабочей части 46 мм начальная скорость кручения выбиралась в пределах 0,002...0,006 рад/с, а при выходе на площадку текучести она устанавливалась в диапазоне 0,2...0,6 рад/с. Процесс испытаний и накопления данных прекращается при разрушении образца или по требованию оператора. Исходные данные и результаты измерений сохраняются в текстовом файле с расширением "csv". Сохраненный файл может быть открыт в программе TorsionCalc для расчета механических характеристик материала. Кроме того, можно открыть этот файл для просмотра, редактирования и обработки содержащихся в нем данных в табличном процессоре Excel.

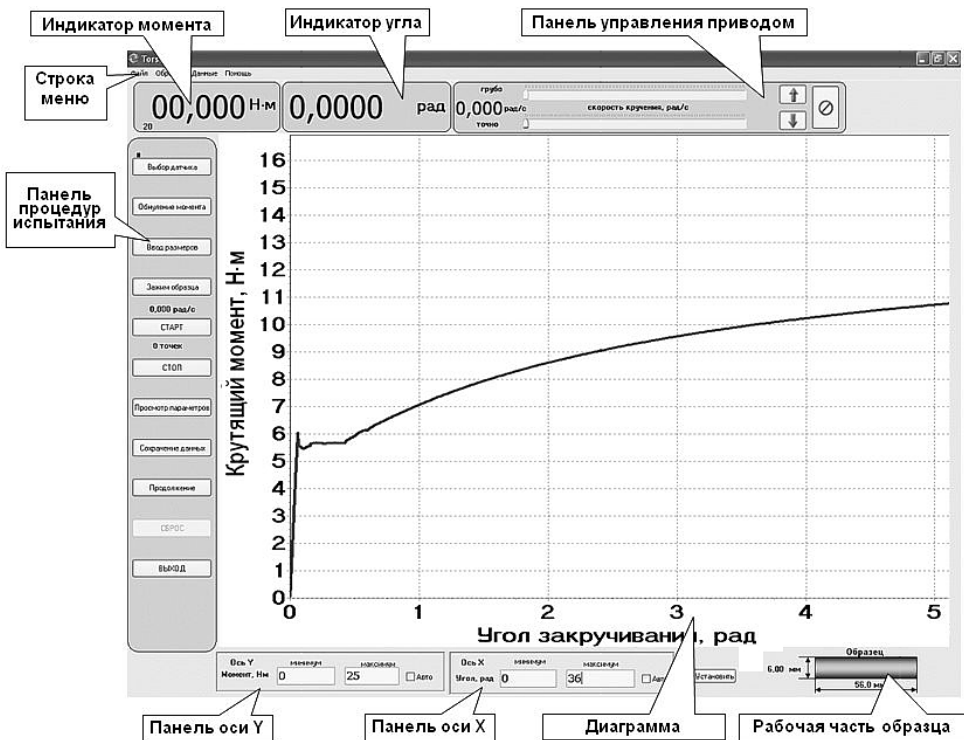


Рис. 4. Пользовательский интерфейс программы TorsionTest.

Описание программы TorsionCalc. Программа осуществляет расчет всех механических характеристик при кручении в соответствии с требованиями [1] для образцов цилиндрической формы сплошного или трубчатого сечения. В зависимости от типа и соотношения размеров поперечного сечения образца (наружный диаметр D и толщина стенки δ) в программе применяются разные формулы для расчета величин полярного момента инерции и полярного момента сопротивления образца. Механические характеристики при кручении определяются по формулам, приведенным в [1]. При открытии файла данных “csv” программа выводит на экран дисплея диаграмму кручения, которая по желанию оператора может представлять всю диаграмму или ее начальный участок, масштаб которого может быть увеличен до 120 раз (рис. 5). Это позволяет обеспечить удобный и точный расчет механических характеристик материала по исходной диаграмме кручения. Расчет проводится по массиву сохраненных данных, находящихся в памяти персонального компьютера, а на диаграмме кручения отображаются точки, соответствующие рассчитанным пределам пропорциональности, текучести и прочности (рис. 5). Также могут быть отображены вспомогательные линии, соответствующие линейному участку диаграммы, линии для определения пределов пропорциональности, текучести и истинного предела прочности. При расчете механических характеристик с помощью данной программы от оператора требуется только отметить границы начального участка для расчета модуля сдвига и ограничить конечный участок диаграммы для расчета истинного предела прочности. Все остальные вычисления происходят автоматически.

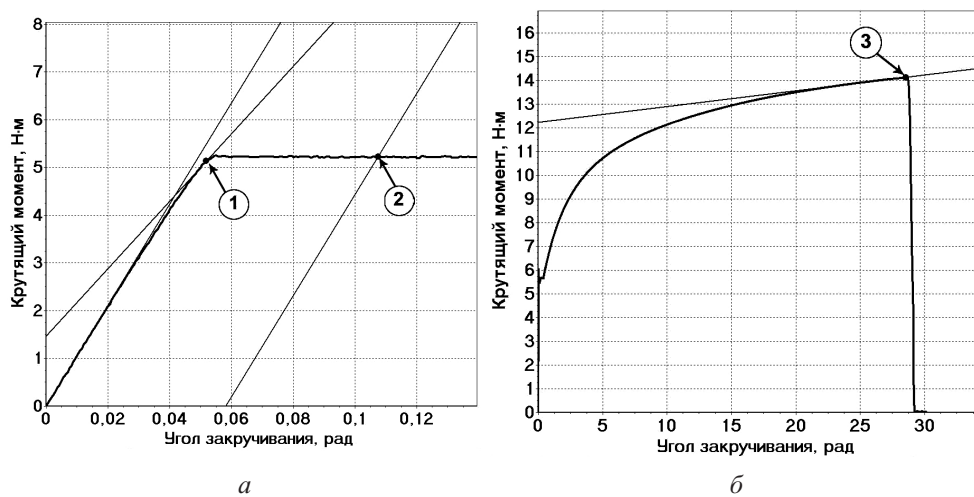


Рис. 5. Диаграмма кручения образца из стали Ст. 3 диаметром 5 мм и длиной рабочей части 46 мм: *а* – начальный участок; *б* – полная диаграмма (1 – предел пропорциональности; 2 – предел текучести; 3 – предел прочности).

Результаты тестовых испытаний на кручение. Отладка работы установки ТТМ-200 и тестирование программного обеспечения выполнялись при испытании образцов различных типов. Особенность проведенных испытаний состоит в том, что получаемые на установке начальные участки диаграмм кручения не имели каких-либо заметных искажений (рис. 5, *а*), что, вероятно, обусловлено точной центровкой образца в захватах, отсутствием его проскальзывания в захватах, а также высокими разрешающей способностью и точностью измерительной системы. Это значительно упрощает процесс определения механических характеристик материалов при кручении и повышает достоверность получаемых данных.

Высокие технические характеристики установки ТТМ-200 были подтверждены в процессе ее опытной эксплуатации в Институте проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. С использованием установки получены новые экспериментальные результаты и выполнены методические исследования расчета кривых нагружения при кручении [6].

Выводы

1. Создана универсальная установка ТТМ-200 для проведения испытаний на кручение стандартных образцов и проволоки. Использование в ней высокоточных механических узлов и измерительных устройств позволили обеспечить высокие точность и достоверность определения механических характеристик материалов при кручении.

2. Разработано специализированное программное обеспечение для испытаний на кручение, которое включает программы TorsionTest для проведения испытаний с накоплением и сохранением первичных данных и TorsionCalc для последующего расчета механических характеристик материалов при кручении.

3. Использование установки ТТМ-200 и разработанного программного обеспечения существенно упростило процесс проведения испытаний и обеспечило практически полностью автоматизированный расчет механических характеристик материалов при кручении.

Резюме

Розроблено універсальну автоматизовану установку ТТМ-200 для проведення випробувань на крутіння з високими технічними характеристиками. Створено програмне забезпечення, що включає програми TorsionTest для проведення випробувань на крутіння та TorsionCalc для розрахунку механічних характеристик за такого виду випробувань, що суттєво спрощує автоматизацію процесів випробувань та відповідних розрахунків.

1. *ГОСТ 3565-80*. Металлы. Метод испытания на кручение. – Введ. 30.05.80.
2. *ISO/DIS 18338*. Metallic Materials – Torsion Test at Ambient Temperature (under Development).
3. *ISO 7800:2012*. Metallic Materials – Wire – Simple Torsion Test.
4. *ISO 9649:1990*. Metallic Materials – Wire – Reverse Torsion Test.
5. *ASTM A938-07*. Standard Test Method for Torsion Testing of Wire.
6. *Вербило Д. Г.* Особенности расчета истинных кривых нагружения при кручении // Пробл. прочности. – 2011. – № 3. – С. 110 – 122.

Поступила 11. 03. 2013