

СЪЗДАВАНЕ НА СТЕНД ЗА ИЗПИТВАНЕ НА МАТЕРИАЛИ ПРИ ЧИСТО УСУКВАНЕ, ПРЕДНАЗНАЧЕН ЗА ЛАБОРАТОРНИ УПРАЖНЕНИЯ

Николай НИКОЛОВ

nyky@tu-sofia.bg

Катедра „Съпротивление на материалите“, Технически университет-София, България

Борис БОРИСОВ

baborisov@tu-sofia.bg

Никола КУЗМАНОВ

nkuzmanov@tu-sofia.bg

Резюме:

В тази статия е описано създаването на икономически изгоден стенд за лабораторни упражнения по темите „Изпитване на материалите“ и „Чисто усукване“, които са част от обучението по „Съпротивление на материалите“. Направен е обзор на съществуващите решения и изисквания към това изпитване, избрана е концепция и са формулирани технически изисквания, описана е конструкцията на създадения стенд.

Ключови думи: *изпитване на материалите, стенд, чисто усукване.*

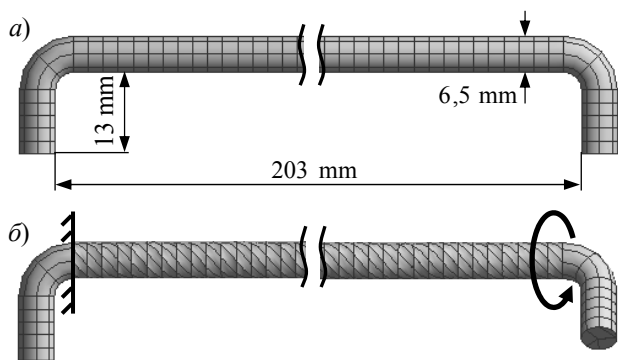
1. Въведение

Основна тема в дисциплината „Съпротивление на материалите“, която се изучава от всеки бъдещ машинен инженер, е „Изпитване на материалите“. Там се провежда лабораторно упражнение, в което се разрушават метални пробни тела на опън и на натиск, записва се кривата на деформиране и се определят важни материални характеристики. Студентите се запознават с поведението на материалите при напрежения, по-големи от границата на пропорционалност. Онагледяват се важните понятия провлачане, пластично уякчаване, образуване на шийка, пластично и крехко разрушаване. Усещат се и неудобствата, съпътстващи изпитването на опън:

- разлика между действителната и условната крива на деформиране на материала, поради неотчитане на промяната в напречното сечение, при изпитване по ISO 6892-1:2009 [1];

- разминаване между вида на напрегнатото и на деформационното състояние. При чист опън (натиск) напрегнатото състояние е едномерно, но деформационното е тримерно. Тангенциалните напрежения при опън влияят съществено на пластичното деформиране и на разрушаването. Това несъответствие често е трудно за разбиране в началния етап от изучаване на дисциплината.

Тези неудобства не съществуват при изпитването на чисто усукване на детайли с кръгово напречно сечение. Това е друго базово изпитване на материала, регламентирано в БДС 1196-71 [2], от което могат да се определят редица важни материални характеристики. При чисто усукване напрегнатото състояние е двумерно (чисто плъзгане). Деформационното състояние също е двумерно и съответства на напрегнатото. Отсъствието на опън значително забавя образуването и нарастването на пукнатини. Липсват и нестабилности на формата, каквато е образуването на шийка при теста на опън. В следствие при пластичните материали се получават много големи абсолютни ъглови деформации. Например, показаното на фиг.1 пробно тяло от мека стомана S235/EN 10025 с работна дължина 203 mm претърпява ъглова деформация от порядъка на 5600° (15,5 оборота) преди да се разруши. При това както напречните сечения, така и осевата дължина на пробното тяло не се променят. Така със сравнително прости средства се получава действителната крива на деформиране на материала, а самият експеримент е интересен и много ефектен поради големите деформации.



Фигура 1. Пробно тяло.

а) форма и размери; б) деформация от 12,8 оборота при усукващ момент 23,5 Nm (симулация).

При натоварване под границата на пропорционалност, тангенциалните напрежения на усукване в радиално направление са линейно разпределени. Това прави механизма на пластично деформиране при по-голямо натоварване много интересен, с постепенно пластифициране на материала от периферията към центъра. При идеална пластичност теоретичните зависимости, описващи напреженията и деформациите са ясни и сравнително прости и обикновено се дават във водещите учебници по „Съпротивление на материалите“ [3,4]. Не се дискутират обаче разликите между идеализацията и реалността, които произтичат от пластичното уякчаване и влиянието на скоростта на деформиране, които най-лесно се демонстрират и обясняват чрез експеримент. Това прави изпитването на усукване важно и за студенти, изучаващи елементи от теория на пластичността, както е случаят с преподаваната в Технически университет – София дисциплина „Конструкционна якост“.

Докато в множество технически университети по света се провежда лабораторно упражнение с изпитване на усукване, в нашата страна то традиционно се пропуска. В голяма степен това се дължи на липсата на техническо осигуряване, както и на недостатъчното внимание, което се отделя на тази проблематика в хода на обучението. С напредването на технологиите реализирането на подходящ стенд става все по-лесно и евтино, което заедно с ползите за учебния процес доведе до настоящата разработка.

2. Стандарти за изпитване на усукване

Необходима стъпка преди да се премине към създаване на средства за изпитване и провеждане на експерименти с тях е да се проучат наличните стандарти в съответната област. Съществуват справочници, които могат значително да облекчат този процес. В [5] са посочени четирите основни стандарта [6-9], свързани с изпитване на метални

образци на чисто усукване:

- ASTM E 143 [6] регламентира стандартен метод за определяне на модула на ъгловите деформации G при стайна температура;

- стандартите [7-9] се отнасят за телове. ASTM A 938 [7] и ISO 7800 [8] регламентират прост тест, при който тялото се усуква до разрушаване, като се броят пълните обороти при неговото деформиране. Броят обороти до разрушаване се сравнява с референтна стойност, от което се прави заключение дали пробното тяло преминава теста;

- ISO 9649 регламентира прост тест, при който пробното тяло последователно и еднократно се усуква в едната и в другата посока на определен брой обороти. След теста се изследва на око повърхността на пробното тяло – ако няма видими дефекти, пробното тяло преминава теста.

В [5] е направено заключението, че не съществува международен стандарт, който да регламентира получаването и обработката на кривата на деформиране на материала при чисто усукване в пластичната зона. Тази крива обаче е необходима за получаването на някои важни материални свойства, например границата на провлачане τ_s и границата на разрушаване (якост на усукване) τ_B . Вероятно това е една от причините създадения преди 44 години български държавен стандарт БДС 1196-71 [2], касаещ изпитването на усукване, да е все още действащ.

БДС 1196-71 регламентира:

- методите за изпитване на метални пробни тела при чисто усукване;

- определяне на: модула на ъгловите деформации G ; границата на пропорционалност τ_P ; условната граница на провлачане при усукване τ_{03} ; действителната граница на якост при усукване τ_B ;

- определяне и на други величини.

Обзорът на наличните стандарти показва, че БДС 1196-71, освен че е действащ, е и най-подробен като указания и количество на определяните величини. Затова логично той е избран за основна отправна точка при разработване на методи и средства за изпитване на усукване и провеждане на експерименти с тях. Стандартите [6-9] също ще бъдат използвани като източник на указания, стига да не влизат в противоречие с БДС 1196-71.

3. Концепция

Проучването показва, че при изпитване на усукване за учебни цели се използват както стендове с автоматично задвижване, така и такива с ръчно задвижване.

Автоматичното задвижване е необходимост при провеждане на точни изпитвания, тъй като пластичната деформация зависи от скоростта на

деформиране. В [9] се споменава, че в различните лаборатории, при спазване на еднакви стандарти, за едни и същи материали могат да се получат съществени различия в кривите заради различната скорост на деформиране. В [10] е показано, че режимът на натоварване (с постоянна скорост на захватите или с постоянна скорост на натоварването) също влияе на формата на диаграмата.

При стендовете с ръчно задвижване скоростта не може да се поддържа постоянна. Въпреки това, когато целта е демонстрация на физически феномени и обучение на студенти, това задвижване има редица предимства, които обуславят широкото му разпространение, като:

- Проста и ясна конструкция. Студентът може лесно да се запознае със стенда и след кратък инструктаж да пристъпи към самостоятелна работа без да се притеснява от грешки;

- Интерактивност и нагледност. Въртейки ръкохватката, студентът може да почувства увеличаващото се натоварване, като в същото време наблюдава протичащите деформации. Той има пълен контрол върху процеса – може да промени скоростта на натоварване, да спре натоварването за да разгледа пробното тяло или да запише междинни резултати, дори да разтовари пробното тяло. В пластичната област може да усети и да запомни как продължително време упражнява усилие, което почти не увеличава своята стойност, докато пробното тяло търпи големи деформации без да се разрушава.

- Икономически ползи. Тези стендове са значително по-евтини от автоматично задвижваните, което позволява една лаборатория лесно да се оборудва с няколко броя. Така студентите могат да работят самостоятелно или на малки групи. Освен това простата конструкция е свързана с голяма надеждност и лесна поддръжка.

Стендовете за изпитване на усукване могат да бъдат фабрични или ръчно изработени. Проучването на фабричните стендове показва, че те имат висока цена, като при това не съдържат сложни и специфични компоненти. Всички компоненти могат да закупят отделно или лесно да се изработят, като сумарната им цена е едва няколко процента от пазарната цена на фабричния стенд. Това прави идеята за ръчна изработка особено привлекателна при ограничен бюджет. Освен това създаването на стендове отлично се вписва в учебния процес на дипломанти и докторанти. В литературата са описани немалко такива разработки. Например в [11] е разработен стенд за изпитване на усукване с електрическо

задвижване и е обобщено, че са вложени \$534, докато типичната пазарна цена на фабричните машини е между \$10000 и \$25000.

Тъй като целта на настоящата разработка е въвеждане изпитването на усукване в учебния процес, а бюджетът е силно ограничен, ло-гично се взе решение да се пристъпи към собствена разработка на стенд с ръчно задвижване.

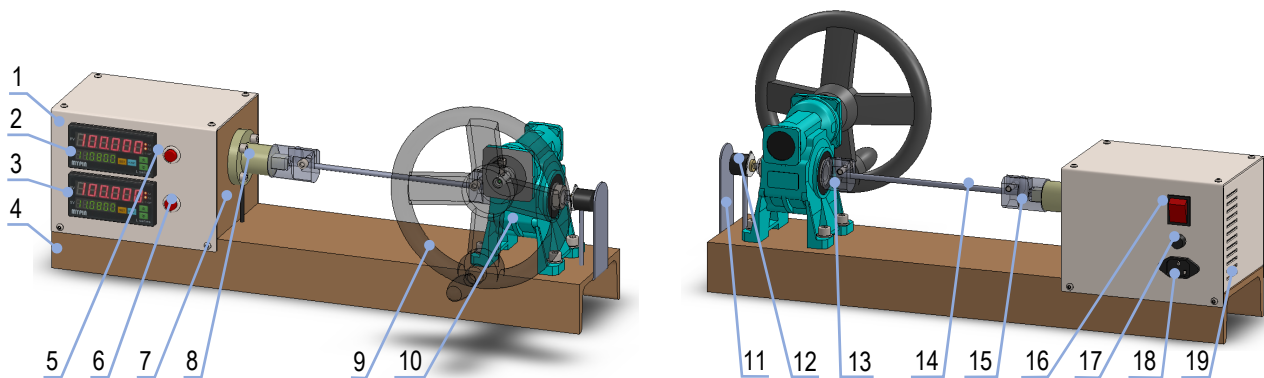
4. Технически изисквания към стенда

- Работа с лесни за изработване пробни тела, с условен диаметър на напречното сечение до 7 mm;
- Лесно поставяне и сваляне на пробните тела;
- Максимален усукващ момент: 30 Nm;
- Ергономичност: упражняване на момент до 30 Nm чрез лесно и удобно задвижване на ръка;
- Възможност за работа и в двете посоки;
- Самозадържане на еластичните деформации при прекратяване прилагането на външно усилие;
- Показване на упражнения при изпитването въртящ момент върху осветен цифров дисплей;
- Показване на сумарната ъглова деформация върху осветен цифров дисплей;
- Клас на точност при измерване на момент и ъглово положение: 0,1;
- Възможност за лесно калибриране на системата за измерване на въртящ момент;
- Добър външен вид;
- Лесно изработване и сглобяване: при възможност да се използват готови компоненти.

5. Описание на стенда

След уточняване концепцията и техническите изисквания беше разработен цялостен CAD-модел, показан на фиг.2 а и б. До показаната конструкция се достигна след анализ на 6 различни варианта. Повечето оригинални детайли бяха изработени от екипа по настоящия проект. Готовите компоненти бяха закупени след обстойно пазарно проучване. Снимка на готовия стенд е показана на фиг.3.

Задвижването на стенда се осъществява на ръка чрез ръкохватка-маховик 9 с диаметър 200 mm. Ръкохватката е монтирана към входящия вал на червячен редуктор 10, с предавателно число 1:65. При тези параметри, ако ръкохватката се върти с една ръка, за да се постигне въртящ момент 30 Nm трябва да се приложи усилие около 0,5 kg. Въртящият се захват 13 е изработен заедно с изходящия вал на редуктора. Този детайл от едната страна предава усилието на пробното тяло 14, а от другата задвижва ротора на инкременталния



Фигура 2. CAD-модел на разработения стенд за изпитване на усукване (изгледи отпред и отзад)

- 1 - панели; 2 - брояч; 3 – тензометричен усилвател; 4 - основа; 5, 6 - бутони за нулиране; 7 - опора; 8 - динамометър; 9 - ръкохватка; 10 - редуктор; 11 - предпазител; 12 - енкодер; 13 – въртящ се захват; 14 - пробно тяло; 15 - неподвижен захват; 16 - ключ; 17 – ел. предпазител; 18 - захранваща буksа; 19 - вентилационни отвори.

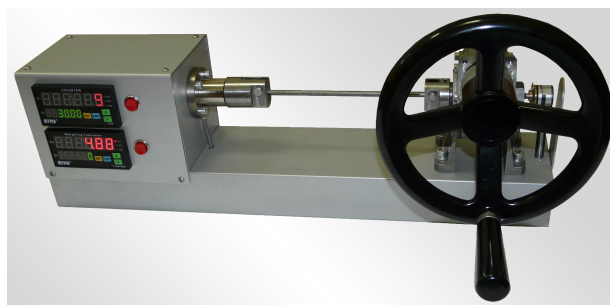
енкодер 12. Енкодерът 12 генерира на оптически принцип и две фази от по 3600 импулса на оборот, дефазирани на четвърт период. Така въртенето на вала се отчита с резолюция от $0,1^\circ$. Сигналът се подава към брояч 2, настроен в режим за работа с енкодери. Броячът увеличава показанието при въртене в едната посока и го намалява при въртене в другата посока. Показанието се извежда на голям, 6-разряден дисплей със светещи червени цифри. Броячът може да се нулира по всяко време чрез натискане на бутон 5.

В другия си край пробното тяло 14 е захванато от неподвижен захват 15, който предава въртящия момент към динамометър 8, произведен фабрично. Той работи на тензометричен принцип и има обхват $\pm 30 \text{ Nm}$. Динамометърът се захранва с напрежение 5V DC от тензометричен усилвател 3, с клас на точност 0,1 и 16-битов АЦП, извеждащ на дисплея до 80 показания в секунда с резолюция $0,01 \text{ Nm}$. Броячът 2 и индикаторът 3 са произведени фабрично и имат еднакъв преден панел, което е ключово за добрия външен вид на стенда. Индикаторът 3 може да се нулира по всяко време с натискането на бутон 6.

Динамометърът 8 е свързан неподвижно с болтове към вертикалната опора 7. Опората също е свързана с болтове към основата 4. Детайлите 4 и 7 са изработени от стандартен горещо валцуван профил UPN120, който има ниска цена, но притежава необходимите геометрия и коравина.

Електрическата част на стенда е поместена в кутия, съставена от панели 1. Панелите са изрязани с лазер от неръждаема стомана, след което са огънати на абкант. В страничния панел са прорязани отвори за вентилация 19. Върху задния панел са монтирани: светещ електрически ключ за включване и изключване на стенда; стъклен предпазител в гнездо 17, позволяващо проверка и подмяна на предпазителя без сваляне на панелите; захранваща буksа за 220V AC, за свързване към

електрическата мрежа чрез стандартни захранващи кабели. Реализираната електрическа схема е сравнително проста, тъй като уредите 2 и 3 се захранват с 220V AC, а самите те осигуряват на възприемателите възбуждащо напрежение 5V DC.



Фигура 3. Снимка на новосъздадения стенд.

4. Пробни тела, захвати и основа

Съществено значение за дизайна на стенда има геометрията на пробното тяло. В БДС 1196-71 [2] е дефинирано т.нар. нормално пробно тяло, номинален диаметър 10 mm и работна дължина 100 mm. Казано е, че могат да се използват пробни тела, пропорционални на нормалните, с номинален диаметър не по-малък от 5 mm. Дадени са изисквания към грапаостта и отклонението от номиналния диаметър. Главите за захващане на пробното тяло се оформят според изпитвателната машина. За спазването на тези изисквания пробните тела трябва да се изработват на струг от заготовки с голям условен диаметър. За да се избегне фрезването на главите за захващане, заготовките трябва да са четиристенни или шестостенни пръти. Всичко това значително затруднява и оскъпява както снабдяването с подходящи заготовки, така и изработката на пробните тела. При обучението на студенти регулярно са необходими големи количества пробни тела. Важно е тяхната цена да бъде ниска, а производството им –

лесно. Затова спазването на БДС 1196-71 по отношение на геометрията на пробните тела в случая бе прието за нецелесъобразно.

Стандартът ASTM A 938 [7] съдържа следните препоръки за геометрията на пробните тела при изпитване на телове на усукване (фиг.1):

- номиналният диаметър на работната част е колкото е диаметъра на телта;
- препоръчителната дължина на работната част е 203 mm;
- главите за захващане се получават чрез огъване на краищата под прав ъгъл, като дължината на огънатата част трябва да е минимум 13 mm.

Комбинацията между лесна за изработване геометрия и изобилие от подходящи метални пръти на пазара с ниска цена стана причина стендът да се пригоди за работа с именно такива пробни тела. Особено подходяща за учебни цели е арматурната стомана S235 с диаметър 6,5 mm. Освен че се разрушава при около 24 Nm, което е точно в обхвата на стенда, тя се отличава с масово производство, ниска цена, има площадка на провлачане и търпи големи пластични деформации. Ако пробните тела са без допълнителна обработка трябва да се отчете, че формата на напречното сечение и грапавостта на арматурните пръти са извън предписанията на БДС 1196-71.

За да се опрости конструкцията е предвидено да се изпитват само пробни тела с геометрията от фиг.1, с диаметър между 5 и 7 mm. Не е предвидено захватите да могат да се местят в осево направление, а динамометъра и редуктора са оразмерени за номинален товар 30 Nm. В самите захвати е фрезован дълбок прорез, който:

- осигурява съосност на пробното тяло с изходящия вал на редуктора и динамометъра;
- осигурява предаването на въртящия момент чрез огънатите краища на пробното тяло;
- осигурява осева хлабина на пробното тяло, за да се избегне възникването на осево усилие по време на експеримента, както се изисква в [2].

Геометрията на неподвижния захват е пригодена за свързване с лоста, чрез който става калибрирането на системата за измерване на въртящия момент.

5. Заключение

Ниската цена, доброто качество и достъпността на компонентите направиха възможна успешната собствена разработка на стенд за изпитване на усукване за учебни цели, с крайна цена, която е едва няколко процента от тази на готовите стендове, предлагани на пазара.

CREATION OF PURE TORSION TESTING MACHINE INTENDED FOR LABORATORY WORKS

Nikolay Nikolov
nyky@tu-sofia.bg

Boris BORISOV
baborisov@tu-sofia.bg
Strength of materials department, Technical university - Sofia, Bulgaria

Nikola KUZMANOV
nkuzmanov@tu-sofia.bg

Abstract: This article describes the creation of economically viable stand for laboratory works on topics "Materials testing" and "Pure torsion", which is part of the course "Strength of Materials". A review of existing solutions and requirements for this test are made, a concept is selected and the technical requirements are formulated, the construction of the created stand are described.

Key words: *materials testing, testing machine, pure torsion.*

References:

1. БДС EN ISO 6892-1:2009 Метални материали. Изпитване на опън.
2. БДС 1196-71 Метали. Методи за изпитване на усукване.
3. Hibbeler R.C., Mechanics of Materials – Eighth Edition, Prentice Hall, 2011.
4. Beer F.P., Mechanics of Materials – Sixth Edition, McGrawHill, 2012.
5. Czichos H., Saito T., Smith L.R., Springer Handbook of Materials Measurement Methods, Springer Science & Business Media, 2006.
6. ASTM E 143: Std. Test Method for Shear Modulus at Room Temperature, ASTM Int., West Conshohocken 2002.
7. ASTM A938: Std. Test Method for Torsion Testing of Wires, ASTM Int., West Conshohocken 2004.
8. ISO 7800: Metallic Materials – Wire – Simple Torsion Test, International Organization for Standardization (ISO), Geneva 2003.
9. ISO 9649: Metallic Materials – Wire – Reverse Torsion Test, International Organization for Standardization (ISO), Geneva 1990.
10. Nadai A.: Theory of Flow and Fracture of Solids, Vol. 1, 2nd edn., McGraw–Hill, New York 1950.
11. Vallee G., Short R., Design and Development of an Economical Torsion Testing Machine, Proceedings of the ASEE New England Section 2006 Annual Conference.