

МЕТОДИКА ЗА РАБОТА С НОВОСЪЗДАДЕН СТЕНД ЗА ИЗПИТВАНЕ НА МАТЕРИАЛИ ПРИ ЧИСТО УСУКВАНЕ

Николай НИКОЛОВ

nyky@tu-sofia.bg

Катедра „Съпротивление на материалите“, Технически университет-София

Борис БОРИСОВ

baborisov@tu-sofia.bg

Резюме:

В тази статия е описана методиката за работа с новосъздаден стенд за изпитване на материали при чисто усукване, предназначен за обучение на студенти. Методиката ще послужи да се доразвие сега съществуващото лабораторно упражнение „Изпитване на материалите“, както и да се създаде ново лабораторно упражнение, на тема „Чисто усукване“. И двете теми са част от обучението по „Съпротивление на материалите“.

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

1. Въведение

Изпитването на материалите при чисто усукване е експериментална дейност, особено подходяща за обучение на студенти, изучаващи „Съпротивление на материалите“. Това изпитване обогатява знанията и уменията на бъдещите инженери в три направления:

- определят се важни материални свойства, необходими за якостно-деформационния анализ на детайли и конструкции;
- демонстрират се и се изясняват важни за практиката физични явления, които са застъпени и в теоретичното обучение по дисциплината;
- развиват се практически умения за провеждане на експерименти и обработка на резултати.

С цел въвеждане на изпитването на усукване в учебния процес, първоначално бе създаден стенд с проста конструкция и ниска цена, от който лесно могат да се изработят няколко броя, с които да се оборудва подходяща лаборатория. Тази разработка е подробно описана в [1], а стендът е показан на фиг. 3. Следващият етап е да се създаде методика за работа със стенда и обработка на получените резултати, на базата на която да се подготвят лабораторните упражнения.

2. Използвани теоретични зависимости

При изпитване на усукване се измерват едновременно две величини – ъгъл на усукване φ и усукващ момент M , и се получава зависимостта $M(\varphi)$ – фиг. 1. Необходима е обаче кривата на деформиране на материала $\tau(\gamma)$ (τ – тангенциално напрежение; γ , % – относително плъзгане при усукване), показана на фиг. 2, която дава информация за някои важни материални свойства. Поради неравномерното разпределение на τ по напречното сечение, получаването на зависимостта $\tau(\gamma)$ от експериментално получената $M(\varphi)$ е значително по-сложно от аналогичното трансформиране на зависимостта $F(\Delta L)$ към кривата на деформиране на материала $\sigma_x(\varepsilon)$ при изпитването на опън (F – сила на опън; ΔL – абсолютна надлъжна деформация; σ_x – нормално напрежение; ε – относителна надлъжна деформация). По-долу накратко е обяснено как се получава кривата на деформиране при усукване и основните материални свойства, свързани с нея.

Модулът на ъгловите деформации G се пресмята по формулата

$$G = \frac{32 M L_0}{(\varphi_2 - \varphi_1) \pi d_0^4}, \text{ Pa} \quad (1)$$

където: M , Pa е стойност от линейния участък на кривата $M(\varphi)$. Съгласно [2] G се пресмята за напрежения в интервала от 10 до 100% от границата на пропорционалност; L_0 , m – мерна дължина на пробното тяло; φ_1 и φ_2 , rad – абсолютни ъгли на усукване на сечения 1 и 2, ограничаващи мерната част от пробното тяло; d_0 , m – номинален диаметър на пробното тяло.

Относителното плъзгане при усукване γ се пресмята по формулата

$$\gamma = \frac{(\varphi_2 - \varphi_1)d_0}{2L_0} 100, \% \quad (2)$$

След пресмятане на γ се построява кривата $M(\gamma)$. От нея се определя M_P – стойността на M , при която тангенсът на ъгъла, който сключва допирателната към тази крива с ординатната ос, нараства с 50% спрямо стойността си в линейния участък.

Границата на пропорционалност при усукване τ_P се пресмята по формулата

$$\tau_P = \frac{16 M_P}{\pi d_0^3}, \text{ Pa.} \quad (3)$$

За стойности на усукващия момент, по-малки от M_P кривата на деформиране на материала може да се построи по формулата за еластично усукване:

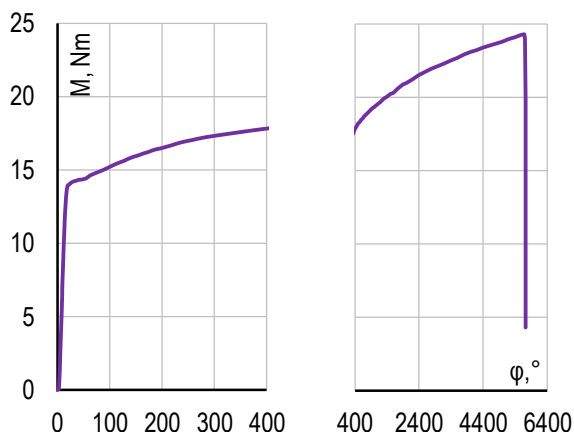
$$\tau(\gamma) = \frac{16 M(\gamma)}{\pi d_0^3}, \text{ Pa.} \quad (4)$$

При същото условие ($M \leq M_P$) напреженията в произволна точка от напречното сечение са

$$\tau(\rho) = \frac{32 M}{\pi d_0^4} \rho, \text{ Pa,} \quad (5)$$

където ρ , m е разстоянието от произволната точка до центъра на сечението.

Условната граница на провлачане τ_{03} съгласно [2] е напрежението, пресметнато по формула (4), при което по повърхността на пробното тяло се получава 0,3% остатъчно плъзгане. Приема се, че плъзгането при напрежения над τ_P е пластично.



Фигура 1. Зависимост $M(\varphi)$ за арматурна стомана, получена експериментално.

Така τ_{03} се получава, като във формула (4) се замени с усукващ момент $M(\gamma_P + 0,3)$, където γ_P е плъзгането, при което се получава M_P . При материали с площадка на провлачане може вместо τ_{03} да се установи и използва действителната граница на провлачане при усукване τ_S .

Действителната граница на якост при усукване τ_B се пресмята по формулата

$$\tau_B = \frac{4}{\pi d_0^3} \left(3M_B + \theta \frac{dM_B}{d\theta} \right), \text{ Pa,} \quad (6)$$

където M_B е максималният (разрушаващ) усукващ момент, а

$$\theta = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{L_0} = \frac{\varphi}{L_0}, \text{ rad} \quad (7)$$

– специфичен ъгъл на усукване.

В [2] се препоръчва да се построи кривата $M(\theta)$, след което $dM_B/d\theta$ да се получи като тангенс на ъгъла, който допирателната към тази крива в точката на разрушаване B сключва с абсцисната ос θ .

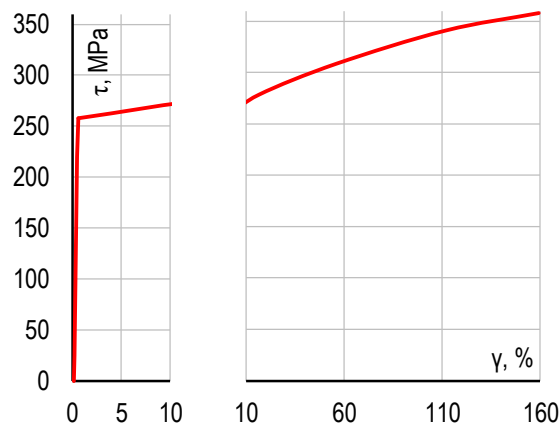
Тъй като съгласно (6), (7) и (2) $\tau = f(\theta)$, $\theta = f(\varphi)$ и $\gamma = f(\varphi)$, то с помощта на тези три формули от опитно получената крива $M(\varphi)$ се достига до необходимата крива на деформиране на материала $\tau(\gamma)$ за пластичната област, в която формула (4) не е валидна.

3. Методика за работа със стенда

3.1. Калибриране на системата за измерване на усукващия момент

Калибрирането се извършва задължително преди въвеждане на стенда в експлоатация и препоръчително – веднъж годишно:

- Неподвижният захват 15 (фиг. 3 б, з) се монтира в положение, при което площадките по външната му повърхност са хоризонтални;
- Постава се подпора 20, като се добавя смазка в контакта между нея и захвата;



Фигура 2. Зависимост $\tau(\gamma)$ за арматурна стомана, пресметната по данните от фиг. 1.

- Поставя се гаечен ключ 21.
- Поставя се стойка за тежестите;
- Стендът се свързва към електрическата мрежа и се пуска чрез ключ 16;

• В паметта на усилвателя 3, чрез клавиатурата на предния му панел, се задава калибрираща стойност на усукващия момент, която трябва да е близка до номиналната стойност от 30 Nm;

• Натиска се и се задържа бутон „надолу“, докато се нулира показанието на дисплея и автоматично се въведе стойността на нулевото показание в паметта на уреда;

• Бавно и внимателно се добавят тежестите 22. Получава се калибриращ усукващ момент, като произведение от силата на тежестта по разстоянието по хоризонтала между точката на окачване и надлъжната ос на динамометъра;

• Натиска се и се задържа бутон „нагоре“, докато се появи потвърждение на дисплея за извършано калибриране. При това уредът автоматично изчислява необходимият преобразуващ коефициент;

• Внимателно се свалят тежестите. Дисплеят трябва да покаже стойност „0“;

• Сваля се стойката и гаечният ключ, които са тара при калибрирането. Индикаторът показва отрицателна стойност, която се нулира с бутон 6.

3.2. Поставяне на пробното тяло:

• Неподвижният захват 15 се монтира с канала нагоре;

• Чрез въртене на ръкохватка 9 се намира положение на захват 13, при което пробното тяло 14 влиза свободно в каналите на двата захвата;

• Поставя се пробното тяло, като се проверява да е опряло плътно в дъното на каналите, с което се гарантира осевото му положение;

• В двата захвата се навиват фасонни винтове, които центроват пробното тяло и придържат частите му след разрушаване;

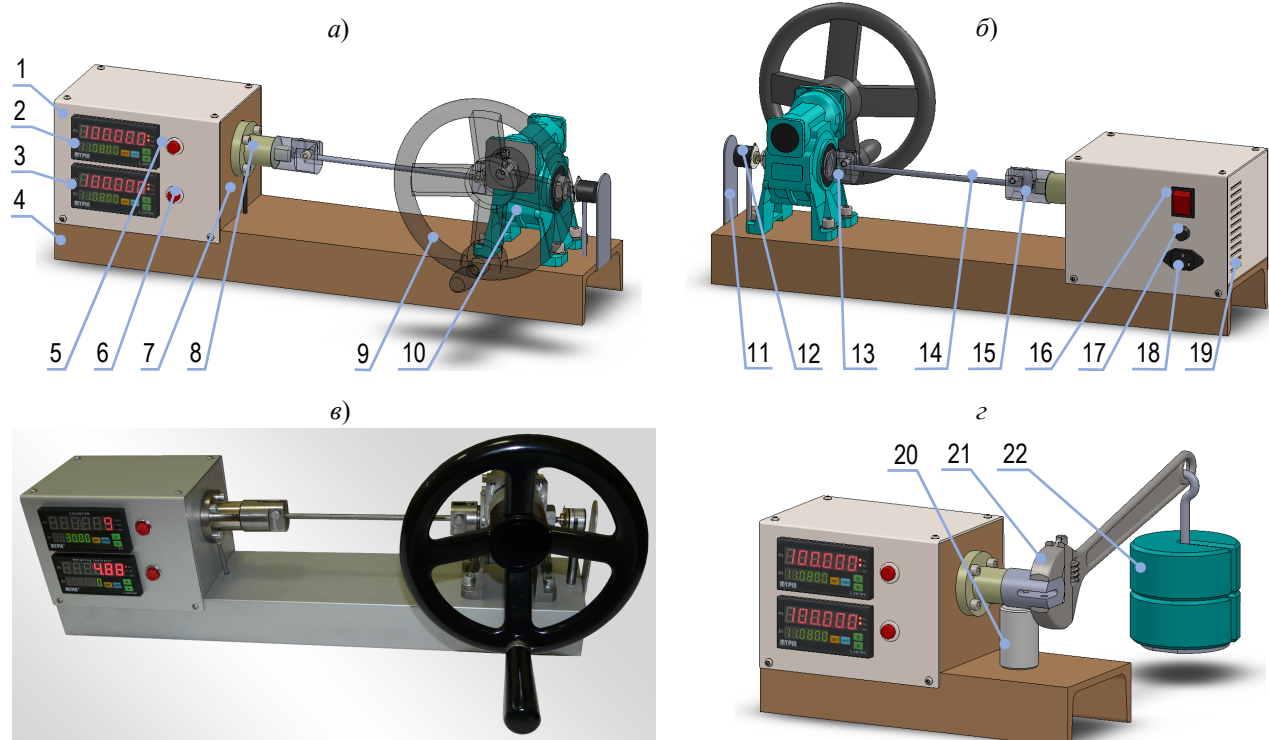
• Ако се изпитва материал, при чието разрушаване има опасност от отхвъркване на отломки, се добавя предпазител от прозрачна пластмаса.

3.3. Нулиране показанията на дисплеите

• Усилвателят 3 се нулира чрез бутон 6 преди върху пробното тяло 14 да е упражнено усилие;

• Ръкохватката 9 започва бавно да се върти в избраната посока, докато се обере хлабината в натоварващата система;

• В момента, в който дисплеят 3 отчете наличието на усукващ момент (стойност „0,01“), се нулира показанието на дисплей 2, отчиташъгловата деформация, чрез натискане на бутон 5.



Фигура. 3. Изображения на разработения стенд за изпитване на усукване

а) общ изглед отпред (модел); б) общ изглед отзад (модел); в) снимка; г) калибриране

- 1 - панели; 2 - дисплей за ъглова деформация; 3 - дисплей за въртящия момент; 4 - основа; 5, 6 - бутони за нулиране; 7 - опора; 8 - динамометър; 9 - ръкохватка; 10 - редуктор; 11 - предпазител; 12 - енкодер; 13 - подвижен захват; 14 - пробно тяло; 15 - неподвижен захват; 16 - ключ; 17 - електрически предпазител; 18 - хранваща бухса; 19 - вентилационни отвори; 20 - подпора; 21 - гаечен ключ; 22 - тежести.

3.4. Провеждане на изпитването

Стендът позволява провеждането на два вида изпитвания:

- Чиста демонстрация. В този случай показанията на дисплеите не се записват. По дължината на пробното тяло се нанася плътна линия за по-добра визуализация на деформацията. В хода на изпитването може произволно да се мени скоростта на натоварване или да се прекъсва въртенето на ръкохватката, с цел наблюдение и коментари на протичащите процеси.

- Определяне на материални характеристики. В този случай показанията на дисплеите се записват за по-нататъшна обработка. Тъй като пластичната деформация е чувствителна към скоростта на деформиране, а при напрежения надвишаващи границата на провлачане се получава и пълзене на материала, е желателно ръкохватката да се върти с постоянна скорост по време на целия експеримент.

След разрушаване на пробното тяло могат да се направят следните допълнителни наблюдения:

- Характер на лома – крехко или пластично разрушаване, наличие на пукнатини в лома. За съпоставка може да се използва приложение С на стандарт [3], като се обясни смисълът на отделните видове разрушаване.

- Равномерност на пластичните деформации. Изследва се формата на надлъжната линия, нанесена по цилиндричната повърхност на пробното тяло. Пластичните материали обикновено се деформират сравнително равномерно, при което първоначалната права линия се деформира в равномерна винтова линия. Понякога, например при студено изтеглени стоманени пръти, пластичните деформации са силно неравномерни по дължината. Образуват се зони с големи деформации, аналогични на шийката при изпитване на опън. В този случай формулата (6) за пресмятане на тангенциалните напрежения в пластичната област е неприложима.

- Измерване на надлъжните и напречните размери на пробното тяло. За цилиндрични пробни тела L_0 и d_0 остават практически непроменени, което се обяснява с вида на напрегнатото и деформационното състояние и е нагледна илюстрация на теорията.

5. Записване на резултатите

Стендът умишлено не е снабден с възможности за съхранение и обработка на показваните на двата дисплея данни, нито с възможност за връзка с компютър. Идеята е с учебна цел данните да се обработват ръчно, с максимално осмисляне на отделните етапи от обработката. Препоръчват се следните два подхода:

- ръчен запис на данните. Необходими са двама

души: един задвижва стенда и диктува показанията на дисплеите, вторият записва. Отчетените показания се попълват в таблица. Стъпката, през която се записват данните, следва да е по-малка в еластичната област и в областта на провлачането, и по-голяма – в останалата част от пластичната област;

- видео запис. Дисплеите за заснемат с камера на мобилен телефон или с друго устройство. Така в последствие кривата на деформиране може да се построи по произволен брой точки. Експериментът е по-точен заради по-равномерното задвижване и съвсем точно отчитане на показанията. Недостатък е увеличеното време за обработка на резултатите.

3.6. Обработка на резултатите

Пълната обработка на опитните данни изисква те да се оформят като таблица (таблица 1). Препоръчва се да се използва компютър със софтуер за електронни таблици.

Таблица 1

$\varphi, ^\circ$	M, Nm	$\gamma, \%$	$\text{tg } \beta$	τ_{el}, MPa	τ_{pl}, MPa
...					
избрана стъпка	експеримент	ф-ла (2)		ф-ла (4)	ф-ла (6)
...					

3.6.1. Пресмята се относителното плъзгане при усукване $\gamma, \%$, по формула (2).

3.6.2. Определя се границата на пропорционалност τ_p според предписанията в [2]:

- Пресмята се $\text{tg } \beta$, където β е ъгълът между допирателната към кривата $M(\gamma)$ и ординатната ос;

- Изчертава се графиката $\text{tg } \beta(\gamma)$ и от нея се определя стойността на $\text{tg } \beta$ за линейния участък ($\text{tg } \beta_G$);

- Пресмята се стойността $1,5 \text{ tg } \beta_G$ и се отбелязва като хоризонтална линия върху графиката $\text{tg } \beta(\gamma)$. Отчита се абсцисата на пресечната точка между хоризонталата $1,5 \text{ tg } \beta_G$ и графиката $\text{tg } \beta(\gamma)$. Тази абсциса е γ_p – относителното плъзгане, при което се достига границата на пропорционалност;

- Изчертава се кривата $M(\gamma)$. Върху нея се нанася вертикалата γ_p . Абсцисата на пресечната точка между кривата $M(\gamma)$ и вертикалата γ_p е M_p – усукващият момент, при който се достига границата на пропорционалност;

- Пресмята се границата на пропорционалност τ_p , като във формула (4) се замени M с M_p .

3.6.3. Пресмята се действителната граница на провлачане τ_s или условната граница на провлачане $\tau_{0.02}$ според предписанията в [2]:

- Разглежда се графиката $M(\gamma)$. Ако материалът има площадка на провлачане, се определя M_s – моментът, при който започва провлачането;

- Ако материалът няма ясно изразена площадка на провлачане, се определя M_{03} . Върху кривата $M(\gamma)$ се нанася вертикалата $\gamma_P+0,3$. Абсцисата на пресечната точка между кривата $M(\gamma)$ и тази вертикала е M_{03} ;

- Границата на провлачане се пресмята, като във формула (4) се замести M с M_S или с M_{03} . Когато се използва M_S се получава действителната граница на провлачане τ_S , а когато се използва M_{03} се получава условната граница на провлачане τ_{03} .

6.4. Построява се кривата на деформиране на материала

- В целия диапазон на усукващия момент тангенциалното напрежение се пресмята по формулата за еластично усукване (4), след което се построява графиката $\tau_{el}(\gamma)$;

- В целия диапазон на усукващия момент тангенциалното напрежение се пресмята по формулата за пластично усукване (6), след което се построява графиката $\tau_{pl}(\gamma)$;

- Кривата на деформиране на материала се получава като комбинация от горните две криви: за стойности на τ по-малки от τ_S се използва графиката $\tau_{el}(\gamma)$, а за останалите стойности - $\tau_{pl}(\gamma)$.

6.5. Определя се границата на якост при усукване τ_B – най-голямата стойност на τ , отчетена от кривата на деформиране на материала.

6.6. Определя се модулът на ъгловите деформации G . Този стенд дава занижени стойности на G , тъй като измерената сумарна деформация е по-голяма

от деформацията в работния участък, чиято дължина участва във формула (1). Независимо от това, с учебна цел G може да се определи по следната последователност:

- Определят се началото и краят на линейния участък от кривата $M(\gamma)$, като се използва графиката $\tan \beta(\gamma)$ от точка 3.6.2. С помощта на таблица 1 се определят началният ъгъл φ_1 и крайният ъгъл φ_2 на линейния участък;

- Модулът на ъгловите деформации G се пресмята по формула (1). Получената стойност се умножава по коригиращ коефициент, по-голям от единица. Стойността на коригиращия коефициент може да се определи с отделен експеримент, или като се използват данни от литературата за реалната стойност на G за изпитвания материал.

5. Заключение

Разработена е цялостна методика за провеждане на изпитване на усукване с новосъздаден стенд и за обработка на получените резултати. Някои етапи на методиката са свързани с работа с таблици и/или построения. Необходима е внимателна преценка каква част от работата по обработка на резултатите да бъде възложена на студентите, за да не се усложни упражнението. Процесът по обработка на резултатите може значително да се облекчи, ако допълнително се създаде специализиран софтуерен продукт.

WORKING METHODOLOGY FOR NEWLY CREATED PURE TORSION TESTING MACHINE

Nikolay Nikolov

nyky@tu-sofia.bg

Strength of materials department, Technical university - Sofia, Bulgaria

Boris BORISOV

baborisov@tu-sofia.bg

Abstract: This article describes working methodology for newly created pure torsion testing machine, designed for training students. The methodology will be used to further develop of the currently existing laboratory exercise "Testing of materials" and to create a new laboratory exercise – "Pure torsion". Both topics are part of the course "Strength of Materials".

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

References:

1. Nikolov N., Borisov B., Kuzmanov N., Creation of pure torsion testing machine intended for laboratory works. BulTrans-2015, Sozopol, Bulgaria, 16-18 September 2015.
2. БДС 1196-71 Метали. Методи за изпитване на усукване.
3. ISO 7800: Metallic Materials – Wire – Simple Torsion Test (International Organization for Standardization (ISO), Geneva 2003).