

ВЪЗСТАНОВЯВАНЕ НА ЛАБОРАТОРЕН СТЕНД ЗА ДИСЦИПЛИНА СЪПРОТИВЛЕНИЕ НА МАТЕРИАЛИТЕ

RESTORATION OF LABORATORY STAND FOR STRENGTH OF MATERIALS COURSE

Диян М. Димитров¹, Свилен Х. Стоянов², Лазар Панайотов²

¹ТУ-Варна, кат. Техническа механика

²ДТК-Добрич

Abstract: In this report a restoration of the laboratory stand for combine loading (bending and twisting), part of Strength of Materials course, is described. First, analytical calculation of force, moments and stresses are described. Obtained values are compared with a FEM solution based on a 3D geometry model. Second, measurement of strains using foil strain gauges connected in half and full bridge scheme is explained. The instrumentation of strain measurements is done with integrating measuring time interval -meter working by the method of ramp right conversion. The results are processed and recorded with specialized software.

Key words: strength of materials, strain gauge, combined loading

1. Въведение

Съпротивление на материалите е теоретико експериментална дисциплина, в рамките на която обучаемите се запознават с методите за якостно пресмятане при основните видове съпротиви [1]. За по-доброто усвояване на материала в повечето учебни програми са предвидени лабораторни упражнения, включващи основните механични изпитвания на материалите, методики за определяне на еластичните модули и практическо измерване на деформации чрез тензометриране[2]. Чрез представеният в настоящият доклад стенд се релизира комбинирано натоварване (огъване с усукване), което дава възможност на обучаемите да приложат знанията си на практика.

2. Изложение

Общият вид на стенда е показан на фиг.1. Еластичният елемент представлява конзолно закрепена стоманена тръба със заварена в свободния край триъгълна планка. Натоварването върху еластичният елемент (P) се реализира чрез лостова система, състояща се от два лоста, на която се закрепват предварително известни тежести (G). За измерване на деформациите, съответно пресмятане на напреженията са

залепени тензорезистори свързани в два моста, реагиращи съответно на огъване и усукване.



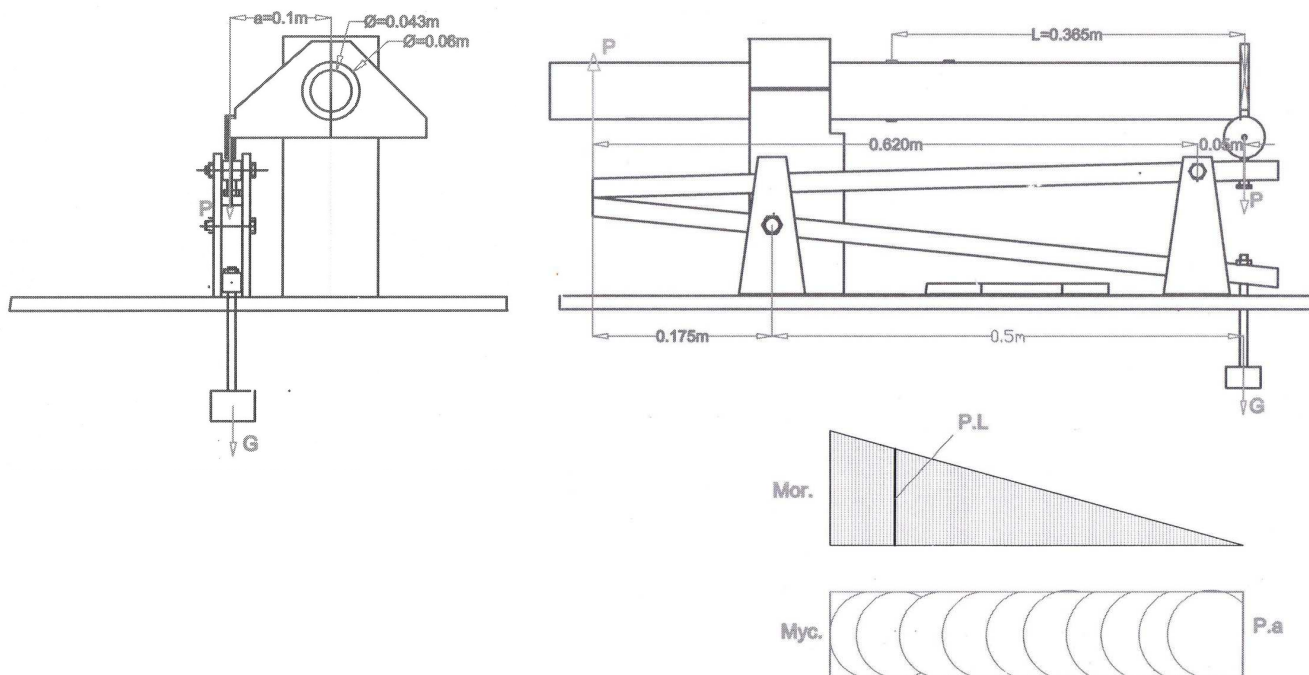
Фиг. 1 Общ вид на стенд за реализиране на комбинирано натоварване (огъване с усукване)

2.1 Теоретично пресмятане на напреженията

Необходимите размери са показани на чертежа фиг.2. Пресмятането извършваме в следната последователност:

-коэффициент на усиление на лостовата система (1)

$$(1) \quad P = \left(\frac{0,500}{0,175} \right) \cdot \left(\frac{0,62}{0,05} \right) \cdot G = 35,429 \cdot G$$



Фиг. 2 Сборен чертеж на стенд за реализиране на комбинирано натоварване (огъване с усукване)

-Огъващ и усукващ момент

Усукващият момент при показаното натоварване е константа ($M_{us}=P.a$), а огъващият момент е линейна функция на разстоянието L ($M_{og}=P.L$). Пресмятаме огъващият момент като измерваме разстоянието от свободния край до мястото на залепване на тензодатчиците реагиращи на огъване.

$$(2) \quad M_{og} = P \cdot 0,365m = 12,931.G$$

$$(3) \quad M_{us} = P \cdot 0,1m = 3,543.G$$

-Съпротивителни характеристики на сечението

$$(4) \quad W_{og} = \frac{\pi \cdot D^3}{32} \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] = 15,612cm^3$$

$$(5) \quad W_{us} = \frac{\pi \cdot D^3}{16} \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] = 31,224cm^3$$

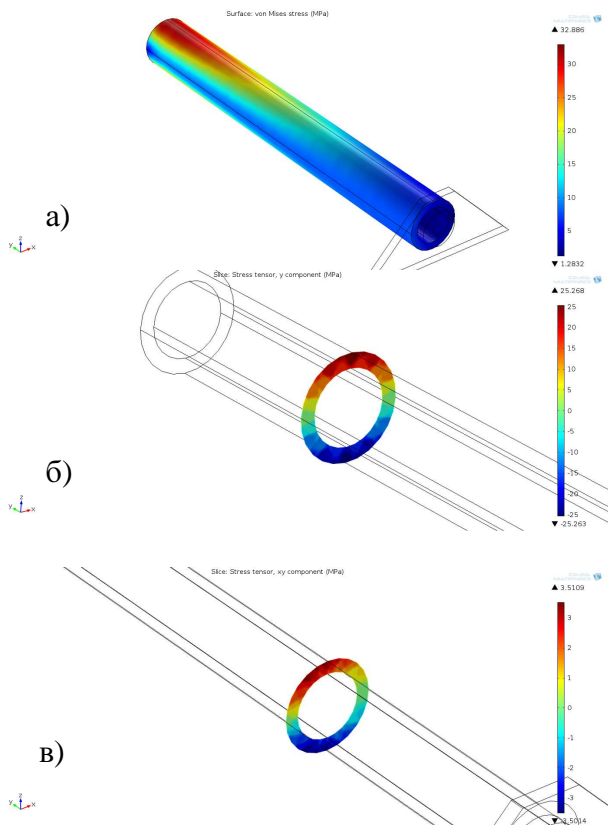
-Напрежения

$$(4) \quad \sigma_x^{Mog} = \frac{M_{og}}{W_{og}} = 0,828.G \text{ [MPa]}$$

$$(5) \quad \tau_x^{Mus} = \frac{M_{us}}{W_{us}} = 0,113.G \text{ [MPa]}$$

При максимално натоварване $G=30N$ ($\approx 3kg$) се получават съответно напрежения $\sigma_x^{Mog} = 24,84MPa$ и $\tau_x^{Mus} = 3,39MPa$.

За сравнение якостната задача е решена по метода на крайните елементи (МКЕ). В средата на софтуера “Comsol Multiphysics” е създаден 3D модел на еластичният елемент на стенда. Зададено е закрепване по задната повърхност и сила $P=30 \cdot 35,429 N$ в посока “-z”. Еластичните константи на материала са $E=210GPa$ и $\mu=0,3$. Разпределението на еквивалентното напрежение по 4та якостна хипотеза (Фон Мизес) е показано на фиг.3а. На фиг.3б е показано разпределението на нормалното напрежение по оста на еластичният елемент (посока y) в сечението на залепване на тензодатчиците реагиращи на огъване, а на фиг.3в разпределението на тангенциалното напрежение τ_{xy} . Регистрираните максимални стойности съответно $\sigma=25,26MPa$ и $\tau=3,51MPa$ са близки до теоретично пресметнатите.



Фиг.3 Разпределение на напреженията в еластичният елемент на стенда по пресметнато по МКЕ

2.2 Измерване на деформациите

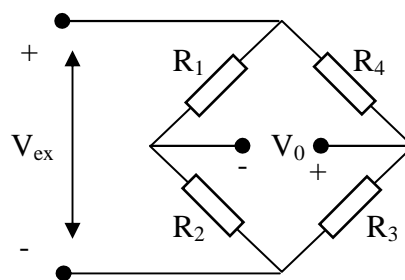
Тензодатчикът е сензор, който измерва линейни деформации като променя електрическото си съпротивление при промяна на дължината (6):

$$(6) \quad \frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

където

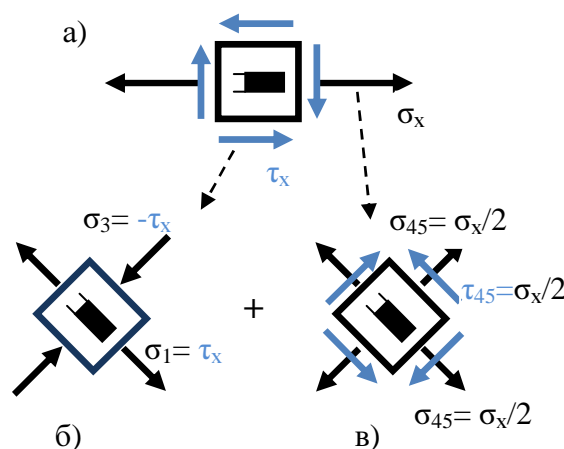
$\frac{\Delta R}{R}$ - относителна промяна на ел. съпротивлението; k - коефициент на тензочувствителност ($k \approx 2$ за фолийни тензодатчици); $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ - линейна деформация.

Тъй като промяната на съпротивлението е малка тензодатчиците се свързват в мостова схема с един, два или четири (четвърт, полу или пълен мост) активни тензодатчика, фиг.4, условието за балансиране на която е $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$.



Фиг.4 Мостова схема на свързване на тензодатчици

В точките на залепване на тензодатчиците („горе“ или „долу“) е налице следното напрегнато състояние, фиг.5а.



Фиг.5 Напрегнато състояние в точките в положение „горе“

Очакваната линейна деформация в направление „x“ при максимално натоварване може да пресметнем по простия закон на Хук (7).

$$(7) \quad \varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} = \frac{24,84 \text{ MPa}}{210 \cdot 10^3 \text{ MPa}} = 118 \cdot 10^{-6}$$

където $E = 210 \text{ GPa}$ – модул на Юнг за стомана.

За измерване на деформациите от тангенциалното напрежение трябва да залепим тензодатчици под ъгъл $\pm 45^\circ$. Напрегнатото състояние фиг.5а можем да разделим на чисто плъзгане фиг.5б и чист опън, фиг.5в. Може да се види, че ако използваме пълномостова схема на измерване, напрегнатото състояние фиг.5в предизвиква такова изменение на съпротивленията R_i , че дебалансиране на моста не се получава. (с колкото се

увеличават съпротивления R1 и R2, с толкова се намаляват съпротивления R3 и R4). При напрегнато състояние фиг.5б се изменят в една посока срещуположните клонове на моста: R1 и R3 се увеличават; R2 и R4 намаляват; или обратно. По такъв начин залепените тензодатчици ще реагират само на деформациите от усукването [2].

Очакваните деформации от усукване при максимално натоварване ще получим от обобщения закон ка Хук (8):

$$(8) \quad \varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \mu\sigma_3) = \frac{\tau_x}{E}(1 + \mu) = 21 \cdot 10^{-6}$$

,където $\mu=0,3$ –коэффициент на Поасон за стомана.

2.3 Конструирание на измервателната система

За конструирание на измервателната система на стенда са използвани фолийни тензодатчици на фирмата НВМ: тип 6/350 LY11 ($\kappa=2.05$) - за отчитане на нормалните напрежения; розетки тип 3/350 XY41 ($\kappa=2.00$) – за отчитане на деформациите от тангенциалните напрежения [3].

При заместване в (6) на максималната очаквана деформация в направление „x“ и $R=350\Omega$ получаваме максимална стойност за $\Delta R_{ex}=0,0847\Omega$. Така ако за измерването на деформациите от огъване използваме полумостова схема ще получим максимално ел. напрежение на изхода на моста (9)

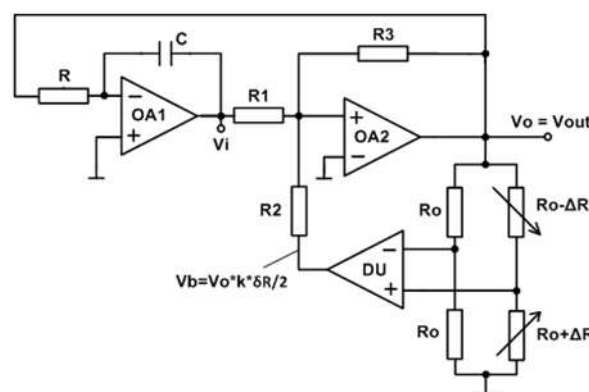
$$(9) \quad \frac{V_0}{V_{ex}} = \frac{k \cdot \varepsilon_x}{2} = 121 \frac{\mu V}{V}$$

При заместване в (6) на максималната очаквана деформация в направление „1“ и $R=350\Omega$ получаваме максимална стойност за $\Delta R_{e1}=0,00735\Omega$. Вижда се, че за измерване на деформациите от усукване трябва да използваме използваме схема пълен мост. Тогава ще получим максимално ел. напрежение на изхода на моста (10)

$$(10) \quad \frac{V_0}{V_{ex}} = k \cdot \varepsilon_x = 42 \frac{\mu V}{V}$$

Сигналът получен от мостовите схеми трябва да се усили и дигитализира за да могат да бъде въведен в компютър където с помоща на специализиран софтуер да бъдат направени необходимите преобразувания и показани исканите величини.

В конкретния случай, за измерване разбаланса на мостовата схема в период е използван двустранен интегриращ измервателен преобразувател, работещ по метода на рязгващото право преобразуване [4,5,6].



Фиг. 6. Схема на двустранен преобразувател на разбаланса на тензомост в период

На фиг.6 е представена принципната схема на преобразувателя. Схемата включва релаксационен генератор и преобразувател на разбаланса на моста в напрежение (ПРМН) [6]. Релаксационният генератор се състои от интегратор OA1 с времезадаваща верига R1 C1 и компаратор OA2, (неинвертиращ тригер на Шмит). Схемата генерира автоколебания на зададена честота с период T. ПРМН се състои от диференциален усилвател ДУ, делител на напрежение R1R2 и тензометричен мост(в случае е даден с два активни датчика).

Изведено е уравнението на изходния период T [6], за двата симетрични полупериода T1 и T2:

$$(11) \quad T = T_1 + T_2 = 4\tau \frac{R_1}{R_3} + 2\tau k \frac{R_1}{R_2} \delta R$$

където:

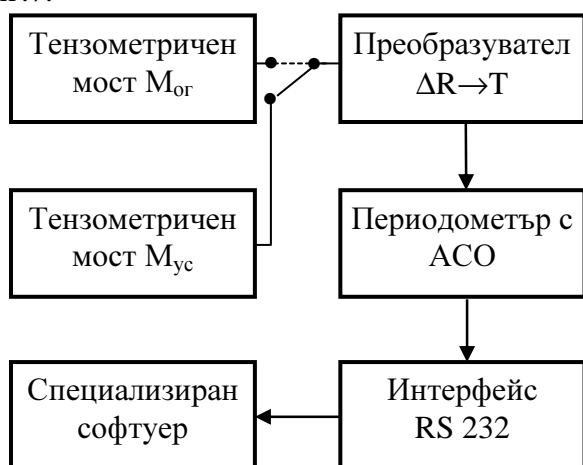
$-4\tau R_1/R_3$ –изходен период на трептенията без натоварване

$-2\tau k(R_1/R_2)\delta R$ –изменение на изходния период под въздействие на деформацията на тензодатчиците.

Характерно за схемата е, че уравнението на преобразуване е инвариантно към стойността на захранващото напрежение и липсва необходимост от допълнителни опорни напрежения. Това са съществени предимства на преобразувателя пред подобни схемни решения, водещи до схемно опростяване и подобряване точността и линейността на преобразуване.

2.4. Блок-схема на стенда

Блок-схемата на свързването на отделните модули на стенда е представена на фиг.7.



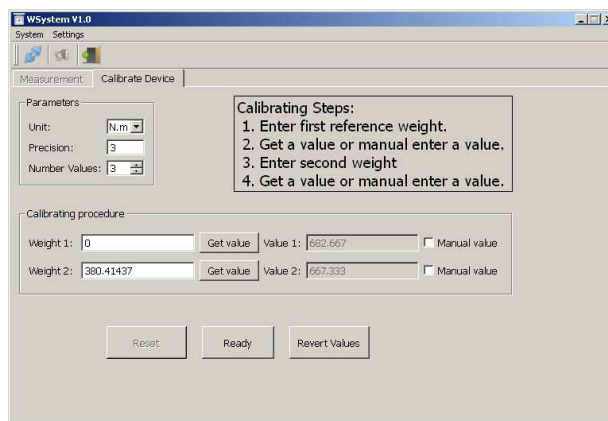
Фиг. 7. Блок-схема на свързване на модулите на стенда

Интегриращият измервателен преобразувател се състои от два отделни блока: преобразувател на изменението на съпротивлението на тензодатчиците в период $\Delta R \rightarrow T$ и периодометър с автоматична смяна на обхватите (АСО). Преобразувателят е едноканален и се свързва с един от двата моста. Изходният сигнал се подава на периодометъра и посредством интерфейса RS 232 на COM Port на компютър със специално разработен и инсталиран софтуер WSystem_v1.0.

Периодометърът, интерфейса и софтуера са разработени от колектив на Добруджански технологичен колеж (ДТК) гр. Добрич и Високотехнологичен парк (ВТП) ТУ-Варна [7].

2.5 Тарирание на стенда

Преди започване на работа е необходимо тарирание на стенда.



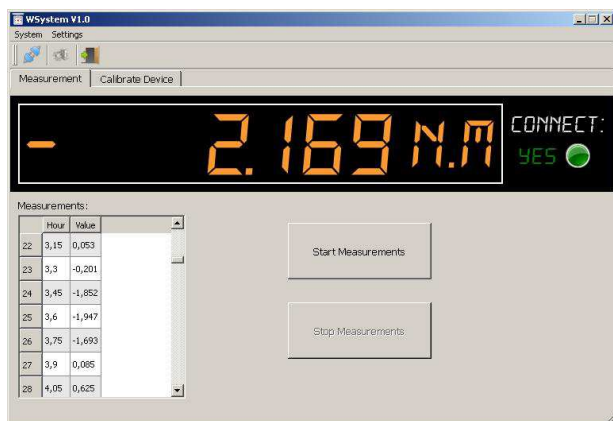
Фиг. 8. Тарирание на стенда

Тарирането се извършва с еталонни тежести и специално вграден калибратор Calibrate Device-фиг.8 в програмата WSystem_v1.0. За целта първо се избира вида на натоварването-Unit и желаната точност-Precision. След това се задава първата контролна точка в Calibrating Procedure чрез натискане на бутона Get Value. Получената стойност на периода Value1 се присвоява на нулево натоварване в полето Weight1. За определяне на втората контролна точка се поставя еталонната тежест и се натиска бутона Get Value, като новата стойност на периода се изобразява в полето Value2. Получената стойност на периода Value2 се присвоява на точната стойност на момента в полето Weight2, създаден от еталонната тежест и еталонното рамо.

При коректно зададени две точки системата е готова за работа след натискане на бутона Ready. За корекции се използват бутоните Reset и Revert Values.

2.6 Измерван на огъващ момент

Измерването на огъващия момент извършва, като се поставя първата тежест и се натиска бутона Start Measurement. Периодометърът започва да записва стойностите на момента, като се индицират време Hour и стойност на измервана величина Value. Необходимото време за извършване на едно измерване е 150ms, или системата прави 4 измервания за една секунда. Последователно се слагат и свалят всички тежести в хронологичен ред.



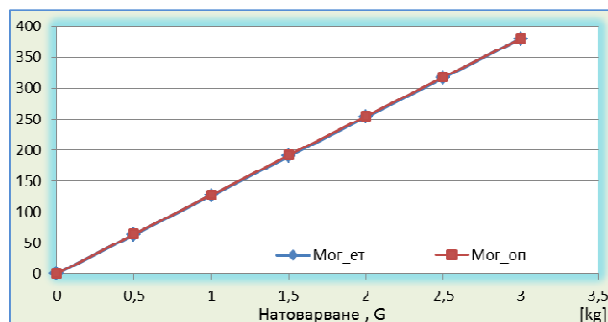
Фиг. 9. Работа със стенда

След приключване на измерването се натиска бутон Stop Measurement и програмата генерира файл от типа CSV, който се разпознава от Excel и получените данни могат да се съхранят и обработят допълнително при нужда. За точни измервания програмата може да се спира и стартира при всяка смяна на тежестите, но за демонстрации е препоръчително студентите да наблюдават изменението на момента при смяна на тежестите. Данните могат да бъдат записвани директно от дисплея или от генерирания файл. Препоръчително е студентите да записват получения момент от всяка тежест и след това да сравнят данните със стойностите на момента в генерирания файл. Освен това във файла може да се проследи и стойността на момента при колебания на системата и времето за затихване на колебателния процес. Получените и обработени резултати са дадени в Табл. 1.

Табл. 1 Получени и обработени резултати при измерване на огъващ момент

Натоварване		Изчислени еталонни стойности		Измерени и изчислени опитни резултати				
G	G	P	M _{ог_ет}	M _{ог_оп}	σ _x	ε ₁	γ	
kg	N	N	Nm	Nm	MPa	*10 ⁻⁶	%	
3	29,4200	1042,23	380,41437	380,4	24,3668	116,032	0	
2,5	24,5166	868,53	317,01197	318,1	20,3754	97,025	0,28601	
2	19,6133	694,82	253,60958	254,9	16,3272	77,748	0,33921	
1,5	14,7100	521,12	190,20718	191,8	12,2854	58,502	0,41871	
1	9,8067	347,41	126,80479	127,6	8,1732	38,920	0,20904	
0,5	4,9033	173,71	63,40239	64,1	4,1058	19,552	0,18338	
0	0	0	0	0	0	0	0	

На фиг.9 е показана графичната зависимост на изменението на момента при натоварване на стенда. Вижда се, че опитните и еталонните стойности практически съвпадат.



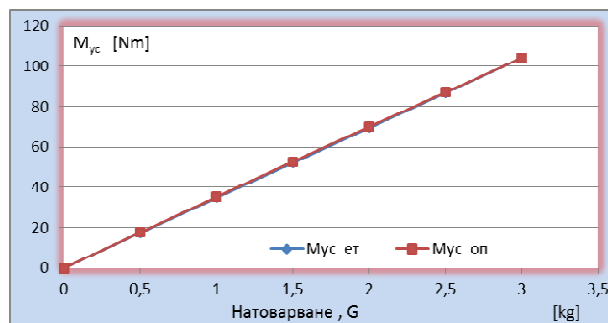
Фиг. 9. Графична зависимост – огъващ момент.

2.7 Измерване на усукващ момент

Измерването на усукващ момент извършва по същия начин. Получените и обработени резултати са дадени в Табл. 2, а графичната зависимост на фиг.10.

Табл. 2 Получени и обработени резултати при измерване на усукващ момент

Натоварване		Изчислени еталонни		Измерени и изчислени опитни			
G	G	P	M _{ус_ет}	M _{ус_оп}	τ _x	ε ₁	γ
kg	N	N	Nm	Nm	MPa	*10 ⁻⁶	%
3	29,4200	1042,23	104,22311	104,22311	3,337917	20,66329	0
2,5	24,5166	868,53	86,85260	87,2	2,792724	17,28829	0,33327
2	19,6133	694,82	69,48208	70,1	2,245068	13,89804	0,592885
1,5	14,7100	521,12	52,11156	52,8	1,691007	10,46814	0,660547
1	9,8067	347,41	34,74104	35,3	1,130541	6,998585	0,536313
0,5	4,9033	173,71	17,37052	17,6	0,563669	3,489379	0,220182
0	0	0	0,00000	0	0	0	0



Фиг. 10. Графична зависимост – усукващ момент.

3.Изводи

1. Възстановен е стенд за демонстриране на комбинирано натоварване (огъване с усукване), чрез който може да се демонстрира измерването на огъващи и усукващи моменти с тензосъпротивителни датчици.

2. Използвана е съвременна елементна база – двустранен интегриращ измервателен преобразувател, периодометър и специализиран софтуер.

3. Получените резултати могат да бъдат съхранени и допълнително обработени при нужда.

4. Извършените изследвания доказват работоспособността на стенда за измерване на големи моменти, благодарение на удачната конструкция на лостовата система с коефициента на усилване $k=35,429$.

5. Основното приложение на стенда е за провеждане на лабораторни упражнения по дисциплината „Съпротивление на материалите“.

Литература:

- [1] Върбан Милков, Съпротивление на материалите (теория, задачи и софтуер на CD), ТУ-Варна, 2001
- [2] Цветан Бацинов, Върбан Милков, Лазар Добрев, Димитър Узунов, Ръководство за лабораторни упражнения по съпротивление на материалите, ВМЕИ – Варна, 1984
- [3] Strain Gauges and Accessories, HBM catalog, hbm.com
- [4] Гигов Х., „Измервания в електрониката“, ТУ-Варна, Варна, 2013.
- [5] Стоянов С., Станков С., Гигов Х., „Преобразовател разбаланси тензомоста в период“, НТК на Севастополски НТУ, Севастопол, Украйна, 16-19.04.2013, Материали МНТК, Современные технологии проектирования управляющих и мехатронных систем, секция 4, стр. 268-274, 2013г;
- [6] Стоянов С., Станков С., Гигов Х., „Преобразовател на двупосочен разбаланс на тензомост в период“, Годишник на ТУ-Варна, т.2, стр.48-52, 2013, ISSN 1311-896X.
- [7] Михайлов Р., Стоянов С., Петрова А., и др. „Разширяване приложението в земеделската практика на технологии, техники и съоръжения за прецизно земеделие“, Резюме на проект НП30/2014, под печат;

За контакти:

Гл. ас.д-р инж. Диян Минков Димитров
9010 Варна, ул. “Студентска”1
Технически университет –Варна,
Катедра Техническа Механика
e-mail: dm_dimitrov@tu-varna.bg

Гл.ас.д-р инж. Свилен Христов
Стоянов, Добруджански технологичен
колеж в структурата на ТУ-Варна,
Гр.Добрич, ж.к. Добротица №12
e-mail: svilen.stoyanov@tu-varna.bg

Ас.инж. Лазар Георгиев Панайотов,
Добруджански технологичен колеж в
структурата на ТУ-Варна,
Гр.Добрич, ж.к. Добротица №12
e-mail: panayotoff@abv.bg