

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Војна академија Универзитета одбране у Београду

Немања Н. Аранђеловић

**Развој експерименталног уређаја за
испитивање струна на затезање израђених
од различитих материјала**

мастер рад

Крагујевац, 2017.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Војна академија Универзитета одбране у Београду



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Мастер студије

Модул: Наоружање

Предмет: Експеримент у машинству

Број индекса: 323/2015

Немања Н. Аранђеловић

**Развој експерименталног уређаја за испитивање
струна на затезање израђених од различитих
материјала**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

- 1. Др Бранко Тадић, ред. проф - ментор**
- 2. Др Александар Кари, доцент**
- 3. Др Данијела Милорадовић, доцент**

Датум одбране: 02.03.2017

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да :

изврши анализу техничких карактеристика идејног модела кидалице – учили. Кандидат такође треба да активно учествује у свим фазама развоја, пројектовања и реализације кидалице-учила и осмисли и изведе одговарајући програм експерименталних истраживања. У оквиру закључака, а на основу поређења добијених резултата са литературним подацима треба извести и одређене закључке.

Препоручена литература:

- [1] Petar Terzić, *ISPITIVANJE METALA- Deo 1: Mehanička ispitivanja*, Beograd (1972)
- [2] Milorad Jovanović, Dragan Adamović, Vukić Lazić, Nada Ratković, *MAŠINSKI MATERIJALI*, Kragujevac (2003)
- [3] Огњановић М.: Машински елементи, Машински факултет, Београд, 2007

Крагујевац, датум

ментор:

др Бранко Тадић, ред.проф

Резиме:

У оквиру овог рада анализирано је испитивање струне на затезање помоћу кидалице.

Приказана је структура, основни принципи рада и конструкција кидалице за мерење карактеристика материјала. Дат је преглед карактеристичних механичких својства материјала које се испитују. Описан је принцип рада класичних кидалица преко којих се долази до вредности сила и деформација испитаног метала. Дато је ново конструктивно решење кидалице, на којој се за разлику од класичних кидалица испитује струна на затезање. Дати су резултати мерења табеларно и представљени преко дијаграма.

Кључне речи:

Кидалица, струна, затезање, испитивање, напони, деформације

Summary

In this work was analyzed strings tensile testing using the test machine.

Shows the structure of the basic principles of operation and construction testing machine to measure the characteristics of the materials. Provides an overview of typical mechanical properties of the material to be tested. Describes the working principle of the conventional testing machine through which we come to value the force and deformation of the tested metal. Dato is a new design of the testing machine, which is in contrast to conventional testing machine examines the tightening string. The results of the measurements presented through tables and diagrams.

Key words:

Testing Machine, chord, tightening, testing, stress, strain

САДРЖАЈ

1. УВОД.....	7
2. МЕТОДЕ ИСПИТИВАЊА МАТЕРИЈАЛА ЗАТЕЗАЊЕМ	9
2.1 Теоријске основе	9
2.2 Оптерећења, напрезања, напони и деформације	13
2.3 Коцентрација напона.....	16
2.3.1. Фактори концентрације напона	16
2.3.2 Аксијално напрезање – затезање/притискивање	18
2.3.3. Утицај концентрације напона на разарање машинских делова при статичком и динамичком напрезању.....	21
2.4 Дијаграм напрезања	23
2.5 Хуков дијаграм	25
2.6 Испитивање затезањем	28
2.7 Анализа постојећих машина.....	32
3. РАЗВОЈ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ УРЕЂАЈА ЗА ИСПИТИВАЊЕ ЗАТЕЗАЊЕМ МЕТАЛНИХ СТРУНА	39
3.1 Основни концепт уређаја.....	39
3.2 Пројектно решење уређаја.....	45
3.2.1 Теоријска разматрања	45
3.2.2 Конструкција и развој уређаја.....	46
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА	54
4.1 План и програм експерименталног истраживања	54
4.2 Резултати истраживања (Табеле и дијаграми).....	55
5. ДИСКУСИЈА	66
6. ЗАКЉУЧАК.....	67
7. ЛИТЕРАТУРА.....	68

СКРАЋЕНИЦЕ КОЈЕ СУ КОРИШЋЕНЕ У РАДУ

σ [daN/mm ²]	- Напон
F [daN]	- Сила
A [mm ²]	- Површина попречног пресека
ϵ	- Деформација
L [mm]	- Почетна дужина струне
ΔL [mm]	- Издужење струне
d [mm]	- Пречник струне
α_k	- Фактор концентрације напона
β_k	- Ефективни фактор концентрације напона
R_m	- Затезна чврстоћа
R_v	- Граница развлачења
$R_{0,2}$	- Техничка граница развлачења
R_e	- Граница еластичности
R_p	- Граница пропорционалности
E	- Модул еластичности

1. УВОД

Механичка својства материјала заузимају посебно место међу осталим физичким и хемијским својствима, будући да се на основи њих димензионишу делови машина и уређаја.

Механичка својства реалних материјала могуће је тачно утврдити само експерименталним испитивањима у лабораторији.

Стога је на подручју испитивања механичких својстава развијена експериментална опрема помоћу које се епрувете оптерећују на начин како ће одговарајући машински делови бити оптерећени током експлоатације.

Епрувете су узорци на којима се спроводе испитивања; нормираног су облика и димензија. Једно од најчешћих испитивања механичких својстава је статичко испитивање на затезање које се спроводи на уређајима који се називају кидалице.

Кидалице су уређаји на којима се епрувета континуално оптерећује статичком силом све до лома како би се анализирано еластично и пластично понашање материјала у условима једноосног оптерећења.

При испитивању се континуално мере сила и деформација епрувете, те се на основу тих величина одређују механичка својства која карактеришу механичку отпорност материјала.

Када се материјали проматрају из конструкцијске перспективе, њихово најважније својство је чврстоћа.

Чврстоћа представља отпор материјала према деформацији и лому, односно, чврстоћа је способност материјала да подноси напрезања узрокована спољним оптерећењима. Чврстоћа материјала одређује се спровођењем статичког испитивања на затезање.

Темељни задаци испитивања материјала су: [1]

- Одређивање погодних величина за карактеризацију својстава материјала и њихово квантитативно изражавање у облику употребљивих карактеристика;

- Континуална и широка аутоматизована контрола промене својстава материјала, које настају код производње, прераде и обраде материјала с откривањем могућих грешака материјала;

- Периодична контрола стања материјала након одређеног времена експлоатације;

- Истраживање случајева разних оштећења и узрока ломова машинских делова у експлоатацији.

Подела испитивања материјала се врши на основу својстава материјала, па тако имамо следеће врсте испитивања материјала:

- механичка испитивања;
- технолошка испитивања;
- испитивања без разарања;
- металографска испитивања;
- хемијска испитивања;
- физичка испитивања.

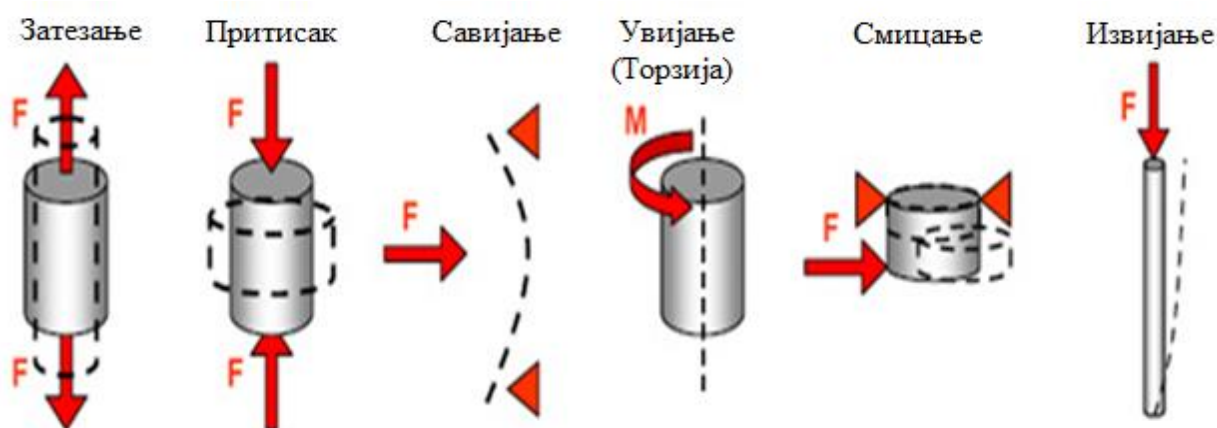
2. МЕТОДЕ ИСПИТИВАЊА МАТЕРИЈАЛА ЗАТЕЗАЊЕМ

2.1 Теоријске основе

Да би се могло извршити правилно димензионисање делова израђених од датих материјала, неопходно је познавање механичких својства датих материјала. Најважнија механичка својства материјала су: чврстоћа, тврдоћа, жилавост, замор и пузање. Овај мастер рад садржи само обрађене методе испитивања затезне чврстоће.

Општа подела механичких својстава и услова испитивања је следећа :

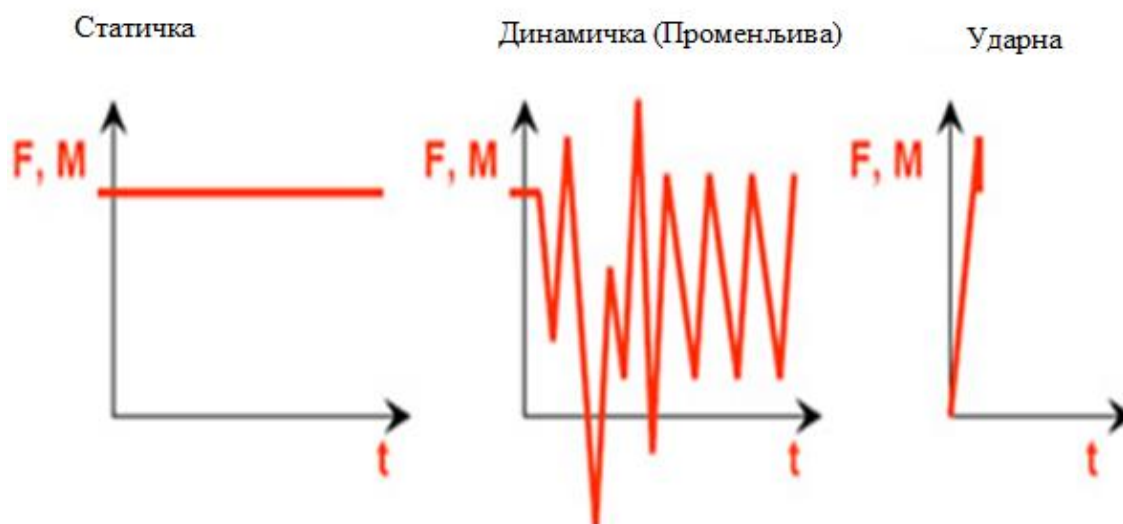
а) Према начину деловања оптерећења на : затезање, притисак, савијање, увијање, смицање, комбинације као затезање и притисак итд [2]



Слика 1. Подела према начину оптерећења

б) Према брзини деловања оптерећења на: статичко и динамичко.

Статичка оптерећења на затезање, притисак, савијање, увијање и смицање, обично су краткотрајна (око 10 min), а нека од њих могу бити и дуготрајна код испитивања пузања и релаксације (од 45 min до 100 000 сати). Динамичка оптерећења могу бити ударна (брзина удара Шарпијевог клатна обично је 5,5 m/s) или променљива (са истосмерним циклусима на затезање или притисак). Динамичка променљива оптерећења осим на затезање и притисак, могу бити још на савијање или увијање;



Слика 2. Подела према брзини деловања

в) Према температури испитивања: на собној, на повишеној и на сниженој температури. Најчешће се врше испитивања на собној температури (између 10 и 35 °C), затим под контролисаним условима на температури 23 ± 5 °C (нпр. за пузање, рефлексција итд.), те на сниженој температури (нпр. ударне радње лома -20 °C) и на повишеној температури (нпр. пузање на температурама +400, +500, +600°C итд.);

г) Према трајању деловања оптерећења на : краткотрајна и дуготрајна, како је већ обрађено под б) [2,3]

Испитивање затезањем убраја се у најважнија механичка испитивања материјала, јер оно даје највише важних употребних својстава, као што су : напон течења, затезна чврстоћа, модул еластичности, издужење (истезање), сужење итд. Прве експерименте затезања на жици ради одређивања затезне чврстоће изводио је Леонардо да Винчи. Важност испитивања затезањем види се из следећег:

- даје најбољи опис понашања материјала под оптерећењем;
- добити о својствима материјала највише се користе за прорачун и димензионисање елемената машина и конструкција;
- добити подаци омогућавају једноставну контролу технолошких процеса разних производа и својстава нових материјала;

-из својстава отпорности материјала могу се приближно одредити и друга важна својства за праксу (као тврдоћа, динамичка издржљивост итд.);

- једноставно се изводи и лако се израчунавају темељна својства.

Понашање металних материјала при испитивању затезањем може се представити дијаграмом на чијој је ординати представљена сила која делује на епрувету а на апсциси тренутно издужење.



Слика 3. Карактеристични облици дијаграма [4]

У свом почетном делу крива има најчешће праволинијски ток, што значи да између силе и тренутног издужења постоји линеарна зависност (Хуков закон). По престанку линеарне зависности (р), прираштаји дужине за једнаке прираштаје силе постају све већи, па се крива постепено савија ка апсциси.ε

Гранични напон до ког је издужење пропорционално напону, назива се граница пропорционалности.

Ако се епрувета у подручју праволинијског пораста растерети, издужење ће нестати. Епрувета добија поново своју првобитну дужину. Издужење је потпуно еластично. При порасту напона изнад једне граничне вредности (е), епрувета се по растерећењу не враћа у потпуности на првобитну дужину. Овај гранични напон назива се граница еластичности σ_e .

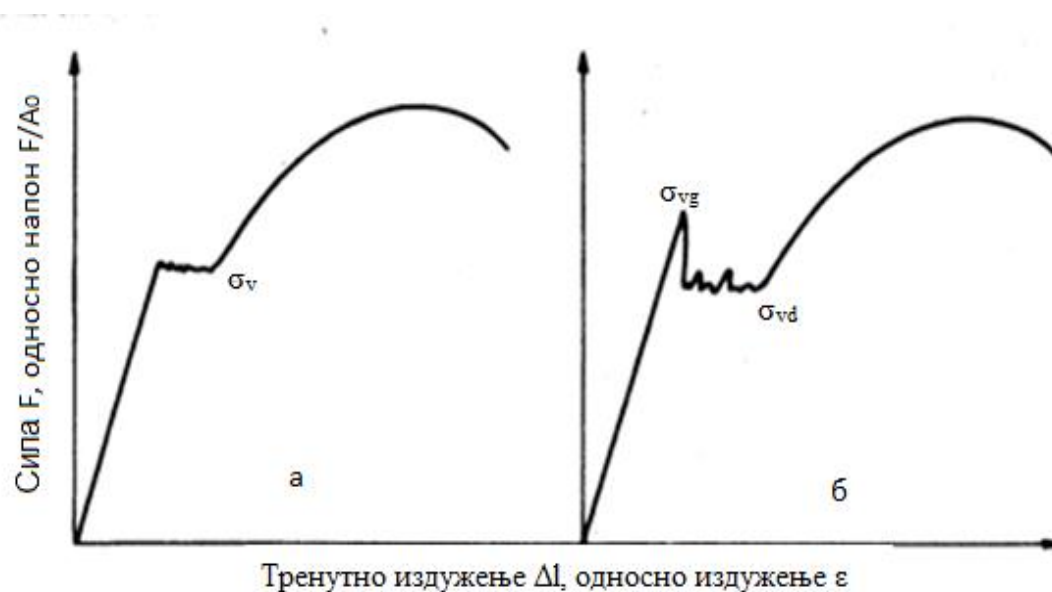
Однос напона и јединичног издужења чија је вредност константна у еластичном подручју, представља модул еластичности $E = \sigma / \epsilon$.

Упоредно са повећањем дужине епрувете настаје смањење попречног пресека. Ово попречно скупљање је пропорционално издужењу. Фактор пропорционалности (Поасонов број) има различите вредности у еластичном и пластичном подручју.

Код кртих материјала (сл. 3.а) лом настаје одмах изнад границе еластичности, дакле пре него што настану већа трајна издужења епрувете.

Код жилавих материјала (сл. 3.б,в,г) при порасту напона изнад тачке V настаје јако пластично деформисање материјала. Издужење мерне дужине постаје тако изразито да се може мерити обичним лењиром.

Напон при којем издужење почиње приметно брже да расте него до тада назива се граница развлачења σ_v . Код неких челика граница развлачења је веома оштро истакнута.

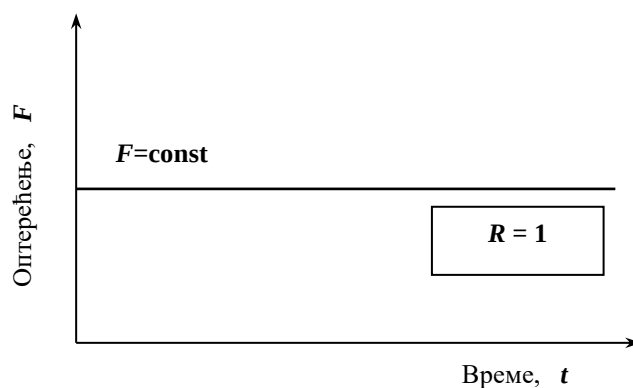


Слика 4. Оштро истакнута граница развлачења (σ_v), код нискоугљеничног челика [4]

2.2 Оптерећења, напрезања, напони и деформације

Машински елементи су у току рада изложени дејству оптерећења (силе и/или моменти). Ова оптерећења су проузрокована отпорима које машина савлађује вршећи користан рад.

Зависно од карактера промена током времена, оптерећење може бити **статичко** или **динамичко**. [3]



Слика 5. Статичко оптерећење

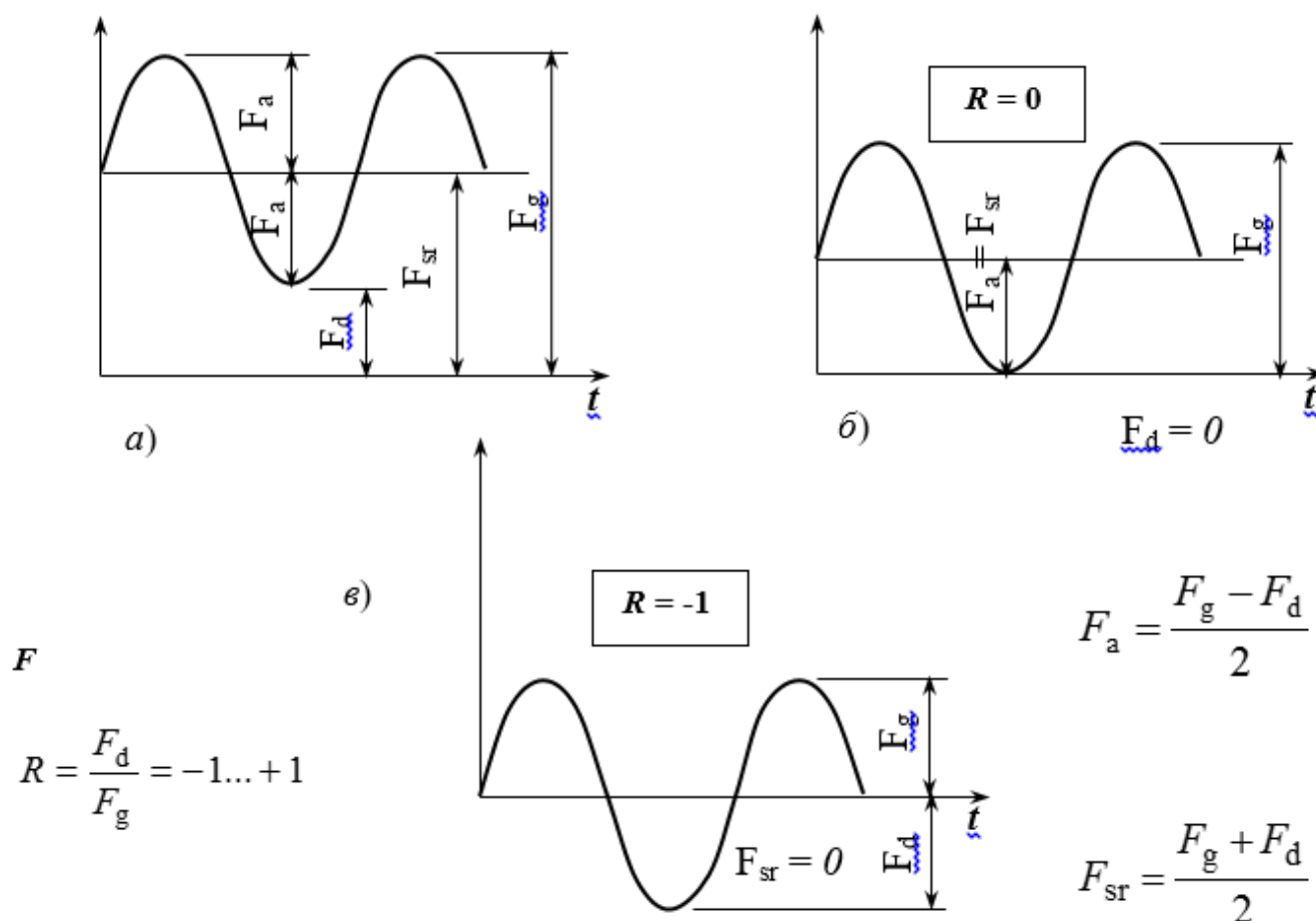
Код **статичког оптерећења** (сл. 5) интензитет, правац и смер оптерећења се не мењају током времена.

Динамичко (сл. 6) периодично променљиво оптерећење током времена се мења по интензитету, правцу и смеру.

Карактеристичне величине периодичног променљивог оптерећења (сл. 6) су:

F_g – максимално оптерећење, F_d – минимално оптерећење,

F_a – амплитудно оптерећење, F_{sr} – средње оптерећење.



Слика 6. Периодично променљиво динамичко оптерећење: а) општи случај; б) једносмерно променљиво; в) наизменично променљиво [2,3]

Периодично променљиво оптерећење код кога је минимално оптерећење једнако нули ($F_d = 0$), а амплитудно оптерећење једнако средњем оптерећењу, односно $F_a = F_{sr}$, назива се **једносмерно променљиво** оптерећење (сл.6 б)

Периодично променљиво оптерећење код кога је средње оптерећење једнако нули ($F_{sr} = 0$), назива се **наизменично променљиво** оптерећење (сл.6 в).

За описивање карактера промене оптерећења током времена, користи се **фактор асиметрије циклуса R** .

Оптерећење које се јавља у нормалним условима рада, назива се **номинално оптерећење**. У току рада, због промене режима рада машине, оптерећења машинских елемената могу бити и знатно већа од номиналних.

Оптерећење машинских елемената које се јавља у току рада назива се **стварно оптерећење**. Одређивање стварног оптерећења је веома сложено, а у неким случајевима и неизводљиво. Зато се за прорачун машинских елемената користи меродавно оптерећење. [3]

Меродавно оптерећење се одређује на основу номиналног оптерећења, тако што се номинално оптерећење помножи одговарајућим фактором оптерећења (K).

Напрезање је стање које настаје у машинском делу под дејством спољашњег оптерећења. Напрезање машинског дела карактерисано је променом облика и димензија - **деформацијама**, односно унутрашњим отпором - **напоном**.

Деформација је промена облика и димензија машинског дела под дејством оптерећења.

Деформације могу бити еластичне (повратне) и пластичне (трајне).

Деформације могу бити запреминске, које се простиру по целој запремини машинског дела или контактне, ограничене на додирну површину два тела.

Напон је физичка величина која карактерише интензитет унутрашњих сила у некој тачки замишљеног пресека машинског дела, којима се материјал машинског дела супротставља деформисању због дејства спољашњег оптерећења.

Зависно од положаја спољашњег оптерећења, у односу на осу машинског дела, разликују се следеће врсте напрезања: **затезање, притискивање, савијање, смицање и увијање**.

2.3 Коцентрација напона

Машински делови скоро увек у већој или мањој мери имају променљиве попречне пресеке. На месту промене попречног пресека (на месту дисконтинуитета), долази до неравномерне расподеле напона.

Значи, све тачке попречног пресека не пружају исти отпор спољашњем оптерећењу. При томе, та неравномерност је утолико израженија, уколико је промена попречног пресека наглија (скоковитија). [3]

Концентрација напона је појава наглог повећања напона на месту дисконтинуитета попречног пресека машинског дела.

2.3.1. Фактори концентрације напона

Теоријски фактор концентрације напона дефинисан је као однос максималног напона на месту извора концентрације напона ($\sigma_{\max}$) према номиналном напону (σ_{nom}) који би владао у посматраном попречном пресеку без извора концентрације напона:

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nom}}}, \quad \alpha_k = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{\text{nom}}} \quad (1)$$

Вредности теоријског фактора концентрације напона односе се на идеалан материјал. Оне зависе од врсте напрезања и облика и релативне величине извора концентрације напона.

С обзиром да зависи од геометријских параметара извора концентрације напона, овај фактор концентрације напона назива се и геометријски фактор концентрације напона. Приказују се у облику дијаграма или таблица. [3]

Дијаграми теоријских (геометријских) фактора концентрације напона за различита напрезања (затезање, савијање, увијање) и облике и величине извора концентрације напона.

Конструкциони облици машинских делова могу да захтевају промену попречног пресека. Тада, у циљу смањења максималног напона на месту извора концентрације напона, треба имати у виду:

- изворе концентрације напона постављати на месту минималних номиналних напона;
- изворе концентрације напона изводити у што блажој форми, применом што блажих прелазних заобљења.

Експерименталним истраживањем утврђено је да сви материјали нису подједнако осетљиви на појаву концентрације напона. Осетљивост на концентрацију напона утолико је већа уколико је материјал хомогенији.

Материјали са међукристалним шупљинама (нехомогени материјали) мање су осетљиви на концентрацију напона.

Због тога је уведен **ефективни фактор концентрације напона**:

$$\beta_k = (\alpha_k - 1)\eta_k + 1, \quad (2)$$

где је η_k -фактор осетљивости материјала на концентрацију напона.

Вредности фактора осетљивости материјала на концентрацију напона приказују се таблично (Таб.1) :

Табела 1. Вредности фактора осетљивости материјала на концентрацију напона η_k за различите врсте материјала

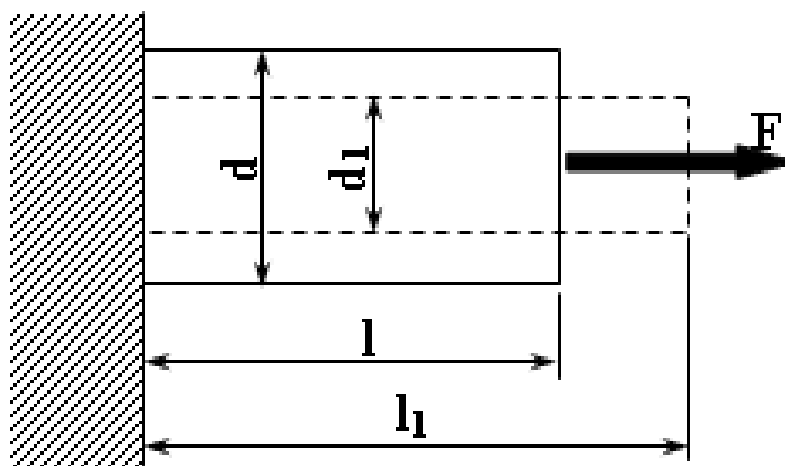
Материјал	η_k
Обични конструкциони челик	0,40 ... 0,85
Легирани челик	0,65 ... 0,95
Челик за опруге	0,95 ... 1,00
Ливено гвожђе	0,00 ... 0,40
Челични лив	0,25 ... 0,50

2.3.2 Аксијално напрезање – затезање/притискивање

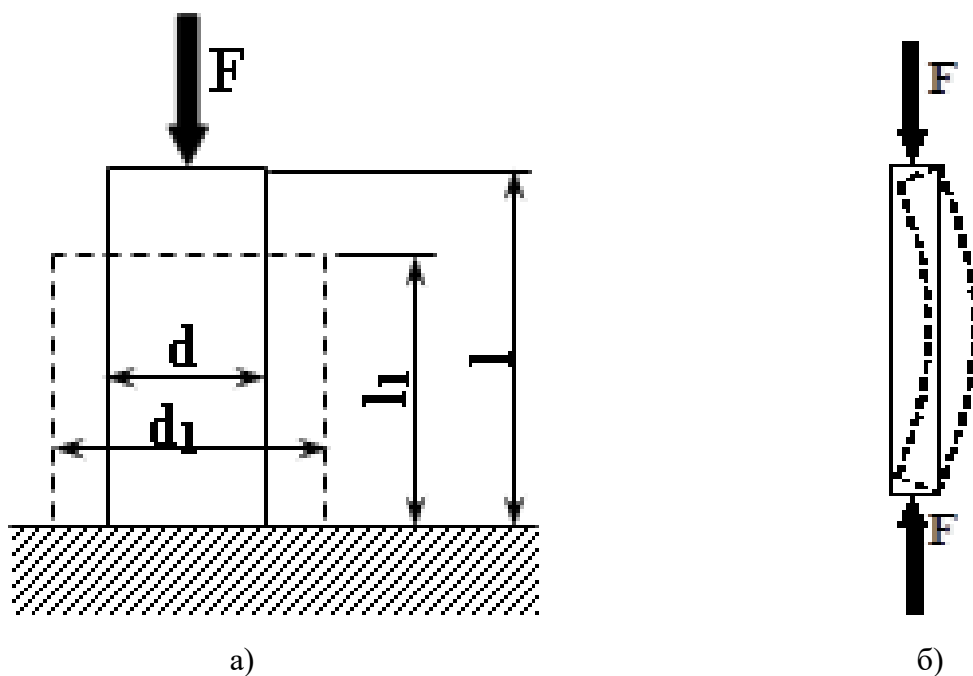
Затезање је напрезање које настаје деловањем сила дуж осе машинског дела (аксијалних сила). Оне у машинском делу изазивају деформацију у виду повећања првобитне дужине и смањења првобитног попречног пресека (Сл.7).

Притискивање је напрезање које настаје деловањем аксијалних сила као. Код овог напрезања се у машинском делу јавља деформација у виду смањења првобитне дужине и повећања првобитног попречног пресека (Сл.8а).

Ако су дужинске мере машинског дела много веће од попречних (пречник или дебљина штапа), тада под дејством аксијалних сила може доћи до извијања машинског дела (Сл.8б).



Слика 7. Машински део напрегнут на затезање [3]

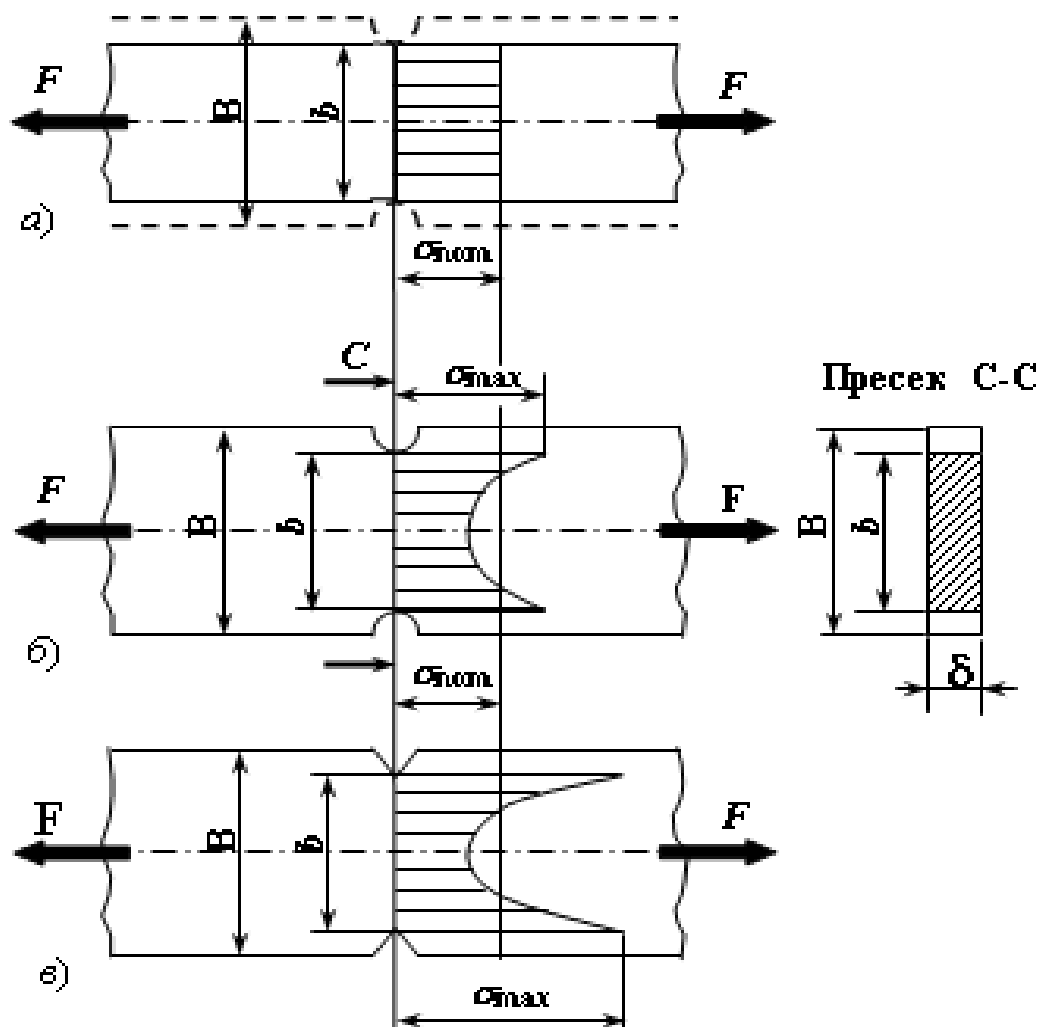


Слика 8. Машински делови напрегнути на притискивање

У попречним пресецима аксијално напрегнутог машинског дела јављају се нормални напони, равномерно распоређени по попречном пресеку (пример затегнутог штапа на Сл.9а).

На месту дисконтинуитета попречног пресека машинског дела, нпр. зареза различитих облика (Сл.9б,в), јавља се концентрација напона у виду наглог скока напона у односу на напон у осталим деловима попречног пресека.

На месту извора концентрације напона, напон има највећу вредност у попречном пресеку – $\sigma_{\max}$ (Сл.9б,в).



Слика 9. Машински делови напрегнути на истезање [3]

Номинални напон σ_{nom} је напон у који се јавља у попречном пресеку машинског дела без извора концентрације напона или напон у зони концентрације напона израчунат под претпоставком константног пресека машинског дела (Сл.9).

Номинални напон при аксијалном напрезању машинског дела се може одредити на основу израза:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (3)$$

где је:

F – оптерећење, које напреже машински део (Сила) и

A – површина најмањег попречног пресека оптерећеног машинског дела.

2.3.3. Утицај концентрације напона на разарање машинских делова при статичком и динамичком напрезању

Расподела напона у попречном пресеку на месту извора концентрације напона код машинског дела израђеног од метала и оптерећеног на затезање, приказана је на слици 9.

При повећању оптерећења, повећава се номинални напон и максимални напон који је од номиналног α_k пута већи.

Максимални напон врло брзо достиже границу кидања R_m , на месту извора концентрације напона појављује се напрслина, која се брзо шири и доводи до разарања целог пресека.

Идеални материјал је веома осетљив на концентрацију напона ($\eta_k = 1$).

Ако је машински део са сл. 9 израђен од хомогеног еласто-пластичног материјала (тзв. „меки“ челици), расподела напона у попречном пресеку приближно одговара расподели у идеалном материјалу, али само у области малих оптерећења, при којима је максимални напон $\sigma_{\max}$ мањи од границе течења (развлачења) R_e .

Са повећањем оптерећења, на месту извора концентрације напона, долази до локалног пластичног деформисања (течења, развлачења) највише напрегнутих влакана материјала.

У тачкама у којима је достигнута граница течења напони остају константни. При томе долази до већег истезања суседних влакана и у њима се повећава напон.

Тако се смањује неравномерност расподеле напона.

При повећању оптерећења, када номинални напон у свим влакнима посматраног попречног пресека достигне вредност напона течења, расподела напона је равномерна, као у случају машинског дела без извора концентрације напона.

Са даљим повећањем оптерећења, равномерно се повећава напон у свим влакнима попречног пресека, све до достизања напона кидања R_m , када долази до разарања машинског дела по целом пресеку.

Нехомогени материјали који у својој структури садрже еластичну компоненту (основна маса гвожђа у ливеном гвожђу) су веома мало осетљиви на концентрацију напона ($\eta_k \rightarrow 0$).

За разлику од разарања при статичком напрезању, лом машинских делова при динамичком напрезању настаје без претходног пластичног деформисања, независно од врсте материјала.

Ефекат достизања равномерне расподеле напона код машинских делова од еласто-пластичног материјала при променљивом оптерећењу не долази у пуној мери до изражаја, као што је случај при статичком напрезању.

Утицај концентрације напона на разарање машинских делова при динамичком напрезању. Ефективни фактор концентрације напона β_k представља меру утицаја концентрације напона на разарање машинских делова при динамичком напрезању.

2.4 Дијаграм напрезања

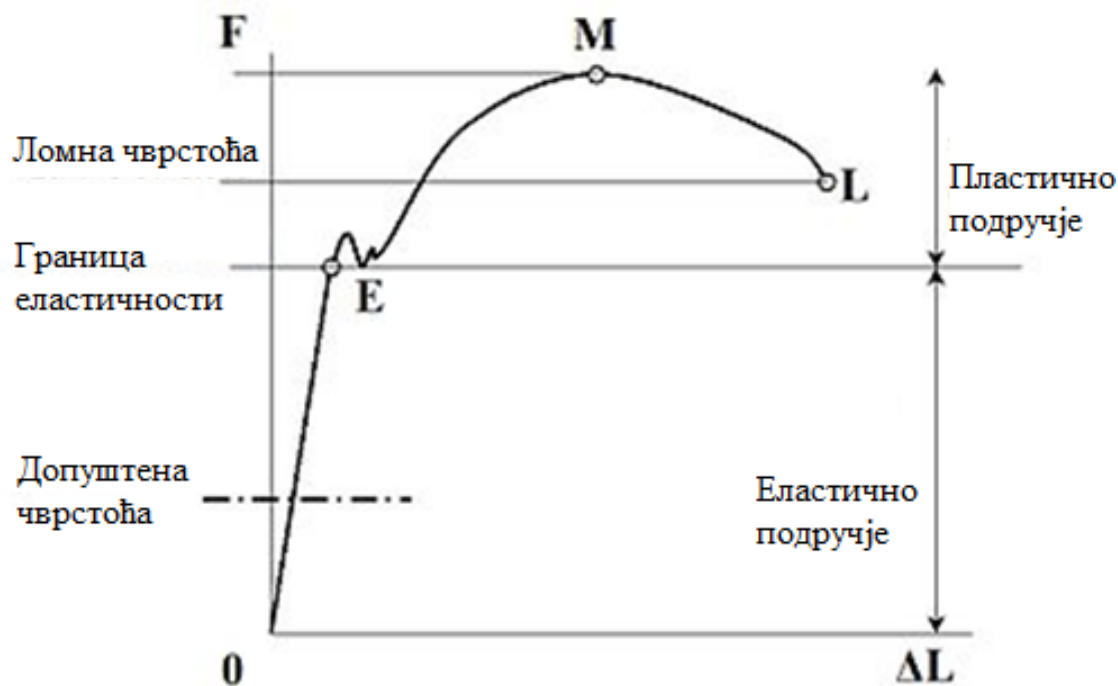
Дијаграм напрезања приказује међусобну зависност σ - напрезања и ε - релативног издужења. У материјалу који је оптерећен неком силом F настају напрезања σ која узрокују његово растезање. Напрезање σ је однос силе F и површине пресека A штапа или шипке. [4]

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4)$$

Због деловања силе F (а тиме насталог напрезања σ) штап или шипка ће се од почетне дужине L_0 растегнути на дужину L . Тако је издужење штапа или шипке:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (5)$$

Почетно напрезање је линеарно (деформација је сразмерна напрезању). У подручју линеарног растезања (Хуков закон) материјал је еластичан и након престанка деловања силе, односно напрезања, он се враћа у почетно стање.



Слика 10. Дијаграм напрезања [5]

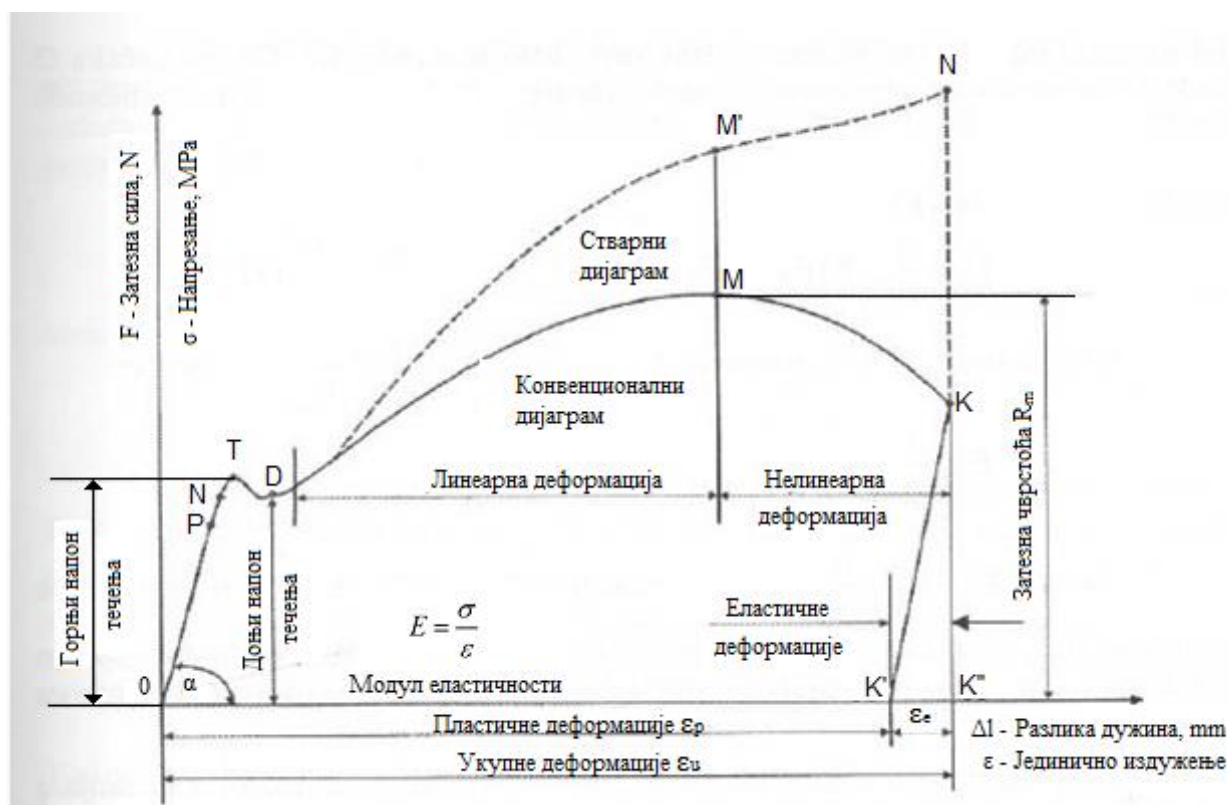
Young-ов модул еластичности је однос напрезања и релативног издужења (у подручју еластичности). (сл. 10)

Техничка граница еластичности је напрезање при којем осетљива мерила осете прво приметно трајно издужење материјала (при још непромењеном пресеку A_0). Након те границе (обично на крају линеарног растезања) материјал се растеже пластично и након престанка деловања силе не враћа се више на почетну дужину l_0 , већ остаје одређено трајно издужење, уз сужење пресека, $A < A_0$).

2.5 Хуков дијаграм

Приликом испитивања затезањем понашање материјала може се пратити на дијаграму крива. Дијаграм крива црта машина за време испитивања. На ординати региструје се сила $F[N]$ а на апцисној оси тренутно издужење $\Delta l [mm]$, у одговарајућој размери. [2,6]

Да би се уклонио утицај димензија пробног узорка конструише се, на основу дијаграма крива, дијаграм напон σ и јединично издужење ϵ . (сл.11)



Слика 11. Нукон дијаграм [2]

При оптерећењу од тачке О до Р зависност продужења епрувете о сили је линеарна, а деформације су еластичне, јер се при растерећењу епрувета потпуно враћа у свој првобитни облик и величину.

Највеће напрезање до којег је издужење пропорционално напрезању назива се границом пропорционалности.

При порасту напрезања изнад ове граничне вредности, престаје пропорционалност између напрезања и деформација и издужење почиње да расте брже. Напон при којем издужење почиње брже да расте назива се граница течења (тачка Т).

Даљим повећањем напона, преко границе течења, долази до пластичних деформација, попречни пресек се стално и равномерно смањује по целој мерној дужини епрувете, све до тачке М када напон достиже своју максималну вредност и када долази до сужења епрувете и настајања локалног издужења на епрувети, после тачке М долази до смањења напона све до пуцања епрувете у тачки К. [5,6]

Резултати који се добијају испитивањем су:

Затезна чврстоћа - R_m је максимални напон који може да поднесе један материјал пре него што дође до лома (кидања).

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (6)$$

Граница развлачења - R_v је напон при којем долази до наглог преласка из еластичног у пластично подручје, код материјала који показују ту појаву.

$$R_v = \frac{F_v}{S_0} \quad (7)$$

Горња граница развлачења - R_{vg} представља највећи напон пре првог опадања силе уз истовремени пораст издужења.

Доња граница развлачења - R_{vd} представља најмањи напон у подручју течења, при чему се занемарују почетни полазни ефекти. [4]

Техничка граница развлачења - $R_{0.2}$ је напон при којем трајно-пластично издужење износи 0,2% првобитне мерне дужине.

Граница еластичности - R_e је гранични напон неког материјала од којег не настају трајне деформације.

Граница пропорционалности - R_p је највећи напон при коме још постоји пропорционалност између напона и јединичног издужења.

Модул еластичности - Е представља однос напона према јединичном издужењу у подручју еластичности.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad или \quad E = \frac{Fl_0}{S\Delta l} \quad (8)$$

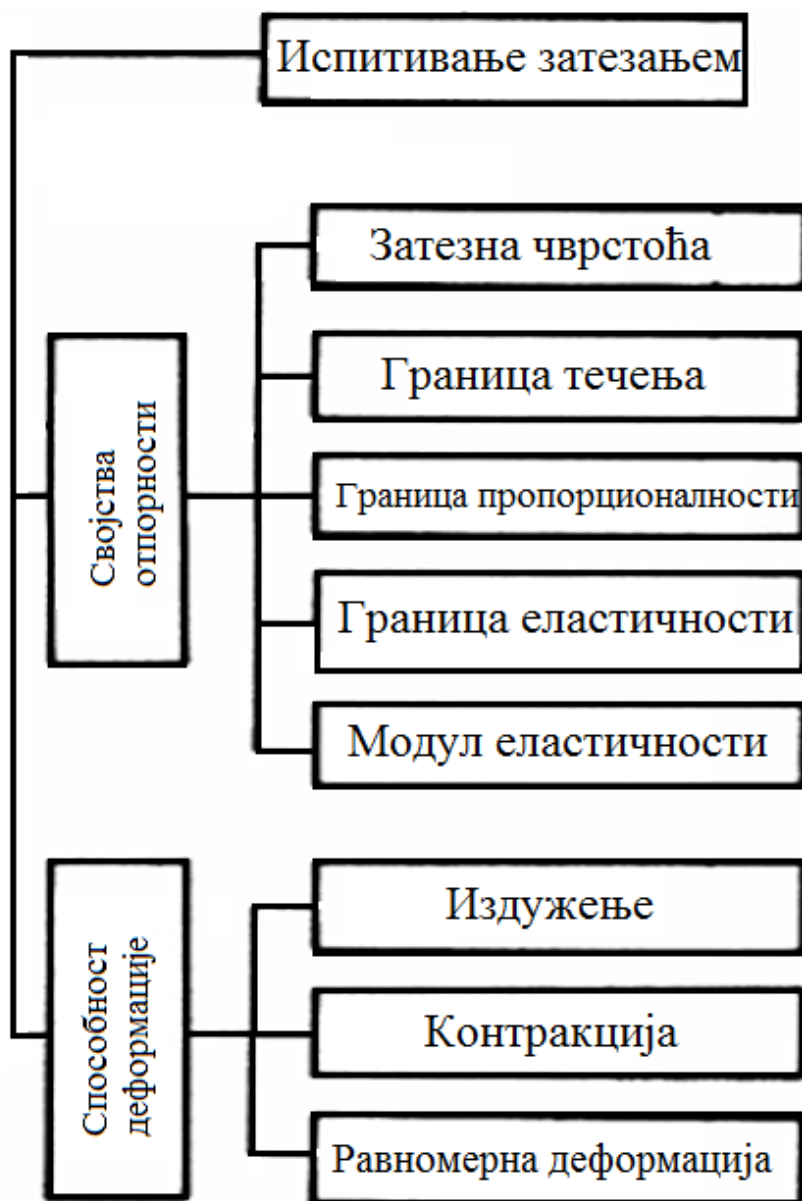
Тренутно издужење ε - сведено на првобитну мерну дужину, представља јединично издужење и може бити еластично и пластично. [5,6]

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (9)$$

Трајно издужење А - дефинише се као процентуално издужење после прекида епрувете.

$$A = \frac{l_u - l_0}{l_0} \cdot 100\% \quad (10)$$

2.6 Испитивање затезањем



Слика 12. Блок шема испитивања затезањем [7]

Изводи се код жилавих материјала: Врши се машинама тзв. кидалицама на одређеним епруветама.

Узорак материјала који се испитује, обради се на одређени облик и димензије прописане стандардима. Тако припремљене узорке зовемо епруветама.

За испитивање на затезање користимо епрувете кружног, квадратног и правоугаоног пресека. За испитивања на затезање, из матријала исецају се узорци за испитивање, од којих се даље обрађују епрувете за испитивање.

Дефиниције за узорак и епрувете су:

- Узорак је комад метала одабран за тестове;
- Епрувета или испитни узорак је тело стандардизованог облика и мера израђена од узорка и припремљена за испитивање.

Епрувете могу бити:

- Непропорционалне - у стању примене (ланци, ужад, цеви)
- Пропорционалне - Одређеног облика и пресека (кружне, квадратне...)

Стандардне епрувете се израђују обилним хлађењем да се структура материјала не промени јер она утиче на чврстоћу.

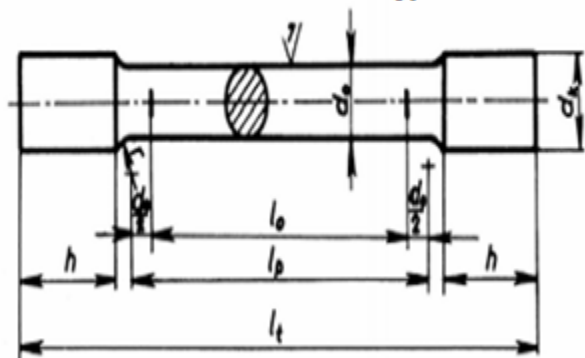
Површина тела мора бити фино обрађена без огреботина и трагова обраде, а прелаз са тела на главу епрувете мора бити изведен са прописаним заобљењем r .

Приликом испитивања посебан уређај црта дијаграм $F - \Delta l$ њега можемо и сами нацртати ако у току испитивања за одређену вредност силе F читамо апсолутно продужење епрувете Δl .

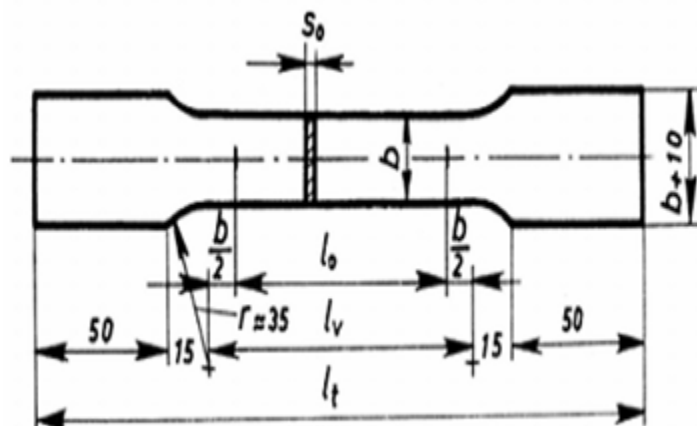
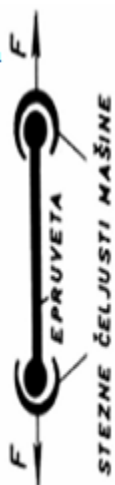
На ординату се нанесе сила F у одређеном мерилу, а на апсцису одговарајућа вредност апсолутног продужења Δl , такође у одређеном мерилу.

Спајањем тако добијених тачкица настаје дијаграм напрезања $F - \Delta l$.

d_0 - Пречник мереног дела $l_0 = l_0 + d_0$ - Дужина средњег цилиндричног дела
 l_0 - Мерена дужина
 $d_k = 1,2 d_0$ - Пречник крајева h - Дужина крајева епрувете

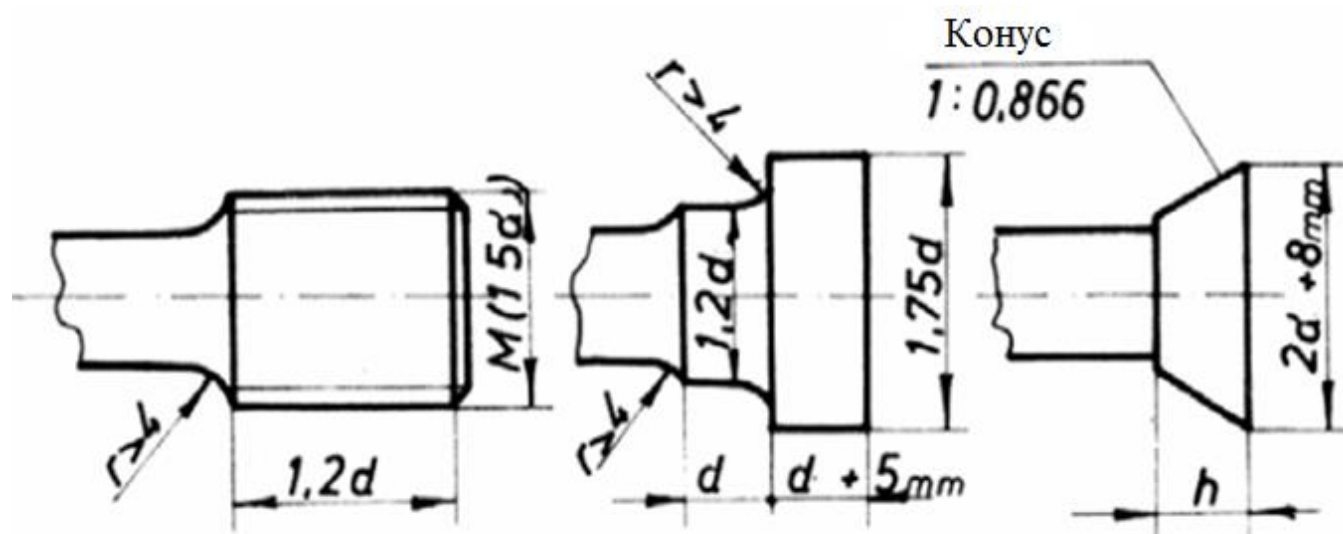


Кружни пресек

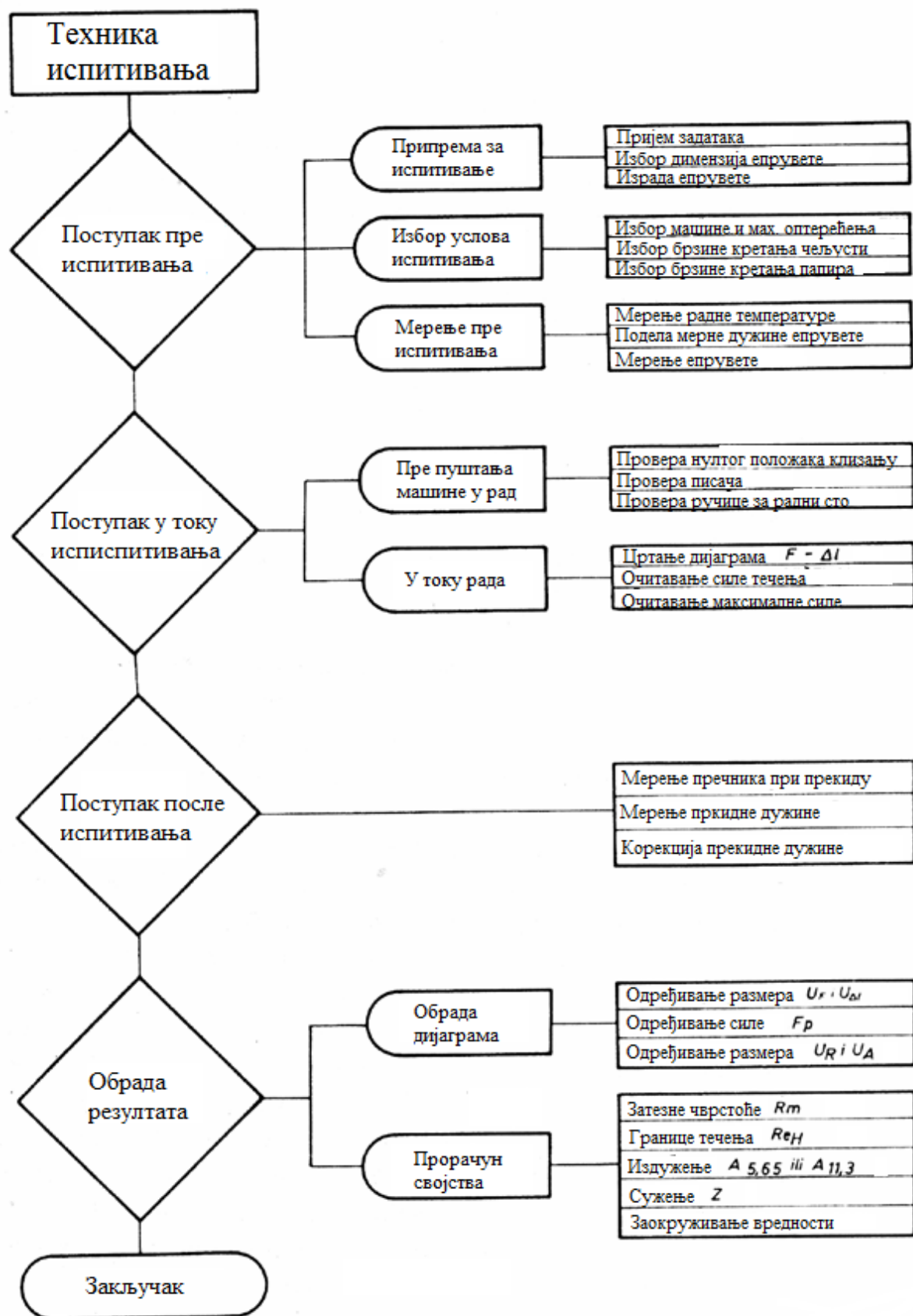


Пресек од лима

Слика 13. Попречни пресек епрувете [7]



Слика 14. Разни облици завршетка епрувете [7]



Слика 15. Блок шема технике испитивања [7]

2.7 Анализа постојећих машина

Код статичких краткотрајних испитивања се испитно тело, тзв. епрувета, излаже у машини за механичка испитивања материјала постепеном порасту једноосног оптерећења све до њеног лома, односно кидања.

При томе машина мора осигурати једнако преношење силе на епрувети у уздужном правцу уз истовремену регистрацију оптерећења на скали манометра, као и цртање дијаграма на рачунару.

Кидалица је мерни инструмент за испитивање чврстоће материјала растезањем. Свака кидалица се састоји из:

- Уређаја за задавање оптерећења,
- Уређаја за мерење силе,
- Уређаја за мерење деформације испитног материјала,
- Уређаја за испис дијаграма напрезања $F - \Delta L$.

На слици 16. дат је изглед универзалне машине за статичка испитивања метала са оптерећењем до 200 kN.



Слика 16. Универзална кидалица за оптерећења до 200 kN [8]

Универзална кидалица осим чврстоће на растезање може испитивати и чврстоћу на сабијање, као и чврстоћу на савијање.

Уређај за задавање оптерећења има уљни вентил преко кога се уље под притиском доводи на дно клипа, који се налази у цилиндру. На тај начин се задаје оптерећење потребно за испитивање чврстоће, које ће подизати покретни мост. Покретни мост и постоље имају чељусти за стезање испитног узорка или епрувете, која ће се услед подизања моста истезати.



Слика 17. Испитивање у три тачке на кидалици [9]

Уређај за мерење деформације је обично у склопу уређаја за испис дијаграма напрезања $F - \Delta L$ (сила–апсолутно издужење). (сл. 17)

Он се састоји из ваљка на којем је намотан папир (обично милиметарски). Ваљак се окреће помоћу узице која је намотана на осовину казаљке.

Да би узица била увек затегнута, на њеном крају налази се тег. Сваки помак казаљке изазваће исти помак ваљка на којем ће писаљка забележити промену вредности силе по ординати дијаграма. [8,9]

Промену деформације ће писаљка бележити по апсциси хоризонталним осциловањем по вођици, изазваним узицом. Узица је везана за покретни мост, те путем котура води до писаљке.

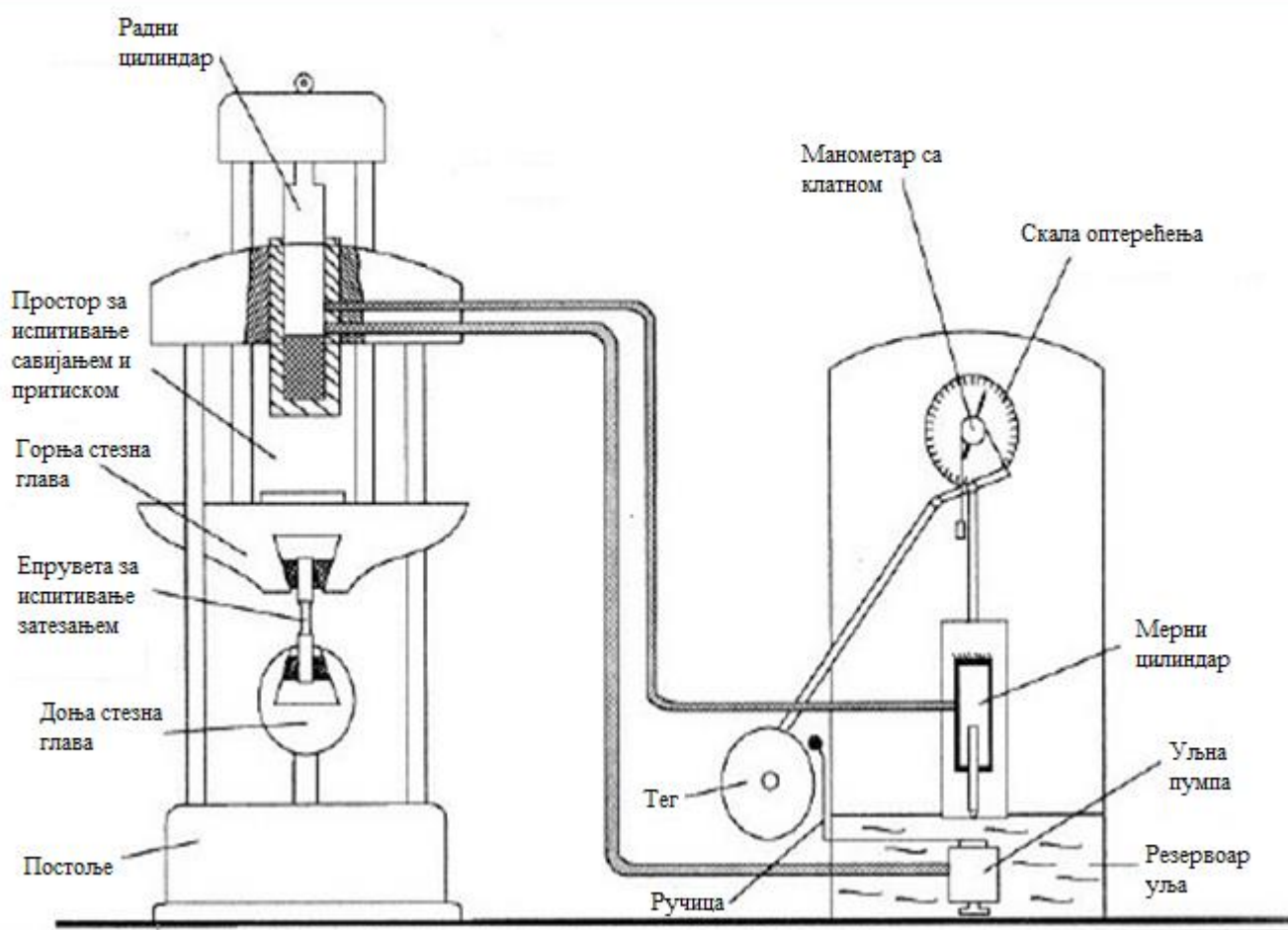


Слика 18. Испитивање на затезање на кидалици [9]

Деформација испитног узорка или епрувете, тј. њено повећавање почетне дужине L_0 , бележи се на уређају за испис дијаграма напрезања $F - \Delta L$. (сл. 18)

Наиме,гибањем моста према горе, он за собом повлачи узицу, а она писаљку, те ће свака деформација епрувете за одређену вредност силе бити забележена на папиру омотаном око ваљка.

Деформација се може мерити и директно. Уз покретни мост је причвршћена скала у милиметрима, а на покретном мосту је причвршћена нониус скала (као помично мерило), која омогућује читавање деформације тачности до 0,01 mm.



Слика 19. Шема универзалне кидалице [2]

Овакве машине (сл. 19) можемо наћи у механичким лабораторијама широм света, а поред испитивања затезањем ове машине можемо користити и за остала статичка испитивања (углавном сва изузев увијања).

Доња стезна глава је при испитивању непокретна, а може се подешавати пре испитивања помоћу одговарајуће ручице. Горња стезна глава везана је помоћу стубова за радни цилиндар у којем се помоћу притиска уља креће клип. [11,12]

При испитивању затезањем помера се према горе горња стезна глава све до лома епрувете уз истовремено читавање оптерећења на скали за манометар и цртање дијаграма у координатама $F-\Delta L$ (на ординати сила F у N , а на апсциси тренутно издужење ΔL у mm) или $\sigma-\epsilon$ (на ординати напрезање у MPa (N/mm^2), а на апсциси јединично издужење ϵ), исти је облик дијаграма.

Простор између радног цилиндра и горње стезне главе користи се за статичка испитивања савијањем и притиском, као и за технолошка испитивања сабијањем.

За испитивање смицањем користе се стезне главе као и код испитивања затезањем. У њих се поставља посебни уређај за смицање (принцип извлачења "ножа из виљушке") са одговарајућом цилиндричном епруветом.

Конструкција стабилног оквира машине мора бити таква да му еластична деформација буде што мања. При испитивању затезањем епрувета и машина чине једну целину, а резултати испитивања зависе како од материјала епрувете и услова испитивања, тако и од карактеристика саме машине. [12,13,14]

При затезном оптерећењу епрувете оптерећење се преноси и на делове машине, који се смеју само еластично деформисати, кад се епрувета прво деформише еластично, а затим пластично све до лома односно пуцања.

Машине које имају велику константу крутости називају се "тврдим кидалица" (обично су на механички погон), нпр. За испитивањем пузањем, а машине с малом константом крутости су "меке кидалица" (машине са хидрауличним погоном).

Машине са механичким погоном могу регистровати брзе промене оптерећења, а са хидрауличним погоном не могу. Механички погон се користи за мања, а хидраулични за већа оптерећења и то:

- до 10 kN, скоро искључиво механички погон;
- 10 до 100 kN могу се користити оба погона;
- већа од 100 kN (обично до 1000 kN), искључиво хидраулични погон.

Машине имају више различитих мерних подручја која омогућавају прецизна испитивања (у границама тачности $\pm 1\%$) епрувета или конструкциони делова разних облика и димензија.

Брзина померања клипа (обично у границама од 0-50 mm/min) код хидрауличних машина остварује се помоћу отварања вентила, а могуће је и аутоматско одржавање константног оптерећења.

Код савремених машина постоје уграђени аутоматски регулатори помоћу којих се може унапред програмирати брзина оптерећења.

Универзална кидалица има и допунску опрему за одређивање малих издужења (нпр. Електронски мерач малих издужења), за испитивање при повишеним (обично до 1000 °C) температурама, за танке жице, ланце и сл. [12,13,14]

У табели 2. дата су типична мерна подручја кидалица које се користе у лабораторијама широм света.

Табела 2. Мерна подручја кидалица [15]

Највеће оптерећење, kN	Остала мерна подручја наведених кидалица, kN				
1000	500	200	100		
500	250	50			
400	200	80	40		
200	100	40	20	10	4
100	50	20	10		

Испитивања материјала морају се вршити увек под истим спољним условима да би се добили једнаки резултати за упоређивање.

Због тога су направљени договори са међународним техничким комитетима за спољне услове испитивања, који су унесени у норме и стандарде као конвенција.

Такве конвенције су направљене нпр. за димензије епрувета, за техничку границу еластичности, за конвенционални напон течења итд.

Њих се морају придржавати све лабораторије. Тиме је избегнуто велико расипање резултата, које је постојало пре конвенција [15].

Савремене кидалице могу податке о вредностима силе и деформације дати и дигитално. Податке о сили и деформацији обрађује рачунар који на монитору исписује слику дијаграма напрезања.

Слику испитаног дијаграма може се путем писача исписати на папир.

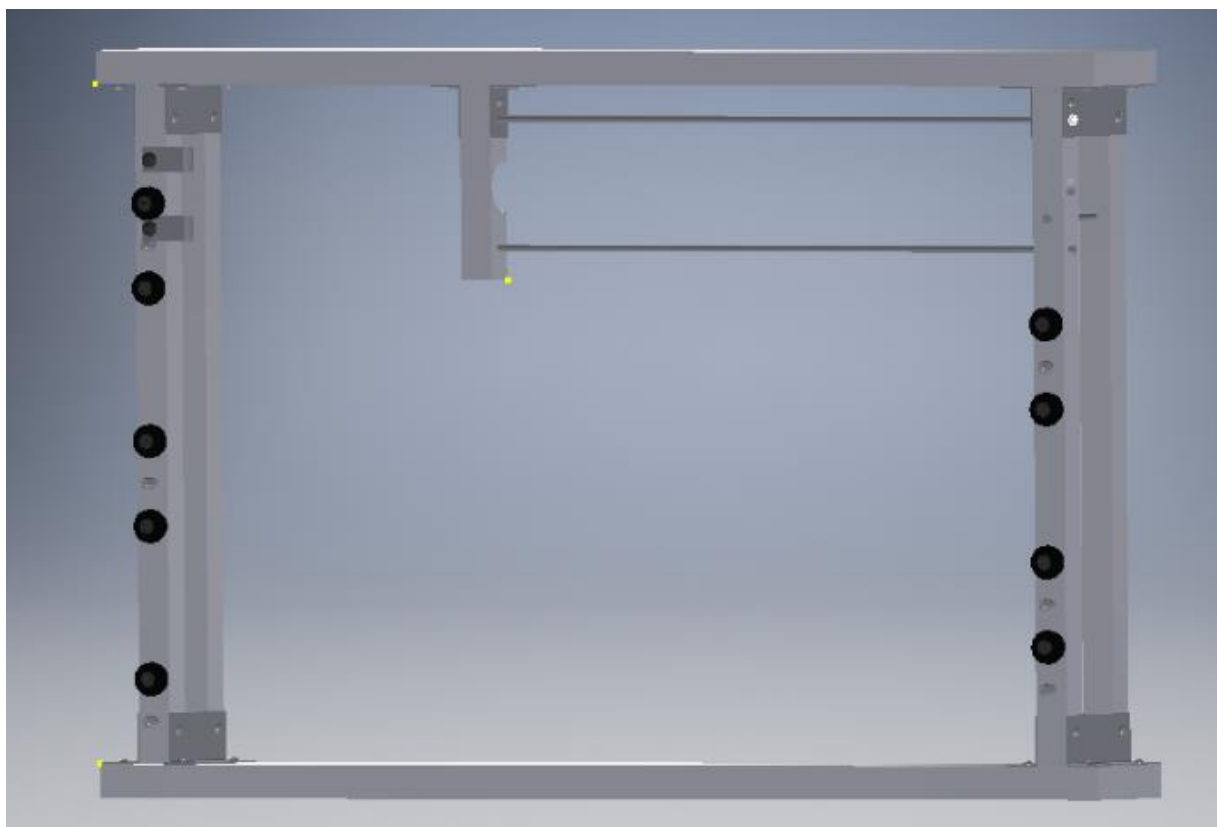
3. РАЗВОЈ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ УРЕЂАЈА ЗА ИСПИТИВАЊЕ ЗАТЕЗАЊЕМ МЕТАЛНИХ СТРУНА

3.1 Основни концепт уређаја

Уређај за затезање струне, односно кидалица пројектована је у софтверу „Autodesk Inventor”, као идеја која има простора за даљи развој.

Прва верзија кидалице се састоји од :

- Постоља (сл.20)



Слика 20. Постоље

Постоље је направљено од метала. На постољу су постављени лежајеви преко којих се поставља струна коју испитујемо. Постоље је једноставне конструкције и стабилно за испитивање струне на затезање.

- Динамометра (сл 21.)

Слика 21. Динамометар

Динамометар је мерни инструмент за мерење момента силе. Принцип рада заснован је на промени дужине еластичне опруге при деловању силе.

Динамометар се може употребити за мерење интензитета електричне, магнетне или неке друге силе. При томе он не мора заузимати увек вертикалан положај. Издужење опруге продужене толико пута колико пута се повећа интензитет силе је управо сразмерно интензитету деформационе силе.

Рад динамометара може бити заснован на различитим принципима.

Динамометри према принципу рада могу бити:

- механички;
- електрични;
- хидраулични;
- пнеуматски.

Према функцији могу бити:

- потезни и потисни;
- за испитивање компресије.

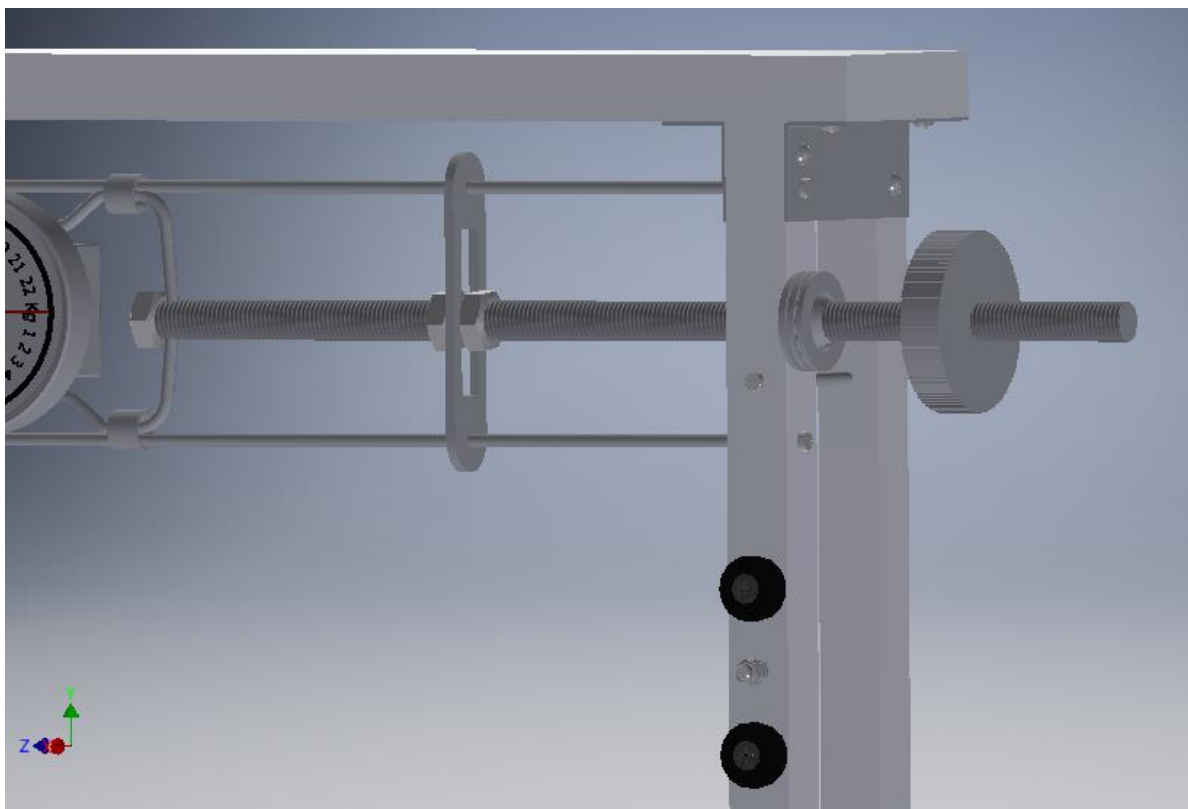
За мерење силе могу се користити различите врсте претварача, а најчешће:

- тензометраске мерне траке;
- индуктивни претварачи;
- капацитивни претварачи;
- пиезоелектрични претварачи.

Основни захтеви које свака конструкција динамометра мора да задовољи су:

- висока осетљивост у целом опсегу мерења, односно брзо реаговање на промену силе;
- мала инерција;
- практичност и економичност у раду.

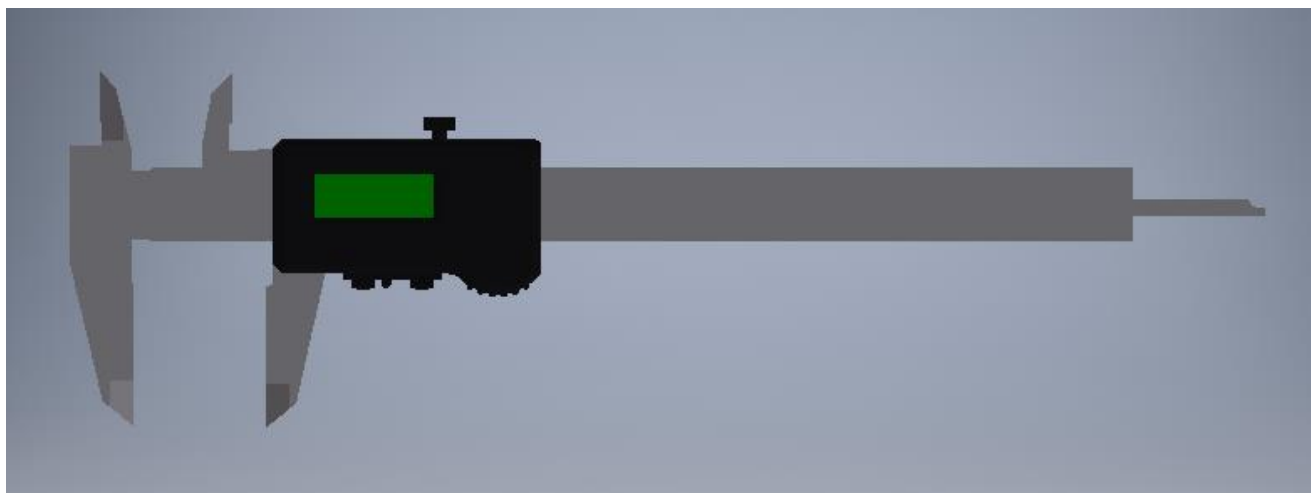
Електрични динамометри се чешће користе јер имају мању инерцију, већу тачност и осетљивост у односу на механичке и хидрауличке.

- Механизма за затезање струне (сл. 22)

Слика 22. Механизам за затезање струне

Механизам за затезање струне функционише на принципу завртња. Завртањем точкића који се налази на навојној осовини, привлачимо динамометар, а самим тим затежемо струну.

На динамометру се читава сила којом се делује, а у исто време се читава на дигиталном помичном мерилу издужење струне.

- Кљунастог помичног мерила (сл.23)

Слика 23. Кљунасто помично мерило

Кљунасто помично мерило је прецизни ручни мерни инструмент намењен за мерење спољних и унутрашњих величина.

Поред овог званичног назива овај инструмент је познат и као нонијус, помично мерило или лењир са нонијусом. Можда најпознатији назив и најчешће коришћен код нас је шублер.

Назив потиче од немачке речи „Schublehre” што би отприлике значило справа за тачно мерење.

Помично мерило се састоји од неколико основних делова:

1. Мерни лењир са непокретном скалом (назива се још и главном скалом);
2. Покретна или клизна скала (назива се још и помоћна скала);
3. Вијак за фиксирање покретне скале.

У зависности од произвођача и конструктивних карактеристика, помична мерила могу имати већи број причврсних вијака и осталих елемената. Ипак, сматра се да су најбоља помична мерила она са најмање делова.

Постоји више величина помичних мерила. Стандардна могу мерити величине до 150mm.

Постоје и мања која су згодна за ношење у џепу за мерење мањих величина али и много већа која се користи у шумарству за мерење пречника стабала. Углавном се израђује од метала. Нека специјална за потребе електротехничке струке израђују се од пластике.

Сва помична мерила немају исту прецизност мерења. Њихова прецизност зависи од њихових конструктивних карактеристика. Наравно, већу прецизност прати и већа цена мерног инструмента. Помична мерила се израђују са тачношћу 0.1 ; 0.05; 0.02 и 0.01mm.

Помичним мерилима се могу мерити величине тачности стотог дела милиметра. На самом мерном инструменту је уписана вредност која означава тачност тог мерног инструмента.

Помично мерило са сатом на покретном делу спада у најпрецизније мерило са веома великом тачношћу. Практично то је модификовано класично помично мерило на чијем се фиксном делу налази зупчаста летва која је узупчена са зупчаником директно спојеним са казаљком на сату. На овај начин је решен проблем са поузданости читавања јер се вредности једноставно прочитају са сата.

Дигитално помично мерило је надградња помичног мерила са сатом. Уместо механичког сата на покретном делу је постављен дисплеј са сензором, док је дуж непокретног дела постављена магнетна трака. Померањем сензора преко магнетне траке читава се померање а његова вредност приказује на дисплеју.

Ово помично мерило је најпрактичније за употребу али се мора водити рачуна о запраљаности. Наиме, стварањем слоја масти на магнетној траци може узроковати погрешна мерења.

3.2 Пројектно решење уређаја

3.2.1 Теоријска разматрања

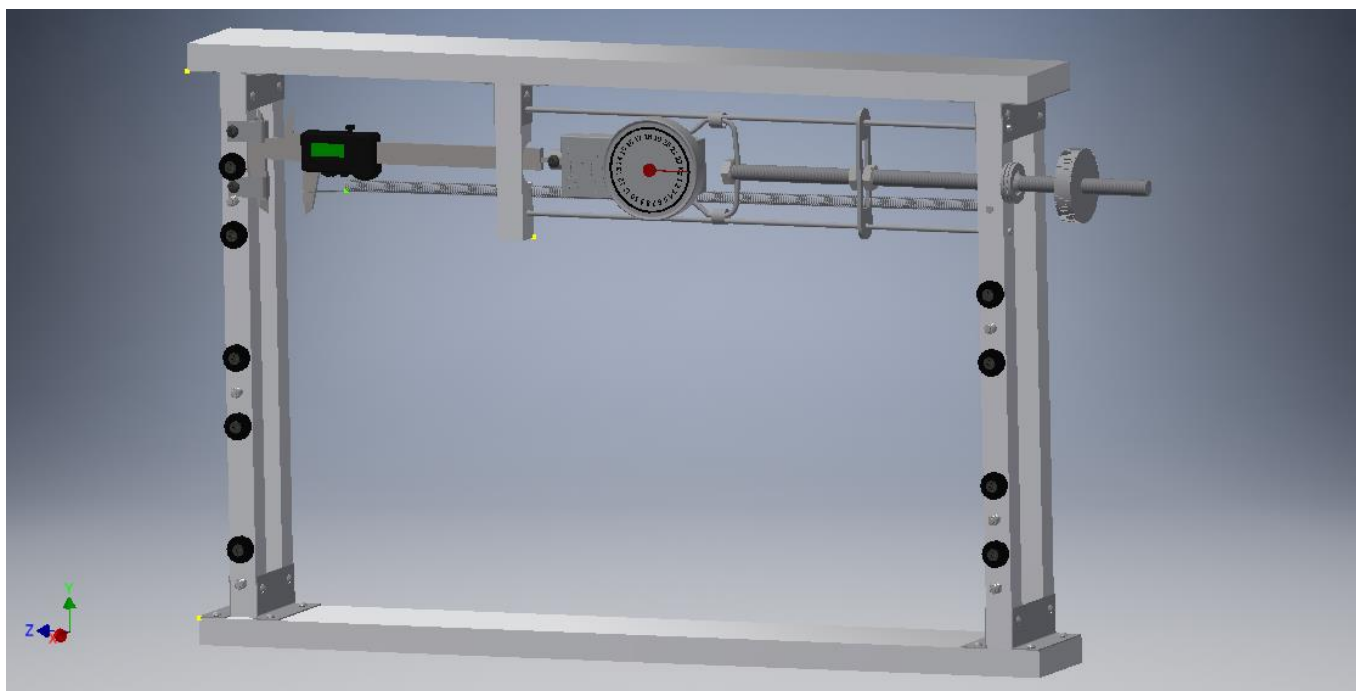
Уређај служи за испитивање материјала на затезање. Омогућава формирање хуковог дијаграма на којем се могу уочити све карактеристичне фазе.

Максимална сила је лимитирана на вредност од 400 N па се уређај користи за испитивање струна (жица) израђених од различитих материјала пречника 0,5-1 mm.

Услов је да сила кидања струне нема вредност већу од 400 N па при избору пречник струне треба водити рачуна да производ напона кидања материјала струне и попречног пресека струне не пређе вредност од 400 N. Генерално се могу испитивати сви материјали преко испитивања струна пречника 0,5-2 mm.

Мерење силе F и издужење струне ΔL врши се преко дигиталног динамометра и дигиталног помичног мерила. Сила затезања остварује се по принципу завртња.

Уређај (сл.24) је веома једноставан за коришћење и пружа високу тачност мерења. За разлику од класичних кидалица, за испитивање на овој кидалици је потребна веома мала сила дејства како би се вршило мерење.



Слика 24. Пројектно решење кидалице (прва верзија)

3.2.2 Конструкција и развој уређаја

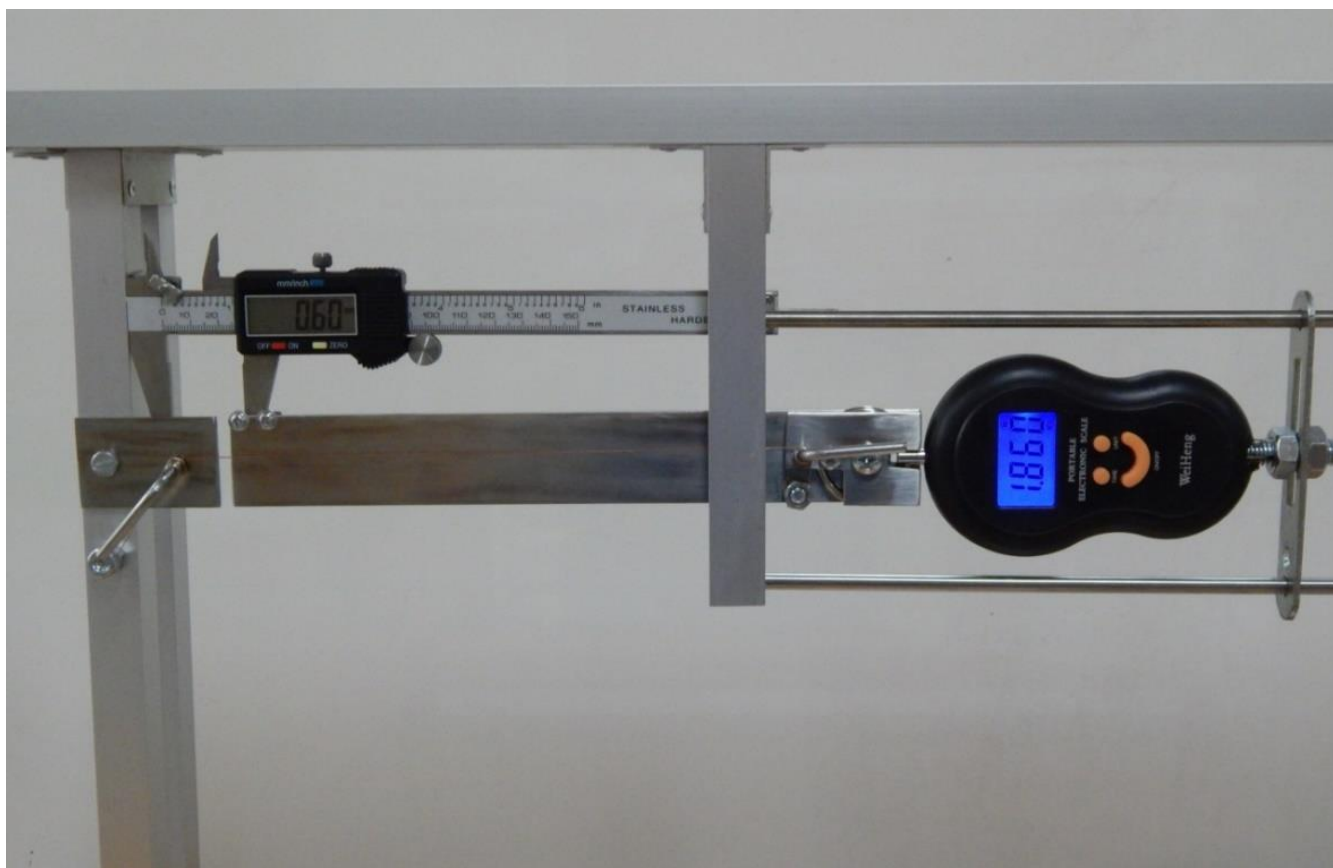
Друга верзија

Због појаве високе концентрације напона на местима везивања струне, промењен је начин везивања струне, тако да је смањена концентрација напона на критичним местима, чиме је добијена већа тачност мерења.

Нови дизајн кидалице је приказан на сл.25 при чему је промењен динамометар. Нова кидалица има дигитални динамометар. (сл. 26)



Слика 25. Пројектно решење нове кидалице



Слика 26. Мерни уређаји, дигитално помично кљунасто мерило и дигитални динамометар

Трећа верзија

Даљим усавршавањем мерила, повећана је тачност мерења.

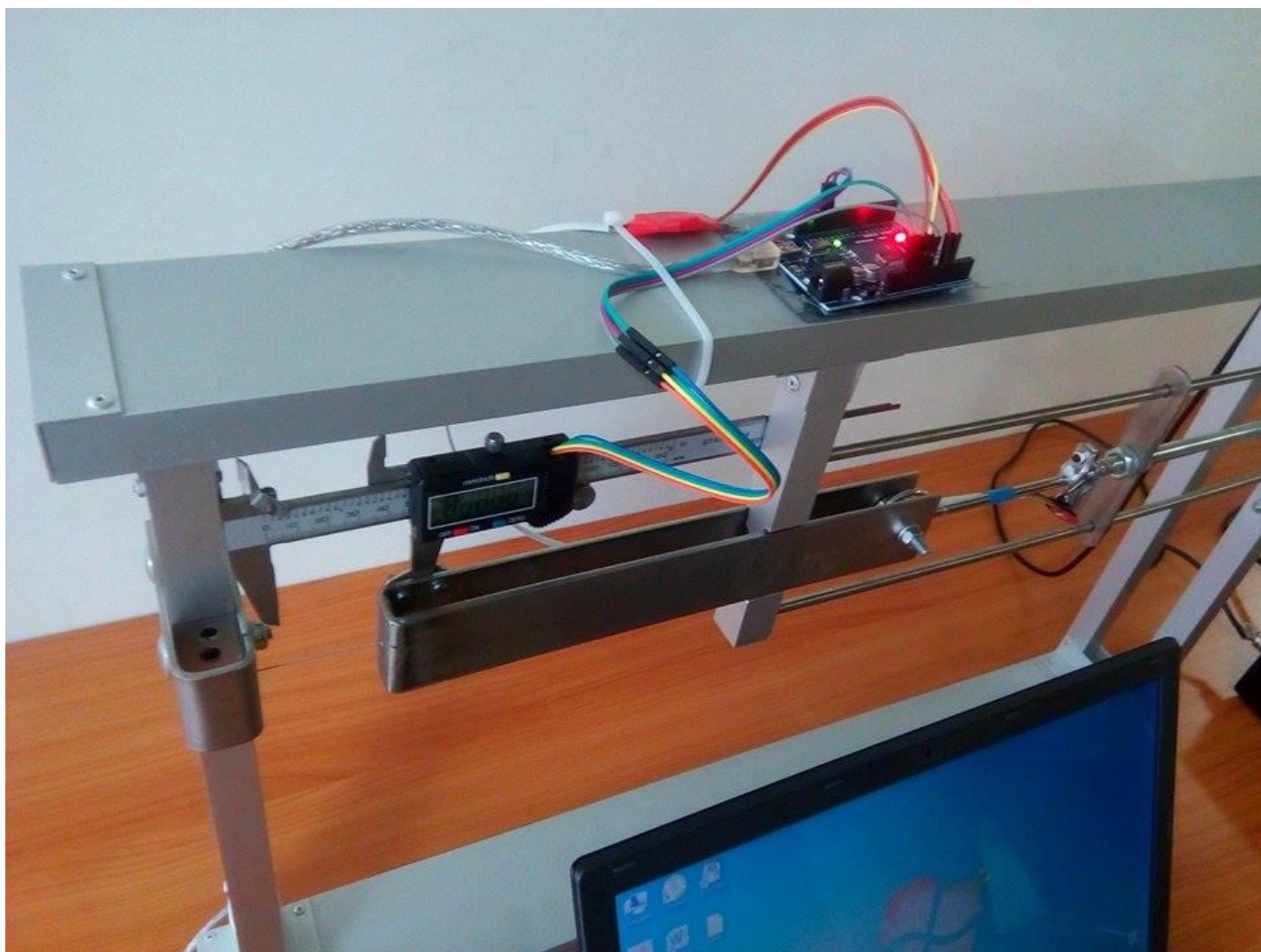
Смањена је грешка тако што се за затезање струне сада користи степ мотор, који затеже струну континуално за разлику од претходног механизма где се струна затезана ручно.

Степ мотор (сл.27) је повезан са регулатором броја обртаја мотора, којим регулишемо брзину истезања струне.



Слика 27. Степ мотор

Кљунасто помично мерило (сл. 28) је повезано микроконтролером, који читава вредност са мерила 3 пута у секунди.



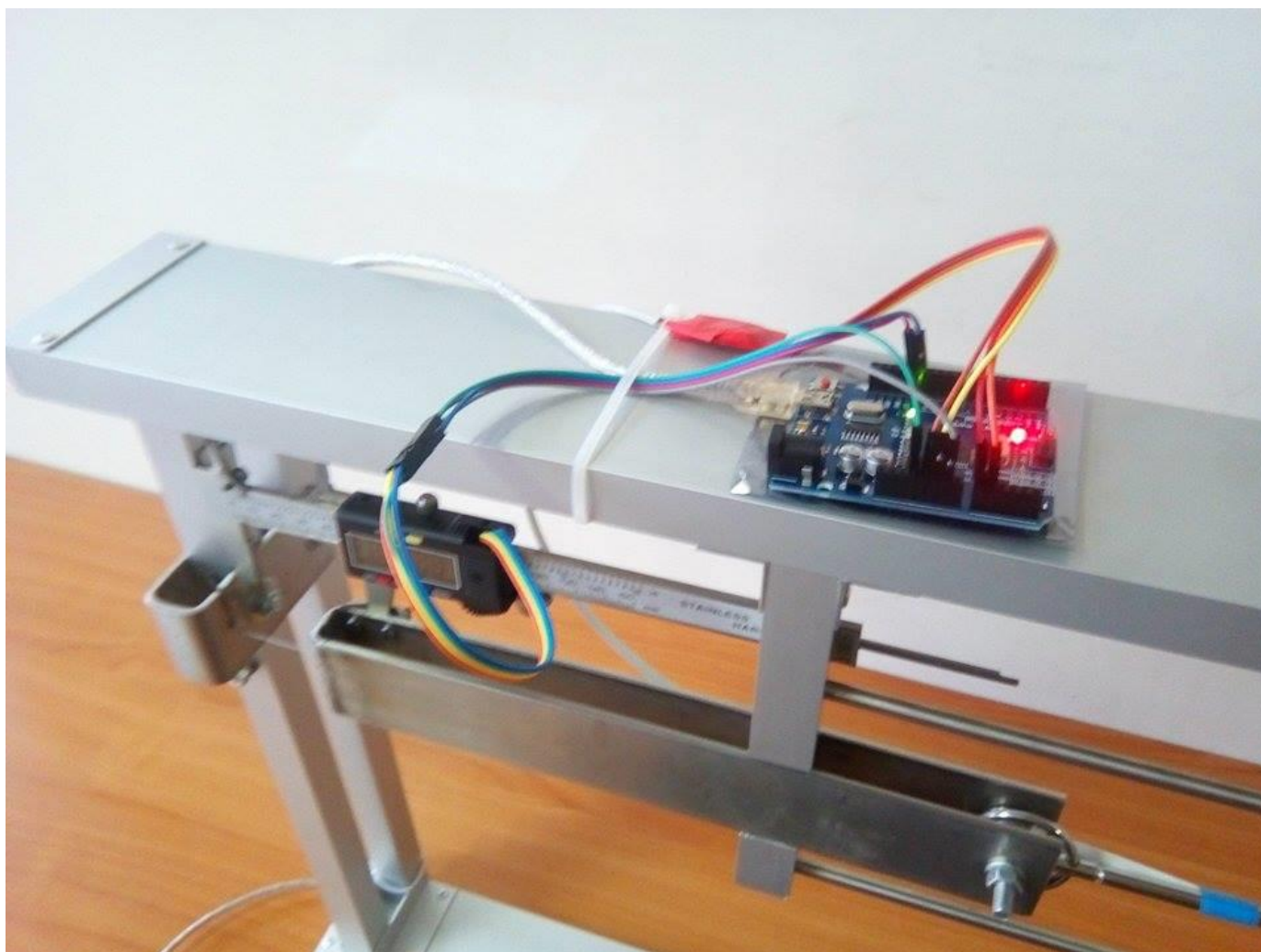
Слика 28. Кљунасто помично мерило

Уместо динамометра постављене су мерне траке (сл. 29) које дају већу тачност мерења. Мерне траке су такође повезане са микроконтролером.



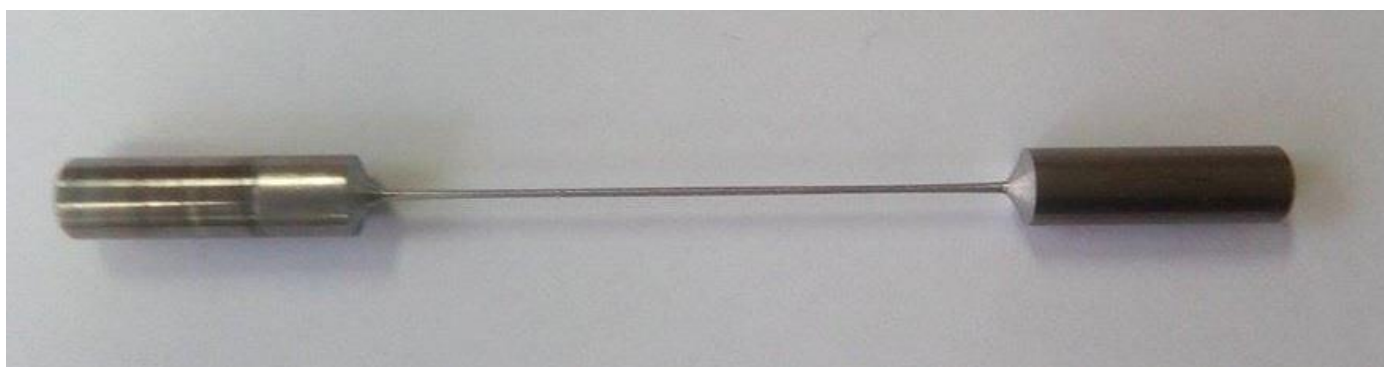
Слика 29. Мерне траке

Микроконтролер (сл. 30) се повезује са рачунаром, који шаље информације о промени дужине струне Δl коју добија са помичног кљунастог мерила и силе F коју добија са мерних трака.

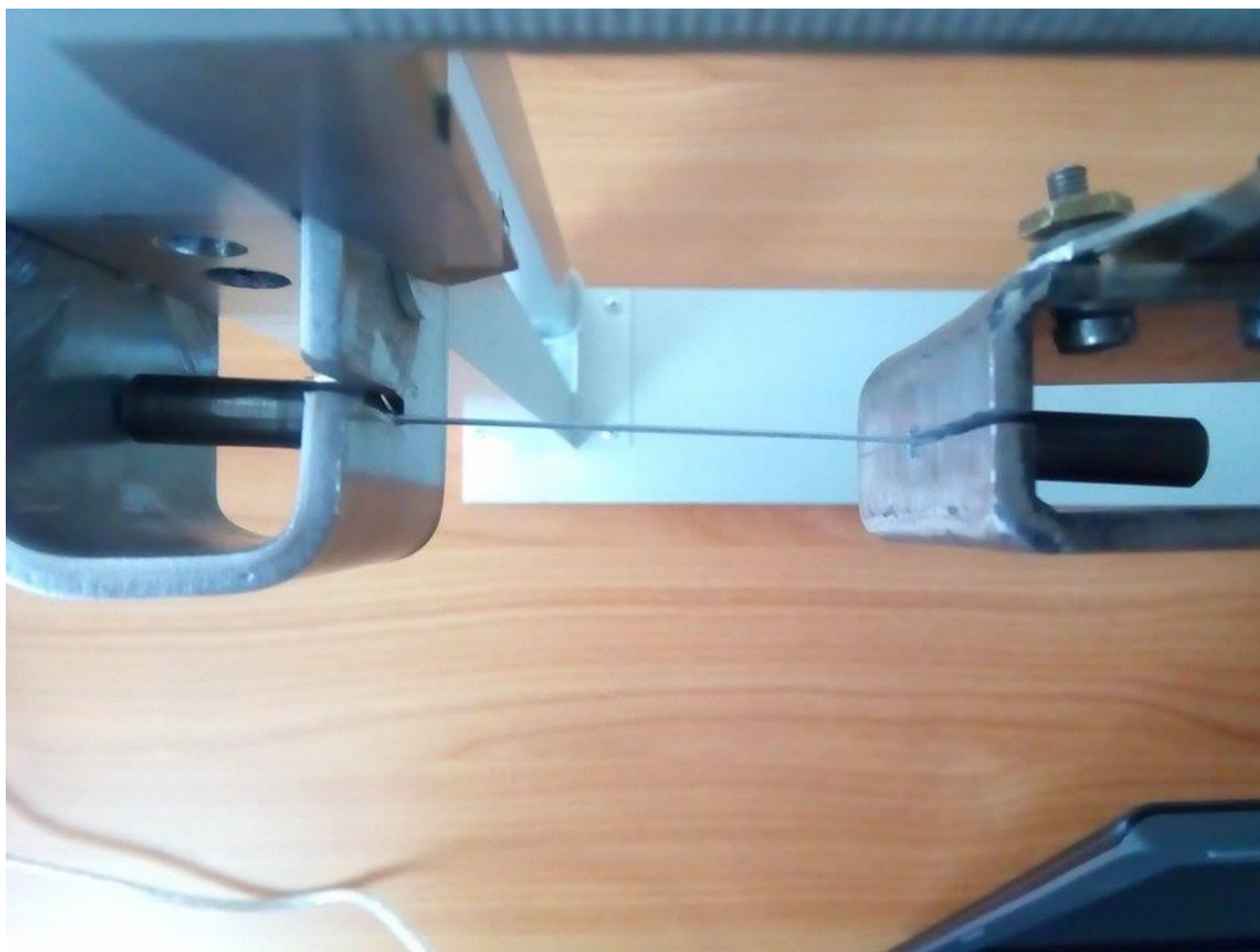


Слика 30. Електронска управљачка јединица

Промењен је начин постављања (сл. 32) и изглед струне, сада је струна у облику епрувете (сл.31) која је лакша за постављање и даје тачније резултате.



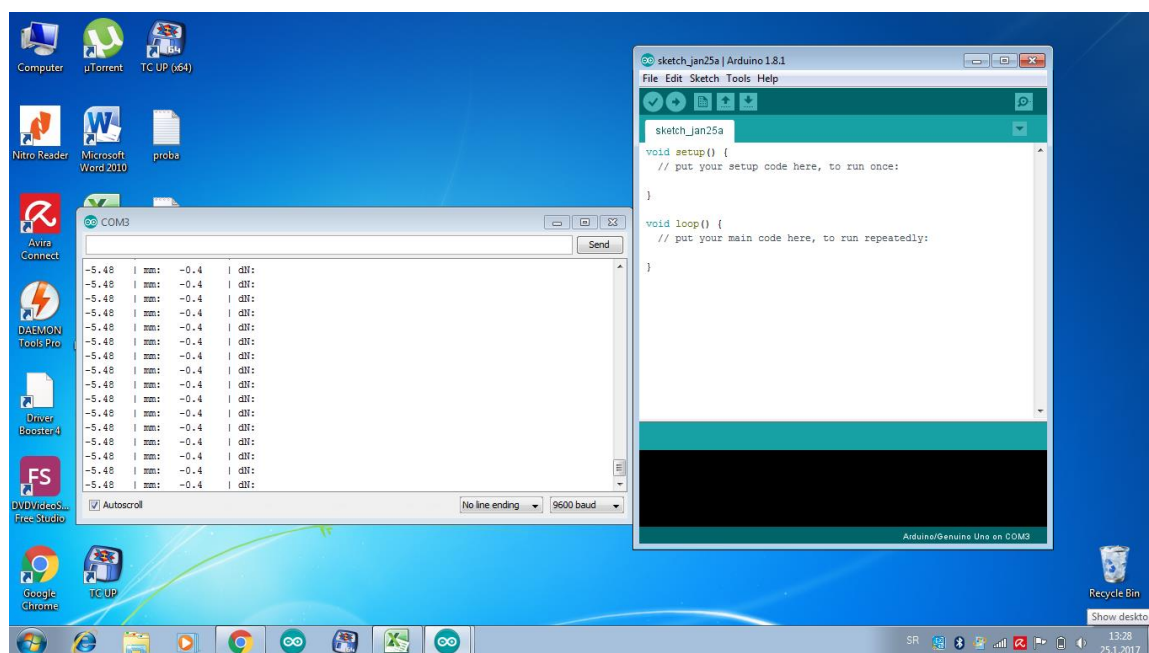
Слика 31. Епрувета



Слика 32. Начин постављања епрувете

Програм на рачунару преко којег се обрађују подци „Arduino” (сл. 33), приказује потребне податке о промени дужине Δl и сили F . Те информације рачунар добија преко микроконтролера који је повезан преко USB порта.

Ови подаци се могу сачувати на рачунару и користити за цртање дијаграма.



Слика 33. Изглед прозора на рачунару у програму Arduino

На сл.34 је приказана кидалица са пратећом опремом која је потребна за испитивање струне на затезање.



Слика 34. Кидалица са опремом

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА

4.1 План и програм експерименталног истраживања

У раду су испитиване струне од различитих материјала.

- Алуминијумска струна, пречника 1,5mm;
- Бакарна струна, пречника 0,8mm;
- Челична струна Š4230, пречника 0,5mm.

План експерименталног истраживања је следећи :

- поставља се струна на кидалици, и нулирају мерила;
- преко механизма се затеже струна на кидалици;
- на помичном мерилу се може прочитати издужење струне ΔL а на динамометру тренутну силу F којом се врши затезање;
- пошто је струна дупло омотана, стварна сила којом се делује на струну у пола је мања од оне коју читавамо на динамометру $F/2$;
- приликом затезања струне, записују се подаци, све до тренутка кидања струне;
- на основу добијених резултата црта се дијаграм затезања.

4.2 Резултати истраживања (Табеле и дијаграми)

Записивањем тренутног издужења ΔL и силе $F/2$, исцртава се дијаграм затезања. Након тога се израчунава напон σ и деформација ε (једначина 4 и 5) који се приказују преко дијаграма.

Резултати су приказани табеларно и преко дијаграма.

Алуминијумска струна се испитује у три различита индивидуална мерења.

У табели 3,4,5 приказани су резултати добијени испитивањем бакарне струне :

Табела 3. Прво испитивање алуминијумске струне на затезање

ΔL [mm]	$F/2$ [daN]	ε	σ [daN/mm ²]	d [mm]	L [mm]	A [mm ²]
0	0	0	0	1,5	300	1,766
0,02	0,5	0,0000667	0,283126	1,5	300	1,766
0,06	1	0,0002	0,566251	1,5	300	1,766
0,1	1,5	0,000333333	0,849377	1,5	300	1,766
0,15	2	0,0005	1,132503	1,5	300	1,766
0,19	2,5	0,000633333	1,415629	1,5	300	1,766
0,24	3	0,0008	1,698754	1,5	300	1,766
0,29	3,5	0,000966667	1,98188	1,5	300	1,766
0,34	4	0,001133333	2,265006	1,5	300	1,766
0,46	4,5	0,001533333	2,548131	1,5	300	1,766
0,69	5	0,0023	2,831257	1,5	300	1,766
1,02	5,5	0,0034	3,114383	1,5	300	1,766
1,4	6	0,004666667	3,397508	1,5	300	1,766
1,76	6,5	0,005866667	3,680634	1,5	300	1,766
2,15	7	0,007166667	3,96376	1,5	300	1,766
2,72	7,5	0,009066667	4,246886	1,5	300	1,766
3,79	8	0,012633333	4,530011	1,5	300	1,766
5,01	8,5	0,0167	4,813137	1,5	300	1,766
6,46	9	0,021533333	5,096263	1,5	300	1,766
8,31	9,5	0,0277	5,379388	1,5	300	1,766
10,19	10	0,033966667	5,662514	1,5	300	1,766
12,77	10,5	0,042566667	5,94564	1,5	300	1,766
16,27	11	0,054233333	6,228766	1,5	300	1,766
22,42	11,5	0,074733333	6,511891	1,5	300	1,766
27,27	12	0,0909	6,795017	1,5	300	1,766

Табела 4. Друго испитивање алуминијумске струне на затезање

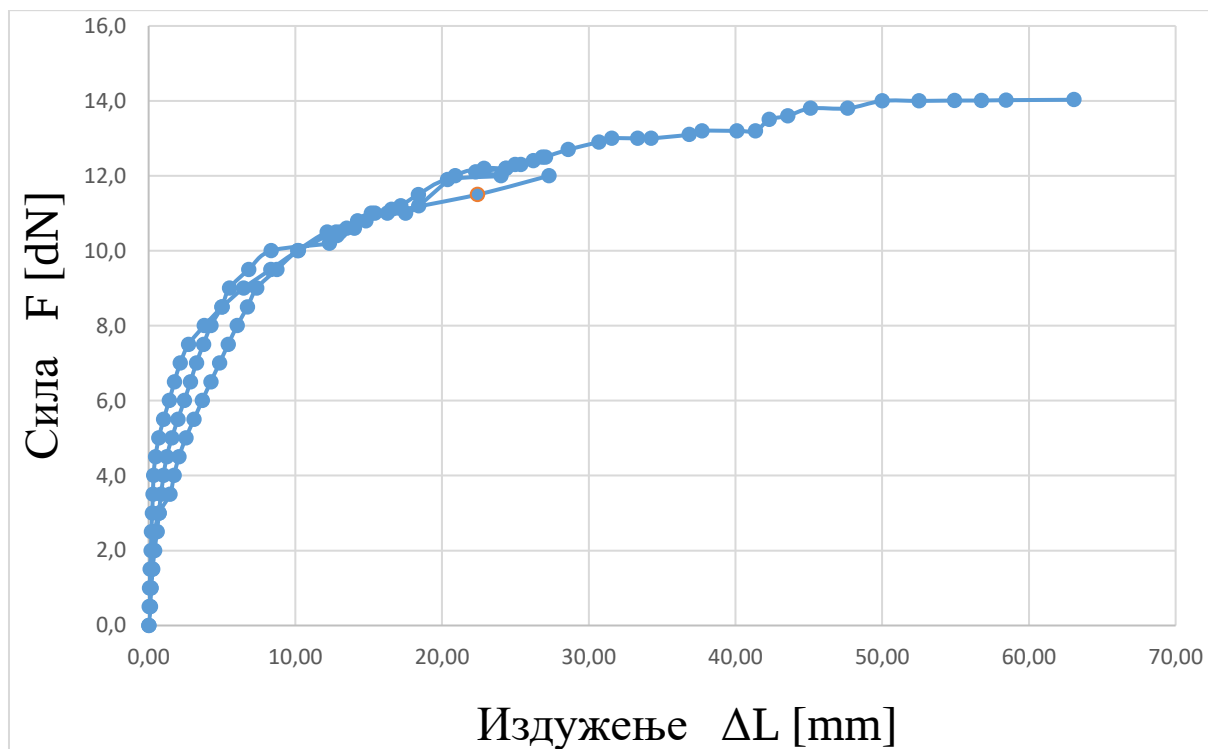
ΔL [mm]	F/2 [daN]	ε	σ [daN/mm ²]	d [mm]	L [mm]	A [mm ²]
0	0	0	0	1,5	300	1,766
0,08	0,5	0,000267	0,283126	1,5	300	1,766
0,13	1	0,000433	0,566251	1,5	300	1,766
0,27	1,5	0,0009	0,849377	1,5	300	1,766
0,4	2	0,001333	1,132503	1,5	300	1,766
0,57	2,5	0,0019	1,415629	1,5	300	1,766
0,7	3	0,002333	1,698754	1,5	300	1,766
0,84	3,5	0,0028	1,98188	1,5	300	1,766
1,02	4	0,0034	2,265006	1,5	300	1,766
1,23	4,5	0,0041	2,548131	1,5	300	1,766
1,58	5	0,005267	2,831257	1,5	300	1,766
1,99	5,5	0,006633	3,114383	1,5	300	1,766
2,43	6	0,0081	3,397508	1,5	300	1,766
2,85	6,5	0,0095	3,680634	1,5	300	1,766
3,25	7	0,010833	3,96376	1,5	300	1,766
3,73	7,5	0,012433	4,246886	1,5	300	1,766
4,24	8	0,014133	4,530011	1,5	300	1,766
4,98	8,5	0,0166	4,813137	1,5	300	1,766
5,51	9	0,018367	5,096263	1,5	300	1,766
6,82	9,5	0,022733	5,379388	1,5	300	1,766
8,35	10	0,027833	5,662514	1,5	300	1,766
12,32	10,2	0,041067	5,775764	1,5	300	1,766
12,84	10,4	0,0428	5,889015	1,5	300	1,766
13,06	10,5	0,043533	5,94564	1,5	300	1,766
14,02	10,6	0,046733	6,002265	1,5	300	1,766
14,79	10,8	0,0493	6,115515	1,5	300	1,766
15,4	11	0,051333	6,228766	1,5	300	1,766
17,51	11	0,058367	6,228766	1,5	300	1,766
18,4	11,2	0,061333	6,342016	1,5	300	1,766
20,89	12	0,069633	6,795017	1,5	300	1,766
22,84	12,2	0,076133	6,908267	1,5	300	1,766
24,34	12,2	0,081133	6,908267	1,5	300	1,766
25,36	12,3	0,084533	6,964892	1,5	300	1,766
26,83	12,5	0,089433	7,078143	1,5	300	1,766

Табела 5. Треће испитивање алуминијумске струне на затезање

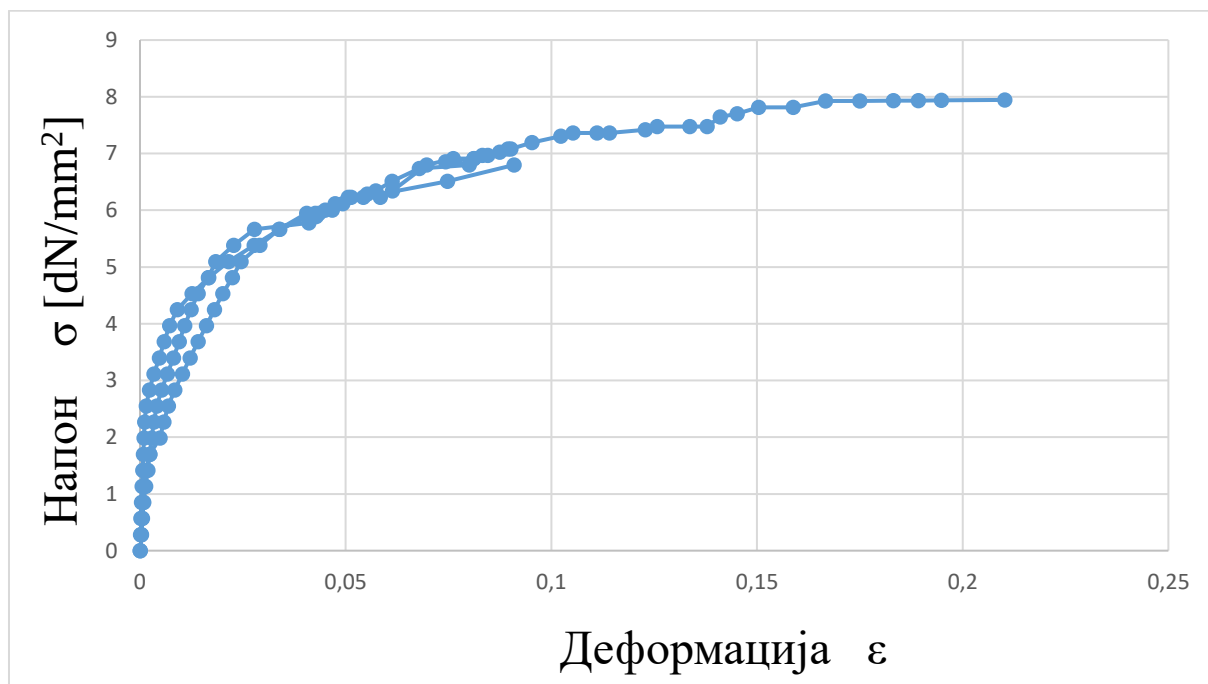
ΔL [mm]	F/2 [daN]	ε	σ [daN/mm ²]	d [mm]	L [mm]	A [mm ²]
0	0	0	0	1,5	300	1,766
0,11	0,5	0,000367	0,283126	1,5	300	1,766
0,16	1	0,000533	0,566251	1,5	300	1,766
0,24	1,5	0,0008	0,849377	1,5	300	1,766
0,32	2	0,001067	1,132503	1,5	300	1,766
0,42	2,5	0,0014	1,415629	1,5	300	1,766
0,71	3	0,002367	1,698754	1,5	300	1,766
1,45	3,5	0,004833	1,98188	1,5	300	1,766
1,73	4	0,005767	2,265006	1,5	300	1,766
2,06	4,5	0,006867	2,548131	1,5	300	1,766
2,53	5	0,008433	2,831257	1,5	300	1,766
3,09	5,5	0,0103	3,114383	1,5	300	1,766
3,65	6	0,012167	3,397508	1,5	300	1,766
4,23	6,5	0,0141	3,680634	1,5	300	1,766
4,83	7	0,0161	3,96376	1,5	300	1,766
5,42	7,5	0,018067	4,246886	1,5	300	1,766
6,03	8	0,0201	4,530011	1,5	300	1,766
6,73	8,5	0,022433	4,813137	1,5	300	1,766
7,37	9	0,024567	5,096263	1,5	300	1,766
8,73	9,5	0,0291	5,379388	1,5	300	1,766
10,15	10	0,033833	5,662514	1,5	300	1,766
12,15	10,5	0,0405	5,94564	1,5	300	1,766
13,49	10,6	0,044967	6,002265	1,5	300	1,766
14,23	10,8	0,047433	6,115515	1,5	300	1,766
15,18	11	0,0506	6,228766	1,5	300	1,766
16,55	11,1	0,055167	6,285391	1,5	300	1,766
17,18	11,2	0,057267	6,342016	1,5	300	1,766
18,37	11,5	0,061233	6,511891	1,5	300	1,766
20,36	11,9	0,067867	6,738392	1,5	300	1,766
24,01	12	0,080033	6,795017	1,5	300	1,766
22,29	12,1	0,0743	6,851642	1,5	300	1,766
24,35	12,2	0,081167	6,908267	1,5	300	1,766
24,97	12,3	0,083233	6,964892	1,5	300	1,766
26,22	12,4	0,0874	7,021518	1,5	300	1,766
27,03	12,5	0,0901	7,078143	1,5	300	1,766
28,58	12,7	0,095267	7,191393	1,5	300	1,766
30,68	12,9	0,102267	7,304643	1,5	300	1,766
31,56	13	0,1052	7,361268	1,5	300	1,766

33,32	13	0,111067	7,361268	1,5	300	1,766
34,23	13	0,1141	7,361268	1,5	300	1,766
36,84	13,1	0,1228	7,417894	1,5	300	1,766
37,7	13,2	0,125667	7,474519	1,5	300	1,766
40,09	13,2	0,133633	7,474519	1,5	300	1,766
41,36	13,2	0,137867	7,474519	1,5	300	1,766
42,3	13,5	0,141	7,644394	1,5	300	1,766
43,55	13,6	0,145167	7,701019	1,5	300	1,766
45,11	13,8	0,150367	7,81427	1,5	300	1,766
47,63	13,8	0,158767	7,81427	1,5	300	1,766
49,99	14	0,166633	7,92752	1,5	300	1,766
52,49	14	0,174967	7,92752	1,5	300	1,766
54,93	14,01	0,1831	7,933182	1,5	300	1,766
56,75	14,01	0,189167	7,933182	1,5	300	1,766
58,44	14,02	0,1948	7,938845	1,5	300	1,766
63,07	14,03	0,210233	7,944507	1,5	300	1,766

На следећим сликама дат је дијаграмски приказ резултата мерења :



Дијаграм 1. Дијаграм промене силе F у доносу на издужење ΔL



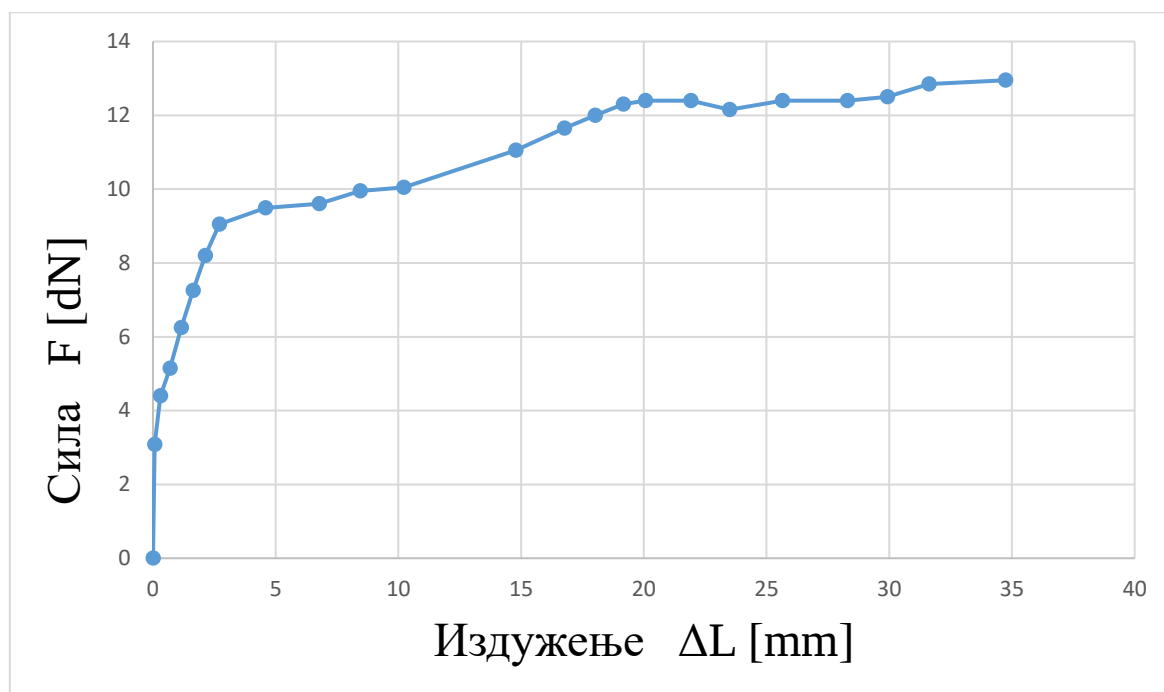
Дијаграм 2. Дијаграм промене напона σ у доносу на деформацију ϵ

У табели 6 приказани су резултати добијени испитивањем бакарне струне :

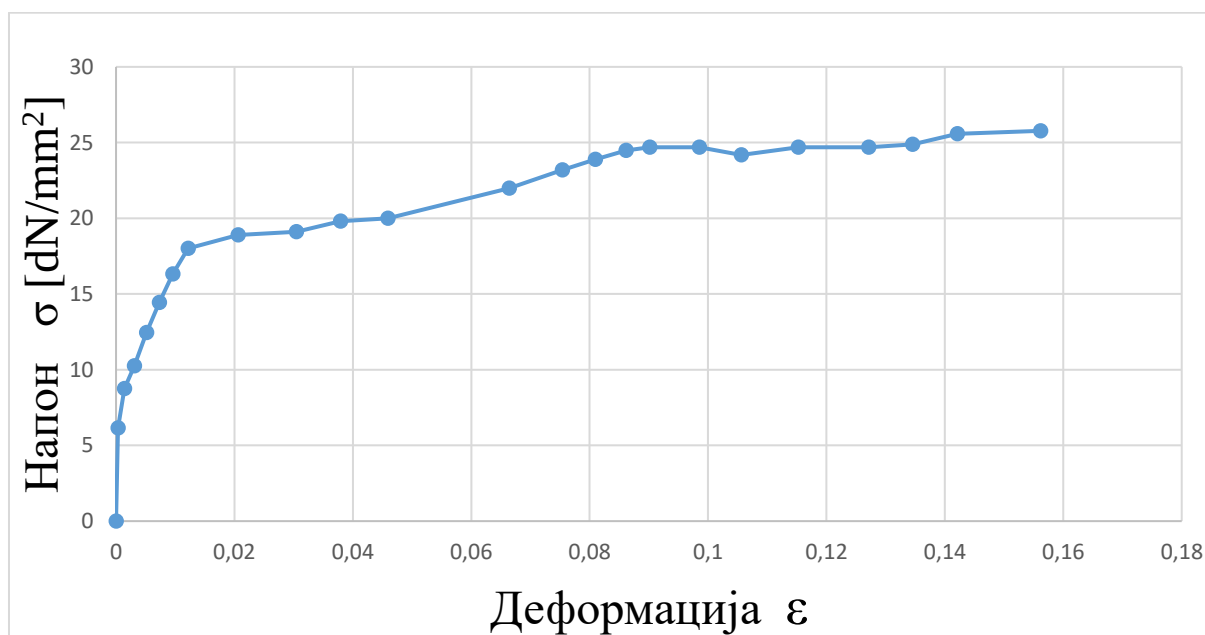
Табела 6. Испитивање бакарне струне на затезање

ΔL [mm]	F/2 [daN]	d [mm]	ϵ	σ [daN/mm ²]	l [mm]	A [mm ²]
0	0	0,8	0	0	222,5	0,5024
0,07	3,085	0,8	0,000315	6,140525	222,5	0,5024
0,31	4,4	0,8	0,001393	8,757962	222,5	0,5024
0,69	5,15	0,8	0,003101	10,2508	222,5	0,5024
1,15	6,25	0,8	0,005169	12,44029	222,5	0,5024
1,63	7,25	0,8	0,007326	14,43073	222,5	0,5024
2,13	8,2	0,8	0,009573	16,32166	222,5	0,5024
2,71	9,05	0,8	0,01218	18,01354	222,5	0,5024
4,58	9,49	0,8	0,020584	18,88933	222,5	0,5024
6,77	9,6	0,8	0,030427	19,10828	222,5	0,5024
8,44	9,95	0,8	0,037933	19,80494	222,5	0,5024
10,22	10,05	0,8	0,045933	20,00398	222,5	0,5024
14,78	11,05	0,8	0,066427	21,99443	222,5	0,5024
16,77	11,65	0,8	0,075371	23,18869	222,5	0,5024
18,01	12	0,8	0,080944	23,88535	222,5	0,5024
19,16	12,3	0,8	0,086112	24,48248	222,5	0,5024
20,06	12,4	0,8	0,090157	24,68153	222,5	0,5024
21,92	12,4	0,8	0,098517	24,68153	222,5	0,5024
23,5	12,15	0,8	0,105618	24,18392	222,5	0,5024
25,64	12,4	0,8	0,115236	24,68153	222,5	0,5024
28,29	12,4	0,8	0,127146	24,68153	222,5	0,5024
29,93	12,5	0,8	0,134517	24,88057	222,5	0,5024
31,62	12,85	0,8	0,142112	25,57723	222,5	0,5024
34,74	12,95	0,8	0,156135	25,77627	222,5	0,5024

На следећим сликама дат је дијаграмски приказ резултата мерења :



Дијаграм 3. Дијаграм промене силе F у доносу на издужење ΔL



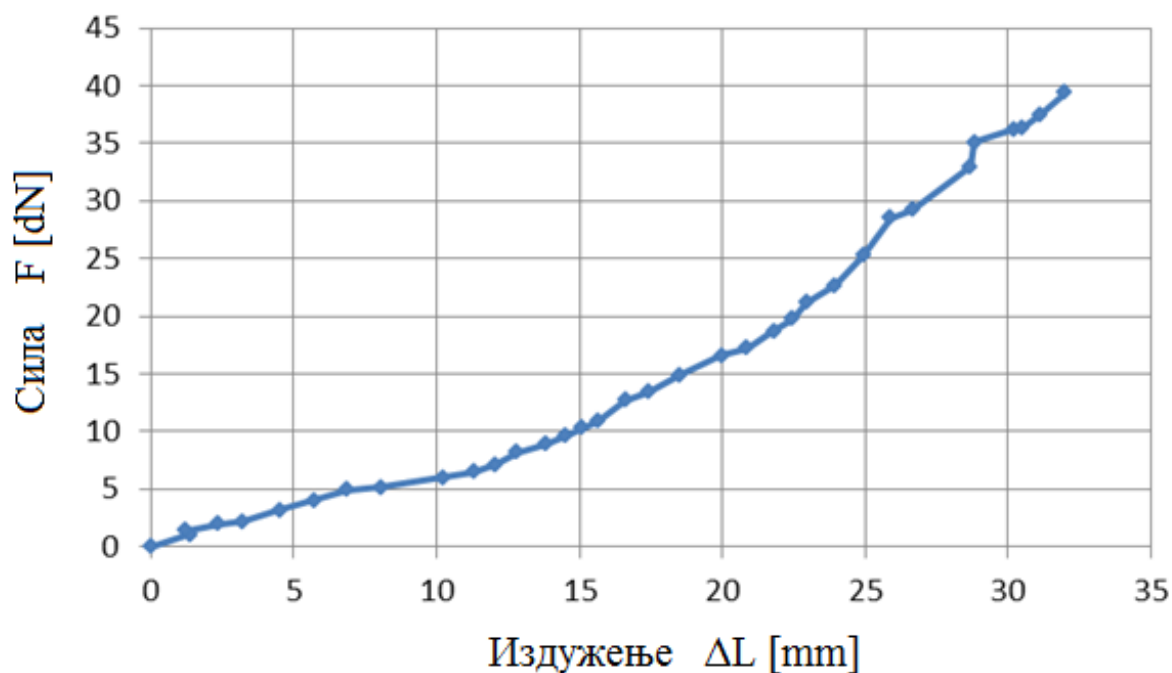
Дијаграм 4. Дијаграм промене напона σ у доносу на деформацију ϵ

У табели 7 приказани су резултати добијени испитивањем струне од прохромског
челика :

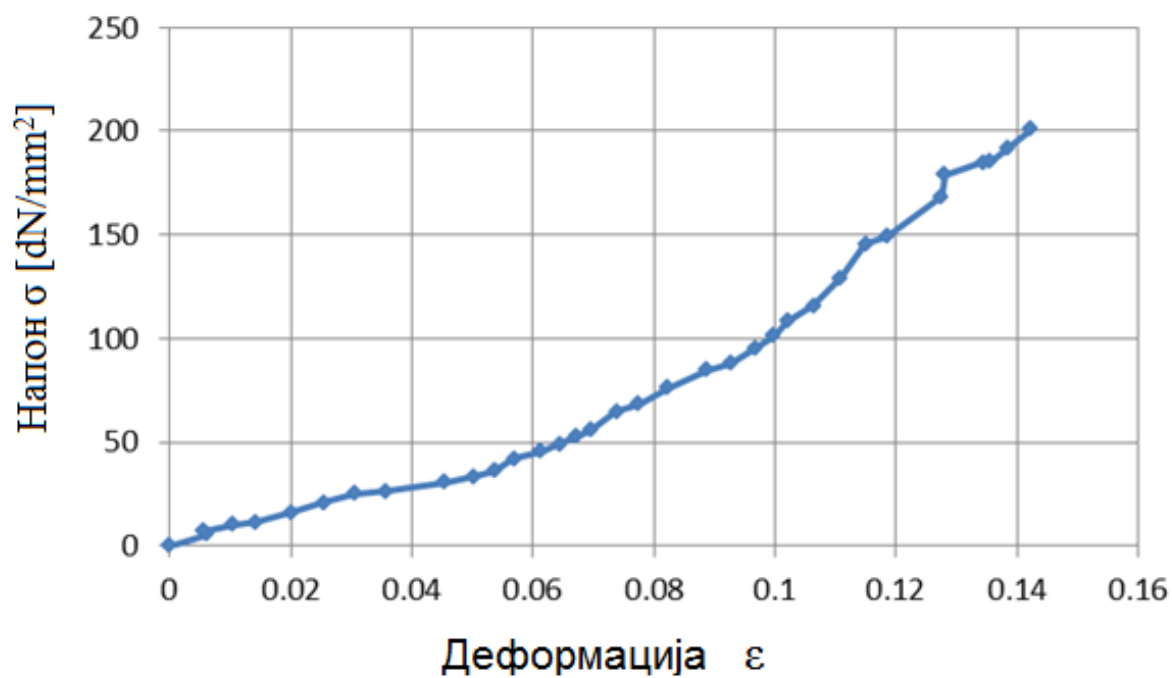
Табела 7. Испитивање челичне струне на затезање

ΔL [mm]	F [daN]	ϵ	σ [daN/mm ²]	L [mm]	A [mm ²]	d [mm]
0	0	0	0	225	0,196	0,5
1,38	1,04	0,006133	5,306122	225	0,196	0,5
1,24	1,41	0,005511	7,193878	225	0,196	0,5
2,36	1,96	0,010489	10	225	0,196	0,5
3,21	2,2	0,014267	11,22449	225	0,196	0,5
4,52	3,15	0,020089	16,07143	225	0,196	0,5
5,71	4,05	0,025378	20,66327	225	0,196	0,5
6,88	4,93	0,030578	25,15306	225	0,196	0,5
8,05	5,12	0,035778	26,12245	225	0,196	0,5
10,16	5,36	0,045156	27,34694	225	0,196	0,5
15,29	4,8	0,067956	24,4898	225	0,196	0,5
18,7	5,4	0,083111	27,55102	225	0,196	0,5
22,22	6,03	0,098756	30,76531	225	0,196	0,5
23,3	6,5	0,103556	33,16327	225	0,196	0,5
24,08	7,1	0,107022	36,22449	225	0,196	0,5
24,8	8,2	0,110222	41,83673	225	0,196	0,5
25,8	8,9	0,114667	45,40816	225	0,196	0,5
26,49	9,6	0,117733	48,97959	225	0,196	0,5
27,1	10,3	0,120444	52,55102	225	0,196	0,5
27,65	10,9	0,122889	55,61224	225	0,196	0,5
28,61	12,7	0,127156	64,79592	225	0,196	0,5
29,42	13,4	0,130756	68,36735	225	0,196	0,5
30,52	14,9	0,135644	76,02041	225	0,196	0,5
31,98	16,6	0,142133	84,69388	225	0,196	0,5
32,85	17,2	0,146	87,7551	225	0,196	0,5
33,79	18,7	0,150178	95,40816	225	0,196	0,5
34,46	19,8	0,153156	101,0204	225	0,196	0,5
34,95	21,2	0,155333	108,1633	225	0,196	0,5
35,93	22,7	0,159689	115,8163	225	0,196	0,5
36,93	25,3	0,164133	129,0816	225	0,196	0,5
37,88	28,5	0,168356	145,4082	225	0,196	0,5
38,65	29,2	0,171778	148,9796	225	0,196	0,5
40,68	33	0,1808	168,3673	225	0,196	0,5
40,82	35,1	0,181422	179,0816	225	0,196	0,5
42,22	36,2	0,187644	184,6939	225	0,196	0,5
42,49	36,3	0,188844	185,2041	225	0,196	0,5
43,13	37,5	0,191689	191,3265	225	0,196	0,5
44	39,4	0,195556	201,0204	225	0,196	0,5

На следећим сликама дат је дијаграмски приказ резултата мерења :



Дијаграм 5. Дијаграм промене силе F у доносу на издужење ΔL



Дијаграм 6. Дијаграм промене напона σ у доносу на деформацију ϵ

4.3 Анализа резултата истраживања

Анализом добијених резултата може се закључити да су дијаграми идентични оним који су добијени испитивањима на великим кидалицама.

Јасно се могу уочити карактеристичне тачке на дијаграму, што омогућава да се виде карактеристике испитиваног материјала.

Резултати у раду су представљени табеларно, где се може видети колика је промена дужине струне ΔL [mm²] за одређену силу F [daN] којом је деловано, односно колики је напон δ [daN/mm²] у односу на деформацију ϵ .

У табели 8. су приказани резултати затезне чврстоће метала добијени експерименталним истраживањем.

У табелама 9. 10. и 11. је приказана теоријска затезна чврстоћа за Алуминијум, Бакар и Прохромски челик.

Табела 8. Затезна чврстоћа материјала добијена у раду

Материјал	Затезна чврстоћа [N/mm ²]	Затезна чврстоћа [daN/mm ²]
Алуминијум	70-80	7-8
Бакар	257	25,7
Прохромски челик	2010	201

Табела 9. Затезна чврстоћа материјала [17]

Материјал	Затезна чврстоћа [N/mm ²]	Затезна чврстоћа [daN/mm ²]
Алуминијум	58-550	5,8-55
Бакар	100-550	10-55
Прохромски челик	480-2240	48-224

Табела 10. Затезна чврстоћа материјала [18]

Материјал	Затезна чврстоћа [N/mm ²]	Затезна чврстоћа [daN/mm ²]
Алуминијум	40-160	4-16
Бакар	200-230	20-23
Прохромски челик	2000-2400	200-240

Табела 11. Затезна чврстоћа материјала [19]

Материјал	Затезна чврстоћа [N/mm ²]	Затезна чврстоћа [daN/mm ²]
Алуминијум	40-50	4-5
Бакар	210	21
Прохромски челик	1860	186

Упоређивањем резултата може се закључити да се затезна чврстоћа добијена у мастер раду налази у опсегу који је дат у литератури.

5. ДИСКУСИЈА

Овим радом објашњен је значај механичког испитивања метала на затезање.

Резултати који су приказани у раду добијени су мерењем у другој верзији кидалице.

Значај нове кидалице за испитивање струна огледа се у томе што :

- је много јефтинија сама конструкција кидалице;
- је јефтиније и лакше направити металну струну за разлику од металне епрувете;
- омогућава сваком студенту да изврши самостално испитивање одређеног метала на затезање;
- нема велике буке при кидању струне, као што је случај код кидања епрувете;
- кидалица је много мањих димензија и лакша, што омогућава лако премештање и вршење испитивања метала како у лабораторији тако и у учионицама;
- лако и једноставно постављање струне;
- затезање струне вршимо малом силом закретања механизма;
- лако читавање вредности на дигиталним инструментима;

Резултати који су добијени и који су представљени табеларно и преко дијаграма су слични теоријским. Грешка која се јавља при читавању је мања од 10%, што је задовољавајуће.

Због својих карактеристика ова кидалица се може користити у едукативне сврхе, односно за приказивање експеримената ђацима и студентима који се први пут сусрећу са испитивањем материјала на затезање. Где ће сваки студент моћи самостално да изврши испитивање, и моћи ће да види понашање материјала све до његовог кидања. Што није био случај са старим кидалицама, где је вршење експеримента скупље. Па се из тог разлога експеримент врши са групом студената при чему није могуће да сваки студент испратити сваки корак испитивања.

6. ЗАКЉУЧАК

Циљ овог рада је био објаснити механичке методе испитивања метала и металних легура, а затим практично применити неке од тих метода за одређивање механичких особина одабраних метала.

Приликом откривања нових метала почело је испитивање њихових механичких особина у сврху кориштења тих метала за изградњу грађевина. Данас су те методе напредовале, а метали се користе у свим аспектима живота. Зато се могу видети њихова велика важност и важност поузданог одређивања њихових механичких особина.

Метали се користе у изградњи грађевина, мостова, аутомобила и других превозних средстава. Међутим, пре него се искористи неки метал у поједине сврхе неопходно је познавати његове механичке особине.

Колики притисак одређени метал може поднети, на којој температури се мењају његове особине и како температура утиче на поједине метале. Неопходно је одредити колико издужење или савијање може поднети одабрани метал или метална легура. Све наведено се може одредити појединим механичким методама за испитивање метала и металних легура.

У овом раду су објашњене машине за испитивање метала које се називају кидалице. Испитани су одабрани метали помоћу методе за испитивање механичких особина метала на затезање. Одређене су механичке особине метала и представљене су преко дијаграма, зависност издужења материјала ΔL од силе F која делује на попречни пресек A струне.

На крају се може закључити да иако су се механичке особине метала и металних легура почеле испитивати пре много година, оне и данас имају веома велику улогу, како у индустрији тако и у другим аспектима живота.

Са гледишта инжињера (машинаца, металурга, грађевинаца итд.) темељна својства материјала су механичка, а значај метала је врло велики јер од њиховог развоја зависи и интензитет развоја енергетике и аутоматизације.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Petar Terzić, *ISPITIVANJE METALA- Deo 1: Mehanička ispitivanja*, Beograd (1972)
- [2] Milorad Jovanović, Dragan Adamović, Vukić Lazić, Nada Ratković, *MAŠINSKI MATERIJALI*, Kragujevac (2003)
- [3] Огњановић М.: Машински елементи, Машински факултет, Београд, 2007
- [4] Ivan Vitez, *ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTVA METALNIH MATERIJALA*, Slavonski Brod, (2006)
- [5] <https://ironlady003.wordpress.com/2013/09/23/ispitivanje-zatezanjem> 15.07.2016.
- [6] Čedomir Petrović, *PRIRUČNIK ZA VEŽBE IZ ISPITIVANJA MATERIJALA*, Deo I, Beograd (1975)
- [7] Mihailo Muravljov : *Gradjevinski materijali*, Beograd 1995
- [8] <http://www.wikiwand.com/sh/Kidalica> 15.07.2016.
- [9] https://www.google.ba/search?q=hidrauli%C4%8Dna+kidalica&biw=1366&bih=653&sit e=webhp&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjT14jPgFjKAhXBa5oKHanFAIYQ_AUIBigB#imgsrc=E3XQNbQi7wKZYM%3A 05.07.2016.
- [10] http://menso88.weebly.com/uploads/1/7/5/8/17586891/naponi_deformacije_osobine.pdf 04.01.2017.
- [11] M. Franz, *Mehanička svojstva materijala*, Zagreb (1998)
- [12] Семинарски рад - Арбен Љајић, Деформациона својства материјала, 2011

[13] B.F. Dyson, M.S. Loveday, M.G. Gee: Materials Metrology and Standards for Structural Performance, Chapman and Hall, 1995.

[14] J. M. Gere, B. J. Goodno: Mechanics of Materials, Toronto, 2009.

[15] R. Dragojević: Utjecaj brzine opterećivanja na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja, završni rad, Zagreb, 2009.

[16] H. Kuhn, D. Medlin: ASM Handbook, Vol. 8: Mechanical Testing and Evaluation, ASM International, Materials Park, Ohio, 2000.

[17] Materials Data book, Cambridge University Engineering Department, 2003

[18] Prof. Dr. -Ing. Harald Meerkamm, Schaeffler Technical Pocket Guide, University of Erlangen-Nuremberg, 2014

[19] https://en.wikipedia.org/wiki/Ultimate_tensile_strength

20.01.2017.