

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Слађан Ж. Шљанић

**Експериментално одређивање модула
еластичности за различите врсте
материјала
Мастер рад**

Крагујевац, 2021.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Наука о заваривању

Број индекса: 395/2016

Слађан Ж. Шљанић

Експериментално одређивање модула еластичности за различите врсте материјала Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Вукић Лазих - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да детаљно обради и опише:

1. Понашање материјала при деловању спољних сила,
2. Најважније методе испитивања са разарањем,
3. Значај познавања модула еластичности,
4. Најважније методе одређивања модула еластичности,
5. Експериментално одређивање модула еластичности различитих материјала: челика, алуминијума, месинга и бронзе,
6. Добијене резултате и упоређи их са литературним подацима.

Препоручена литература:

1. М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић: *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
2. М. Јовановић и аутори: *Наука о материјалима II* – рукопис предавања, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2021.
3. А. Мајсторовић, В. Ђукић: *Испитивање машинских материјала – упутства*, друго издање, Научна књига, Београд, 1988.
4. Ј. Мандић: *Отпорност материјала*, Машински факултет у Београду, Научна књига, Београд, 1987.

Крагујевац, 2021.

Ментор:
Проф. др Вукић Лазић

Садржај

1. Уводне напомене	1
2. Понашање метала при деловању спољних сила	5
2.1 Еластичне деформације	5
2.2 Пластичне деформације	7
2.2.1 Веза између клизања и различитих врста кристалних решетки	9
2.2.2 Разложени напон клизања	11
2.3 Методе испитивања метала и легура	12
2.3.1 Избор узорака за механичка испитивања метала и легура	12
2.3.2 Статичка испитивања механичких особина металних материјала	12
2.3.3 Испитивање затезањем на повишеним температурама	23
3. Начини одређивања модула еластичности	25
3.1 Уводне напомене	25
3.2 Начин одређивања модула еластичности	27
3.2.1 Графичка метода	27
3.2.2 Одређивање модула еластичности екстензометром	29
3.2.3 Одређивање модула еластичности материјала мерењем угиба греде оптерећене савијањем	36
4. Припрема опреме и избор узорака за експериментална испитивања	39
4.1 Механичка кидалица	39
4.2 Припрема узорака за експериментална испитивања	43
5. Метали и легуре за експериментално одређивање модула еластичности	45
5.1 Основни појмови о челику	45
5.2 Основни појмови о легурама бакра	48
5.2.1 Месинг	48
5.2.2 Бронза	50
5.3 Основни појмови о алуминијуму и његовим легурама	51
5.3.1 Технички чист алуминијум	52
5.3.2 Отпорност алуминијума према корозији	53
5.3.3 Механичке особине чистог алуминијума	53
6. Експериментално одређивање модула еластичности различитих метала и легура ...	55
6.1 Челик	55
6.2 Месинг	57
6.3 Алуминијум	59
6.4 Упоредивање добијених резултата	61
6.5 Специјално припремљени узорци истог попречног пресека	65
6.5.1 Челик	65

6.5.2 Бронза.....	68
6.5.3 Алуминијум	71
6.5.4 Упоређивање добијених резултата код епрувета истог попречног пресека	73
7. Закључак	76
8. Литература	77

Предговор

Желео бих најпре да се захвалим ментору овог мастер рада, проф. др Вукићу Лазићу, на неизмерној и искреној подрици и помоћи, без које израда овог рада не би била могућа у овом облику.

Захвалност дугујем и проф. др Србиславу Александровићу на корисним саветима при извођењу експеримента и проф. др Весни Марјановић на помоћи око уређења поглавља везаног за једначину еластичне линије.

Захвалност такође дугујем и асистенту др Душану Арсићу на саветима и техничкој помоћи, као и старијем лаборанту у пензији Слободану Тимотијевићу на великој помоћи при извођењу експерименталног дела овог рада.

Посебну захвалност дугујем и фирми "ДЛС СПЕЦИЈАЛНИ СИСТЕМИ" која ми је омогућила израду специјално припремљених узорака од различитих материјала неопходних за експериментални део овог мастер рада, као и на стално подстицање руководства да се започете студије морају завршити.

Најзад, захвалност дугујем својој породици која ми је одувек била највећа подршка.

У Крагујевцу, 15.02.2021.

Слађан Шљанић

Резиме

Предмет овог рада јесте експериментално испитивање Јанговог модула – модула еластичности. Конкретно у овом раду за испитивање су се користили специјално припремљени узорци на CNC стругу од нискоугљеничног челика, месинга (бронзе) и од алуминијума. Детаљно је објашњен ток експеримента од полуфабриката материјала до позиционирања узорака у стезне чељусти машине као и позиционирања мерног уређаја, екстензометра на тело узорка. Експеримент је рађен из два дела, а једина разлика је била у попречном пресеку испитиваних узорака у првом и у другом делу. Тиме је показано да је због упоређивања издужења испитиваних материјала веома битна и димензија узорка, док је модул еластичности зависио само од врсте материјала. Објашњена је важност познавања основних механичких особина материјала због њихове даље примене као и њихов начин испитивања. Модул еластичности се може одредити графичком и рачунско-експерименталном методом. Графичка метода подразумева читавање вредности директно са графика добијеног испитивањем, док се код експерименталне методе читавају мале вредности издужења услед деловања прираштаја познате силе уз помоћ посебних мерних уређаја – екстензометра.

Кључне речи: модул еластичности, узорак, екстензометар, мерни уређај, универзална кидалица, деформација

Abstract

The subject of this paper is an experimental research of Young's modulus - elastic modulus. In this paper specifically, specially prepared CNC lathe samples, made of low carbon steel, brass (bronze) and aluminum, were used for the experiment. The course of experiment has been explained in detail, from semi-fabricated material sample to sample positioning in the machine's clamping jaw and measuring device (extensometer) positioning on the sample body. Experiment was conducted in two phases and the only difference between the two phases was the samples' intersection. Thus, it was indicated that samples' dimensions were really important because of sample materials elongation comparing, while the elastic modulus depended on the material only. The importance of knowing fundamental mechanical characteristics of a material was also indicated, because of its use and the type of experimental research. The elastic modulus could be defined using a graphical and a computer-experimental method. Graphical method implies the reading of values directly from the experimentally created graphic, while the experimental method implies the reading of elongation values using special measuring devices with the certain load - extensometers.

Key words: elastic modulus, extensometer, sample, measuring device, deformation, universal testing machine

1. Уводне напомене

Најважније, можда и пресудне особине материјала који се користе у машинству јесу својства отпорности (затезна јачина, напон течења) којима се они супротстављају спољашњем дејству сила и својства пластичности (издужење, сужење, жилавост). Стога се закључак о применљивости неког машинског материјала заснива најчешће на наведеним својствима – јачине и дуктилности. Испитивања која се односе на одређивање наведених својстава имају најширу примену, тако да тзв. механичка испитивања материјала имају далеко највећи значај при изучавању понашања машинских материјала. Циљ тих испитивања јесте да се код материјала од којег се израђују радни предмети за одређену сврху, под дејством оптерећења сличног какво ће бити изложени у реалном процесу, пронађу граничне карактеристике: када ће доћи до лома, колика је највећа деформација, какав је однос између деформације и напона и др.

Од машинских материјала се понекад захтевају и друга својства која овде нису наведена. Пре свега материјал који има задовољавајуће механичке особине, мора имати и одређене технолошке особине, тј. да буде употребљив и за друге намене (на пример: да се може пластично прерађивати на топло и хладно, ковати, лити, заваривати, лемити, имати добра својства на сниженим и повишеним температурама и тсл.). Машинска обрадивост материјала такође је значајно својство и одређује се практичним испитивањем сваког конкретног изабраног материјала.

Од извесних машинских материјала се могу захтевати и допунска својства, као што су: стање површине (геометрија), тврдоћа, отпорност на хабање, клизне особине, што се проверава испитивањем површинских особина специфичним методима.

Код већине материјала који се употребљавају у електротехници потребно је познавање одређених електричних или магнетних особина, те се за одређивање тих својстава користе посебне методе физичког испитивања.

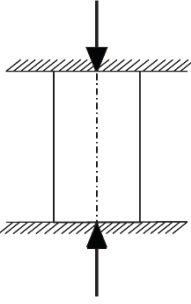
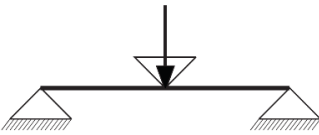
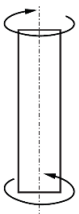
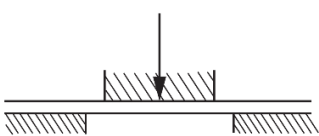
Ако се од материјала траже на пример повољне особине постојаности против хемијских или електрохемијских утицаја (на пример метали примењени у поморској бродоградњи морају бити постојани на агресивно дејство морске воде), тада се карактеристике материјала одређују специјалним испитивањима у тзв. сланим коморама чиме се утврђује отпорност на корозију сваког појединачног материјала.

Поузданост уграђених делова у било коју конструкцију није одређена само особинама материјала, него врло често и правилним избором технологије којом је тај материјал прерађен у финални део. Механичке особине неког одливка који је при ливењу израђен са грешком, најчешће споља невидљивом: шупљином, пукотином, прслином и др. битно могу нарушити интегритет конструкције при реалном раду. Стога је врло често потребно испитивање таквих делова, не само одливака, методама које неће довести до пластичних деформација или лома. Пре употребе финално обрађеног одговорног дела потребно је спровести и испитивања без разарања у циљу утврђивања евентуалних спољашњих и посебно унутрашњих грешака применом стандардизованих метода без разарања, као што су: визуелна контрола, пенетрантна метода, магнетна метода, ултразвучна дефектоскопија, редиографске методе и по потреби остале методе (проба на херметичност, метода вртложних струја, инфрацрвена метода и др.).

Главни циљ испитивања материјала јесте да се особине материјала искажу одређеним бројчаним вредностима. При прорачуну реалне конструкције или одговорног машинског дела/елемента, заснованих на законима механике и отпорности материјала, неминовно се полази до величина које су добијене испитивањем материјала (механичких, термофизичких, хемијских, електричних и др.). Те величине које представљају одређене карактеристике/константе материјала су циљ одређивања при свим видовима испитивања материјала. Овај циљ се може лако постићи ако је позната и

јасна законитост која постоји између особина и разних спољашњих чинилаца који утичу на та својства. Тако се може бројчано одредити већина физичких особина које представљају битне карактеристике материјала (особине, магнетне, термичке и др.). У табелици 1.1 дате су најважније врсте механичких испитивања.

Таблица 1.1 Врсте механичких испитивања

Дејство силе	Врста силе	Бројне карактеристике особине	Примена
	статичка	затезна чврстоћа издужење, сужење	сви материјали изузев камена
	статичка, дуготрајна	трајна чврстоћа трајно издужење граница пузања	код металних материјала на повишеним температурама
	ударна	специфичан рад удара при лому	ретко
	динамичка	динамичка чврстоћа	сви материјали изузев камена
	статичка	притисна чврстоћа скраћење проширење просека	грађевински материјали, метали за лежишта
	ударна	специфичан рад удара при лому	ретко у примени
	сила на извијање	чврстоћа на извијање	испитивање делова конструкције
	динамичка	динамичка чврстоћа	сиви лив
	статичка	савојна чврстоћа угиб при лому фактор савијања крутост	грађевински материјали, дрво, сиви лив
	ударна	специфичан рад савијања при лому	вештачке материјале, дрво, цинк и легуре цинка, одливци од сивог лива
	ударна при зарезаној епрувети	живавост	дрво, пластичне материјале, метали
	динамичка	динамичка савојна чврстоћа	метални материјали
	статичка	увојна чврстоћа	ретко
	ударна	специфичан рад увијања при лому	алатни челици
	динамичка	динамичка увојна чврстоћа	метални материјали
	статичка	смицајна чврстоћа	сиви лив, дрво, челик

Сасвим је другачија ситуација при одређивању технолошких особина. Ове особине не зависе само од материјала, већ и од других елемената (начина прераде, облика и димензије испитиваних узорка, радне температуре, врсте оптерећења и др.).

Механичка испитивања се изводе најчешће на специјално израђеним пробним узорцима – епруветама, а ређе на готовим деловима (жицама, ланцима, ужадима и др.). Према врсти силе која дејствује при испитивању на епрувету/узорак постоје разне врсте механичких испитивања (таб 1.1). Потребне епрувете су обично различито прописаног облика, а силе којим се оптерећују бирају се тако да је њихово дејство што једноставније (нпр. аксијално напрезање и тсл.).

Испитивања могу бити статичка или динамичка. При статичким испитивањима брзина дејства спољашњег оптерећења (сила, момената) је релативно мала или су пак спољашња дејства за време оптерећења трајна и константна (условно речено мирна). При динамичким испитивањима дејство силе је са знатно већом брзином промене интензитета силе (ударно дејство) и прати се понашање материјала на то дејство силе или ако је сила током времена променљива по величини или по знаку, прати се број промена који доводи до лома испитиваног материјала/узорка. Сва ова испитивања дају веома поуздану слику о подобности изабраног материјала при статичком или динамичком испитивању.

Циљ изучавања механичких особина материјала је двојак:

- 1) да се омогући прорачун отпорности појединих делова/елемената у конструкцији и
- 2) да се омогући надзор над производњом одређеног материјала са одређеним особинама.

Циљ наведених опсежних метода испитивања материјала јесте да се добију одређене бројчане вредности појединих значајних величина које ће обезбедити што поузданији прорачун и тиме допринети већој безбедности у реалном раду конструкције или дела. Другим речима, израђена конструкција или готов одговорни радни део, треба у реалном процесу да издрже дата оптерећења с великим степеном сигурности, било да је реч о статичком или динамичком оптерећењу.

Истраживачки рад у области механичких особина металних материјала добрим делом се састоји и у налажењу односа/корелације између понашања материјала при лабораторијском испитивању и понашању у стварним конструкцијама.

У процесу пријема материјала/метала слично се проверавају и подаци произвођача материјала добијени уз сваку испоруку (тзв. "атести" материјала). Незаобилазна испитивања свде се на: проверу хемијског састава, мерење тврдоће, одређивање најважнијих својства отпорности и пластичности материјала, а понекад провером металографских особина материјала или применом метода испитивања без разарања (нпр. најчешће при оцени пријема великих одливака). На овај начин се пре уградње набављеног материјала, у циљу обезбеђивања што веће поузданости конструкције, спроводе наведена испитивања.

Истраживачки рад из области испитивања материјала се такође односи на одређивање односа између појединих својстава истог материјала.

Према врсти силе којом се материјал оптерећује, па према томе и врсти напона и деформације која настаје, најважнија механичка испитивања могу бити на:

- Затезање,
- Притисак,
- Савијање,
- Увијање и
- Смицање.

У прва три случаја испитивања, спољне силе у посматраном пресеку изазивају нормалне напоне, док у последња два настају напони смицања. Врло важне константе при овим испитивањима које дају везу између напона и деформације у области еластичности јесу: модул еластичности (E) и модул клизања (G).

Деформације које настају под дејством сила могу бити двојаке: пролазне (еластичне) које се губе после престанка дејства сила и трајне (пластичне) које заостају и после престанка дејства сила. Деформације у еластичној области у којој су оне најчешће пропорционалне сили (напону) су мале и губе се после престанка дејства силе тако да нема трајне промене облика. Прекорачењем једног граничног оптерећења при порасту оптерећења, границе еластичности, поред еластичних деформација настаће и пластичне деформације које се по престанку дејства силе неће изгубити. Ове пластичне деформације при даљем порасту оптерећења не расту линеарно и равномерно као еластичне деформације, већ је њихов пораст убрзан при порасту оптерећења и највише зависи од врсте и стања материјала. Овај пораст деформације који је уочљив већ са простим мерним инструментима или чак од ока збива се код различитих материјала сасвим различито. Код већине метала/легура прелаз из еластичне у пластичну деформацију/област одвија се у широј или ужој области оптерећења, али увек континуално. Код великог броја технички важних метала, пре свега челика, долази до великих деформација, па је усвојено да се прелазак из еластичне у пластичну област одвија од тзв. границе течења материјала (уколико је изражена - R_{eH}) или од договорене/условне границе течења - $R_{p0.2}$ на основу увојене декларисане вредности деформације ($\varepsilon = 0.2\%$).

Често се као мера „квалитета“ при испитивању механичких особина материјала узима затезна јачина као однос максималне силе кроз попречни пресек мерног дела узорка. Реч је о максималном нормалном или танганцијалном напону, зависно од врсте оптерећења и назива се:

- Затезна јачина или чврстоћа;
- Притисна јачина или чврстоћа;
- Савојна јачина или чврстоћа;
- Смицајна јачина или чврстоћа;
- Јачина на увијање или чврстоћа;

Поред наведених својстава јачине на идентичан начин се мере и својства пластичности или деформације при затезању, притиску, савијању, смицању или увијању. Свакако да су најважније карактеристике оне добијене затезањем, док се друга врста испитивања примењују за различите металне или неметалне материјале. На пример крти материјали (камен, керамика, опеке, ливена гвожђа, месинг и др.) се знатно више подвргавају испитивању притиском, при чему и релани делови раде у тим условима. Уколико је реч о осовинама и вратилима онда се предност даје испитивању савијањем и увијањем и тсл. Дакле, зависно од услова рада сваког дела, бира се начин испитивања, укључујући ударна оптерећења као и циклички понављана оптерећења.

Најважнији део овог рада јесу поглавља посвећена теоријском и експерименталном одређивању модула еластичности различитих метала и легура који налазе широку примену: као конструкциони делови/елементи, ливачке легуре, легуре за деформисање, основни материјали, али и за израду заварених конструкција и тсл. Модул еластичности и модул клизања који се повезују Поасоновим коефицијентом су спрега између напона и деформација у еластичној области и служе при прорачуну делова изложених наведеним оптерећењима. У том смислу, иако није предмет рада, описаше се најважније методе испитивања метала без разарања.

2. Понашање метала при деловању спољних сила

2.1 Еластичне деформације

Ако на метални предмет делују спољне силе најпре се мења облик, а при довољно великој сили настаје разарање. Истовремено у радном предмету се јављају напони, тј. унутрашње силе којима се он супроставља промени облика. Промене димензија се називају деформација, а промене облика преобликовање. При ниским вредностима спољних сила (и ниским напонима) деформације су само еластичне (опружне); по растерећењу оне нестају, а предмет поприма првобитни облик. Прекорачи ли величина спољне силе одређену границу, настаће пластичне (трајне) деформације које остају и по растерећењу, па предмет постаје трајно деформисан. На кристалној решетки се еластична деформација испољава само малим отклањањем атома из њиховог равнотежног положаја; отклон не прелази половину параметара кристалне решетки. При трајној деформацији, атоми мењају свој положај за удаљеност најмање једнаку параметру решетки.

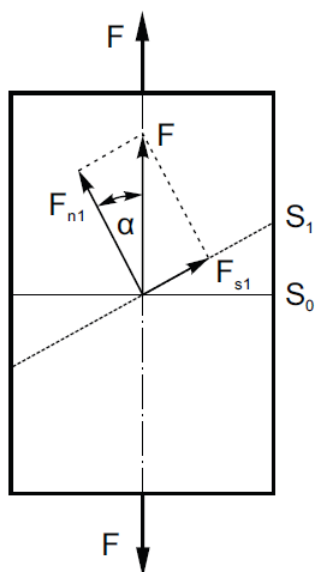
Дејство спољне силе F на метални штап кружног попречног пресека (сл. 2.1) настаће у равни S_0 , управној на правац дејства силе, нормални напоне $\sigma_0 = F/S_0$. У произвољној равни S_1 , отклоњеној од S_0 за угао α , нормална компонента (F_{n1}) и смичућа компонента (F_{s1}) силе F имаће вредности:

$$F_{n1} = F \cdot \cos \alpha; \quad F_{s1} = F \cdot \sin \alpha.$$

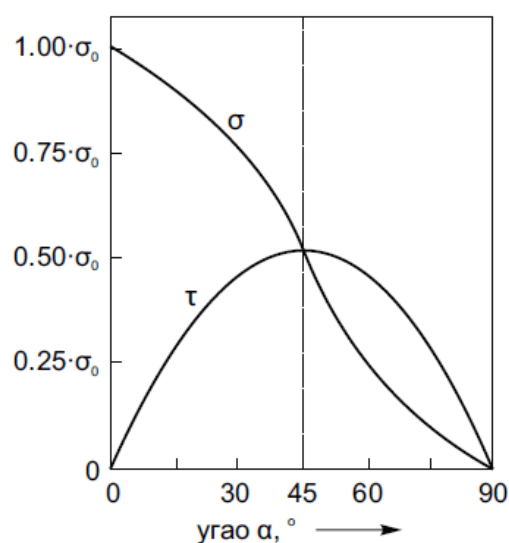
У равни S_1 делују нормални и смичући напони:

$$\sigma_1 = \frac{F_{n1}}{S_1} \quad \text{односно} \quad \tau_1 = \frac{F_{s1}}{S_1}.$$

Токови нормалног и смичућег напона у зависности од угла α при једноосном затезању приказани су на слици 2.2. Може се уочити да нормални напон (σ) достиже максимум за $\alpha = 0^\circ$; а смичући/тангенцијални напон (τ) при $\alpha = 45^\circ$ износи $\tau_{\max} = 1/2 \cdot \sigma_0$. Ако је аксијална сила довољно мала, настаће еластични нормални и смичући напони, праћени еластичним нормалним и смичућим деформацијама.



Слика 2.1 Нормална и смичућа компонента силе F



Слика 2.2 Ток нормалног и смичућег напона у зависности од угла α при једноосном затезању

Између еластичне деформације (ε) и напона (σ) постоји линеарна зависност која је позната као Хуков¹ закон:

$$\varepsilon = \alpha \cdot \sigma,$$

где је: α - константа пропорционалности чија се реципрочна вредност $1/\alpha = E$ назива модул еластичности при затезању у МПа.

Однос између нормалног напона и пратеће еластичне деформације одговара Хуковом закону:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon.$$

За смичуће напоне (τ) и смичуће еластичне деформације (γ) важи однос:

$$\tau = G \cdot \gamma,$$

где је G - модул еластичности на смицање, односно модул клизања у МПа.

Релативне деформације ε и γ су бездимензијски бројеви. Уздужна еластична деформација ε представља однос тренутног издужења (Δl) и почетне дужине l_0 , а одређује се помоћу израза:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0},$$

где је:

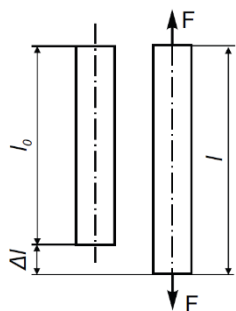
l_0 - дужина узорка у незатегнутом стању и

l - тренутна дужина узорка у току затезања силом F до границе еластичности.

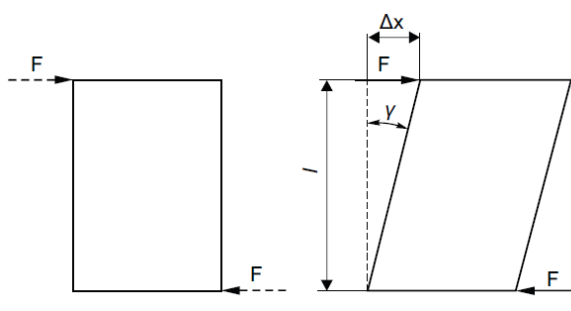
Еластично издужење Δl изазвано аксијалном силом F приказано је на слици 2.3.

Слично се, према слици 2.4, одређује смичућа еластична деформација (смицање):

$\gamma = \frac{\Delta x}{l}$; то је у ствари тангенс угла смицања изазваног смичућом силом F ($\tan \gamma = \frac{\Delta x}{l}$ и $\tan \gamma \approx \gamma$ за мале углове).



Слика 2.3 Илустрација уздужне деформације



Слика 2.4 Илустрација смичуће деформације

Апсолутне вредности модула E и G су за разне метале различите, а у монокристалу зависе и од оријентације кристалне решетке према вектору силе. Тако се нпр. код монокристала бакра добијају велике разлике модула еластичности за различите правце; однос $E [111]/E [100]$ је код бакра око 2.8; за алуминијум око 1.2. Стога монокристал бакра има велики степен анизотропије² еластичних особина, док се монокристал алуминијума понаша готово као изотропно тело.

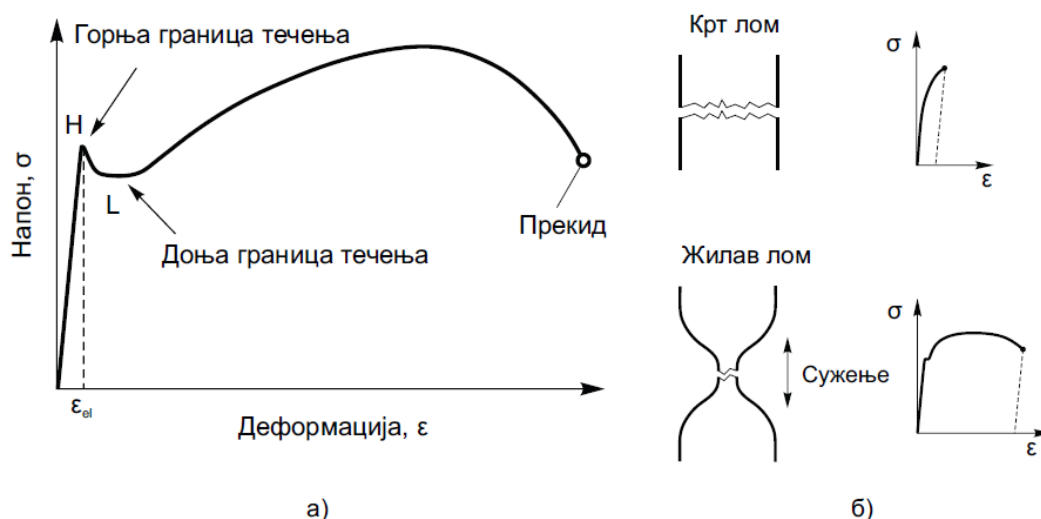
¹ Robert Hooke (1635-1703), енглески математичар, дао основне законе у теорији еластичитета.

² Анизотропија означава особину неких тела да у различитим правцима имају другачија својства.

Код већине техничких метала и легура, будући да је реч о поликристалним материјалима са великим бројем металних зрна различитих оријентација, величина модула еластичности сматра се независном од правца. За овакве материјале модул еластичности је у макроскопским размерама једнак средњој вредности модула еластичности монокристала. Другим речима, макроскопски посматрано, поликристални материјали имају изотропне еластичне особине. Ово се не односи на хладно ваљане челичне лимове код којих су метална зрна при преради издужена у правцу ваљања.

2.2 Пластичне деформације

Тачну границу између еластичних и трајних (пластичних) деформација тешко је успоставити. Код поликристалних материјала се таква граница практично и не појављује, јер нека зрна могу бити већ трајно деформисана, док друга остају у области еластичности. Зато је договором усвојено да еластичне деформације трају све док не настане трајно издужење $\Delta l = 0.005\% \cdot l_0$ (сл. 2.5). С обзиром на то да је мерење овако малих деформација веома сложено и дуготрајно, у техничкој пракси се за почетак трајних деформација метала усваја напон, који изазива трајну деформацију 0.2% и означава се као граница $R_{p0.2}$ ³. Код неких метала (нарочито код метала просторно центриране кубне решетке - А2), који садрже мале количине интерстицијских примеса, почетак трајне деформације се може лако прочитати са дијаграма кидања. Такав дијаграм приказан је на слици 2.5а за нискоугљенични челик. Кад напон порасте до тачке Н, настаје велико трајно деформисање, које је праћено наглим падом напона. Деформисање и кад напон опада назива се течење материјала; тачка Н почетка трајне деформације означава се као горња граница течења или само напон течења. Релативна деформација ϵ_H , која одговара овој тачки, може се сматрати за границу између еластичне и трајне деформације. Дијаграм кидања приказан на слици 2.5а одговара жилавом лому, док код кртог лома, готово да нема пластичног деформисања (сл. 2.5б-горе). Област улево од тачке Н може послужити за процену конструкционих особина материјала (где није допуштена трајна деформација), област удесно за процену погодности метала за обраду деформисањем (ковањем, ваљањем, пресовањем, дубоким извлачењем).



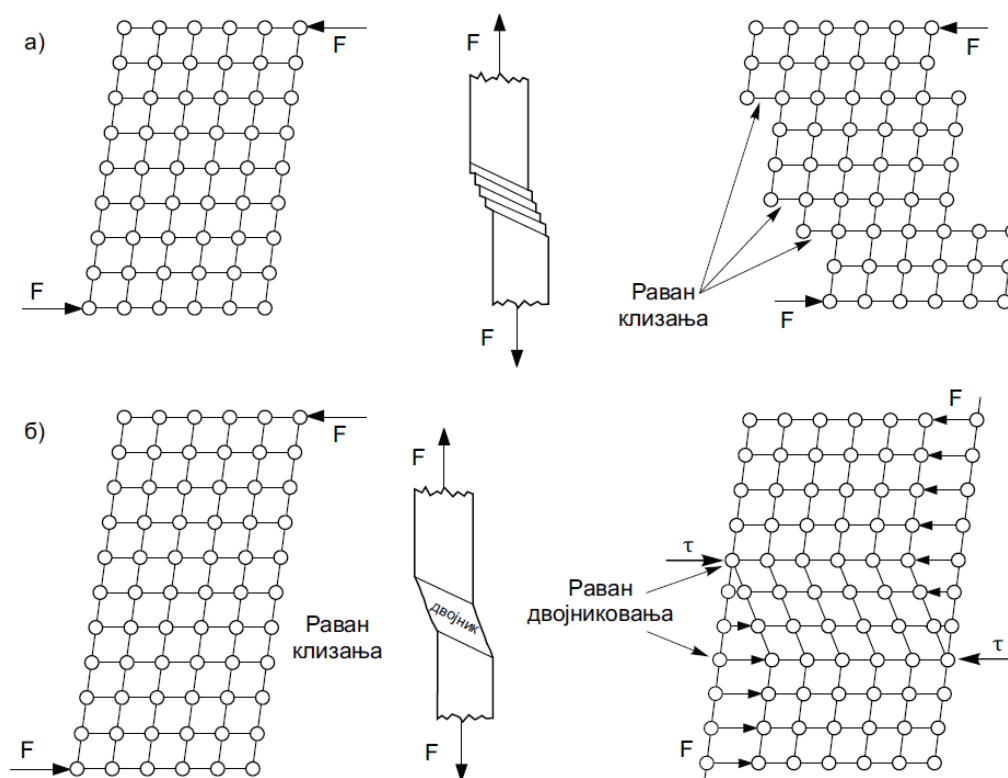
Слика 2.5 Дијаграм кидања σ - ϵ нискоугљеничног челика (а) и приказ кртог-горе и жилавог-доле лома са карактеристичним дијаграмима затезања (б)

Пластична (трајна) деформација кристалних материјала одвија се клизањем или двојниковањем, што је праћено кретањем дислокација. Схематски приказ ова два вида

³ $R_{p0.2}$ ($R_{0.2}$) зове се технички напон течења или боље конвенционални напон течења.

пластичних деформација дат је на слици 2.6. У оба случаја настаје трајна промена облика услед дејства довољно велике аксијалне силе (F). Клизање у елементарној кристалној решетци (ћелији) настаје онда кад смичући напон у погодној равни и правцу клизања достигне критичну вредност τ_{kr} , која премешта дислокације; ако дислокације пређу целим попречним пресеком монокристала, узајамно ће се удаљити одређене равни клизања уз деформацију реда величине $10^{-10}m$, што је резултат великог броја елементарних деформација (сл. 2.6a). Деформација ће започети у равни и правцу клизања погодно оријентисаним према сили затезања, где се најпре достиже критичан напон клизања. Даље се кристал заокреће па се и друге равни и правци подешавају сили затезања што доводи до вишеструког клизања (средња слика 2.6a). Међусобно се померају два дела кристала дуж одређених кристалографских равни, за величину параметра кристалне решетке, односно за цео умножак међуатомног растојања; оријентација мрежа оба дела кристала остаје иста, континуитет атомних равни се задржава (сл. 2.6a).

При пластичној деформацији двојниковањем (сл. 2.6б) међусобно се помера више кристалних равни за параметар кристалне решетке, па у кристалу настају непотпуне дислокације. Оријентације елементарних решетки деформисаног дела кристала се разликују од основне решетке. Део кристала који је заокренут у односу на основну мрежу зове се двојник; основна мрежа и двојник изгледају као слика и лик у огледалу према равни двојниковања (сл. 2.6б-десно). За двојниковање је неопходан виши тангенцијални напон него за клизање па оно настаје само код неких метала и то при одређеним условима, нпр. код решетки са малим бројем равни клизања и при деформацији на нижим температурама или при бржем порасту оптерећења (истовремено и деформација). Код метала који имају површински центрирану кубну решетку (А1) и њихових легура (бакар, месинг итд.), двојниковање кристала може настати услед термичких напона при загревању; они се гледано под микроскопом разликују од двојника насталих пластичним деформисањем.



Слика 2.6 Деформисање монокристала: а) клизањем и б) двојниковањем

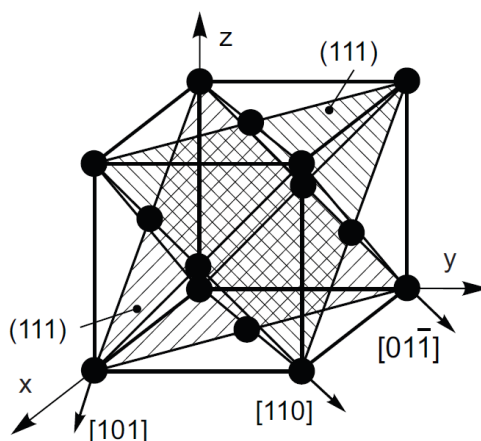
Течење при напону мањем од јачине материјала је битна карактеристика металних материјала. Супротно томе, код тврдых ковалентних кристала (дијамант, карбид силицијума), као и кристала са делимично металном везом (карбиди метала), клизање настаје при напону који превазилази њихову јачину. То је последица јако усмерених веза између атома што отежава кретање дислокација. За овакве материјале се може рећи да имају малу (крхку, слабашну) чврстину.

2.2.1 Веза између клизања и различитих врста кристалних решетки

Најчешћи механизам пластичног деформисања метала јесте клизање. Ако се постепено повећава сила оптерећења која делује на металне предмете, смичући напони ће у погодној кристалографској равни (тзв. равни клизања) достићи критичан напон клизања и започеће деформација; један део кристала се помера по равни клизања у односу на други део. Из проба на монокристалу доказано је да се клизање првенствено одвија у одређеним кристалографским равнима и правцима.

Везе између структуре кристала и геометрије ћелије омогућиле су формулисање три основна закона деформисања клизањем:

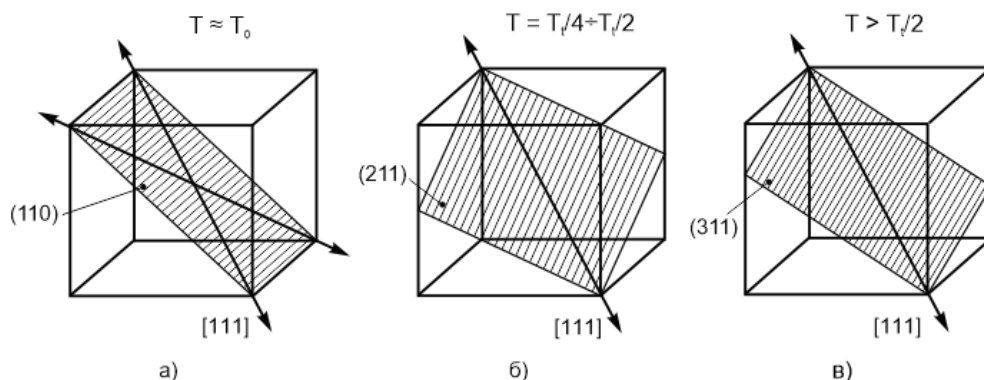
- Први, раван клизања је најгушће поседнута атомима,
- Други, клизање настаје у правцима кристала који су најгушће поседнути атомима и
- Трећи, од датог скупа равни и праваца могу се издвојити системи клизања којима смичућа компонента напона најпре достиже највећу вредност (тзв. активна раван и активан правац клизања; активација настаје по Шмидовом закону течења⁴).



Слика 2.7 Правци и равни клизања у површински центрираној кубној решетки (A1)

У површински центрираној кубној решетки (A1) најгушће су поседнуте атомима равни типа $\{111\}$ и правци $\langle 110 \rangle$ (сл. 2.7). Код просторно центриране кубне решетке (A2) најгушће су поседнуте атомима равни типа $\{110\}$ и правци $\langle 111 \rangle$ (сл. 2.8a). Код α -гвожђа (α -Fe) и волфрама (W), положаји равни клизања зависе и од температуре (сл. 2.8б, в); на $T \approx T_0$ то су равни $\{111\}$ и правци $\langle 111 \rangle$; између $T_T/4$ и $T_T/2$ равни клизања су $\{211\}$, а правци $\langle 111 \rangle$, док су при $T > T_T/2$ равни $\{311\}$, а правци $\langle 111 \rangle$ (T -температура топљења у Келвинима, K).

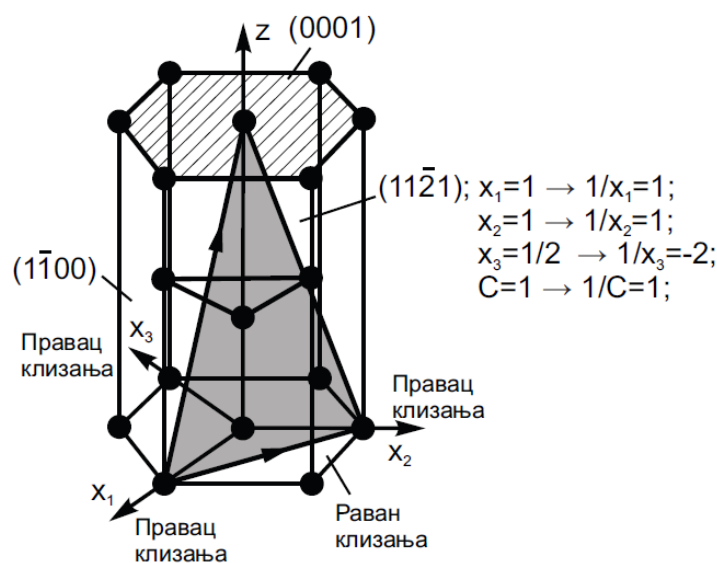
⁴ Закон је формулисао аустријски физичар Erich Schmid (1896-1983) 1932. године, а објавио га 1935. године у књизи под називом „Шмидов закон смичућег напона“. Закон гласи: "Од могућих система клизања у кристалу, клизање ће почети у оном систему који има најповољнију оријентацију према компоненти разложеног напона и компоненте добијене разлагањем затежућег оптерећења".



Слика 2.8 Системи клизања за метале решетке A2 (a); за α -Fe и W у зависности од температуре (б, в)

Код хексагоналне решетке (A3) најгушће је поседнута атомима основна раван, а најгушће поседнути правци леже у тој равни (сл. 2.9).

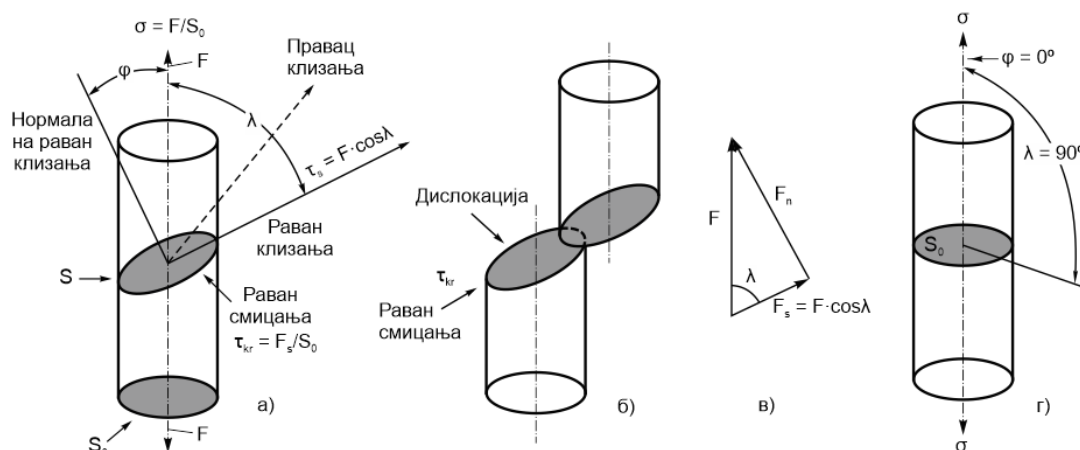
Без обзира на тип ћелија, системи клизања се добијају множењем бројева равни клизања и правца. Метали структуре A1 имају 4 равни клизања и у свакој равни по 3 правца што даје $(4 \times 3) = 12$ система клизања, метали структуре A2 имају $(6 \times 2) = 12$ система клизања и метали структуре A3 имају $(1 \times 3) = 3$ система клизања. То је у складу и са емпиријском чињеницом да метали Au, Ag, Cu, Al, Pb (решетка A1) имају знатно већу пластичност него метали Zn, Mg, Cd (решетка A3).



Слика 2.9 Правци и равни клизања у хексагоналној густо пакованој решетки (A3)

2.2.2 Разложени напон клизања

Разлика у својствима пластичности појединих метала може се објаснити како различитим кристалним решеткама, тако и количином дислокација. Ове разлике се могу уочити ако се лабораторијским истраживањима проучи деловање спољашњег затезућег оптерећења на масивни монокристал, према слици 2.10.



Слика 2.10 (а) Разложени напон смицања $\tau_{кр}$ настао у систему клизања (збир $\varphi + \lambda$ не може бити 90°), (б) померање дислокација у систему клизања деформише метал, (в) разлагање силе затезања, (г) нормални напон

Својства метала који имају различите кристалне структуре најбоље дефинише сила потребна да почне клизање у косој равни S (сл. 2.10). Ма колико била велика аксијална сила F, клизање не може настати за $\lambda = 90^\circ$ или $\varphi = 90^\circ$.

Смичући напон се према претходним сликама може одредити као:

$$\tau_s = \tau_{kr} = \frac{F_s}{S} = \frac{F \cos \lambda}{S_0 / \cos \varphi} = \sigma \cos \lambda \cos \varphi.$$

Израз $m = \cos \lambda \cos \varphi$ је Шмидов (Schmid) оријентациони фактор који се мења од $m = 0$ за $\lambda = 90^\circ$ или $\varphi = 90^\circ$ до $m = 0.5$ за $\lambda = \varphi = 45^\circ$. У првом случају клизање је искључено, док у другом случају при превеликој сили F може доћи до разарања монокристала.

За истраживачке сврхе може се у лабораторијским условима, поступком ливења, добити монокристал алуминијума тако да му раван клизања буде под 45° у односу на правац дејства аксијалног напона од 3.4475 MPa. Како је $\tau_{kr}^{Al} = 1.022046$ MPa то из

$$\text{Шмидовог закона следи: } \cos \varphi = \frac{\tau_{kr}}{\sigma \cos \lambda} = \frac{1.02046}{3.4475 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}} = 0.419 \text{ одакле се добија } \varphi = 65^\circ.$$

Овакав одливак може се добити постављањем обликоване клице Al на дну калупа у који се потом насипа течан алуминијум.

Величина смичућег напона неопходног да се раскину металне везе кристалне решетке назива се критични разложени (тангенцијални) напон ($\tau_{кр}$). Потребно је истаћи два услова да клизање почне: (1) да се појави разложена сила ($\lambda \neq 90^\circ$; $\varphi \neq 90^\circ$) и (2) да се правац разложене силе поклопи с неком равни и правцем. Поред ова два услова почетак клизања олакшавају дислокације у равни клизања.

2.3 Методе испитивања метала и легура

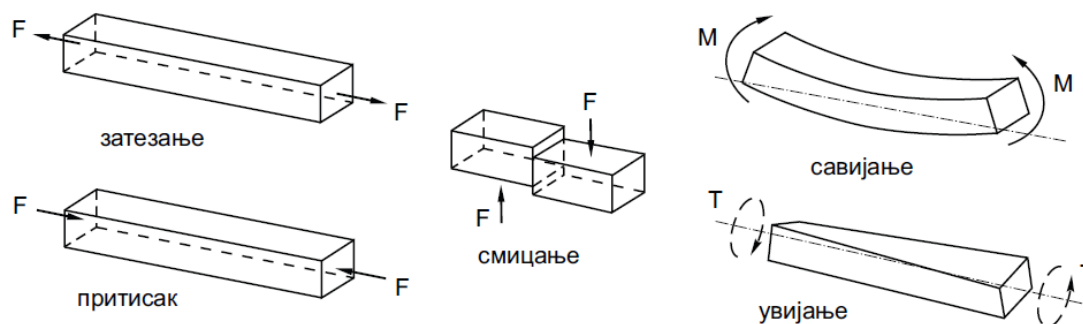
2.3.1 Избор узорак за механичка испитивања метала и легура

Метални материјали у облику полупроизвода (лимова, трака, плоча, профила, шипки, цеви, жица) производе се у железарама (ливена гвожђа и челици) и топионицама (Al и његове легуре, Cu и његове легуре и др.). При испоруци купцима, продавци шаљу и пропратну декларацију која садржи основне податке о материјалу: хемијском саставу, физичким и механичким особинама, стању испоруке (жарено, вучено и др.), стандарде по којима је материјал произведен и испитан, као и друге податке по захтеву купаца. При пријему материјала, наручилац по правилу проверава у сертификованој (акредитованој) лабораторији све податке садржане у декларацији.

Први корак за ову проверу је правилан *избор узорак*. При томе треба имати у виду да производи железара и топионица нису никад савршено хомогени, што значи да ће на резултате механичких и других испитивања утицати и место и начин узимања узорак из контингента пристиглог материјала. При исецању узорак из полупроизвода (нпр. гасним пламеном, брусном плочом, тестером и др.) требало би пазити да не дође до спонтане термичке обраде или деформационог ојачања што може променити неке особине узорка. Начин избора узорак за механичка испитивања дефинишу одговарајући стандарди, међутим када се изводе специфичне пробе које нису дефинисане стандардима потребно је уз извештај о резултатима испитивања навести место и начин исецања узорка. Из добијених узорак се методима машинске обраде даље праве пробни узорци стандардизованих облика и димензија сходно врсти пробе и условима испитивања.

2.3.2 Статичка испитивања механичких особина металних материјала

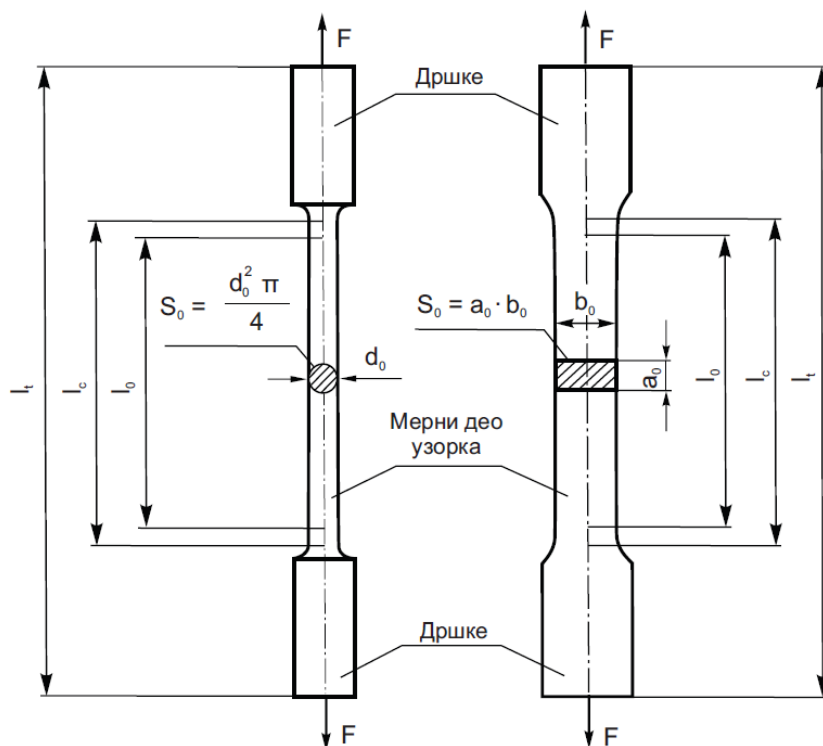
Статичке пробе се изводе при равномерном и спором порасту оптерећења, почев од нуле па до одређене вредности, зависне од врсте испитивања. Према врсти оптерећења (сл. 2.11) разликују се испитивање затезањем, притиском, савијањем, увијањем и смицањем.



Слика 2.11 Схематски приказ основних врста оптерећења

2.3.2.a Испитивање затезањем

Ова проба се изводи према одговарајућем стандарду⁵. Најпре се од одабраних узорака, машинском обрадом припремају пробни узорци, неправилно названи "епрувете" ⁶ (сл. 2.12).



Слика 2.12 Пробни узорци за испитивање затезањем: кружног и правоугаоног попречног пресека

Пробни узорци кружног и правоугаоног (квадратног) попречног пресека праве се из шипки, плоча, профила, а за испитивање одливака они се израђују ливењем у калупу истим поступком као и стварни одливак. Из полупроизвода као што су жице, траке, цевчице, ланци - пробни узорци се директно исецају. Радна или мерна дужина пробног узорка (l_0), према слици 2.12 одређује се из израза $l_0 = k\sqrt{S_0}$, при чему је $k=5.65$, а S_0 - површина попречног пресека узорка. У табелици 2.1 дате су препоручене димензије узорака за пробе затезања. Такође се мора поштовати услов да l_0 не буде испод 20 mm.

Таблица 2.1 Препоручене димензије пробних узорака за пробе затезања

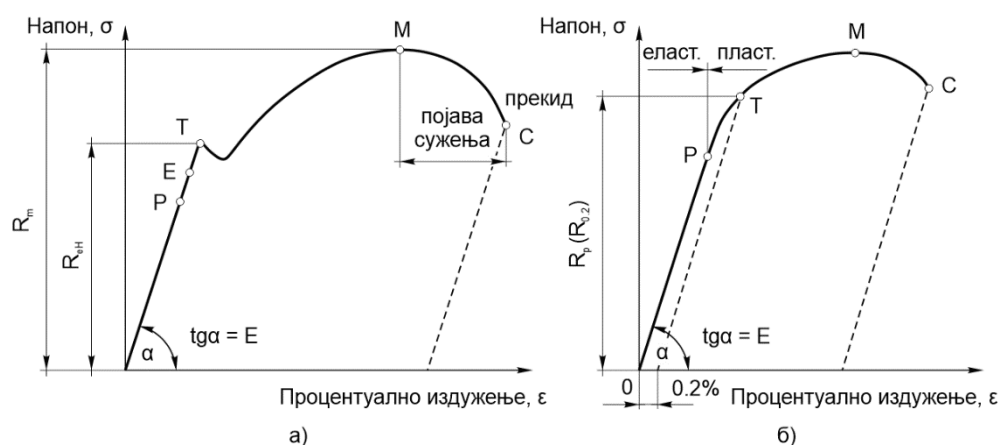
k	d_0, mm	S_0, mm^2	l_0, mm	l_g, mm	l_t, mm
5.65	20 ± 0.150	314.2	100 ± 1.0	110	$l_t \gg l_0 + 2 \cdot d_0$
	10 ± 0.075	78.5	50 ± 0.5	55	
	5 ± 0.01	19.6	25 ± 0.25	28	

Радна (мерна) дужина (l_0) се пре испитивања обележава плитким зарезима или маркерима на 10 једнаких делова, да би се после лома узорка могло установити да ли је место прекида у средњој или крајњим трећинама. Припремљен узорак учвршћује се у

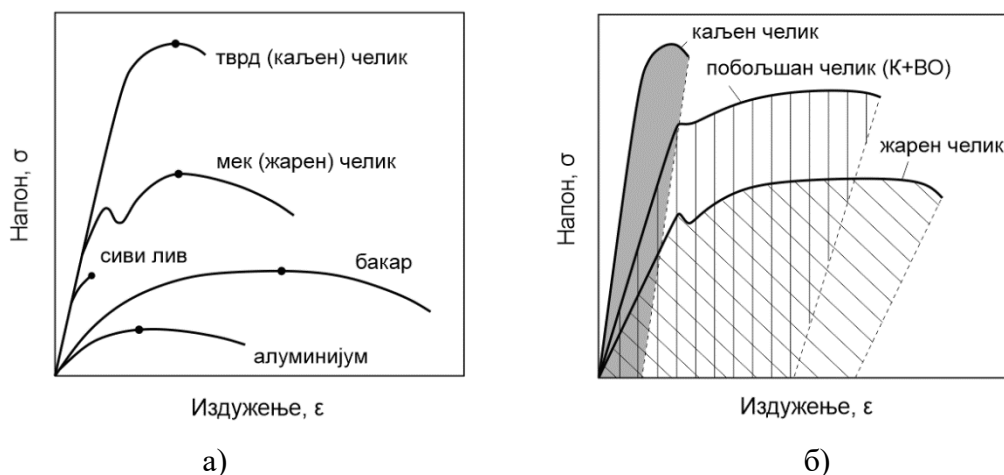
⁵ Испитивање затезањем се код нас изводи према тренутно важећем стандарду SRPS EN ISO 6892-1:2017 на собној и SRPS EN ISO 6892-2:2017 на повишеној температури.

⁶ "Епрувета" је у ствари стаклена посуда (цевчица) за извођење хемијских експеримената па је стога неоправдано пробне узорке за испитивање материјала звати епруветама као у неким старијим књигама или чак стандардима.

челусти машине за испитивање (кидалице), па се уводи мирно оптерећење чија се брзина пораста може регулисати у три или више нивоа. Чим почне деловање аксијалне силе затезања аутоматски се исцртава дијаграм затезања. Тако се добија дијаграм $F-\Delta l$ који је идентичан дијаграму $\sigma-\varepsilon$, само се разликују у размери. Дијаграм $\sigma-\varepsilon$ зове се технички дијаграм напон-деформација ($\sigma = F/S_0$ - нормални напон и $\varepsilon = \Delta l/l_0$ - релативно издужење). Радни дијаграм испитивања затезањем приказује ток отпора испитиваног материјала против деформисања и разарања. Сваком материјалу и његовом стању (каљено, вучено, жарено) одговара посебан дијаграм кидања (слике 2.13 и 2.14).

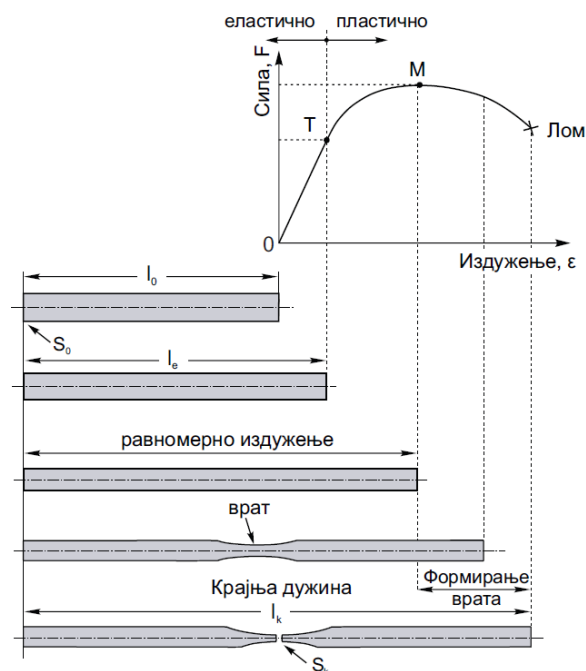


Слика 2.13 Дијаграм $\sigma-\varepsilon$ за: а) мек челик б) тврд челик



Слика 2.14 Дијаграм $\sigma-\varepsilon$ за: а) различите метале и б) каљен побољшан и жарен челик (K + KV - каљен + високо отпуштен)

На слици 2.15 приказане су промене попречног пресека узорка у току испитивања затезањем.



Слика 2.15 Промене попречног пресека узорка у зони еластичних (опружних) и трајних деформација

На основу сила очитаних на динамометру кидалице и дијаграма σ - ϵ (сл. 2.13) могу се одредити својства отпорности (R_m , $R_{p0.2}$) и својства деформације (A , Z):

- Јачину на кидање, R_m , МПа или затезну чврстину (чврстоћу);
- Горњу границу течења, R_{eH} , МПа или технички напон течења, $R_{p0.2}$, МПа;
- Модул еластичности ($E = \tan \alpha$), Е, МПа;
- Релативно издужење (издужење) A_5 , A_{10} , % за $l_0 = 50 \text{ mm}$ или $l_0 = 100 \text{ mm}$;
- Сужење (контракцију), Z , %.

Јачина је показатељ квалитета, која се користи за процену својстава отпорности деформабилних (истегљивих) материјала. Упоредним испитивањима више узорака од истог материјала, могу се према јачини установити евентуалне унутрашње металуршке грешке (порозност, неметални укључци). Јачина на кидање се израчунава према обрасцу:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \text{ МПа},$$

где је:

F_m - највећа сила затезања очитана при испитивању у N и

S_0 - површина попречног пресека радног дела у mm^2 .

Напон течења је најважнија величина за прорачун (димензионисање) машинских делова. Највећи ниво напона којим се део у току експлоатације (радних услова) сме оптеретити мора бити нижи од напона течења, што се за одговорне конструкције дефинише *степеном сигурности*. С обзиром на значај напона течења потребно је детаљно објаснити како се он одређује. Код меких⁷ челика (сл. 2.13а) тај се напон директно очитав на динамометру кидалице или се одређује са дијаграма σ - ϵ као горњи напон течења R_{eH} . Код других врста челика не може се директно у току испитивања

⁷ Термин „мек“ челик се употребљава у смислу нискоугљенични челик ($C < 0.25\%$).

затезањем уочити напон течења. Будући да и при најмањем оптерећењу дислокације изазивају локалне пластичне деформације, поставља се питање колико се највише пластично издужење може толерисати, а да рад конструкције не буде угрожен. За челик је усвојено да је то напон који изазива трајну деформацију од 0.2% l_0 ; тако се одређује *технички* (или конвенционални) напон течења, $R_{p0.2}$ (сл. 2.13б). Израчунава се према обрасцу:

$$R_{p0.2} = \frac{F_{p0.2}}{S_0}, \text{ МПа},$$

где је:

$F_{p0.2}$ - сила на граници течења у N ,

S_0 - површина попречног пресека узорка у mm^2 .

За друге метале и легуре (Al, Cu, Mg) график σ - ε почиње да се криви већ при релативно ниском напону те се узима да напону течења одговара трајна деформација од 0.5%. Стога се у овом случају технички напон течења означава са $R_{p0.5}$.

Модул еластичности. При замени једног конструкционог материјала другим увек се мора узети у обзир не само јачина, већ и модул еластичности. То је карактеристика која одређује угиб односно крутост одређеног машинског дела. На пример, алуминијумска осовина ће се при истом оптерећењу истегнути три пута више него челична, јер је $E^{Al} = 69000 \text{ МПа}$, а $E^c = 207000 \text{ МПа}$. Модул еластичности је исти за све врсте челика (легиране, хладно ојачане, термички обрађене), а са порастом температуре опада; при 650°C износи око 60000 МПа . Стога се може рећи да је модул еластичности материјална константа за групу легура (има одређену вредност за челике, другу за легуре Al, трећу за легуре Cu итд.); код свих метала E мање или више опада са порастом температуре. Модул еластичности израчунава се према обрасцу:

$$E = \frac{\Delta F \cdot L_{e0}}{\Delta l \cdot S_0}, \text{ МПа},$$

где је:

ΔF - прираштај силе затезања у N ,

L_{e0} - усвојена мерна дужина („база“) на екстензометру (инструмент за мерење малих деформација – еластичних издужења Δl) у mm ,

Δl - тренутно еластично издужење које изазива дејствујућа сила ΔF у mm и

S_0 - површина попречног пресека узорка у mm^2 .

Поред модула еластичности, још се одређује модул клизања G и ређе *запремински* модул K :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \text{ и } K = \frac{E}{3(1-2\nu)}, \text{ где } K = -\frac{p}{\Delta V} \text{ показује смањење запремине при}$$

дејству свестраног (хидрауличног) притиска (ν је Поасонов коефицијент).

Ова три коефицијента еластичности E , G , K показују како материјал реагује на одређено напонско - деформационо стање. Везу између G и K одређује Поасонов коефицијент $\nu = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x}$. Еластична деформација ε_x поклапа се са правцем дејства силе, а

ε_z је управна на ту силу, и односи се на деформацију по дебљини. Вредности Поасоновог коефицијента за неке чисте метале дате су у следећој табlici:

Метал	Pb	Mg	Al	Cu	Fe	W
ν	0.45	0.29	0.33	0.36	0.24	0.28

Релативно издужење A (истегљивост, издужење) може бити бољи показатељ металуршког квалитета челика него својства отпорности, јер у случају локалне порозности и неметалних укључака истегљивост драстично опада. Статичка жилавост или боље рећи затезна жилавост при мирном оптерећењу је добар индикатор својстава пластичности, тј. способности материјала да апсорбује спољашње оптерећење. Статичка жилавост (апсорбована енергија) сразмерна је шрафираној површини испод криве σ - ϵ (сл. 2.14б). Релативно процентуално издужење (A_5 , A_{10}) се одређује према изразу:

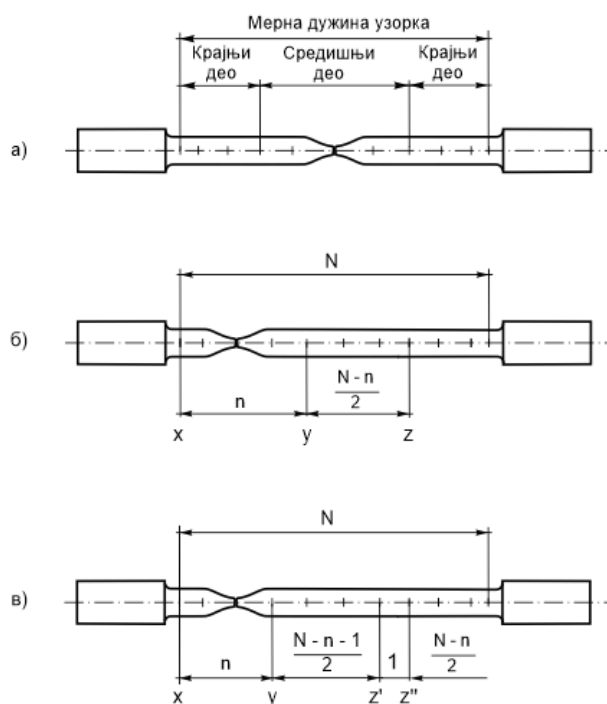
$$A = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100, \%$$

где је:

l_0 - почетна мерна дужина пробног узорка у mm и

l_k - крајња дужина прекинутих делова узорка у mm .

Ако је место прекида у средњој трећини мерне дужине, онда се састављањем прекинутих делова једноставно мери дужина l_k , mm (сл. 2.16а). Супротно томе, за прекиде у једној од трећина до главе узорка, неопходна је корекција l_k , јер је у крајњим трећинама мерне дужине до главе узорка издужење било ометено због повећаног пресека и близине чељусту кидалице (сл. 2.16б, в).



Слика 2.16 Корекција мерне дужине прекинутог узорка

Корекција се изводи на основу мерних дужина уписаних у две доње слике:

- Ако је разлика броја подеока $N-n$ паран број (сл. 2.16б) онда се дуж $\frac{N-n}{2}$ надомешта од тачке y до тачке z ($N=10$, $n=4$), па је релативно издужење:

$$A = \frac{(xy + 2yz) - l_0}{l_0} \cdot 100, \%$$

- Ако је N -п непаран број (сл. 2.16б), онда се дуж $\frac{N-n-1}{2}$ надомешта од тачке у до тачке z' ($N=10, n=3$), па је релативно издужење:

$$A = \frac{(xy + yz' + yz'')}{l_0} \cdot 100, \%$$

Осим својстава отпорности и деформација, при испитивању затезањем процењују се и фрактографија⁸ површине прелома, углавном однос глатких и храпавих површина.

Сужење (контракција) Z је битан показатељ обрадивости метала пластичним деформисањем. Највеће процентуално сужење попречног пресека је на месту прекида.

Одређује се према изразу:

$$Z = \frac{S_0 - S_k}{S_0} \cdot 100, \%$$

где је:

S_0 - површина почетног попречног пресека узорка у mm^2 и

S_k - крајњи попречни пресек састављених крајева узорка на месту прекида у mm^2 .

Стварни дијаграм напон деформација ($\sigma_{st}-\varepsilon_{st}$)

Стварни дијаграм $\sigma_{st}-\varepsilon_{st}$, теже је конструисати него технички дијаграм $\sigma-\varepsilon$, те се $\sigma_{st}-\varepsilon_{st}$ углавном користи за развојне и истраживачке сврхе.

Разлика проистиче из разлога што се у техничком дијаграму напон израчунава под претпоставком да попречни пресек S_0 остаје константан у току оптерећења; то важи само до границе еластичности, док се после те границе, пресек знатно смањује са порастом силе. Ако се пречник узорка и сила затезања мере више пута при порасту силе може се израчунати стварни напон:

$$\sigma_{st} = \frac{\text{Тренутна сила } (F > F_e)}{\text{Стварна површина попречног пресека } (S = f(F))}$$

Такође је потребно израчунавати стварну јединичну деформацију, сукцесивним сабирањем прираштаја Δl дељеног са тренутном дужином l . Тако се добија логаритамска деформација $\varepsilon_{st} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{S_0}{S}$. Задњи однос проистиче из услова да запремина метала у

току деформисања остаје приближно константна $V = S_0 \cdot l_0 = S \cdot l = const.$ (S_0, l_0 – почетне вредности, S, l – тренутне вредности).

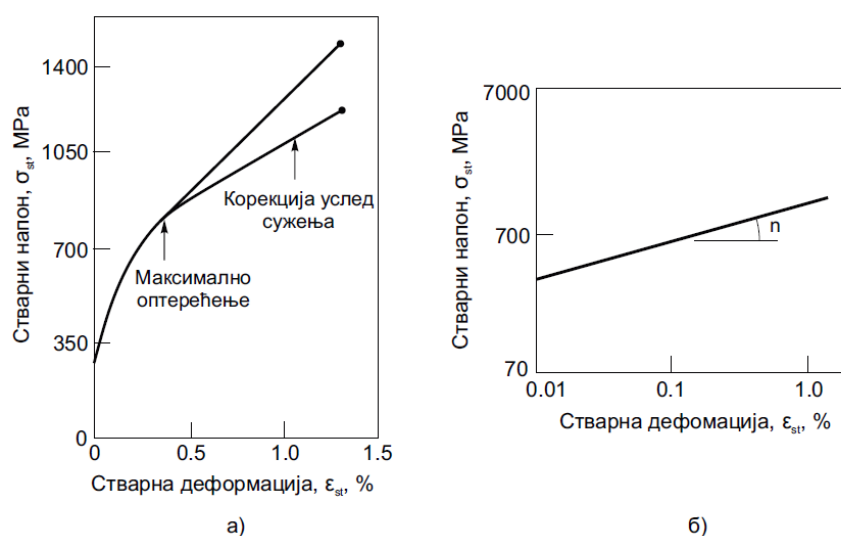
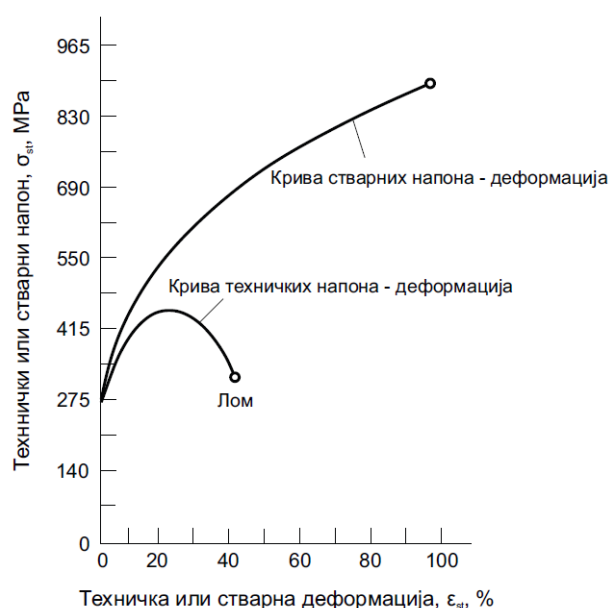
Између стварног напона и деформације у зони пластичности установљена је зависност, $\sigma = K \times \varepsilon^n$, где је K - константа зависна од материјала, а n - *коэффициент деформационог ојачања*. За неке техничке метале и легуре вредности K и n дате су у табелици 2.2.

⁸ Фрактографија је као научна дисциплина која се бави проучавањем изгледа површине прелома узорка уведена 1944. године. Фрактографија може да пружи информације о структури материјала, могућим узроцима отказа дела, квалитету материјала и појединим механичким особинама.

Таблица 2.2 Параметри деформационог ојачања неких метала и легура

Материјал	Напон течења, R_{eH} , MPa	K , MPa	n , -
Нискоугљенични челик (жарено стање)	210	500	0.28
Cr-Ni челици за побољшање (0.25 Cr, 0.30 Ni, 0.5 C)	520	1270	0.15
Аустенитни челик 18CrNi9	590	1280	0.45
Бакар (жарено стање)	60	320	0.54
Алуминијум (жарено стање)	40	180	0.20

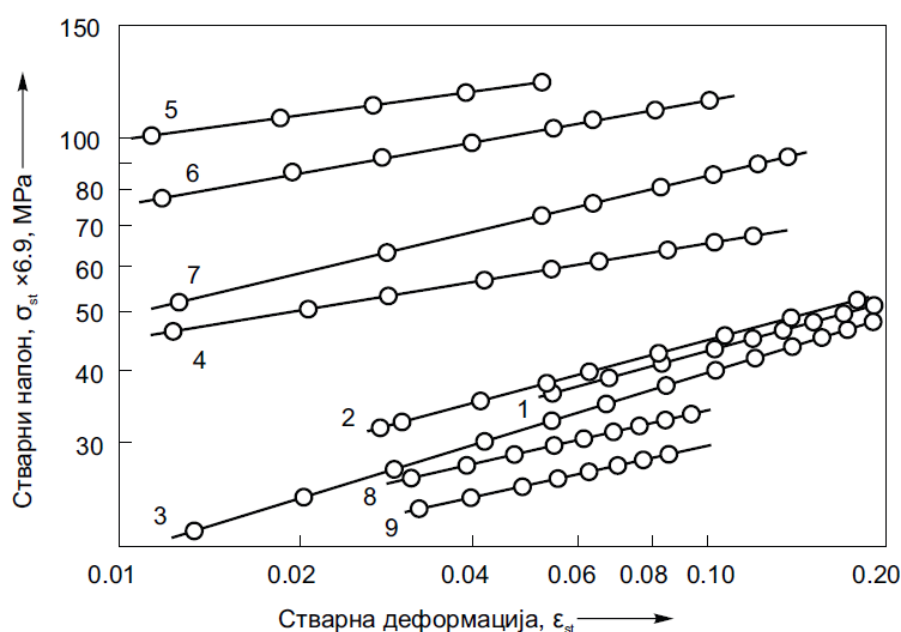
Ако се општи израз $\sigma = K \cdot \varepsilon^n$ логаритмује, добија се једначина: $\ln \sigma = n \ln \varepsilon + K$, што у дупло-логаритамском координатном систему одговара једначини праве линије ($y = mx + b$) (сл. 2.17). У зони еластичности стварни и технички напони се не разликују (сл. 2.18), јер је $S_0 \cong S$.

Слика 2.17 Дијаграм стварни напон - издужење (а) и дупло логаритамски дијаграм напон - издужење $\sigma_{st} - \varepsilon_{st}$ Слика 2.18 Упоредни приказ графика $\sigma - \varepsilon$ и $\sigma_{st} - \varepsilon_{st}$

Ако се од општег претходног дијаграма пређе на конкретне ливове од легура алуминијума, умиреног нискоугљеничног челика и нерђајућег феритног челика добијају се линије деформационог ојачања (сл. 2.19). Са слике се јасно види да се *меки челични ливови* (ознаке 1 и 2) и *ливови Al – легура* (ознаке 8 и 9) могу употребити за дубоко извлачење, јер су за њихово велико деформисање потребне релативно мале силе. Кад је у питању *нерђајући феритни лим* (17% Cr, 0.1% C - крива 7) и нисколегирани термостойани ливови (жарен - крива 5 и топловаљан и нормализован крива 6), потребне су велике силе за дубоко извлачење, па произлази да је нерационална израда отпресака од ових ливова. Зато се шкољке аутомобила праве углавном од меких челика, а у новије време и од Al-ливова (криве 1 и 2).

Између стварних напона и деформација са једне стране и техничких напона деформација са друге стране успостављене су везе:

$$\sigma_{st} = \sigma(1 + \varepsilon) \text{ и } \varepsilon_{st} = \ln(1 + \varepsilon).$$

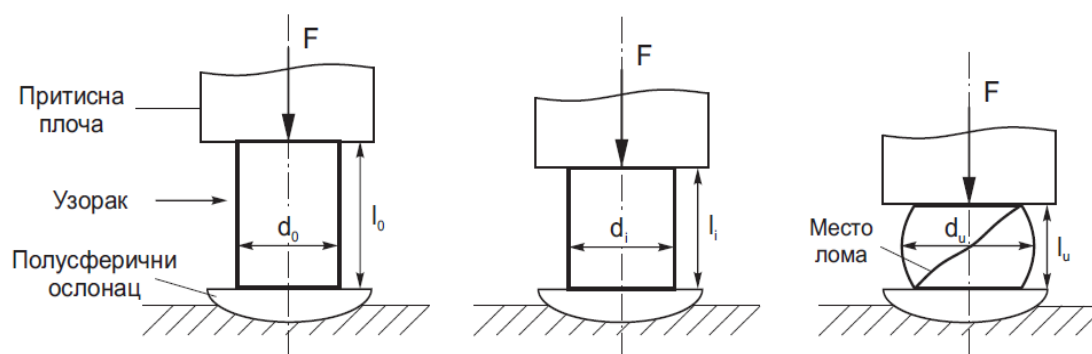


Слика 2.19 Дијаграм стварни напон-деформација (σ_{st} - ε_{st}) у дуло-логаритамском систему

2.3.2.6 Испитивање притискивањем

Овај вид испитивања првенствено се примењује за крпе материјале (сиви лив, месинг, камен, бетон, ...) за које се одређују својства отпорности (R_{cm} , $R_{cp0.2}$), а понекад и својства пластичности (A_c , Z_c).

Испитивање притиском се изводи на пробним узорцима цилиндричног или призматичног облика, висине 10 до 30 mm, при чему је висина 2.5 до 3 пута већа од пречника. За испитивање се користе пресе или универзалне машине, а потребно је да горња и доња површина узорка буду паралелне. Под дејством силе узорак се ломи па се за тај гранични случај одређују најважнија механичка својства. Схематски приказ испитивања притиском дат је на слици 2.20, а после испитивања се израчунавају својства отпорности и својства деформације.



Слика 2.20 Схематски приказ тока испитивања притискивањем: а) почетак испитивања, б) ток испитивања, в) крај испитивања

Својства отпорности:

Притисна јачина (чврстина, чврстоћа): $R_{cm} = \frac{F_{cm}}{S_0}$, МПа.

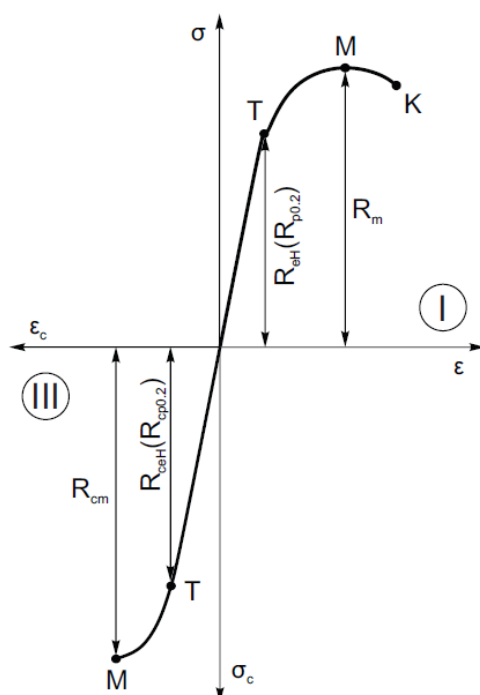
Граница гњечења: $R_{cp0.2} = \frac{F_{cp0.2}}{S_0}$, МПа.

Својства пластичности (деформације):

Скраћење: $A_c = \frac{l_0 - l_u}{l_u} \cdot 100, \%$.

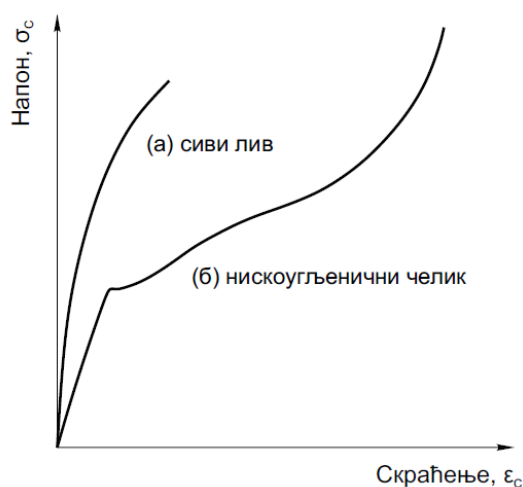
Раширење: $Z_c = \frac{S_u - S_0}{S_0} \cdot 100, \%$.

На слици 2.21 приказани су у истом координатном систему дијаграми добијени при испитивању затезањем - квадрант I и притискивањем - квадрант III. Уз дијаграме затезања и притиска уписане су и карактеристичне величине: напони течења и гњечења ($R_{p0.2}$ и $R_{cp0.2}$), затезна и притисна јачина (R_m и R_{cm}), као и тачке разарања узорка услед лома (K).



Слика 2.21 Карактеристични дијаграми σ - ϵ при испитивању затезањем и притискивањем

У зависности од тога да ли се на притисак испитује крт или пластичан материјал, на слици 2.22 приказани су одговарајући дијаграми (а- сиви лив, б- нискоугљенични челик).

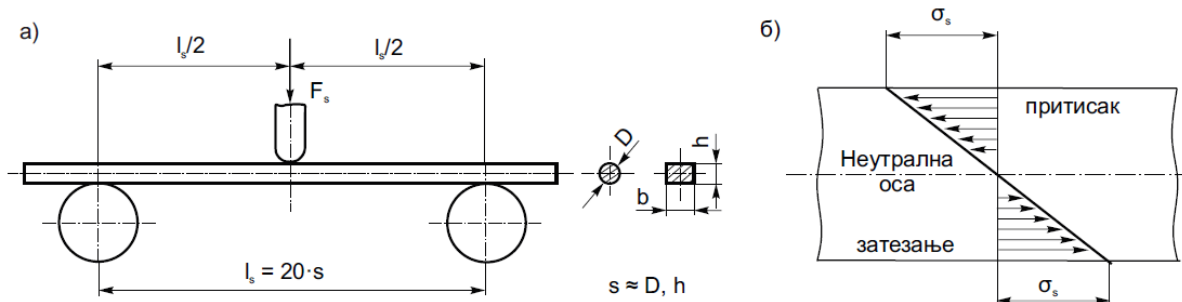


Слика 2.22 Графички приказ дијаграма притискивања (σ_c - ϵ_c) за сиви лив (а) и нискоугљенични челик (б)

2.3.2.в Испитивање савијањем

Овој врсти испитивања углавном се подвргавају крти материјали. При томе се одређује мањи број карактеристичних величина него при испитивању затезањем, поготову у области еластичних деформација.

Испитивање савијањем се изводи по моделу просте греде (сл. 2.23), оптерећене на средини силом F .



Слика 2.23 Схема испитивања савијањем (а) и расподела напона у попречном пресеку узорка у еластичној области (б)

Јачина на савијање (R_{sm}) израчунава се помоћу израза:

$$R_{sm} = \frac{M_{smax}}{W} = \frac{F_s \cdot l_s}{4 \cdot W}, \frac{N}{mm^2} (MPa),$$

где су:

M_{smax} – максимални момент савијања у Nmm ,

F_s – максимална сила у N и

W – отпорни момент пробног узорка у mm^3

За кружни попречни пресек пречника D у mm , отпорни момент се израчунава по изразу $W = \frac{D^3 \cdot \pi}{32}, mm^3$, односно за правоугаони $W = \frac{b \cdot h^2}{6}, mm^3$, а јачина на савијање,

$$R_{sm} = \frac{8 \cdot F_s \cdot l_s}{\pi \cdot D^3}, \frac{N}{mm^2}, \text{ односно } R_{sm} = \frac{3 \cdot F_s \cdot l_s}{2 \cdot b \cdot h^2}, \frac{N}{mm^2}.$$

Као мера деформације при савијању узима се величина угиба, односно угао савијања при настанку прве видљиве прслине у зони затезања (сл. 2.23б).

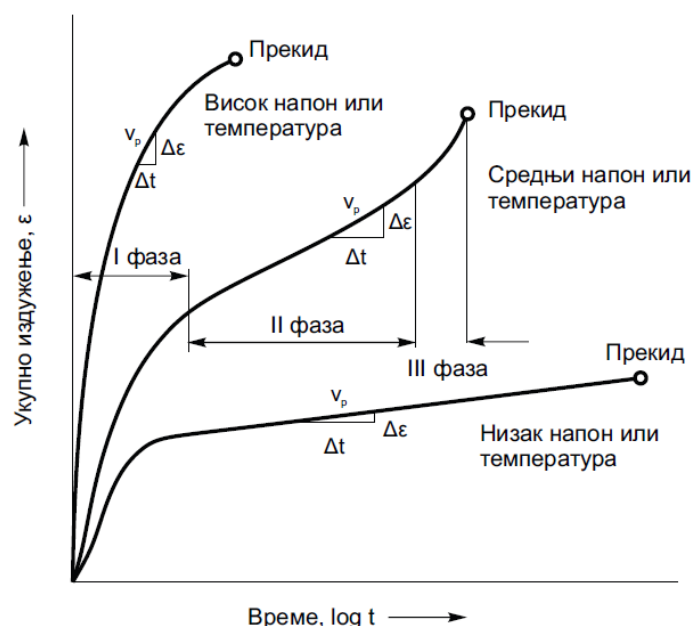
2.3.3 Испитивање затезањем на повишеним температурама

Испитивања метала и њихових легура на повишеним температурама могу се извести са већим или мањим брзинама деформисања. У првом случају добијају се подаци за процену могућности прераде метала пластичним деформисањем на топло. Само испитивање обавља се на машини за испитивање затезањем, опремљеној додатном комором за загревање пробних узорка електричним грејачима. Тестом се одређују исте карактеристике као при затезању на собној температури.

Далеко већи значај имају испитивања при малим брзинама деформисања. Показало се да трајна деформација материјала који раде на повишеним температурама настаје при знатно нижем напону од границе течења и да је зависна од времена. Ова врста деформације на повишеној константној температури и одређеном напон ($\sigma < R_{p0.2} \approx \text{const}$) зове се *пузање* (енгл. *creep*). Код многих конструкција које раде на повишеним температурама подразумева се одржавање сталних димензија делова у предвиђеном периоду експлоатације. Као пример могу се навести лопатице парних турбина које за око 10 година рада не смеју променити своје димензије више од 0.1%. Стога резултати испитивања на повишеним температурама омогућавају правилан избор материјала отпорног на деформисање и дају податке за пројектовање у циљу да се спрече прекомерне деформације.

Резултати испитивања на повишеним температурама, добијени при различитим константним напонима и температурама, графички су приказани на слици 2.24. Са средње криве уочавају се три фазе пузања (I, II и III) карактеристичне за средњи ниво

напона и средње температуре; у фази I течење се одвија убрзано, у фази II пузање је устаљено, а у фази III пузање је опет убрзано и претходи лому.



Слика 2.24 Типичне криве пузања

Из дијаграма пузања углавном се одређују три карактеристике:

- *Јачина на пузање*, тј. напон коме одговара минимална брзина пузања при датој температури,
- *Временска јачина на пузање*, тј. напон који после одређеног времена доводи до лома при датој температури и
- *Брзина пузања* $v_p = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t}$, која омогућава да се прорачуна поуздано време рада

машинског елемента пре појаве великих деформација (слика 2.24). Нагиб криве у фази II дефинише минималну брзину пузања.

Важна појава која прати пузање јесте релаксација напона заосталих при секундарној преради метала (нпр. ковањем, дубоким извлачењем, ливењем, заваривањем и тсл.). Ови напони су последица прераде материјала, а не спољашњег оптерећења. Заостали напони увек су праћени и локалним еластичним деформацијама сличним онима, кад се узорак држи затегнут испод R_{eH} у кидалици. Загревањем до температуре пузања, еластичне деформације прелазе у пластичне, тј. Настаје растерећење (релаксација). При термичкој обради попуштања напона неопходно је споро хлађење са температуре рекристализације, да би се спречиле нове еластичне деформације због неравномерне расподеле температура у току хлађења.

3. Начини одређивања модула еластичности

3.1 Уводне напомене

За сваки материјал и сваку врсту напрезања, у области важности Хуковог⁹ закона, постоје одређени односи између напона и њима изазваних деформација. Реч је о једном од најважнијих закона у механици. Математички, овај закон се изражава као једна проста линеарна зависност између напона (σ) и издужења (ε). Коефицијент еластичности (E) у највећем броју библиографских јединица означен је као Јангов¹⁰ модул. Међутим, пажљивим прегледом литературе може се утврдити следеће: када је Ојлер открио овај закон Јанг се није ни родио. Овим је начињена неправда према великом научнику какав је био Ојлер¹¹.

Код напрезања на затезање, притисак и савијање овај однос дат је модулом еластичности, а код напрезања на смицање и увијање модулом клизања. Као показатељи еластичних својстава материјала, модул еластичности и модул клизања, од највећег су практичног значаја.

Методологија одређивања модула еластичности заснива се на Хуковом закону: *Напон је пропорционалан деформацији.*

$$\sigma = E \cdot \varepsilon,$$

где је:

σ - нормални напон,

E – модул еластичности и

ε - релативно издужење

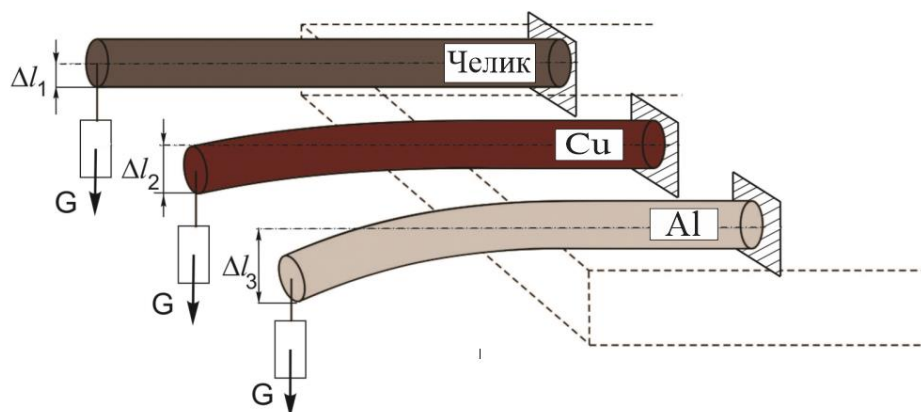
Модул еластичности је заправо чврстина између атома који чине материјал. То је карактеристика која одређује угиб односно крутост одређеног машинског дела ($B = E \cdot I_x$), где момент инерције зависи од облика попречног пресека. Реч је о константи материјала чија величина зависи од јачине/чврстине везе између атома у кристалној решетки.

Пример дат на слици 3.1 показује да ће различити материјали (нпр. челик, Cu и Al) истог попречног пресека, другачије поднети исти терет или оптерећење. Будући да алуминијум има готово скоро 3 пута мањи модул еластичности од челика његова деформација ће бити око 3 пута већа.

⁹ Robert Hooke (1635-1703), енглески математичар, професор геометрије на колеџу у Лондону. Први је открио линеарну зависност између силе и деформације, дао основне законе у теорији еластичитета и др.

¹⁰ Tomas Joung (1773-1829), енглески научник. Завршио медицинске студије, а бавио се механиком. Проучавао је звук, светлост, ударне појаве, ексцентрични притисак, извијање и др. 1807. године дао математичку формулацију Хуковог закона, уводећи при томе коефицијент пропорционалности између напона и деформација. Увео је у појам смицајног (тангентног напона).

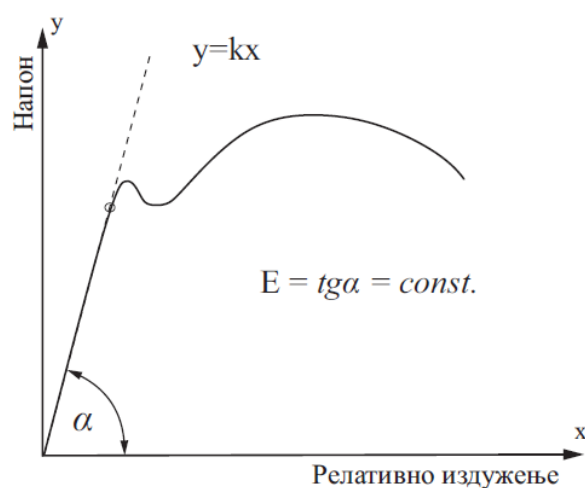
¹¹ Leonhard Euler, велики научник из области математике и механике (1707. Базел – Швајцарска, 1783. Санкт Петербург – Русија). Сматра се да је он први открио везу између напона и деформације уводећи коефицијент пропорционалности, која је много година касније приписана Томасу Јангу. Дао велики допринос изучавању еластичних линија и извијања притиснутих штапова у Отпорности материјала.



Слика 3.1 Понашање три различита метала под дејством истог терета

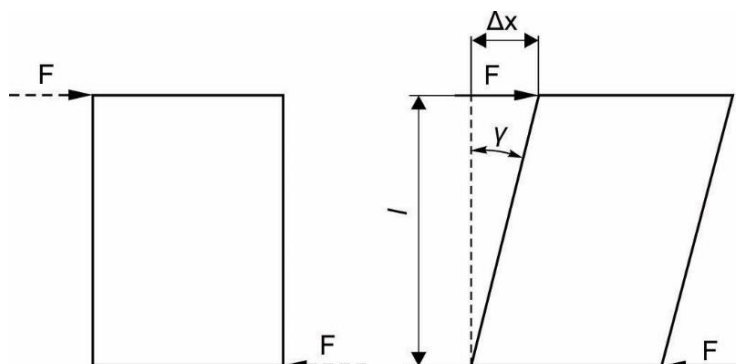
Наведени израз $\sigma = E \cdot \varepsilon$, у математичком смислу, представља једначину праве (експлицитна једначина праве је $y = k \cdot x$) у којој је модул еластичности коефицијент правца линеарног дела криве σ - ε (сл. 3.2). Стога се он може изразити на следећи начин:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \operatorname{tg} \alpha, \text{ где је } \alpha - \text{угао нагиба линеарног дела криве затезања.}$$



Слика 3.2 Дијаграм σ - ε за меки челик карактеристичан за оптерећење на затезање

Поред модула еластичности (E), треба споменути и модул клизања (G) који се дефинише при чистом смичућем оптерећењу материјала (сл. 3.3).



Слика 3.3 Илустрација смичуће деформације

И за напрезање на смицање важи Хуков закон и то: Смичући напон је сразмеран угаоној деформацији у области еластичности $tg\gamma = \frac{\Delta x}{l}$; $tg\gamma \approx \gamma$ за мале углове. Клизање је сразмерно тангенсијалном напону, а тангенсијални напон је дат изразом $\tau = G \cdot \gamma$, док је:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

где је:

G – модул клизања у MPa ,

τ – тангенсијални (смичући) напон у MPa ,

γ - угао нагиба изводница материјала у односу на почетни положај у rad (угаона деформација) и

ν – Поасонов¹² коефицијент.

3.2 Начин одређивања модула еластичности

Модул еластичности представља својство материјала и може се одредити:

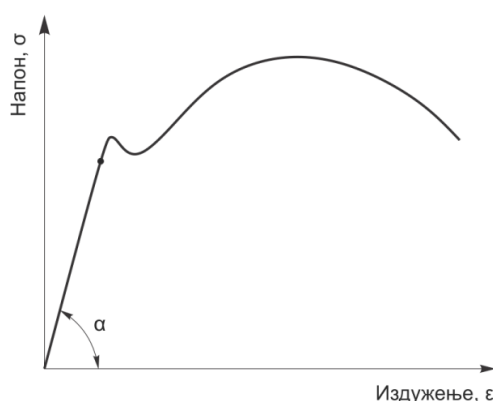
- 1) Графичком методом (из дијаграма $F-\Delta l$ односно $\sigma-\epsilon$) и
- 2) Рачунско-експерименталним методима (најчешће помоћу екстензометара).

3.2.1 Графичка метода

Помоћу графика $\sigma-\epsilon$ може се одредити приближна вредност модула еластичности.

Код материјала који имају изражен праволинијски део дијаграма напон-јединично издужење (нпр. за нискоугљенични челик) модул еластичности има сталну вредност до границе еластичности и као што се види са слике 3.4 једнак је тангенсу угла који праволинијски део дијаграма $\sigma-\epsilon$ заклапа са апсцисном ϵ - осом ($E = \frac{\sigma}{\epsilon} = tg\alpha$). Код неких

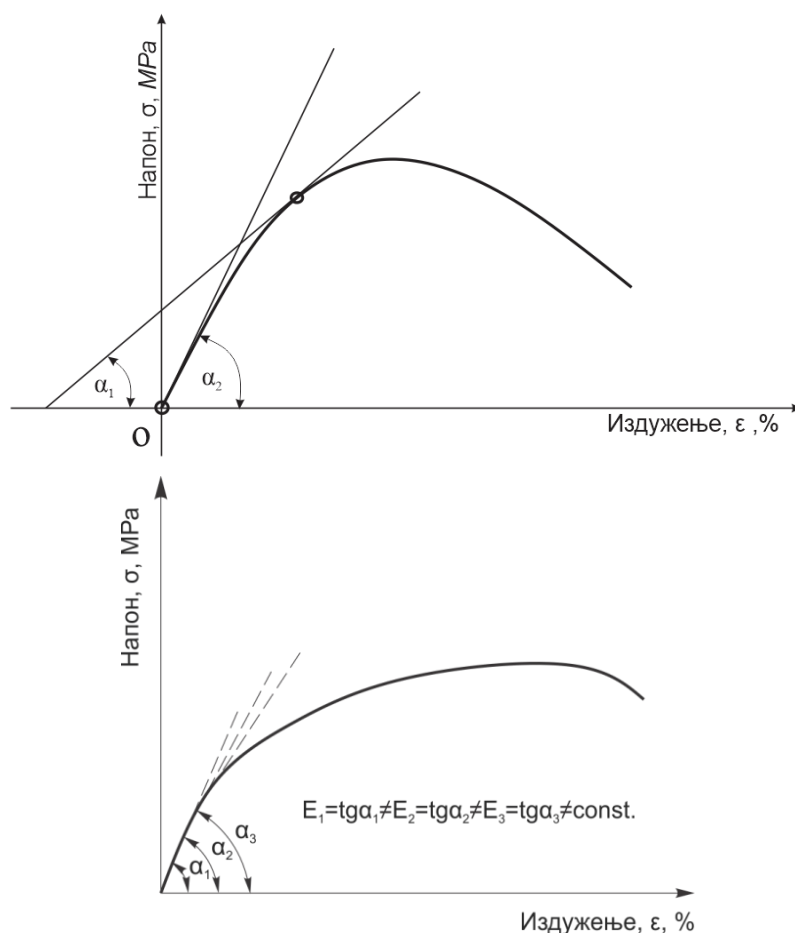
материјала који немају праволинијски део графика $\sigma-\epsilon$, нпр. бакра, модул еластичности зависи од оптерећења у границама еластичности.



Слика 3.4 Графичко одређивање модула еластичности нискоугљеничног челика са израженом границом течења

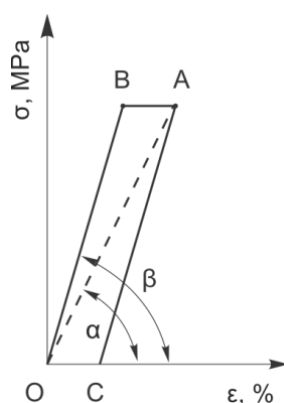
¹² *Simeon Denis Poisson* (1781-1840) - француски математичар. Завршио Политехничку школу у Паризу на којој је касније био професор више математике. Бавио се решавањем проблема теоријске физике применом математичких метода. Године 1812. изабран за члана француске Академије наука. Коефицијент - ν касније назван по његовом имену одредио је не експериментално, већ теоријски - на основу молекуларне теорије структуре материје.

Код материјала код којих није изражена линеарна зависност промене напона и издужења (нпр. алуминијума, бакра, цинка и др.) модул еластичности има у свакој тачки до границе еластичности другу вредност и у овом случају једнак је тангенсу угла који заклапа тангента у тој тачки дијаграма са апсисом (ϵ -осом, слика 3.5). Са дијаграма се може уочити да модул еластичности није константна величина већ се смањује са порастом напона.



Слика 3.5 Графичко одређивање модула еластичности код бакра

Треба напоменути да брзина пораста затежуће силе при одређивању модула еластичности има значајан утицај. При спором порасту силе температура узорка и околине остају исте за време експеримента. У том случају праволинијски део дијаграма ОА има нагиб $\tan \alpha$ (сл. 3.6), који дефинише величину изотермичког модула еластичности.



Слика 3.6 Изотермални и адијабатски модул еластичности ($E_A = \tan \beta > E_1 = \tan \alpha$)

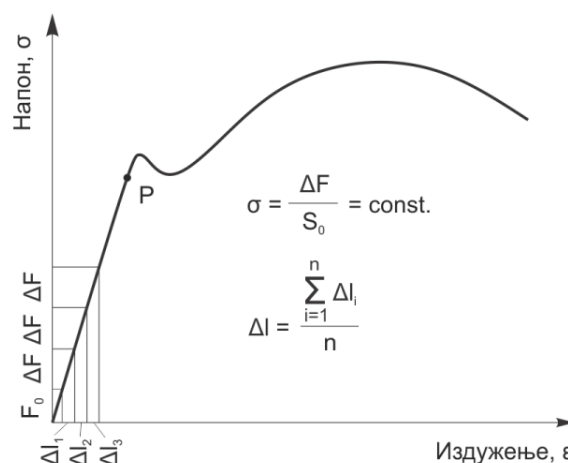
При брзом порасту затежуће силе изостаје равнотежна размена топлоте између узорка и околине. Услед брзог издужења, узорак се хлади испод околне температуре те пружа већи отпор затезању. Стога праволинијски део дијаграма кидања у адијабатским условима (права ОВ) има већи нагиб ($tg\beta > tg\alpha$), другим речима адијабатски модул еластичности је већи од изотермалног модула еластичности.

При одређивању модула еластичности нема ни чисто изотермичких ни чисто адијабатских деформација, будући да промена силе затезања није ни преспора, ни пребрза, јер је неизбежна промена температуре узорка и размена топлоте са околином. Тако се често реални дијаграм деформације може приказати у облику петље хистерезиса чија површина представља губитак механичке енергије по једном циклусу.

3.2.2 Одређивање модула еластичности екстензометром

Тачније одређивање модула еластичности изводи се у лабораторијским условима тако што се прецизно мере силе и њима изазване деформације. Веома мале деформације, настале при затезању, мере се прецизним мерним уређајима названим *екстензометрима*. Они могу бити механички (Мартенс-Кенедијев и са сатним механизмом), *оптички* и *електрични*. У последње време у примени су и бесконтактни екстензометри (оптички, ласерски, ласерско-оптички и тзв. видео-екстензометри). Такође, постоје екстензометри намењени за мерење деформација на повишеним температурама.

На специјално припремљеном узорку се најпре бира тзв. "база екстензометра" (L_{e0}), па се на узорку причвршћују два екстензометра (леви и десни) који у току затезања региструју веома мале деформације, независно један од другог. На дијаграму $F-\Delta l$ (сл. 3.7) приказан је начин мерења малих деформација (Δl_i) при константном прираштају силе (ΔF_i). Узорак је претходно оптерећен силом F_0 како би се отклонио утицај његовог проклизавања у чељустима кидалице.



Слика 3.7 Приказ сила и деформација битних за одређивање модула еластичности екстензометром

Измерене вредности деформација испитиваног узорка за израчунавање модула еластичности узимају се као средња вредност свих деформација (Δl_i) насталих у току испитивања:

$$\Delta l = l - L_{e0} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta l_i}{n}.$$

Подаци добијени из више узастопних мерења (повећањем броја измерених издужења или серије испитивања) знатно се смањује утицај грешке мерења. Зато је

уобичајено да се испитивања изводе бар у две серије с тим да се у другој односе најчешће на нову вредност прираштаја силе (ΔF), која се задржава константном у току извођења одговарајуће серије испитивања. На истом узорку се према резултатима мерења одређује модул еластичности помоћу израза:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{\Delta F}{S_0}}{\frac{\Delta l}{L_{e0}}} = \frac{\Delta F \cdot L_{e0}}{S_0 \cdot \Delta l}; \text{ заменом } \Delta l \text{ из претходног израза добија се:}$$

$$E = n \cdot \frac{\Delta F \cdot L_{e0}}{S_0 \cdot \sum_{i=1}^n \Delta l_i},$$

где су:

E - модул еластичности у MPa ,

n - број серије мерења,

ΔF - прираштај силе у N ,

L_{e0} - мерна дужина екстензометра у mm ,

S_0 - површина попречног пресека узорка у mm^2 и

Δl_i - измерено издужење у mm .

Крајња вредност модула еластичности израчунава се помоћу израза за хармонијску средину резултат добијених из обе серије:

$$E = \frac{2 \cdot E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2},$$

где су: E_1 и E_2 - вредности модула еластичности одређене у првој, односно другој серији испитивања.

3.2.2.1 Инструменти за прецизно мерење деформација – екстензометри

Деформације које настају у епрувети уобичајених димензија, при напонима у области еластичности, толико су мале да се не могу визуелно уочити ако се не употребе неки системи за њихово увећање. За ту сврху користе се инструменти – екстензометри, који могу бити конструисани на механичком, оптичком или електричном принципу.

Екстензометри се користе за мерење деформација не само на епруветама, већ и на готовим машинским или грађевинским конструкцијама. Циљ испитивања готових конструкција обично се своди на то да се, користећи се основама елементарне науке о чврстоћи, односно аналитичким везама између напона и деформација, одреде максимални напони у појединим деловима конструкције.

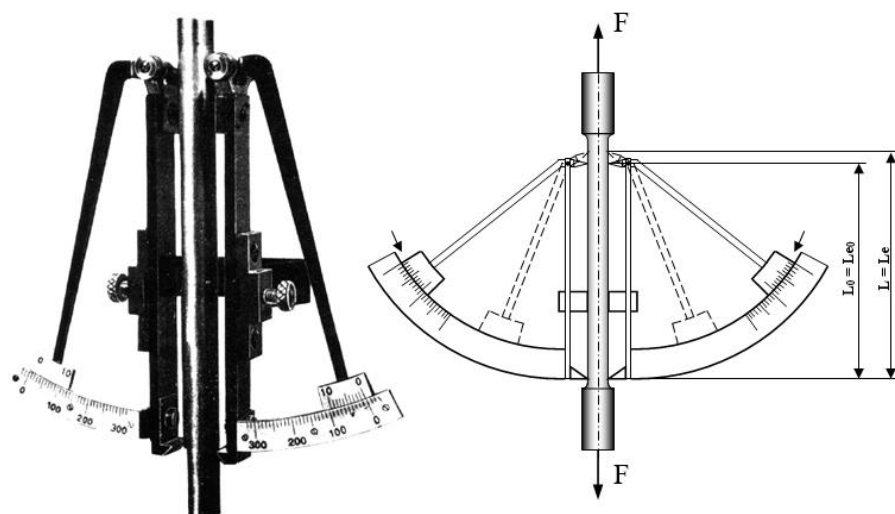
При мерењу деформација екстензометар се на одређени начин причврсти уз епрувету или део конструкције чија се деформација жели измерити. Механички и оптички екстензометри се ослањају на епрувету или део конструкције преко сечива или шиљака у две тачке чије је растојање једнако мерној дужини. Овај размак се назива још и база екстензометра. Једна тачка базе је непокретна а друга се помера при деформисању материјала. Ово померање се увећава и читава на инструменту. Главне потешкоће при конструисању екстензометра везане су за систем увећања, од којег се захтева да буде довољно тачан, поуздан и лак за коришћење. Потешкоће су веће ако се захтева краћа база екстензометра. Такви захтеви се намећу код мерења деформација на кратким епруветама или малим деловима машина, односно конструкција.

3.2.2.1.а Мартенс-Кенедијев екстензометар

Механички екстензометар типа Мартенс - Кенеди (*Martens - Kenedy*), приказан на слици 3.8, састоји се од два независна симетрична дела који су еластичном опругом притиснути уз испитивани узорак. На сваком делу налази се непокретан и покретан нож. Екстензометар ради на принципу разностраних полуга, при чему казаљке показују издужење увећано 50 до 100 пута. Растојање између покретних и непокретних ножева је у ствари база екстензометра. Нонијусна подела на крају казаљке омогућава мерење деформација реда величине 0.005 mm .

Екстензометри се постављају тако да замишљена раван у којој леже оба инструмента, пролази кроз осу симетрије испитиваног узорка. Регистрована мала издужења међусобно су независна и истовремено се читавају са левог ($\Delta l'$), односно десног екстензометра ($\Delta l''$). Носач Мартенс-Кенедијевог екстензометра се, на једном крају, завршава непокретним ножем (сечивом), а покретним на другом крају (сл. 3.8а). База екстензометра (L_{e0}) може бити једнака почетној мерној дужини испитиваног узорка (l_0).

Под дејством силе F долази до издужења узорка за вредност $l - L_{e0}$ (сл. 3.8б). Ако нема проклизавања између ножа и површине узорка, тада због издужења настаје закретање горњег покретног ножа и померање нонијуса у односу на главну скалу (приказано испрекиданим линијама). Очитани број подеока одговара промени издужења пробног узорка Δl . Основна карактеристика екстензометра јесте "коэффициент увећања" уобичајене вредности $k = 100$ код механичких инструмената типа Мартенс-Кенеди. Његова вредност је видно обележена на сваком инструменту.



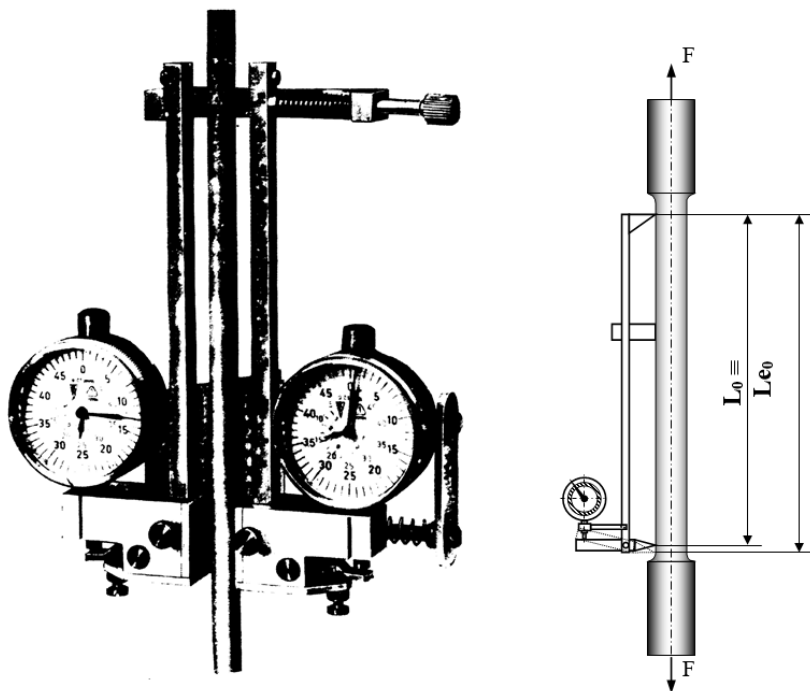
Слика 3.8 Мартенс - Кенедијев механички екстензометар са нонијусом

3.2.2.1.б Механички екстензометри са сатним индикатором

Код другог типа екстензометра на испитивани узорак се постављају два инструмента са сатним индикатором (сл. 3.9а), који, као и у претходном случају, региструју издужења потпуно независно један од другог. За узорак су инструменти притегнути помоћу механизма са опругом. Издужења се читавају независно на оба инструмента.

База екстензометра (L_{e0}) може да се подешава померањем горњег непокретног ножа у распону од 30 до 120 mm . Покретан нож је везан за један крај једнокраке полуге, док њен други крај преко спрегнутих зупчаника и зупчасте летве, помера казаљке на скали индикатора, (сл. 3.9б). Ако нема проклизавања између ножева и површине испитиваног узорка, доћи ће до закретања полуге пропорционалног издужењу ($l - L_{e0}$); то издужење

се вишеструко увећава преносом преко зупчaste летве и зупчаника, тако да кретање велике казаљке одговара коефицијенту увећања $k = 100$. Малом казаљком се региструје број пуних кругова које начини велика казаљка.



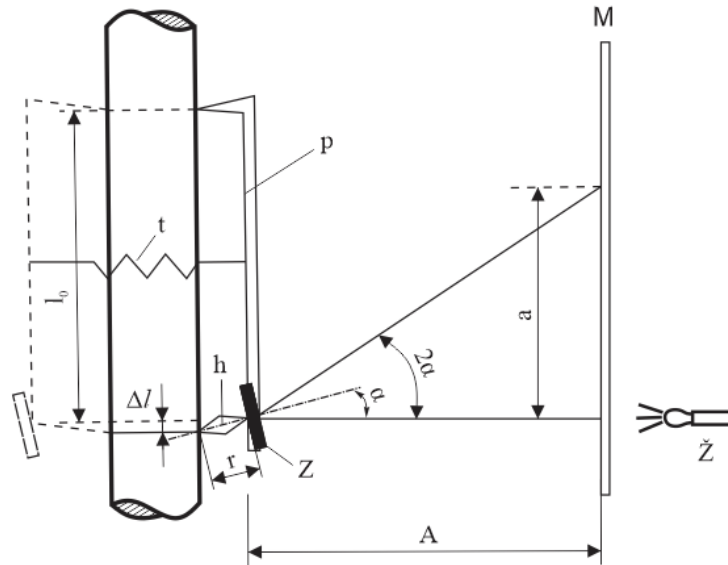
Слика 3.9 Механички екстензометар са сатним индикатором

3.2.2.1.в Оптички екстензометар са Мартеновим огледалима

Овај инструмент мери мала издужења са много већом тачношћу него механички, јер код њих нема трења и празних ходова. Они се углавном примењују за врло прецизна лабораторијска мерења малих издужења ради одређивања модула еластичности, с обзиром на то да им је тачност мерења реда 0.0005 mm .

У зависности од усвојене почетне мерне дужине узорка (l_0) база екстензометра (L_{e0}) може се бирати у опсегу 50, 100, 150 и 200 mm , што одговара расположивим дужинама носача екстензометра. На испитивани узорак се постављају два инструмента тако да буду у равни која пролази кроз осу симетрије епрувете. При сваком читавању бележе се по две вредности оствареног издужења (Δl).

На слици 3.10 приказан је Мартенов екстензометар или како се још понекад назива, Мартеново огледало. Помично сечиво (h) има облик призме на коју је причвршћено огледало (Z). Сечиво призме лежи у плитком жлебу који је урезан по обиму испитиваног узорка. Издужење узорка (Δl) при затезању одређује се помоћу светлосног зрака који са извора ($\check{Z}$) пада на огледалце и од њега се одбија на лењир са милиметарском поделом (M).



1 - узорак, l_0 - база екстензометра (L_{e0}), P - носач ножева, Δl - издужење узорка, H - покретан нож, Z - огледалце, M - лењир, A - растојање између ножа (h) и лењира (M), $r = 4 \text{ mm}$ је дијагонала призме (константа инструмента)

Слика 3.10 Принцип рада Мартеновог оптичког екстензометра

Према подацима са слике 3.10 може се срачунати издужење Δl : $\Delta l = r \cdot \sin \alpha$, што одговара померању светлосног зрака на лењиру: $\alpha = \text{Atg } 2\alpha$.

Повећање ће према томе бити:

$$n = \frac{\alpha}{\Delta l} = \frac{A \cdot \operatorname{tg} 2\alpha}{r \cdot \sin \alpha}.$$

Будући да је угао α мали, може се усвојити да је $\operatorname{tg} 2\alpha \approx 2\alpha$ и $\sin \alpha \approx \alpha$, па је:

$$n = \frac{\alpha}{N} = \frac{A \cdot 2\alpha}{r \cdot \alpha} = \frac{2A}{r}.$$

Дијагонала призме (r) је константа инструмента, па увећање (n) зависи првенствено од растојања (A) лењира од огледала.

На пример, за $r = 4 \text{ mm}$ и $A = 1000 \text{ mm}$ увећање ће износити: $n = \frac{2 \cdot 1000}{4} = 500$, тј.

померање светлосног зрака по лењиру за 1 mm одговара издужењу узорка за 1/500 mm. Будући да је скала на лењиру милиметарска, десети делови од милиметра се могу проценити, па је на тај начин могуће мерење деформација са тачношћу од 1/5000 mm.

3.2.2.1.д Електрични екстензометри (мерне траке)

Електрични екстензометри (мерне траке или тензометри) у ствари су претвараачи механичких издужења у електричне величине. Принцип њиховог рада је заснован на промени електричног отпора у жичаном проводнику велике дужине и малог попречног пресека (пречника око 0.02 mm) кроз који се пропушта струја ниског напона (око $4\text{--}6\text{ V}$). Омски електрични отпор мерних трака креће се у интервалу $100\text{--}200\text{ }\Omega$ (и до $250\text{ }\Omega$), што се своди на дужину, док је укупан отпор:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{S}, \Omega,$$

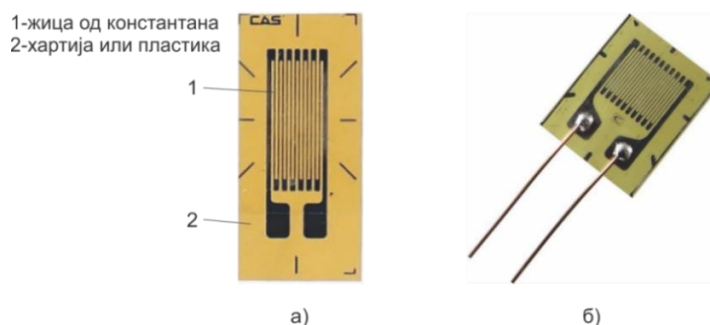
где је:

ρ - специфична електрична отпорност материјала проводника у Ωm ,

L - дужина проводника у m и

S - површина попречног пресека проводника у m^2 .

Заменом наведених вредности параметара мерних трака у претходни израз (при $\rho = 49 \cdot 10^{-8}$, Ωm за жицу од константана: 60% Cu, 12% Mn, 4% Ni) добија се дужина $L = 80 - 200 mm$. Како она може бити и већа, конструкција мерне траке се реализује у облику приказаном на слици 3.11. Савијена жица лепи се на танки специјални папир чиме се одржава цик-цак облик и изолација проводника од материјала на који је трака залепљена; при напрезању настају деформације мерне траке које се региструју на мерним утређајима. Дужине мерних трака крећу се $2.5 - 150 mm^2$, а ширине $3 - 60 mm$.



Слика 3.11 Мерна трака (а) и изглед мерне траке (б)

Мерним тракама се могу регистровати деформације у једном или више праваца. У свим случајевима настала деформација се одређује према промени дужине проводника и термогеног отпора, па се осетљивост мерних трака изражава односом релативне промене отпора $\Delta R/R$ и релативне промене издужења (скраћења) $\Delta L/L$:

$$k = \frac{\Delta R}{R} : \frac{\Delta L}{L}.$$

Осетљивост мерне траке зависи од врсте материјала проводника и креће се око 2.0, а тачан податак даје произвођач. За сваку траку морају бити познате вредности отпора (R) и дужине (L).

Пошто према Хуковом закону за област пропорционалности важи:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon,$$

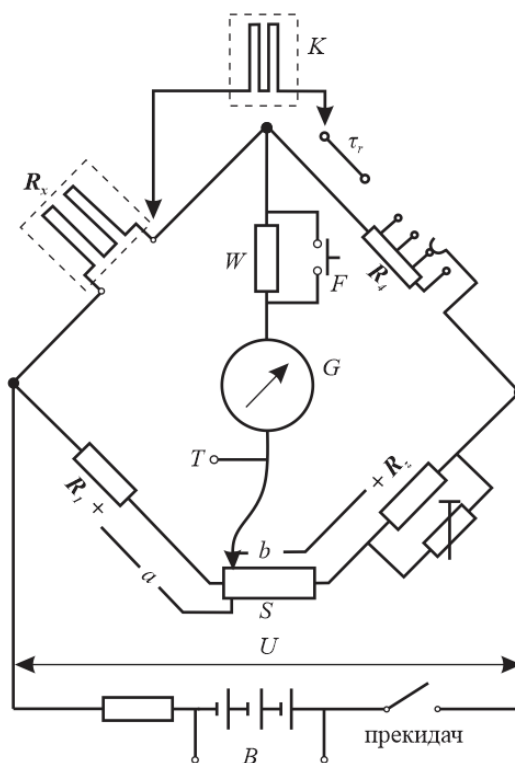
то је могуће мерењем деформације мерити посредно и напон:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \frac{\Delta L}{L} = \frac{E}{k} \cdot \frac{\Delta R}{R}.$$

Тачност мерења увелико зависи од правилно залепљене траке на пробни узорак, коаксијалности мерне траке са правцем деформације и опсега температура препоручених за дату траку.

Одређивање издужења помоћу Витстоновог моста при статичком оптерећењу

Мерење овим мостом (сл. 3.12) при статичком оптерећењу може бити спроведено по нултој методи или методом читавања вредности. Први начин је тачнији, али му је мана дуже време утрошено за мерење, али је ипак погоднији за статичка испитивања. Метод директног читавања је погоднији због краћег времена мерења, а посебно кад се контролише већи број мерних места, нарочито када је реч о динамичким испитивањима. Схема Витстоновог моста приказа је на слици 3.12



Слика 3.12 Схема Витстоновог моста

Нулта метода

На једној грани Витстоновог моста постави се и на извор струје прикључи мерна трака (на слици 3.12 означена са R_x) и са променљивим отпорником (R_k) се подешава отпор друге стране моста све док галванометар не покаже нулту вредност (струја не протиче). Овако се поступа пре затезања пробног узорка на коме је залепљена мерна трака. Када се узорак затеже, истеже се мерна трака, па се мења и електрични отпор траке ($R_x + \Delta R$), па казаљка осетљивог галванометра скреће. Подешавањем променљивог отпорника на другој страни Витстоновог моста тако да галванометар поново дође на нулу, може се одредити промена отпора на мерној траци; (ΔR) је величина сразмерна издужењу (Δl) изазваног дејством силе (ΔF). Понављањем описаног мерења више пута, може се срачунати средња вредност издужења односно деформације (Δl). Овај начин мерења примењује се само код статичких оптерећења. Остали отпорници у струјном колу имају регулациону улогу - да компензују могуће грешке, отклоне спољне утицаје и повећају тачност мерења.

Вредност модула еластичности за неке најважније инжењерске материјале дата је у табелици 3.1.

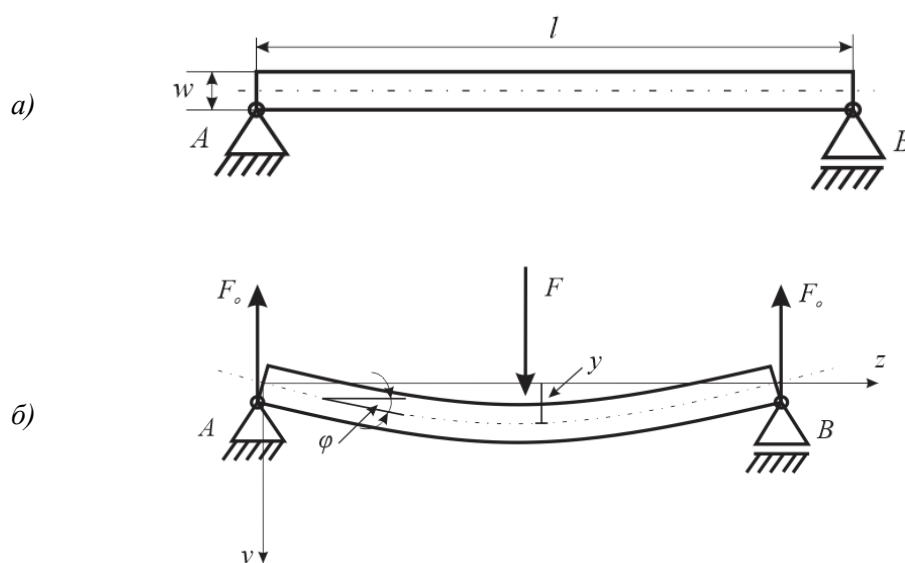
Таблица 3.1 Вредности модула еластичности за неке метале и легуре

Материјал	Модул еластичности, Е, МПа
Алуминијум	70300
Бакар	112500
Месинг	105000
Сиви лив	100000
Угљенични челик	215000
Легирани челик	220000

3.2.3. Одређивање модула еластичности материјала мерењем угиба греде оптерећене савијањем

3.2.3.1 Диференцијална једначина еластичне линије

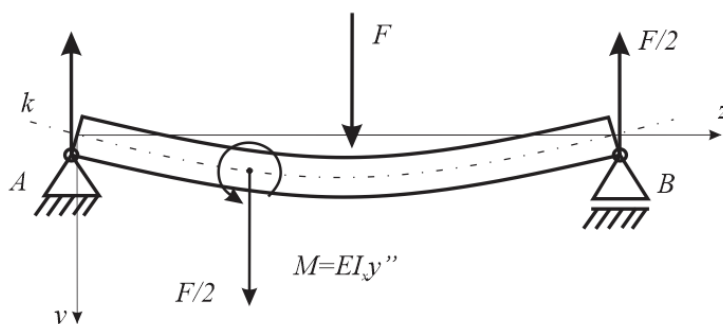
Греда изложена силама мења свој облик и тиме се деформише. Карактеристика деформације при савијању састоји се у томе што оса греде из праволинијског облика прелази у криволинијски (сл. 3.13). Облик који заузима оса греде при деформацији зове се *еластична линија* (сл. 3.14). Она се налази у неутралној равни греде. Облик еластичне линије зависи од оптерећења и његовог распореда дуж греде. Еластичну линију у свакој тачки одређује угиб и нагиб. У Отпорности материјала се разматрају само мале деформације, па су угиби и нагиби мале величине. Угиб (y) представља праволинијско померање неке тачке на греди од њеног почетног положаја, а нагиб (φ) угао тангенте на еластичну линију у тачки и првобитно недеформисане подужне осе греде. Задатак који се поставља састоји се у дефинисању погодних метода за одређивање еластичних линија.



Слика 3.13 Греда ослоњена на два ослоња: а) неоптерећена и б) оптерећена силом F

Еластичне линије представљају меру деформације при савијању. Оне налазе примену у следећим случајевима:

- при испитивању/одређивању савојне крутости греде ($B = E \cdot I_x$) и провери/одређивању да ли су деформације греде у дозвољеним/прописаним границама и
- за формирање допунских једначина код статички неодређених греда на основу геометријских веза деформација. I_x

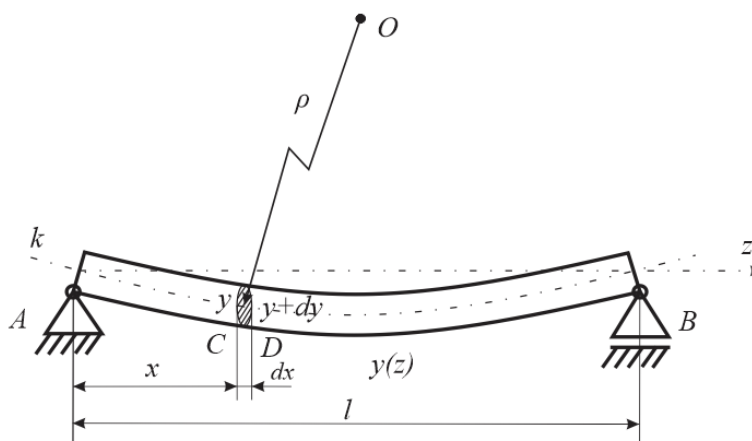


Слика 3.14 Греда оптерећена силом F

При дефинисању нормалних напона може се успоставити зависност између кривине осе греде и момента савијања:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{E \cdot I_x},$$

где је $1/\rho$ кривина (сл. 3.15) у пресеку у коме делује момент савијања M . Овом величином изражавају се деформације при савијању. У општем случају M и I_x су променљиве величине и зависне од положаја пресека па је и величина кривине такође променљива. Најчешће је облик еластичне линије парабола првог или другог степена. У специјалном случају кад је $M = \text{const}$ и $I_x = \text{const}$ тада је и $\frac{1}{\rho} = \text{const}$.



Слика 3.15 Кривина осе греде где је ρ полупречник кривине ($\kappa=1/\rho$)

У овом случају еластична линија је део кружног лука (види слике 3.13б и 3.14). За пресеке у којима је $M = 0$ и $1/\rho = 0$ или $\rho = \infty$. То значи да су те тачке на еластичној линији превојне тачке; еластична линија из конкавног прелази у конвексни облик или обратно.

Иако величина $1/\rho$ представља меру деформације при савијању, она се из чисто практичних разлога не користи у оваквом облику, већ се изражава кривом линијом облика $y = f(x)$, где је y -ордината еластичне линије у датом пресеку.

Ако је еластична линија дата у облику $y = f(x)$, онда се за сваку тачку ове криве може одредити кривина помоћу следећег израза:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{y''}{\pm(1+y'^2)^{3/2}}.$$

Такође, може се и обрнуто наћи еластична линија ако је позната кривина за сваку њену тачку. Пошто је кривина одређена једначином $\frac{1}{\rho} = \frac{M}{E \cdot I_x}$, то се сменом у претходну једначину добија:

$$\frac{y''}{\pm(1+y'^2)^{3/2}} = \frac{M}{E \cdot I_x}.$$

Ово је општа диференцијална једначина еластичне линије греде. Њено решење се добија двоструким интегралењем. Решавање ове диференцијалне једначине у овом

облику је сложено, па се решавање знатно упрошћава ако се претпостави да су нагиби тангената y' мале величине, што је у практичним случајевима испуњено. Према овој претпоставци је y'' врло мала величина која се може занемарити у односу на 1. Под овом претпоставком горња једначина еластичне линије добија следећи облик:

$$y'' = \pm \frac{M}{E \cdot I_x}.$$

Ако је еластична линија конвексна према позитивном смеру у-осе, онда када x расте y' стално опада, а тиме је за сваку тачку $y'' < 0$. У овом случају диференцијална једначина има облик:

$$y'' = - \frac{M}{E \cdot I_x}.$$

За случај еластичне линије греде константног момента инерције и оптерећене концентрисаном силом F , уочава се да је еластична линија конвексна према позитивном смеру у-осе и има горе наведени облик (парабола првог реда). Детаљним решавањем диференцијалне једначине узимајући у обзир промену момента у сваком пресеку и за случај да концентрисана сила делује по средини греде добија се вредност угиба:

$$f_{x=\frac{l}{2}} = \frac{F \cdot l^3}{48 E \cdot I_x},$$

где су:

f - угиб,

F – концентрисана сила савијања,

l - растојање између ослонаца,

E - модул еластичности и

I_x – аксијални момент инерције за неутралну осу савијања.

Из горње једначине за израчунавање угиба можемо закључити да је модул еластичности:

$$E = \frac{F \cdot l^3}{48 f \cdot I_x}.$$

Овај израз се односи на област еластичних деформација које се могу дефинисати следећим условом:

$$\sigma \cdot \frac{M_f}{W} \leq \sigma_e,$$

где су:

σ - напон,

W - отпорни момент за дати попречни пресек и

σ_e - граница еластичности.

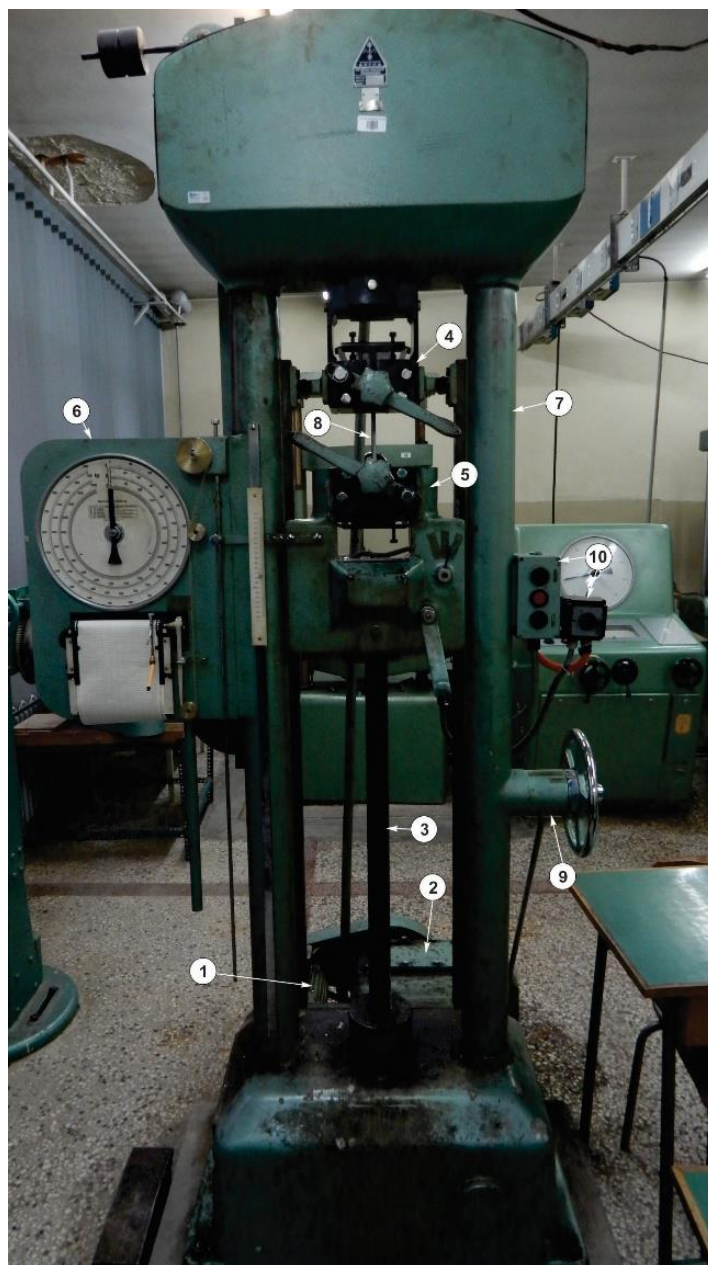
На основу израза за модул еластичности конструисани су прилично једноставни уређаји за његово израчунавање. Задавањем познате силе, уз познато растојање између ослонаца и одређивањем момента инерције за дати пресек штапа (греде) и уз прецизно мерење угиба може се одредити модул еластичности вишеструким оптерећивањем и растерећивањем испитиваног узорка материјала различитог попречног пресека. Још једном се треба подсетити да деформације/угиби морају бити у области еластичности. Дакле, по престанку оптерећења штап/греда се враћају у почетни положај.

4. Припрема опреме и избор узорака за експериментална испитивања

4.1 Механичка кидалица

Кидалица је мерни уређај или машина за испитивање материјала. Према принципу рада могу бити механичке (сл. 4.1) и хидрауличне (сл. 4.26). У зависности од начина на који се остварује сила стезања, стезне чељусту могу бити механичке, хидрауличне и пнеуматске (сл. 4.3).

На слици 4.1 приказани су делови механичке универзалне кидалице.



Слика 4.1: Делови механичке кидалице: 1- погонски електромотор, 2- редуктор, 3- пужни преносник и завојно вретено, 4- горње (непокретне) чељусту, 5- доње (покретне) чељусту, 6- мерни уређај, 7- рам машине, 8- узорак, 9- уређај за дефинисање брзине деформисања, 10- прекидачи

Хидрауличне машине за испитивање имају неке предности над механичким, управо у коришћењу знатно већих оптерећења и могућности финијег регулисања пораста оптерећења, као и већу тачност при испитивању. Свака кидалица се састоји од:

- уређаја за задавање силе (механички или хидраулични),
- уређаја за преношење силе,
- уређаја за мерење деформација испитиваног материјала,
- уређаја за приказивање (запис или меморисање вредности) дијаграма $F - \Delta l$.

Поред затезања, универзална кидалица се може користити и при испитивању материјала на притисак, савијање и смицање. Подразумева се, додатком специјалних прибора.

Машине са хидрауличким погоном називају се популарно хидрауличким пулзаторима. Изглед расположиве машине са пратећим компонентама приказан је на слици 4.2б. Врсте стезних чељусту приказане су на слици 4.3.

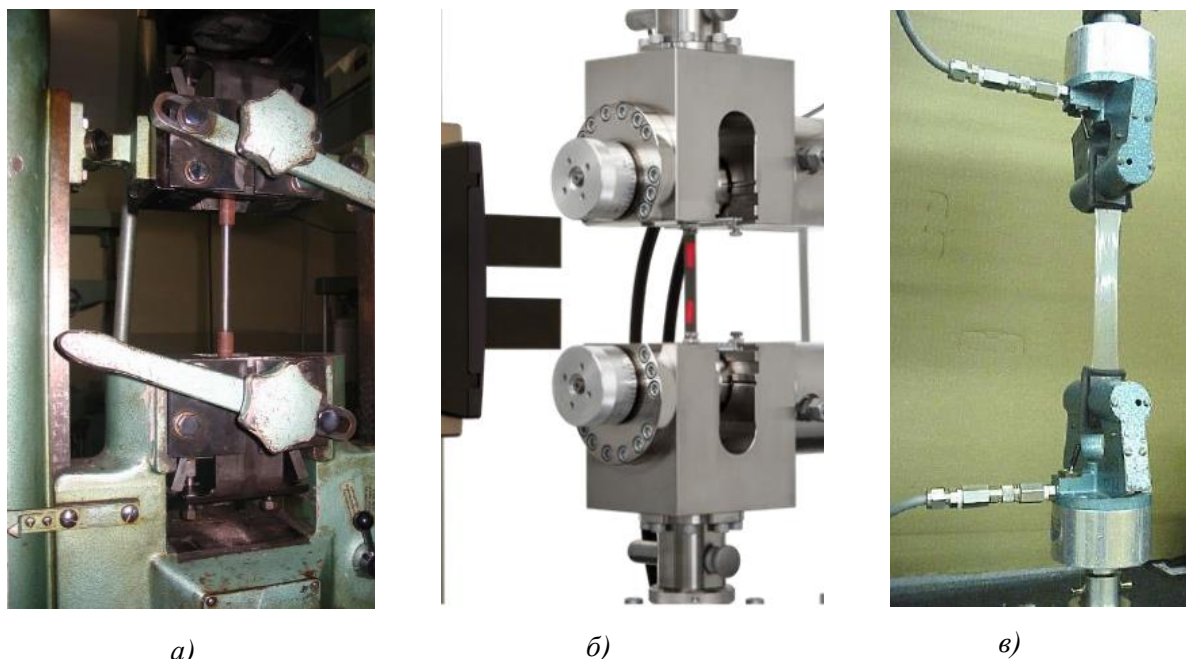


а)

б)

Слика 4.2 Подела кидалица према принципу рада а) механичка кидалица, б) хидраулична кидалица

Код динамичких испитивања на овде приказаној машини погон се остварује преко пулзатора смештеног у посебно кућиште. Пулзатор се покреће електромотором, а главни његов елемент је цилиндар са клипом. Фреквенција клипа се може регулисати променом броја обртаја мотора. Клипни простор пулзатора повезан је широком цеви са погонским цилиндром машине. Тако се остварује промена оптерећења у истом ритму у коме клип пулзатора осцилира. Када машина ради са пулзатором, на другом командном уређају се могу очитати максимални и минимални напон (сила) при динамичком оптерећењу, укупан број промена оптерећења и жељени број промена оптерећења у јединици времена (фреквенције од $500 - 1500 \text{ min}^{-1}$).

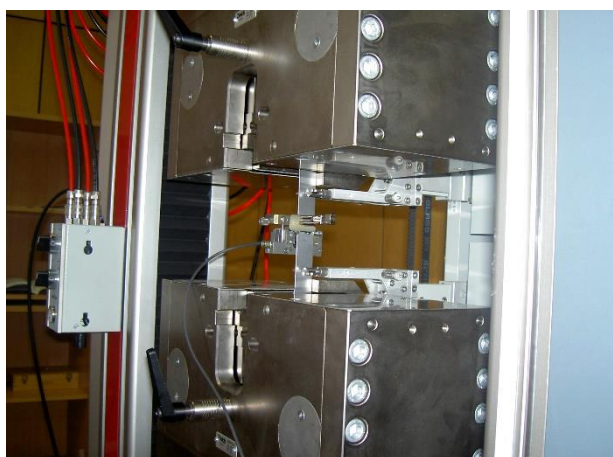


Слика 4.3 Врсте стезних чељусту: а) механичке, б) хидрауличне и в) пнеуматске

Савремена универзална машина за испитивање материјала ZWICK/ROELL Z 100 (сл. 4.4) је набављена од водећег светског произвођача овакве опреме. Намењена је за механичка испитивања затезањем, притискивањем и савијањем, како на собним тако и на повишеним и високим температурама (до 1000°C). Опсег номиналне силе је 0-100 kN. Има бројне предности над механичком кидалицом: високу тачност (ход испод 1 μm ; сила 0.16% расположивог опсега), могућност рада са константном брзином деформисања, могућност програмског прекида према критеријуму достигнуте силе или деформације, пнеуматске стезне чељусту са максималном силом стезања од 180 kN, извођење специфичних испитивања; све наведено садржано је у лиценцираном софтверском пакету *Test Xpert* и др. Препоручује се да овом машином рукује високообучени кадар.



а)



б)

Слика 4.4 Универзална машина за испитивање материјала ZWICK/ROELL Z 100 (а) и изглед екстензометара постављених на мерни узорак (б)

Узорак материјала који се испитује обрађује се на одређени облик и димензије прописаних одговарајућим стандардима. Узорци припремљени на овај начин називају се често и епрувете (специјално припремљени узорци за испитивање разарањем). Поред специјално припремљених узорака користе се за испитивање затезањем и цеви кружног, квадратног и правоугаоног попречног пресека. Користе се и ланци, ужад, сајле и друге врсте готових полупроизвода или финалних производа (тзв. непропорционални узорци).

4.2 Припрема узорака за експериментална испитивања

Почетна дужина мерења испитног узорка или епрувете за кратке пропорционалне епрувете је $l_0 / d_0 = 5$, а за дуге пропорционалне епрувете $l_0 / d_0 = 10$, где је d_0 мерни пречник епрувете. Почетна мерна дужина цеви за непропорционалне цеви не зависи од пречника d_0 . Цеви за жице и шипке пречника до 4 mm морају имати почетну мерну дужину $l_0 = 200 \pm 2 \text{ mm}$ или $l_0 = 100 \pm 1 \text{ mm}$. Испитни узорци за листове и траке дебљине 0,1 до 3 mm морају се припремити на ширину од 12,5 mm, односно 20 mm, са почетном дужином мерења l_0 од 50 до 80 mm и почетном мерном дужином од 75 mm, односно 120 mm.

Крајеви епрувете чврсто се стежу у чељустима кидалице да се не би померали/клизали приликом извођења експеримента. Чињеница да су пресеци крајева већи од пресека средњег дела условљава велико специфично оптерећење и видно затезање средњег дела епрувете (сл. 4.5). Од епрувета које су коришћене у првом делу експеримента само је челична била припремљена у складу са прописима. Епрувете од алуминијума и месинга само су одсечене на потребну меру и нису биле истог попречног пресека. У другом делу експеримента све три епрувете су биле обрађене у складу са прописима, истог попречног пресека и истих димензија. Пре почетка код оба експеримента епрувете су затегнуте иницијалном силом (100 daN) како би се смањио ризик од проклизавања епрувета у чељустима машине.



Слика 4.5 Изглед епрувете у чељустима машине за испитивање

Поред стандардних узорака (епрувета) за испитивање затезењем (сл. 4.6а), као што је напоменуто, користе се и непропорционалне епрувете или делови готових производа (сл. 4.6б). То су ланци, челична ужад, цеви, разни профили, жица, готови делови машина, итд. Наравно, мисли се на исечене делове ланца, сајле, цеви и др. Ове епрувете нису посебно обрађене, али испитивање се изводи у стању у којем су уграђене у конструкцију. Површина стандардних узорака (епрувета) за испитивање затезењем мора се фино обрадити без огреботина и трагова обраде, а прелазак са тела на главу епрувете мора се обавити прописаним заокруживањем, радијусом.



а) Стандардни облици епрувета/узорака – цилиндрични и плочасти



б) Непропорционалне епрувете/узорци

Слика 4.6 Врсте епрувета за испитивање затезањем

Како би експеримент био потпун, поред модула еластичности, било је потребно упоредити и издужења услед дејства силе. У првом делу експеримента епрувете нису биле истог попречног пресека, па се из добијених резултата могао упоредити само модул еластичности. Из тог разлога прављен је још један сет епрувета/узорака и изведен још један експеримент у коме се јасно види и зависност издужења од модула еластичности и врсте испитиваног материјала.

5. Метали и легуре за експериментално одређивање модула еластичности

5.1 Основни појмови о челику

С обзиром на то да се данас производи преко 3000 различитих врста челика, неопходно их је груписати да би се корисницима олакшао избор. Челици се могу поделити према:

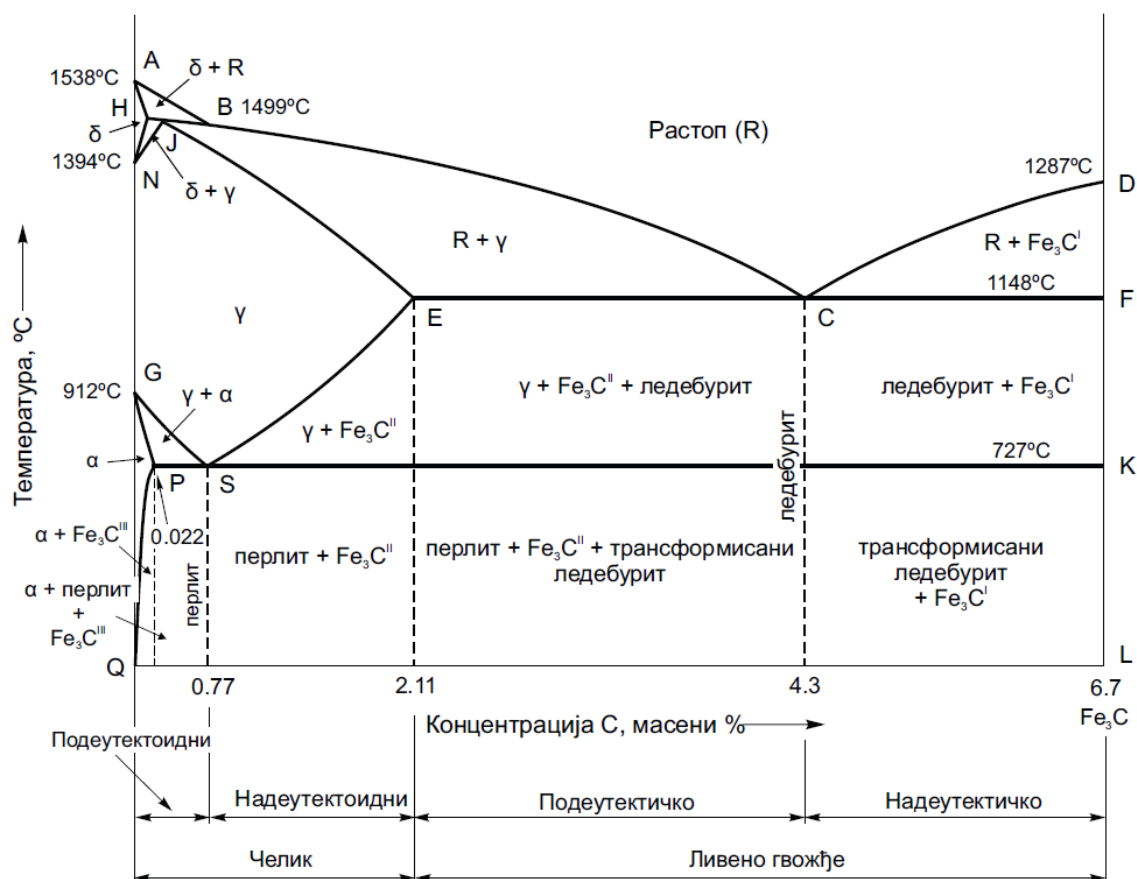
- хемијском саставу (на угљеничне и легиране);
- намени (на конструкционе, алатне, специјалне);
- структури (на феритне, перлитне, аустенитне, бејнитне, ледебуритне, мартензитне);
- начину производње (на Томасове, Бесемерове, Сименс-Мартенове, електрочелике);
- квалитету односно садржају фосфора и сумпора (на челике обичног квалитета, квалитетне челике, челике високог квалитета и племените челике);
- облику и стању испоруке полуфабриката (као ваљани, вучени, ковани, ливени, пресовани, љуштени, брушени).

Поред гвожђа и угљеника (компоненте) у челицима се налазе и:

- корисни пратећи елементи: Mn, Si, Cu, Al;
- штетни пратећи елементи: S, O, P, N, H;
- додатни легирајући елементи: Cr, Ni, Mn, Si, Mo, W, Co, Ti, Al, Nb, Zr, B, N, Be, Pb и др.

Може се уочити да се четири хемијска елемента (Mn, Si, Al, N) појављују било као примесе или пак као легирајући елементи, зависно од садржаја у челику.

Најобичнији угљенични челик садржи најмање 6 хемијских елемената: Fe, C, Mn, Si, P и S. Највећи утицај на структуру челика, а тиме и на механичке и технолошке особине има угљеник. Са порастом % C у челику структура се мења од феритне, феритно-перлитне, перлитне до перлитно-цементитне (сл. 5.1). Испитивањем механичких особина угљеничних челика са различитим % C дошло се до закључка да само 0.10% C повећава јачину на кидање R_m за око 90 MPa, а напон течења R_{eH} за 45 MPa; за приближно исто повећање (R_{eH} и R_m) потребно је око 1% Mn, Si, Cr (појединачно). То значи да угљеник доприноси порасту чврстине 10× више него Mn, Si, Cr. Код угљеничних челика расту HB и R_{eH} , а R_m само до 1.20% C, јер се даље секундарни цементит излучује по границама перлитних зрна, па затезна јачина (R_m) опада.



Слика 5.1 Равнотежни дијаграм метастабилног система $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$

Челик је легура гвожђа и угљеника са садржајем угљеника мањим од 2,11% (сл. 5.1) Додавањем легирајућих елемената (мангана, силицијума, хрома, никла, молибдена, ванадијума, титана а, кобалта и других), појединачно или у комбинацијама, добијају се легирани челици за специјалне сврхе, изузетних механичких, хемијских, ватросталних или термосталних својстава. Невероватан распон и флексибилност особина (уз помоћ легирања, термичке обраде и пластичне прераде) као и релативно ниска цена производње чине га и даље најраспрострањеније коришћеним металним материјалом. На слици 5.2 приказани су полуфабрикати и једна монументална конструкција израђена од челика изведена претежно спајањем закивцима.



Слика 5.2 Полуфабрикати и конструкције израђене од челика

Као што је већ речено, челик има невероватан распон и флексибилност особина. Може бити врло мек и као такав изузетно погодан за дубоко извлачење. Насупрот томе, челик може бити врло тврд и крт, као на пример код мартензитних челика који се користе за сечива и резне алате. Пред модерну производњу челика постављају се врло високи захтеви, који најчешће укључују оптималну комбинацију особина, као што су механичка својства с једне и дуктилност односно својства пластичности с друге стране. Поред тога мора се стално водити рачуна о исплативости производње, што има за последицу непрестаног повећања својстава и квалитета. Најважнији елемент у челику је угљеник. То је уједно и компонента. Будући да има малу интерстицијску растворљивост у решеткама гвожђа (α -Fe и γ -Fe), он се у челику (посебно угљеничним) налази у облику једињења под именом цементит (карбид гвожђа - Fe₃C). У том смислу уместо дефиниције да је челик легура гвожђа и угљеника, може се у литератури наћи и дефиниција да је челик легура гвожђа и цементита. Повећани удео угљеника чини челик чвршћим и тврђим, али у исто време и кртим. У зависности од удела угљеника и температуре на којој се узорак челика налази у фазном дијаграму се могу уочити следећи микроконституенти: аустенит, ферит, примарни, секундарни, цементит, као и микроструктуре (мешавине фаза): перлит, ледебурит. Ако се челик нагло охлади, тако да се искључе дифузиони процеси (на првом месту супституцијска дифузија гвожђа и интерстицијска дифузија угљеника), онда се у структури челика појављују нове микроструктуре које су углавном пресићене угљеником (мартензит, горњи и доњи бејнит и др.). Другим речима, за равнотежне процесе време је веома битан фактор (термичка обрада, заваривање и слични процеси), па се за праћење трансформације аустенита примењују тзв. трансформациони дијаграми. Реч је о фазним променама у чврстом стању код челика. Уколико је брзина хлађења већа од критичне добија се мартензит, уколико је брзина хлађења веома мала добија се феритно-перлитна структура, и коначно уколико је брзина хлађења умерена добијају се међуфазне структуре или структуре бејнита.

Специфична тежина челика је скоро иста као специфична тежина чистог гвожђа и износи око 7850 kg/m³. Особине челика као што су тврдоћа, јачина, пластичност, ватросталност, термостојаност и друге могу се остварити и контролисати у веома широком спектру, било подешавањем хемијског састава, прерадом на топло и применом термичке обраде, што челик чини главним конструкционим материјалом. Поновио бих да често предметни наставник и ментор овог рада на предавањима истиче: "Челик је био, остао и задуго остаће главни метални конструкциони материјал".

Три основне методе, којима се могу подешавати најважнија својства челика су:

- легирање,
- термичка обрада (жарење, каљење, побољшање и др.) и
- пластична прерада на топло или хладно (ваљање, извачење, вучење и др.).

Челици се према намени разврставају на *конструкционе*, *алатне* и *специјалне*. Готово за све челике, изузев трговачког квалитета, битна је и чистоћа, тј. квалитет челика који зависи од начина производње. Стога се према квалитету челици деле на:

- челике обичног квалитета (угљеничне) (S до 0.060% и P до 0.070%),
- квалитетне челике (угљеничне и легиране) (P, S = 0.035 - 0.040%),
- висококвалитетне челике (легиране) (P, S до 0.025%) и
- племените челике (легиране) (P, S до 0.015%).

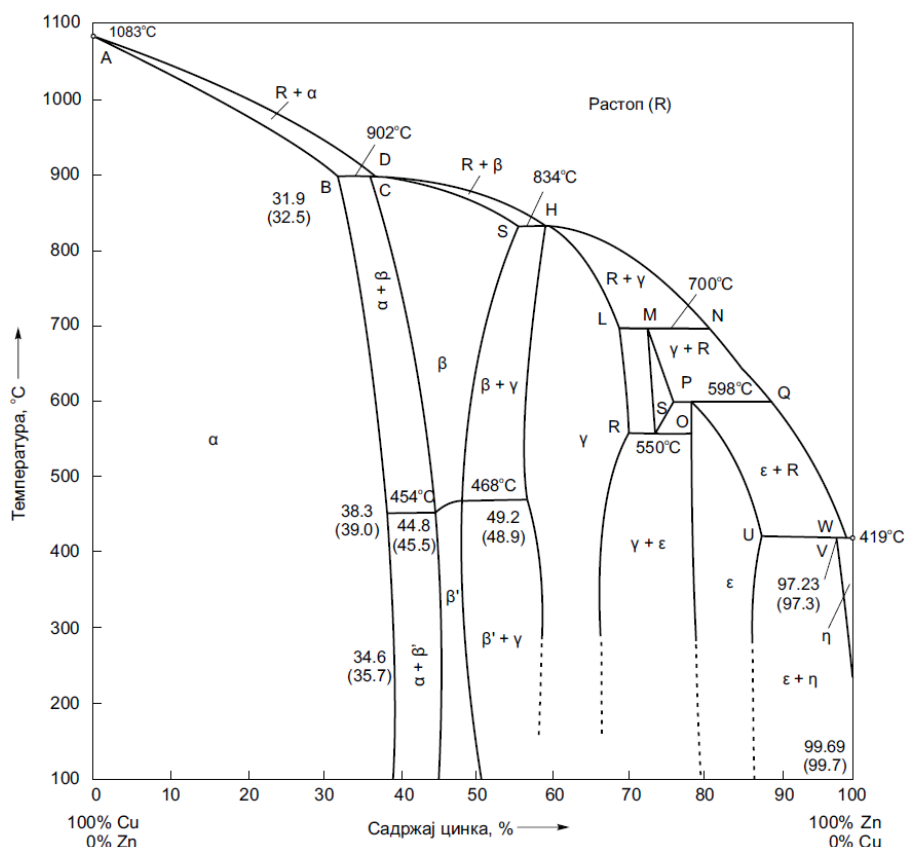
Кад се каже квалитетан челик мисли се само на садржај P и S.

5.2 Основни појмови о легурама бакра

5.2.1 Месинг

Месинзи (Ms) су велика група легура бакра и цинка, као и других додатака и примеса. Бинарни равнотежни дијаграм Cu-Zn (сл. 5.3) је веома сложен, али је за техничке потребе значајан само почетни део до 40% Zn, јер су легуре бакра са више од 40% Zn претерано крте и практично неупотребљиве.

Бакар и цинк се у течном стању потпуно растварају, а кад легуре очврсну граде чврсте растворе Zn у растварачу-Cu, образујући тзв. α -фазу која може садржати максимално 39% раствора Zn. Код легура припремљених са више Zn од наведеног, настају β , γ , δ и η - фазе које су углавном интермедијарне, тј. прелазне фазе. Примарна чврста фаза α на око 450°C садржи 39% Zn, а при спором хлађењу растворљивост опада по солвус линији до 33% на собној температури. При бржем хлађењу са 450°C у чврстом раствору ће се до краја задржати свих 39% Zn; после прераде на хладно и жарења, уочена је појава двојниковања, тј. настанак кристала близанаца - нових металних зрна уместо старих полиедарских. Код легуре са 32% Zn при 902°C (тачка В, сл. 5.3), одвија се перитектичка реакција, па се добија нова фаза β , односно двофазна легура - ($\alpha + \beta$) месинг. Ако би садржај Zn даље растао до 45%, удео β - фазе би толико порастао, да би нагло опале све карактеристике легуре, а нарочито ковност.



Слика 5.3 Равнотежни бинарни дијаграм стања Cu-Zn

Из свега наведеног произлази да је за многе примене најбољи α -месинг, јер има добру ковност и ливкост. Код ($\alpha + \beta$) месинга, обрада деформисањем могућа је само на топло.

Према технолошкој намени, разликују се:

- 1) Месинзи за пластичну прераду и
- 2) Месинзи за ливење.

Код месинга се изводе два вида термичке обраде:

- 1) Рекристализационо жарење и
- 2) Жарење ради попуштања унутрашњих напона.

Месингани делови израђени прерадом на хладно, најчешће се подвргавају рекристализационом жарењу (500-700°C) и затим хлађењу у води. На овај начин могу се успоставити претходна својства пластичности неопходна за ситне делове, као што су: подметачи, заптивке и слични делови. У табlici 5.1 приказане су неке врсте месинга за пластичну прераду, а у табlici 5.2 месинзи за ливење.

Таблица 5.1 Врсте месинга за пластичну прераду

Ознака	Примена
CuZn10 CuZn15 CuZn20 CuZn28	За делове у електротехници, бижутерију и тсл.
CuZn30	За израду чаура свих врста, цеви за кондензаторе, измењиваче топлоте
CuZn33	За мреже, траке за хладњаке, шупље закивке
CuZn37 CuZn40	За машинске и завртње за дрво, ваљке за штампање текстила, траке за хладњаке, лиснате опруге

Таблица 5.2 Ливачке легуре месинга

Ознака	Механичка својства				Примена
	R _{p0.2} , MPa	R _m , MPa	A ₅ , %	HB	
P.CuZn33Pb2	60	150	10	45	Одливци ливени у песку, склопови и везни конструкциони елементи. Делови за општу употребу у електротехници
K.CuZn40	80	250	25	75	Одливци ливени у кокили, арматуре метално-светлих површина, оклови, делови у електротехници, ...
T.CuZn40	100	250	2	75	Одливци ливени под притиском, арматуре, делови у електротехници, ...

На слици 5.4 су приказани неки делови израђени од месинга.



Слика 5.4 Делови од месинга

5.2.2 Бронза

Под бронзом се подразумева легура бакра и калаја. Међутим, шире посматрано, то не мора бити двојна легура нити калај мора бити једини легирајући елемент, па због тога поред калајне постоји и алуминијска, оловна, манганска, берилијумова и друге врсте бронзе. То је двојна или тројна легура са најмање 60% бакра, али без цинка.

У калајним бронзама највећи садржај калаја не прелази 20%. Присуство калаја у легури утиче на повећање њене јачине уз истовремено опадање пластичности. Ово опадање пластичности није посебно велико до садржаја калаја до 5%, али је после тога знатно брже. Због тога је код бронзи за ливење садржај калаја већи него код бронзи за обраду деформисањем. Чврстоћа расте све до 15% калаја, а затим почиње да опада.

Легуре бакра са алуминијумом и другим пратећим елементима (манган, никл, гвожђе и др.) у пракси се називају алуминијске бронзе и у свом саставу имају највише до 11,5% алуминијума. Повећањем садржаја алуминијума у легури система Cu-Al расте затезна чврстоћа, а при садржају око 10,5% постиже свој максимум. Међутим, способност деформације са повећањем садржаја алуминијума опада до 2% Al а затим расте и постиже свој максимум при 8% Al.

Калајне и алуминијумске бронзе су легуре отпорне на корозију, морску воду као и на хабање. Користе се за врло оптерећене клизне плоче и летве, клизне лежајеве ротирајућих вретена, за венце пужних кола и других озубљења, за арматуре под притиском, за турбинска и пумпна кола, кошуљице котрљајућих лежајева, за високооптерећене склопке, матрице вретена, зупчанике, кранске точкове и сл. На слици 5.5 приказани су неки делови израђени од бронзе.



Слика 5.5 Делови израђени од бронзе

5.3 Основни појмови о алуминијуму и његовим легурама

Алуминијум припада групи лакших обојених метала густине 2.7 g/cm^3 , што значи да је око три пута лакши од гвожђа. Добија се из руде боксита електрометалуршким методама. Одликује се добром електричном ($38 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$) и топлотном ($209 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) проводношћу. Алуминијум је неалотропски метал, јер при загревању задржава површински центрирану кубну кристалну решетку (А1) све до температуре топљења; може се обрађивати деформисањем на топло и хладно, отпоран је на атмосферску корозију, док су му својства отпорности релативно ниска. Електронска конфигурација $\text{Al} (13) \rightarrow 1s^2, 2s^2p^6, 3s^2p^1 \rightarrow \text{Al}^{+++} + 3e^-$. Температура топљења је 660°C . Најчешће примесе у алуминијуму су Fe и Si^{13} које потичу из почетних сировина, а тешко се одстрањују. Механичке и технолошке особине хемијски чистог Al (99.99%) и технички чистог Al (99.5%) (металуршког) дате су у табели 5.3, одакле се уочава утицај чистоте Al на његове механичке особине. Хемијски чист алуминијум може се добити из металуршког алуминијума који се пречишћава електрометалуршким методама.

Таблица 5.3 Особине чистог Al у жареном стању при температури од 20°C

Механичке особине		Al 99.99	Al 99.5
Техничка граница течења	R_p, MPa	15	50
Јачина на кидање	R_m, MPa	50	80
Издужење	$A_{5.65}, \%$	45	30
Контракција	$Z, \%$	90	70
Модул еластичности	E, MPa	71000	71000
Тврдоћа	HB	15	20
Технолошке особине			
Обрадивост на хладно	Веома добра		
Обрадивост на топло	Веома добра		
Ливкост	Отежана		
Заварљивост	Веома добра, условна		
Обрадивост резањем	Добра		

И мали садржај примеса негативно утичу на технолошке особине алуминијума и отпорности на корозију. Тако на пример, већ при садржају Fe изнад 0.05% (граница α -чврстог раствора) појављује се еутектикум ($\alpha + \text{Al}_3\text{Fe}$) који погоршава обрадивост деформисањем и отпорност на корозију. Растворљивост Si у Al (α - чврст раствор) је вишег реда него гвожђа, а изнад граничне растворљивости појављују се груби игличасти кристали силицијума (фаза β) који на особине алуминијума утичу слично као и еутектикум ($\alpha + \text{Al}_3\text{Fe}$). При истовременој појави примеса Fe и Si снижава се чистота алуминијума на 99.5% и мање, па се уместо фазе β (чистих кристала Si) образује комплексна фаза $\text{Al}_m\text{Fe}_n\text{Si}$. Ефикасно уситњавање зрна ливеног Al постиже се додавањем ситних честица Ti које у растопу стварају више центара кристализације.

Алуминијумски одливци склони су порозности због растварања водоника који потиче из влажних пешчаних калупа¹⁴; тог проблема нема при ливењу у кокилама било гравитационо или под притиском. Сличне тешкоће настају и при заваривању

¹³ Силицијум је примеса у чистом алуминијуму, али и главни легирајући елемент у ливачким легурама Al .

¹⁴ При ливењу у сувим калупима, у одливцима се при хлађењу око солидус температуре појављују прелине на топло, па се алуминијум лије у влажним пешчаним калупима.

алуминијумских легура, па се морају применити технологије које дају веома низак садржај водоника у металу шава (углавном поступци заваривања у заштити аргона, TIG или MIG). Легуре алуминијума прерађују се ливењем и пластичним обликовањем, па се због тога морају поседовати одговарајуће особине за ове видове прераде. Око 70% од укупне производње прерађује се пластичном прерадом (обликовањем). Остали део користи се за производњу ливених калупа, праха и соли. Из ливених производа добијају се одливци различитих облика (пример калупа за један од различитих облика који могу да се добију ливењем алуминијума (сл. 5.6). Широку примену имају ливени производи од силумина (легура Al - Si са садржајем силицијума као легирајућег елемента до 3%).



Слика 5.6 Калуп за ливење једног од различитих облика од алуминијума

5.3.1 Технички чист алуминијум

Технички чист алуминијум (Al 99.5) добро проводи електричну струју па се алуминијумске жице употребљавају за пренос електричне струје на далеководима и нисконапонској мрежи. С обзиром на малу јачину алуминијумских жица, оне се упредају око носеће челичне жице (затезне јачине 1200 MPa), па би их требало звати челично-алуминијумске жице. Слични проводници употребљавају се и за тролејбуске мреже. Такође се алуминијумске жице употребљавају за намотаје статора генератора и електромотора. Добра топлотна проводљивост, као и велика отпорност алуминијума на деловање знатног броја хемикалија и животних намирница, допринела је широкој примени алуминијума у хемијској и прехранбеној индустрији, као и у домаћинству. Алуминијум се употребљава и за метализацију (алитирање) у бродоградњи, вагоноградњи и архитектури. Сем тога, технички чист алуминијум се користи као дезоксидатор у металургији челика и као састојак мешавине за термитно заваривање. Природна отпорност алуминијума на корозију често се вештачки поправља поступком елоксирања, тј. повећањем почетне дебљине спонтано формираног оксидног слоја (Al_2O_3) дебљине 0.10 на 10 μm .

Елоксирањем се углавном постиже ефикасна заштита посуђа у хемијској и прехранбеној индустрији (посуђе од алуминијума, сл. 5.7). Од укупне количине произведеног технички чистог Al прерађује се око 35% у полупроизводе, а око 65% служи за производњу алуминијумских легура (силумина, дурала и др.).



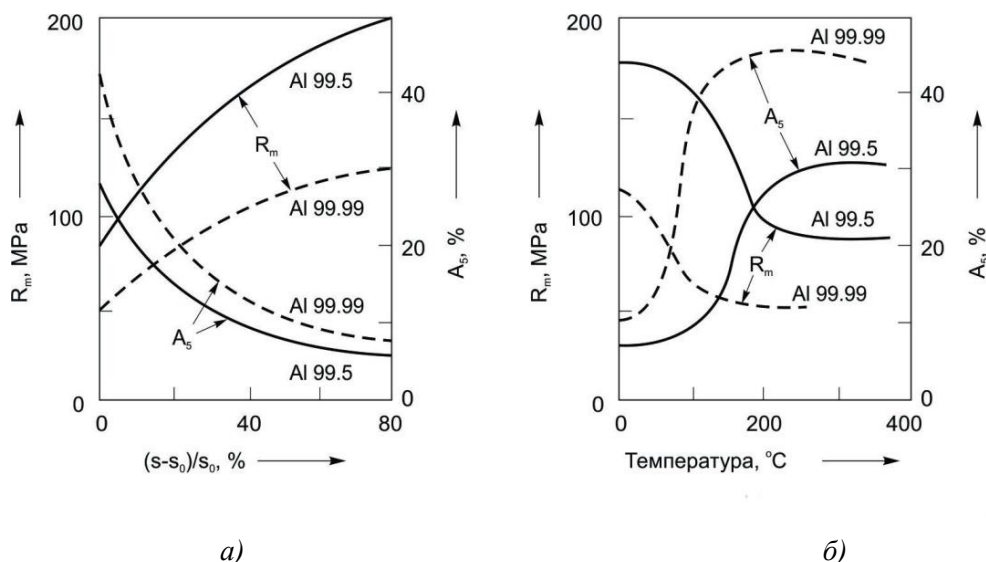
Слика 5.7 Посуђе заштићено процесом елоксирања

5.3.2 Отпорност алуминијума према корозији

Природно образован оксид Al_2O_3 чини алуминијум стабилним на ваздуху и у морској води. У корозивно активним срединама алуминијум одолева боље што је чистији. Међутим, подлеже корозији у хидроксидима (NaOH , KOH) и киселинама халогених елемената (HCl , HF).

5.3.3 Механичке особине чистог алуминијума

Технички чист алуминијум има релативно ниска својства отпорности, која могу порастати при преради на хладно. На величину деформационог ојачања, при истом степену прераде, утиче чистоћа алуминијума (сл. 5.8а); ток опорављања, тј. пораст издужења- $A_{5.65}$ и смањење јачине- R_m , при рекристализационом жарењу, дат је на слици 5.8б. Степен прераде на хладно дефинише се односом $(s-s_0)/s_0$, где је: s_0 - почетна, а s - крајња дебелина деформисаног лима, трака и тсл. У току опорављања код алуминијума настаје полигонизација (издужена зрна постају равноосна), што успорава појаву и раст нових зрна. Код веома чистог алуминијума и већих степена прераде те промене започињу већ и на собној температури. Рекристализациона температура $\text{Al } 99.5$ при средњем степену прераде, износи око 150°C (сл. 5.8б). У пракси се рекристализационо жарење алуминијума обавља на температури $300\text{--}400^\circ\text{C}$.



Слика 5.8 Промена јачине R_m и истегљивости $A_{5.65}$ технички чистог алуминијума: а) у зависности од степена прераде на хладно $(s-s_0)/s_0$, б) у зависности од температуре рекристализационог жарења ($(s-s_0)/s_0=50\%$, време жарења 1h)

Прерада алуминијума на топло, како је уосталом то правило и код других метала, одвија се изнад температуре рекристализације, углавном при $350\text{--}500^\circ\text{C}$. Алуминијумски полупроизводи добијени деформисањем: шипке, профили, цеви,

лимови, траке и жице израђују се од топионичких производа-гредица или стубова добијених континуалним ливењем (сл. 5.9). Жице већег пречника израђују се у две фазе: најпре континуалним ливењем, затим ваљањем и на крају вучењем. Жице мањих пречника обликују се вучењем на хладно кроз калибрисане отворе у челичној плочи. Најзначајније и најбитније особина алуминијума су:

- сребрнасто - беле је боје,
- нема магнетна својства и изузетно је мек метал,
- за разлику од осталих метала има врло малу густину,
- добар је проводник топлотне и електричне енергије,
- могуће га је ваљањем стањити до дебљине фолије,
- нетоксичан је,
- отпоран је на утицај многих киселина, али не и на морску воду,
- као чист метал није много тврд, међутим у комбинацији са осталим металима његова тврдоћа се знатно повећава.



а)



б)

Слика 5.9 Алуминијумски полупроизводи (а-профил; б-шипке)

6. Експериментално одређивање модула еластичности различитих метала и легура

6.1 Челик

Као епрувета коришћен је специјално припремљен узорак од нискоугљеничног челика обрађен на универзалном стругу на потребне димензије.

Епрувета која је коришћена за испитивање има следеће димензије:

- Почетни пречник: $d = 10 \text{ mm}$
- Почетна мерна дужина: $l_0 = 240 \text{ mm}$
- Почетна површина попречног пресека: $S_0 = 78,53 \text{ mm}^2$

Издужење се мери механичким екстензометром (Мартенс – Кенеди) чија је:

- База екстензометра: $L_{e0} = 80 \text{ mm}$
- Коефицијент увећања: $k = 100$

Таблица 6.1 Резултати испитивања узорка од челика – први део експеримента

Прираштај силе ΔF	Број подеока на екстензометрима				$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}$	$E_i \cdot 10^5$
Предоптерећење 100 daN	Леви $\Delta l'$		Десни $\Delta l''$		mm	MPa
Прва серија испитивања						
300	0,9	0,9	0,9	0,9	0,0099	2,05814
500	1,9	1	1,9	1		
700	2,9	1	2,9	1		
900	4	1,1	3,9	1		
1100	5	1	4,9	1		
Средња вредност: $\Delta l'/5 = 1$ подеока и $\Delta l''/5 = 0,98$ подеока						
Друга серија испитивања						
300	1	1	1	1	0,0099	2,05814
500	2	1	2	1		
700	3	1	3	1		
900	4	1	3,9	0,9		
1100	5	1	4,9	1		
Средња вредност: $\Delta l'/5 = 1$ подеока и $\Delta l''/5 = 0,98$ подеока						
Трећа серија испитивања						
300	1	1	1	1	0,0099	2,05814
500	2	1	2	1		
700	3	1	3	1		
900	4	1	4	1		
1100	5	1	4,9	0,9		
Средња вредност $\Delta l'/5 = 1$ подеока и $\Delta l''/5 = 0,98$ подеока						
Коначна вредност: $E = 2,058 \cdot 10^5$ MPa						

I Серија испитивања

$$\Delta l' = \frac{0,9+1+1+1,1+1}{5} = \frac{5}{5} = 1$$

$$\Delta l'' = \frac{0,9+1+1+1+1}{5} = \frac{4,9}{5} = 0,98$$

$$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k} = \frac{1 + 0,98}{2 \cdot 100} = \frac{1,98}{200} = 0,0099 \text{ mm}$$

$$E_1 = \frac{\Delta F \cdot L_{e0}}{S_0 \cdot \frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}} = \frac{2000 \cdot 80}{78,53 \cdot 0,0099} = \frac{160000}{0,7774} = 205814 \text{ MPa}$$

II Серија испитивања

$$\Delta l' = \frac{1+1+1+1+1}{5} = \frac{5}{5} = 1$$

$$\Delta l'' = \frac{1+1+1+0,9+1}{4} = \frac{4,9}{5} = 0,98$$

$$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k} = \frac{1 + 0,98}{2 \cdot 100} = \frac{1,98}{200} = 0,0099 \text{ mm}$$

$$E_2 = \frac{\Delta F \cdot L_{e0}}{S_0 \cdot \frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}} = \frac{2000 \cdot 80}{78,53 \cdot 0,0099} = \frac{160000}{0,7774} = 205814 \text{ MPa}$$

III Серија испитивања

$$\Delta l' = \frac{1+1+1+1+1}{4} = \frac{5}{5} = 1$$

$$\Delta l'' = \frac{1+1+1+1+0,9}{4} = \frac{4,9}{5} = 0,98$$

$$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k} = \frac{1 + 0,98}{2 \cdot 100} = \frac{1,98}{200} = 0,0099 \text{ mm}$$

$$E_3 = \frac{\Delta F \cdot L_{e0}}{S_0 \cdot \frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}} = \frac{2000 \cdot 80}{78,53 \cdot 0,0099} = \frac{160000}{0,7774} = 205814 \text{ MPa}$$

На слици 6.1 приказана је челична епрувета.



а)



б)

Слика 6.1 Изглед челичне епрувете

6.2 Месинг

Као епрувета коришћена је шипка од месинга одсечена на потребне димензије непознатог хемијског састава.

Епрувета која је коришћена за испитивање има следеће димензије:

- Почетни пречник: $d = 11 \text{ mm}$
- Почетна мерна дужина: $l_0 = 200 \text{ mm}$
- Почетна површина попречног пресека: $S_0 = 95,03 \text{ mm}^2$

Издужење се мери механичким екстензометром (Мартенс – Кенеди) чија је:

- База екстензометра: $L_{e0} = 80 \text{ mm}$
- Коефицијент увећања: $k = 100$

Таблица 6.2 Резултати испитивања узорка од месинга – први део експеримента

Прирастај силе ΔF	Број подеока на екстензометрима				$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}$	$E_i \cdot 10^5$
Предоптерећење 100 daN	Леви Δl'	Десни Δl''			mm	N/mm ²
Прва серија испитивања						
300	1,5	1,5	1,8	1,8	0,0159	1,05890
500	3,1	1,6	3,1	1,3		
700	5	1,9	5	1,9		
900	6,6	1,6	6,9	1,9		
1100	8,8	1,2	8,1	1,2		
Средња вредност: Δl'/5 = 1,56 подеока и Δl''/5 = 1,62 подеока						
Друга серија испитивања						
300	1,5	1,5	1,5	1,5	0,016	1,05263
500	3,1	1,6	3	1,5		
700	5	1,9	4,9	1,9		
900	6,8	1,8	6,1	1,2		
1100	8,1	1,3	7,9	1,8		
Средња вредност: Δl'/5 = 1,62 подеока и Δl''/5 = 1,58 подеока						
Трећа серија испитивања						
300	1,5	1,5	1,5	1,5	0,0163	1,03225
500	3,1	1,6	3,1	1,6		
700	5	1,9	5	1,9		
900	6,8	1,8	6,2	1,2		
1100	8,3	1,5	8	1,8		
Средња вредност Δl'/5 = 1,66 подеока и Δl''/5 = 1,6 подеока						
Коначна вредност: E = 1,0479·10 ⁵ MPa						

I Серија испитивања

$$\Delta l' = \frac{1,5+1,6+1,9+1,6+1,2}{5} = \frac{7,8}{5} = 1,56$$

$$\Delta l'' = \frac{1,8+1,3+1,9+1,9+1,2}{5} = \frac{8,1}{5} = 1,62$$

$$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k} = \frac{1,56+1,62}{2 \cdot 100} = \frac{3,18}{200} = 0,0159 \text{ mm}$$

$$E_1 = \frac{\Delta F \cdot L_{e0}}{S_0 \cdot \frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}} = \frac{2000 \cdot 80}{95,03 \cdot 0,0159} = \frac{160000}{1,511} = 105890 \text{ MPa}$$

II Серија испитивања

$$\Delta l' = \frac{1,5+1,6+1,9+1,8+1,3}{5} = \frac{8,1}{5} = 1,62$$

$$\Delta l'' = \frac{1,5+1,5+1,9+1,2+1,8}{5} = \frac{7,9}{5} = 1,58$$

$$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k} = \frac{1,62+1,58}{2 \cdot 100} = \frac{3,2}{200} = 0,016 \text{ mm}$$

$$E_2 = \frac{\Delta F \cdot L_{e0}}{S_0 \cdot \frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}} = \frac{2000 \cdot 80}{95,03 \cdot 0,016} = \frac{160000}{1,52} = 105263 \text{ MPa}$$

III Серија испитивања

$$\Delta l' = \frac{1,5+1,6+1,9+1,8+1,5}{5} = \frac{8,3}{5} = 1,66$$

$$\Delta l'' = \frac{1,5+1,6+1,9+1,2+1,8}{5} = \frac{8}{5} = 1,6$$

$$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k} = \frac{1,66+1,6}{2 \cdot 100} = \frac{3,26}{200} = 0,0163 \text{ mm}$$

$$E_3 = \frac{\Delta F \cdot L_{e0}}{S_0 \cdot \frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}} = \frac{2000 \cdot 80}{95,03 \cdot 0,0163} = \frac{160000}{1,55} = 103225 \text{ MPa}$$

На слици 6.2 приказана је епрувета израђена од месинга.



а)



б)

Слика 6.2 Епрувета израђена од месинга

6.3 Алуминијум

Као епрувета коришћена је шипка од алуминијума непознатог састава добијена сечењем из шипке.

Епрувета која је коришћена за испитивање има следеће димензије:

- Почетни пречник: $d = 15,3 \text{ mm}$
- Почетна мерна дужина: $l_0 = 220 \text{ mm}$
- Почетна површина попречног пресека: $S_0 = 183,8 \text{ mm}^2$

Издужење се мери механичким екстензометром (Мартенс – Кенеди) чија је:

- База екстензометра: $L_{e0} = 80 \text{ mm}$
- Коефицијент увећања: $k = 100$

Таблица 6.3 Резултати испитивања узорка од алуминијума – прва серија експеримента

Прираштај силе ΔF	Број подеока на екстензометрима				$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}$	$E_i \cdot 10^5$
Предоптерећење 100 daN	Леви $\Delta l'$	Десни $\Delta l''$			mm	N/mm ²
Прва серија испитивања						
300	1	1	1	1	0,012	0,72562
500	2	1	2,1	1,1		
700	3,3	1,3	3,6	1,5		
900	4,8	1,5	4,9	1,3		
1100	6	1,2	6	1,1		
Средња вредност: $\Delta l'/5 = 1,2$ подеока и $\Delta l''/5 = 1,2$ подеока						
Друга серија испитивања						
300	1	1	1	1	0,012	0,72562
500	2,1	1,1	2,1	1,1		
700	3,4	1,3	3,5	1,4		
900	4,8	1,4	4,8	1,3		
1100	6	1,2	6	1,2		
Средња вредност: $\Delta l'/5 = 1,2$ подеока и $\Delta l''/5 = 1,2$ подеока						
Трећа серија испитивања						
300	1	1	1	1	0,012	0,72562
500	2,1	1,1	2,1	1,1		
700	3,4	1,3	3,4	1,3		
900	4,9	1,6	4,8	1,5		
1100	6	1,1	6	1,2		
Средња вредност $\Delta l'/5 = 1,2$ подеока и $\Delta l''/5 = 1,2$ подеока						
Коначна вредност: $E = 0,72562 \cdot 10^5 \text{ MPa}$						

I Серија испитивања

$$\Delta l' = \frac{1+1+1,3+1,5+1,2}{5} = \frac{6}{5} = 1,2$$

$$\Delta l'' = \frac{1+1,1+1,5+1,3+1,1}{5} = \frac{6}{5} = 1,2$$

$$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k} = \frac{1,2+1,2}{2 \cdot 100} = \frac{2,4}{200} = 0,012 \text{ mm}$$

$$E_1 = \frac{\Delta F \cdot L_{e0}}{S_0 \cdot \frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}} = \frac{2000 \cdot 80}{183,8 \cdot 0,012} = \frac{160000}{2,205} = 72562 \text{ MPa}$$

II Серија испитивања

$$\Delta l' = \frac{1+1,1+1,3+1,5+1,1}{5} = \frac{6}{5} = 1,2$$

$$\Delta l'' = \frac{1+1,1+1,4+1,3+1,2}{5} = \frac{6}{5} = 1,2$$

$$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k} = \frac{1,2+1,2}{2 \cdot 100} = \frac{2,4}{200} = 0,012 \text{ mm}$$

$$E_2 = \frac{\Delta F \cdot L_{e0}}{S_0 \cdot \frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}} = \frac{2000 \cdot 80}{183,8 \cdot 0,012} = \frac{160000}{2,205} = 72562 \text{ MPa}$$

III Серија испитивања

$$\Delta l' = \frac{1+1,1+1,3+1,5+1,1}{5} = \frac{6}{5} = 1,2$$

$$\Delta l'' = \frac{1+1,1+1,3+1,4+1,2}{5} = \frac{6}{5} = 1,2$$

$$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k} = \frac{1,2+1,2}{2 \cdot 100} = \frac{2,4}{200} = 0,012 \text{ mm}$$

$$E_3 = \frac{\Delta F \cdot L_{e0}}{S_0 \cdot \frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}} = \frac{2000 \cdot 80}{183,8 \cdot 0,012} = \frac{160000}{2,205} = 72562 \text{ MPa}$$

На слици 6.3 приказана је епрувета израђена од алуминијума.



а)



б)

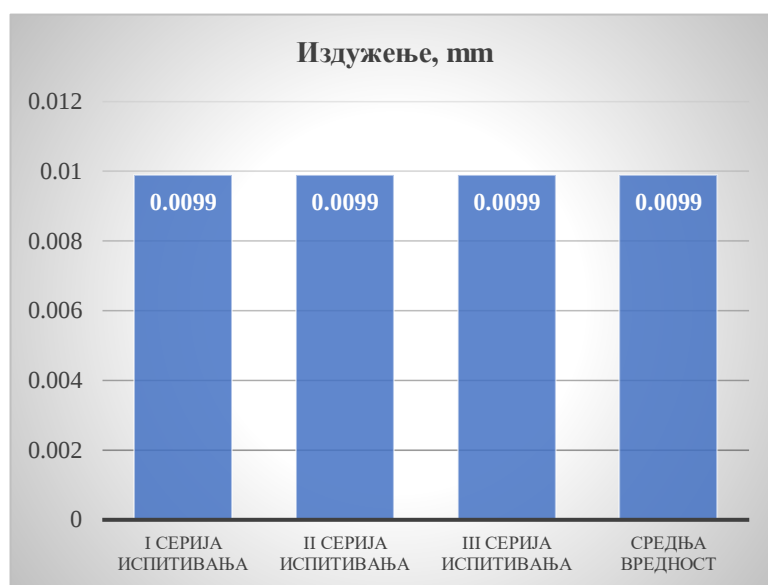
Слика 6.3 Епрувета израђена од алуминијума

6.4 Упоређивање добијених резултата

После испитивања и обраде резултата као што је и очекивано, епрувета од челика је показала највећи отпор при деформисању и самим тим челик поседује највећи модул еластичности. Епрувета од месинга је друга по реду и њен модул еластичности је скоро дупло мањи од модула еластичности челика, што указује на то да је међуатомска веза у епрувети челика дупло јача него што је то случај код месинга. Алуминијум са својим модулом еластичности од 72562 МПа представља најмекши испитивани материјал и као такав најпогоднији је за пластично обликовање.

На графику 1а може се видети да је издужење епрувета приликом све три серије испитивања, при истим вредностима силе, било исто. Деформације су веома мале, али је модул еластичности очекивано веома висок. Тиме се доказује да што је међуатомска веза у кристалној решетки метала јача, модул еластичности је већи а издужење мање. С обзиром да је издужење имало исту вредност у све три серије; на графику 1б види се да је и модул еластичности за све три серије испитивања исти.

а)



б)

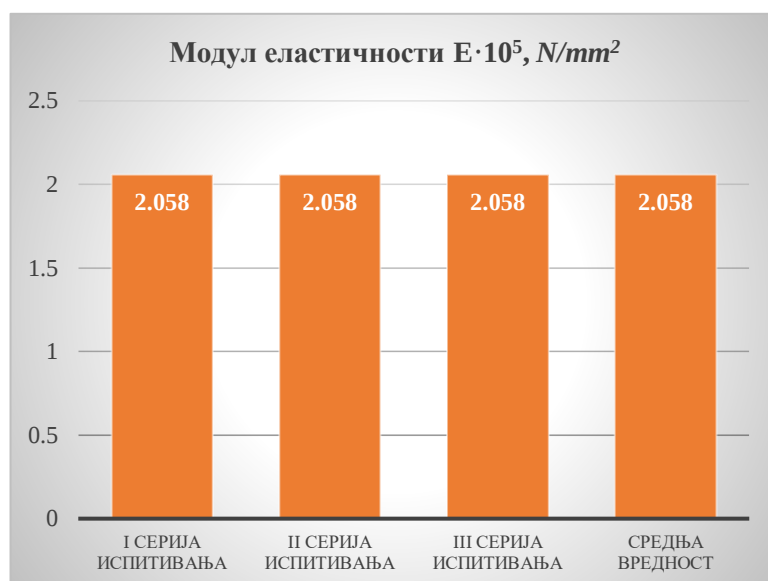
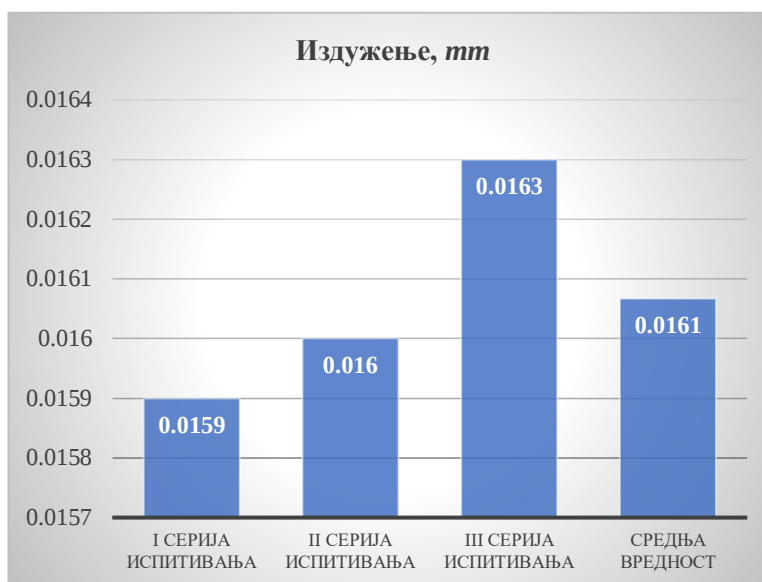


График 1 а) Вредност издужења и б) модула еластичности испитиваног челика

Приликом испитивања епрувете од месинга може се приметити (график 2а) да се вредност деформације разликује у све три серије. Резултати из друге и треће серије испитивања су приближно исти, док се добијена вредност деформације прве серије евидентно разликује. Разлог томе може бити лоше позиционирање екстензометра који је после првог затезања фино "налегао" на епрувету и тиме су у другом и трећем покушају добијени приближно исти резултати. На графику 2б приказане су вредности модула еластичности у зависности од издужења.

а)



б)

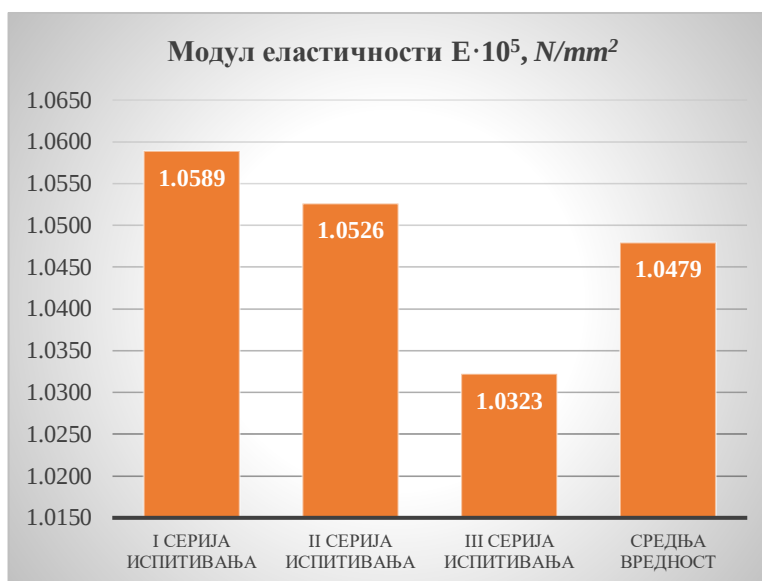


График 2 а) Вредности издужења и б) модула еластичности испитиване епрувете од месинга

На графику 3а, б приказане су зависности модула еластичности од издужења епрувете израђене од алуминијума. Као и код челика, при експерименталном испитивању у три серије мерења добијене су идентичне вредности деформације што је веома мало вероватно. Ово може бити показатељ веома хомогене структуре епрувете од алуминијума која је коришћена за испитивање што вероватно неће увек бити случај у пракси. С обзиром на то да су у све три серије испитивања вредности издужења биле исте, модул еластичности добијен даљом обрадом података је такође исти.

а)



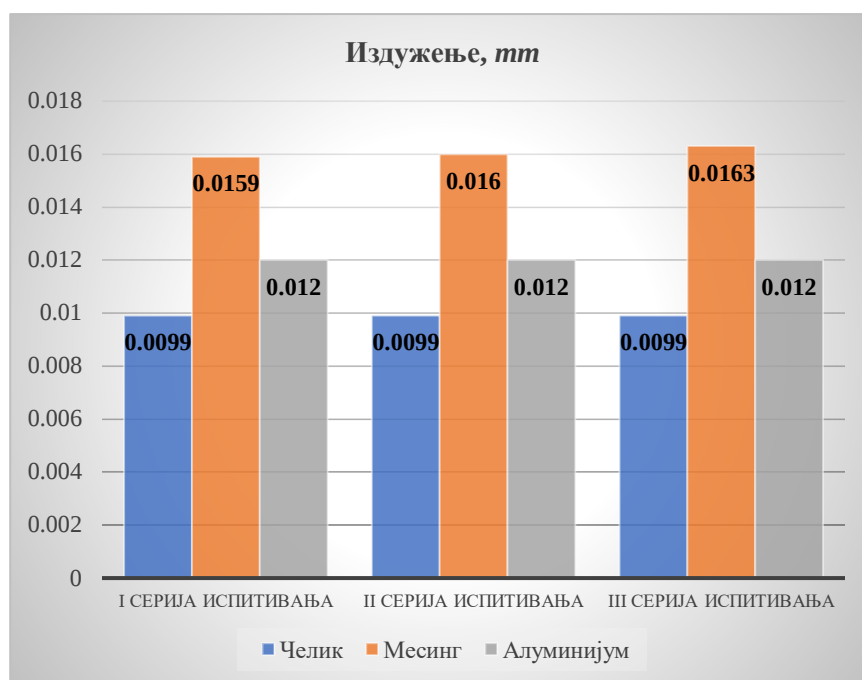
б)



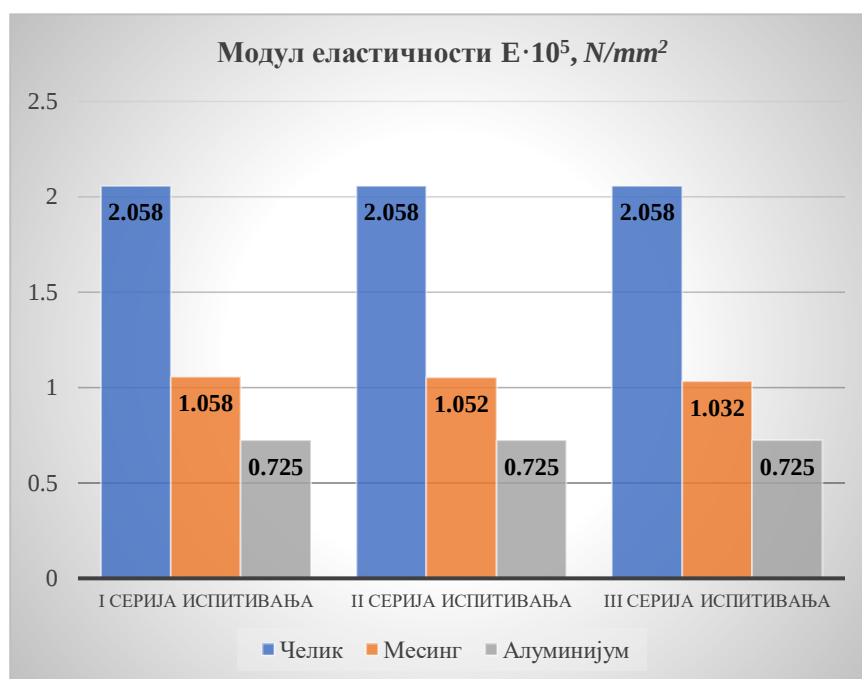
График 3 а) Вредности издужења и б) модула еластичности испитиване епрувете од алуминијума

На слици 6.4 приказани су графици који одговарају издужењима епрувета (mm) (сл. 6.4а), као и модули еластичности (MPa) испитиваних епрувета (сл. 6.4б). График издужења показује да епрувета израђена од месинга има веће издужење од епрувете израђене од алуминијума, а да је разлика издужења између епрувета израђених од челика и алуминијума релативно мала. Као што је претходно напоменуто и експериментално утврђено, алуминијум има око три пута мањи модул еластичности од челика (сл. 6.4б), тако да би издужење алуминијумске епрувете требало да буде око три пута веће у односу на челичну. Разлог овако добијених вредности издужења је разлика у попречном пресеку испитиваних епрувета. Овим је доказана позната чињеница да модул еластичности зависи само од врсте испитиваних материјала, а не и од њихових димензија. Како би експеримент био потпун и поред модула еластичности се дало увид и у разлику издужења ова три различита материјала, направљене су још три епрувете (од челика, бронзе и алуминијума) истог попречног пресека и изведена је друга серија експерименталног одређивања модула еластичности.

а) График 4



а) График 5



Слика 6.4 Упоређивање издужења/деформација и модула еластичности испитиваних материјала

6.5 Специјално припремљени узорци истог попречног пресека

6.5.1 Челик

Као епрувета коришћен је специјално припремљен узорак од нискоугљеничног челика обрађен на CNC стругу на потребне димензије.

Епрувета која је коришћена за испитивање има следеће димензије:

- Почетни пречник: $d = 10 \text{ mm}$
- Почетна мерна дужина: $l_0 = 330 \text{ mm}$
- Почетна површина попречног пресека: $S_0 = 78,53 \text{ mm}^2$

Издужење се мери механичким екстензометром (Мартенс – Кенеди) чија је:

- База екстензометра: $L_{e0} = 80 \text{ mm}$
- Коефицијент увећања: $k = 100$

Таблица 6.4 Резултати испитивања узорка од челика - друга серија експеримента

Прираштај силе ΔF	Број подеока на екстензометрима				$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}$	$E_i \cdot 10^5$
Предоптерећење 100 daN	Леви Δl'	Десни Δl''			mm	N/mm²
Прва серија испитивања						
300	0,9	0,9	1	1	0,0099	2,05880
500	1,9	1	2	1		
700	2,9	1	3	1		
900	3,9	1	4	1		
1100	4,9	1	4,9	0,9		
Средња вредност: Δl'/5 = 1 подеока и Δl''/5 = 0,98 подеока						
Друга серија испитивања						
300	0,9	0,9	1	1	0,01	2,03821
500	1,9	1	2	1		
700	2,9	1	3	1		
900	3,9	1	4	1		
1100	4,9	1	5	1		
Средња вредност: Δl'/5 = 1 подеока и Δl''/5 = 1 подеока						
Трећа серија испитивања						
300	1	1	1	1	0,01	2,03821
500	2	1	2	1		
700	3	1	3	1		
900	4,1	1,1	4	1		
1100	5,1	1	4,9	0,9		
Средња вредност Δl'/5 = 1,02 подеока и Δl''/5 = 0,98 подеока						
Коначна вредност: E = 2,045·10 ⁵ MPa						

I Серија испитивања

$$\Delta l' = \frac{0,9+1+1+1,1+1}{5} = \frac{5}{5} = 1$$

$$\Delta l'' = \frac{1+1+1+1+0,9}{5} = \frac{4,9}{5} = 0,98$$

$$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k} = \frac{1+0,98}{2 \cdot 100} = \frac{1,98}{200} = 0,0099 \text{ mm}$$

$$E_1 = \frac{\Delta F \cdot L_{e0}}{S_0 \cdot \frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}} = \frac{2000 \cdot 80}{78,5 \cdot 0,0099} = \frac{160000}{0,77715} = 205880 \text{ MPa}$$

II Серија испитивања

$$\Delta l' = \frac{0,9+1+1,1+1+1}{5} = \frac{5}{5} = 1$$

$$\Delta l'' = \frac{1+1+1+1+1}{5} = \frac{5}{5} = 1$$

$$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k} = \frac{1+1}{2 \cdot 100} = \frac{2}{200} = 0,01 \text{ mm}$$

$$E_2 = \frac{\Delta F \cdot L_{e0}}{S_0 \cdot \frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}} = \frac{2000 \cdot 80}{78,5 \cdot 0,01} = \frac{160000}{0,785} = 203821 \text{ MPa}$$

III Серија испитивања

$$\Delta l' = \frac{1+1+1+1,1+1}{5} = \frac{5,1}{5} = 1,02$$

$$\Delta l'' = \frac{1+1+1+1+0,9}{5} = \frac{4,9}{5} = 0,98$$

$$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k} = \frac{1,02+0,98}{2 \cdot 100} = \frac{2}{200} = 0,01 \text{ mm}$$

$$E_3 = \frac{\Delta F \cdot L_{e0}}{S_0 \cdot \frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}} = \frac{2000 \cdot 80}{78,5 \cdot 0,01} = \frac{160000}{0,785} = 203821 \text{ MPa}$$

На слици 6.5 се може видети процес припреме једне епрувете, од полуфабриката - хладно ваљане шипке (сл. 6.5а), до специјално припремљеног узорка за испитивање на CNC стругу (сл. 6.5б), затим њено позиционирање и стезање у чељусти механичке кидалице, као и позиционирање екстензометра за мерни део епрувете. Како би мерење било што прецизније веома је битно да квалитет обраде тела епрувете буде што финији.



а)



б)



в)



г)

Слика 6.5 Припрема и позиционирање специјално припремљеног узорка од челика за испитивање модула еластичности

6.5.2 Бронза

Као епрувета коришћен је специјално припремљен узорак од бронзе обрађен на CNC стругу на потребне димензије

Епрувета која је коришћена за испитивање има следеће димензије:

- Почетни пречник: $d = 10 \text{ mm}$
- Почетна мерна дужина: $l_0 = 330 \text{ mm}$
- Почетна површина попречног пресека: $S_0 = 78,53 \text{ mm}^2$

Издужење се мери механичким екстензометром (Мартенс – Кенеди) чија је:

- База екстензометра: $L_{e0} = 80 \text{ mm}$
- Коефицијент увећања: $k = 100$

Таблица 6.5 Резултати испитивања узорка од бронзе – друга серија експеримента

Прираштај силе ΔF	Број подеока на екстензометрима				$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}$	$E_i \cdot 10^5$
Предоптерећење 100 daN	Леви Δl'		Десни Δl''		mm	N/mm ²
Прва серија испитивања						
300	2,2	2,2	2,3	2,3	0,0213	0,95690
500	4,3	2,1	4,4	2,1		
700	6,4	2,1	6,5	2,1		
900	8,5	2,1	8,6	2,1		
1100	10,7	2,2	10,6	2		
Средња вредност: Δl'/5 = 2,14 подеока и Δl''/5 = 2,12 подеока						
Друга серија испитивања						
300	2,1	2,1	2,1	2,1	0,0206	0,98942
500	4,1	2	4,1	2		
700	6,2	2,1	6,1	2		
900	8,2	2	8,1	2		
1100	10,4	2,2	10,2	2,1		
Средња вредност: Δl'/5 = 2,08 подеока и Δl''/5 = 2,04 подеока						
Трећа серија испитивања						
300	2	2	2,1	2,1	0,0205	0,99425
500	4,1	2,1	4,1	2		
700	6,1	2	6,1	2		
900	8,2	2,1	8,1	2		
1100	10,3	2,1	10,2	2,1		
Средња вредност Δl'/5 = 2,06 подеока и Δl''/5 = 2,04 подеока						
Коначна вредност: E = 0,9801·10 ⁵ MPa						

I Серија испитивања

$$\Delta l' = \frac{2,2+2,1+2,1+2,2}{5} = \frac{10,7}{5} = 2,14$$

$$\Delta l'' = \frac{2,3+2,1+2,1+2,1+2}{5} = \frac{10,6}{5} = 2,12$$

$$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k} = \frac{2,14 + 2,12}{2 \cdot 100} = \frac{4,26}{200} = 0,0213 \text{ mm}$$

$$E_1 = \frac{\Delta F \cdot L_{e0}}{S_0 \cdot \frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}} = \frac{2000 \cdot 80}{78,5 \cdot 0,0213} = \frac{160000}{1,67205} = 95690 \text{ MPa}$$

II Серија испитивања

$$\Delta l' = \frac{2,1+2+2,1+2+2,2}{5} = \frac{10,4}{5} = 2,08$$

$$\Delta l'' = \frac{2,1+2+2+2+2,1}{5} = \frac{10,2}{5} = 2,04$$

$$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k} = \frac{2,08 + 2,04}{2 \cdot 100} = \frac{4,12}{200} = 0,0206 \text{ mm}$$

$$E_2 = \frac{\Delta F \cdot L_{e0}}{S_0 \cdot \frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}} = \frac{2000 \cdot 80}{78,5 \cdot 0,0206} = \frac{160000}{1,6171} = 98942 \text{ MPa}$$

III Серија испитивања

$$\Delta l' = \frac{2+2,1+2+2,1+2,1}{5} = \frac{10,3}{5} = 2,06$$

$$\Delta l'' = \frac{2,1+2+2+2+2,1}{5} = \frac{10,2}{5} = 2,04$$

$$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k} = \frac{2,06 + 2,04}{2 \cdot 100} = \frac{4,1}{200} = 0,0205 \text{ mm}$$

$$E_3 = \frac{\Delta F \cdot L_{e0}}{S_0 \cdot \frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}} = \frac{2000 \cdot 80}{78,5 \cdot 0,0205} = \frac{160000}{1,60925} = 99425 \text{ MPa}$$

На слици 6.6 приказана је израда узорка за одређивање модула еластичности од бронзе. Бронза је, као и месинг, једна од легура бакра условно сличних карактеристика. Разлика у цени израде је разлог зашто је у другом делу експеримента коришћена бронза а не месинг. Приликом израде узорка било је потребно обрадити пажњу да димензије припремка за израду не одступају превише од финалних мера како би било што мање отпада (струготине) и смањило само време израде.



а)



б)



в)



г)

Слика 6.6 Припрема и позиционирање специјално припремљеног узорка од бронзе за испитивање модула еластичности

6.5.3 Алуминијум

Као епрувета коришћен је специјално припремљен узорак од алуминијума обрађен на CNC стругу на потребне димензије

Епрувета која је коришћена за испитивање има следеће димензије:

- Почетни пречник: $d = 10 \text{ mm}$
- Почетна мерна дужина: $l_0 = 330 \text{ mm}$
- Почетна површина попречног пресека: $S_0 = 78,53 \text{ mm}^2$

Издужење се мери механичким екстензометром (Мартенс – Кенеди) чија је:

- База екстензометра: $L_{e0} = 80 \text{ mm}$
- Коефицијент увећања: $k = 100$

Таблица 6.6 Резултати испитивања узорка од алуминијума – друга серија експеримента

Прираштај силе ΔF	Број подеока на екстензометрима				$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}$	$E_i \cdot 10^5$
Предоптерећење 100 daN	Леви $\Delta l'$		Десни $\Delta l''$		mm	N/mm ²
Прва серија испитивања						
300	3,1	3,1	3	3	0,03	0,67940
500	6,1	3	6,1	3,1		
700	9,2	3,1	9	2,9		
900	12,1	2,9	12	3		
1100	15,2	3,1	14,8	2,8		
Средња вредност: $\Delta l'/5 = 30,4$ подеока и $\Delta l''/5 = 2,96$ подеока						
Друга серија испитивања						
300	3	3	3	3	0,0296	0,68858
500	5,9	2,9	6,1	3,1		
700	8,8	2,9	9,1	3		
900	11,8	3	12,1	3		
1100	14,7	2,9	15	2,9		
Средња вредност: $\Delta l'/5 = 2,92$ подеока и $\Delta l''/5 = 3$ подеока						
Трећа серија испитивања						
300	3	3	3	3	0,0301	0,67714
500	6	3	6,1	3,1		
700	8,9	2,9	9,1	3		
900	11,9	3	12,2	3,1		
1100	14,9	3	15,2	3		
Средња вредност $\Delta l'/5 = 2,98$ подеока и $\Delta l''/5 = 3,04$ подеока						
Коначна вредност: $E = 0,6816 \cdot 10^5 \text{ MPa}$						

I Серија испитивања

$$\Delta l' = \frac{3,1+3+3,1+2,9+3,1}{5} = \frac{15,2}{5} = 3,04$$

$$\Delta l'' = \frac{3+3,1+2,9+3+2,8}{5} = \frac{14,8}{5} = 2,96$$

$$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k} = \frac{3,04 + 2,96}{2 \cdot 100} = \frac{3}{200} = 0,03 \text{ mm}$$

$$E_1 = \frac{\Delta F \cdot L_{e0}}{S_0 \cdot \frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}} = \frac{2000 \cdot 80}{78,5 \cdot 0,03} = \frac{160000}{2,355} = 67940 \text{ MPa}$$

II Серија испитивања

$$\Delta l' = \frac{3+2,9+2,9+3+2,8}{5} = \frac{14,6}{5} = 2,92$$

$$\Delta l'' = \frac{3+3,1+3+3+2,9}{5} = \frac{15}{5} = 3$$

$$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k} = \frac{2,92 + 3}{2 \cdot 100} = \frac{5,92}{200} = 0,0296 \text{ mm}$$

$$E_2 = \frac{\Delta F \cdot L_{e0}}{S_0 \cdot \frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}} = \frac{2000 \cdot 80}{78,5 \cdot 0,0296} = \frac{160000}{2,3236} = 68858 \text{ MPa}$$

III Серија испитивања

$$\Delta l' = \frac{3+3+2,9+3+3}{5} = \frac{14,9}{5} = 2,98$$

$$\Delta l'' = \frac{3+3,1+3+3,1+3}{5} = \frac{15,2}{5} = 3,04$$

$$\frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k} = \frac{2,98 + 3,04}{2 \cdot 100} = \frac{6,02}{200} = 0,0301 \text{ mm}$$

$$E_3 = \frac{\Delta F \cdot L_{e0}}{S_0 \cdot \frac{\Delta l' + \Delta l''}{2 \cdot k}} = \frac{2000 \cdot 80}{78,5 \cdot 0,0301} = \frac{160000}{2,36285} = 67714 \text{ MPa}$$

На слици 6.7, као и у претходним случајевима, од полуфабриката и после фина машинске обраде се добио узорак жељених димензија потребан за експеримент. Пречник мерног дела на који се позиционирају мерни инструменти – екстензометри толерисан је $\pm 0,05 \text{ mm}$, док су остале димензије узорка остављене као слободне коте. Због природе експеримента неопходно је било да се пречници мерних делова сва три узорка битно не разликују, ради упоређивања добијених експерименталних резултата.



а)



б)



в)



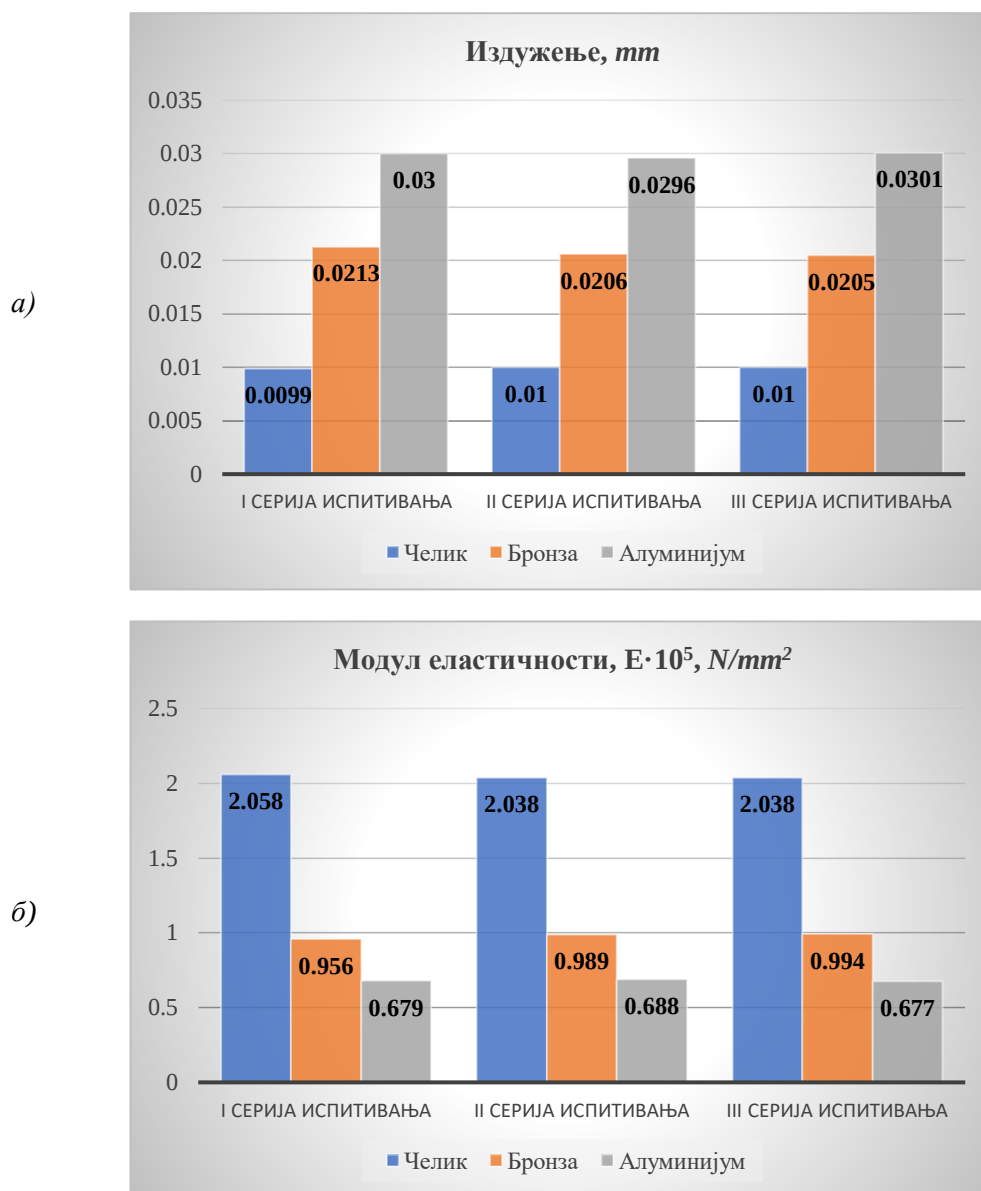
г)

Слика 6.7 Припрема и позиционирање специјално припремљеног узорка од алуминијума за испитивање модула еластичности

6.5.4 Упоредивање добијених резултата код епрувета истог попречног пресека

За другу серију експеримента направљен је нов сет узорака истог попречног пресека средишњег мерног дела на који се позиционира екстензометар. Како би мерења била што прецизнија потребна је што финија обрада узорака, јер је коришћени мерни инструмент (Мартенс – Кенедијев екстензометар) јако осетљив и има степен увећања $k = 100$, што значи да је вредност једног подеока на мерном сату $0,01 \text{ mm}$. Само позиционирање мерног инструмента на тело узорка и почетно подешавање (тзв. "нуловање") је веома компликовано зато што су лева и десна страна екстензометра независне. После позиционирања следи задавање иницијалне силе како би се отклонио ризик од могућег проклизавања узорка у чељустима механичке кидалице, затим задавање изабраног прираштаја силе и поновно растерећење до почетне силе како би се проверило да ли је мерни инструмент прописно позициониран и да се испитивања спроводе у области еластичности. Ако се после растерећења казаљке на мерном сату/индикатору поново врате на нулу, екстензометар је исправно подешен и може се започети са експерименталним испитивањима. Задавање силе обавља се ручно помоћу

окретења завојног вретена до задате силе у циљу веће тачности. Експеримент на сваком узорку се изводио у три серије у циљу што веће прецизности, а изабран је исти прираштај силе (ΔF). Вредности издужења читавају се директно са мерног сата уређаја, а затим се рачунски помоћу добијене средње вредности деформације (Δl) срачунава вредност модула еластичности. Добијени експериментални резултати приказани су на слици 6.8. На слици 6.8а приказане су средње вредности деформација/издужења, док су на слици 6.8б приказане вредности модула еластичности за испитиване материјале. Као што се са дијаграма издужења јасно може видети, узорак израђен од алуминијума има три пута веће издужење од узорка израђеног од челика док је издужење узорка од бронзе отприлике дупло веће. Наравно овде је реч о еластичним издужењима/деформацијама.



Слика 6.8 Експериментално добијене вредности а) издужења/деформације и б) модула еластичности испитиваних узорка

У првом делу експеримента наглашено је да је различит попречни пресек узорка довео до неадекватних резултата приликом упоређивања издужења узорка, док су у другом делу експеримента резултати задовољавајући. Аналогно издужењу, вредности модула еластичности (сл. 6.8б) су обрнуте, узорак израђен од челика, као што је и очекивано, пружио је највећи отпор при издужењу (поседује најјаче међуатомске везе)

и самим тим има највећи модул еластичности, приближно 205000 МПа. У табlici 6.7 дате су упоредне вредности модула еластичности које су добијене експерименталним испитивањем узорак из обе серије испитивања као и вредности модула еластичности које се могу наћи у релевантној литератури или каталозима произвођача челика, месинга, бронзе и алуминијума.

Таблица 6.7 Упоредне вредности модула еластичности испитиваних материјала

	Експериментално добијене вредности, МПа		Литературне вредности модула, МПа
	Прва серија експеримента	Друга серија експеримента	
Челик	205800	204500	200000 - 210000
Месинг	104792	-	95000 - 105000
Бронза	-	98010	80000 - 110000
Алуминијум	72562	68160	65000 - 70000

Треба напоменути да је модул еластичности веома важна константа материјала чија величина зависи од јачине/чврстине везе између атома у кристалној решетки и врсте материјала. Посебно треба нагласити да се мења са променом температуре. Дакле, са растом температуре долази скоро до линеарног опадања вредности модула еластичности, што се може повезати и са слабљењем међуатомских веза код метала.

7. Закључак

Модул еластичности представља меру крутости/чврстине материјала и једнак је односу напона и деформације при затезању у линеарној или еластичној области дијаграма σ - ϵ . Реч је о веома важној карактеристици/константи материјала, која велику примену налази при прорачуну конструкција. Основни циљ овог рада јесте покушај да се за различите метале и легуре експериментално, помоћу методе екстензометра, што тачније одреди ова врло важна величина при затезању специјално припремљених узорака/епрувета.

У првом поглављу овог рада је описано понашање материјала при деловању спољних сила. Утврђена је веза између напона и деформација при дејству нормалних сила у еластичној области – модул еластичности, односно везе између напона и деформација при дејству тангенцијалних сила у еластичној области – модул клизања. Такође, наведена је позната веза између модула еластичности и модула клизања помоћу Поасоновог коефицијента. Поред еластичних/опружних деформација, указано је и на могућност настанка пластичних/трајних деформација, као и најважније равни и правци клизања - системи клизања, код најважнијих кристалних решетки (A1, A2 и A3), сходно познатом Шмидовом закону клизања.

У другом поглављу се наводе и описују неке од најважнијих метода испитивања метала и легура са разарањем: испитивање затезањем, испитивање притиском, испитивање савијањем и др. Циљ овог поглавља јесте да се утврде најважнија својства оппорности и пластичности/деформације материјала при деловању спољашњих оптерећењам, као и да буде солидна основа за што боље разумевање појмова – модул еластичности и модул клизања. У трећем поглављу детаљно се описују најважнији начини за одређивање модула еластичности: графичка метода, метода помоћу механичких инструмената (екстензометра) за мерење малих деформација, електрична метода помоћу мерних трака и метода одређивања модула еластичности мерењем угиба греде оптерећене савијањем, тј. решавањем диференцијалне једначине еластичне линије. Јасно, поред описаних метода, данас се користе и неке друге методе (оптичке, ласерске и др.) које се свде на што тачније/прецизније одређивање малих деформација у еластичном подручју.

У четвртном поглављу описана је поступак припреме узорака/епрувета и процедура за експериментална испитивања. У петом поглављу се описују испитивани метали: челик и алуминијум, и легуре: месинг и бронза, од којих су припремљени узорци за одређивање модула еластичности. Заправо, наводи се кратак резиме добијања и примене ових врло важних материјала. У шестом, најважнијем поглављу овог рада, детаљно су наведени резултати одређивања модула еластичности две серије испитиваних материјала: челика, алуминијума, месинга и бронзе. Успостављена је веза између деформације/издужења и модула еластичности у еластичној области за наведене материјале. Добијени резултати су упоређивани са литературним подацима и могу се сматрати прихватљивим.

8. Литература

1. М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић: *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
2. М. Јовановић и аутори: *Наука о материјалима II* – рукопис предавања, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2021.
3. П. Терзић: *Испитивање метала, део I: Механичка испитивања*, Институт за испитивање материјала СРС, Београд, 1972.
4. И. Пантелић: *Познавање материјала*, II део, Особине и испитивање металних материјала, Научна књига, Београд, 1967.
5. В. Арсенијевић, А. Валчић, М. Брекић: *Физичко механичко испитивање материјала*, Грађевинска књига, Београд, 1972.
6. А. Мајсторовић, В. Ђукић: *Испитивање машинских материјала – упутства*, друго издање, Научна књига, Београд, 1988.
7. Ч. Петровић: *Приручник за вежбе из испитивања материјала*, део II, Испитивање механичких и структурних особина метала и легура. Шесто издање. Електротехнички факултет Универзитета у Београду, Научна књига, Београд, 1975.
8. Ј. Мандић: *Отпорност материјала*, Машински факултет у Београду, Научна књига, Београд, 1987.
9. Д. Рашковић: *Отпорност материјала*, Грађевинска књига, Београд, 1987.
10. М. Ћировић: *Отпорност материјала I*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2008.
11. Д. Рашковић: *Таблице из Отпорности материјала*, XIV издање, Грађевинска књига, Београд, 1987.
12. В. Лазић, М. Јовановић, Д. Арсић, *Рукописи и предавања са портала е-Learning из предмета: Машински материјали, Наука о заваривању и Производне технологије 1 и 2* (Факултет инжењерских наука у Крагујевцу).
13. Д. Голубовић: *Механика у примерима и задацима – Отпорност материјала*, ИРО Грађевинска књига, Београд, 1986.
14. М. Јовановић, В. Лазић: *Технологија заваривања и ливења*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
15. <https://www.trcpro.rs/proizvodi/masine-za-ispitivanje-materijala/index.html> - Приступљено јула 2020.