

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Мерење, контрола и квалитет

Број индекса: 23/2015

Иван С. Милошевић

Мерење механичких карактеристика завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Доц. др Фатима Живић - ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да

Опише теоријски процес одређивања модула еластичности уређајима којима се мери и тестира механичке карактеристике материјала. Одређивање и теоријски опис услова пластичности, криве ојачања, затезне чврстоће и границе течења. Приказ статичких и динамичких метода одређивања тврдоће материјала. Дато је описивање кратког теоријског описа механике лома и поделе ломова и процеса настанка тих ломова.

Препоручена литература:

[1] Horst Czichos, Tetsuya Saito, Leslie Smith, *Springer Handbook of Materials Measurement Methods*, Springer Science + Business Media, Inc., Лајпциг, 2006.

Крагујевац, датум

Ментор:

Доц. др Фатима Живић

Садржај

1. Увод.....	2
2. Еластичност	3
2.2. Истезање и Хуков закон	4
2.3. Дијаграм нормалног напона и релативног истезања	5
2.4. Савијање плоче	6
2.5. Опис апаратуре	7
2.6. Одређивање модула еластичности механичким екстензометром.....	10
2.7. Одређивање модула еластичности оптичким екстензометром.....	11
2.8. Електрични екстензометри (мерне траке).....	12
3. Пластичност.....	14
3.1. Услови пластичности.....	15
3.2. Енергетски услов пластичности.....	15
3.3. Услов највећег смичућег напона.....	16
3.4. Деформационо ојачање и криве ојачања.....	16
3.5. Хладно и топло деформисање	16
3.6. Крива ојачања	17
3.7. Својства отпорности при затезном напрезању	18
3.8. Граница течења	20
3.9. Затезна чврстоћа	22
4. Тврдоћа	23
4.1. Статичке методе за одређивање тврдоће	23
4.1.1. Тврдоћа по Бринелу (НВ)	23
4.1.2. Тврдоћа по Викерсу	28
4.1.3. Тврдоћа по Роквелу.....	30
4.2. Испитивање тврдоће динамичким дејством силе	34
4.2.1. Метода Полдијевог чекића	34
4.2.2. Склероскопска метода.....	36
4.2.3. Дуроскопска метода.....	38
5. Механика лома.....	39
5.1. Подела ломова.....	39
5.2. Ломови настали смицањем.....	40
5.2.1. Ломови при једноставном клизању	40
5.2.2. Лом при вишеструком клизању	41
5.3. Ломови настали механизмом раздвајања	42
5.3.1. Раздвајање кристала	42
5.3.2. Пропагација пукотина раздвајањем.....	42

5.3.3. Ефекат границе зрна на лом.....	42
5.4. Жилави лом	43
5.5. Крти лом.....	46
6. Закључак	48
Литература.....	49

Резиме

У овом раду се разматрају мерења механичких карактеристика. Детаљно се описује начин мерења механичких карактеристика, као и методологије испитивања. Поређена су одређене врсте мерења и њихова примена за испитивање карактеристика материјала. Сликавито се представљају различити уређаји и инструменти за испитивање карактеристика материјала. У овом раду се описује еластичност, пластичност, тврдоћа, механика лома.

Кључне речи: испитивање материјала, механичке карактеристике

Abstract

In this paper, the measurement of mechanical characteristics are discussed. The method of measurement, as well as their characteristics, are described in details. There is a parallel between certain types of measurements and their application for testing the characteristics of the material. Different devices and instruments for testing material characteristics are presented. This paper describes elasticity, plasticity, hardness, fracture mechanics.

Key words: testing of materials, mechanical characteristics

1. Увод

Узимање узорка је, можда, најважнији део процеса мерења. Узимање узорка је, зато, суштински први корак у скоро свим мерењима. Ипак, обично је квалитет мерења онолико добар колико је добар квалитет узорка на којем се заснива. Па тако следи да је највећа брига и пажња око инструменталног мерења небитна, ако је оригинални узорак лошег квалитета.

Рад је конципиран тако да се представе начини мерења механичких карактеристика материјала на различитим уређајима на којима се могу испитивати особине еластичних и пластичних деформација, мерење тврдоће материјала, испитивање материјала на лом.

У теоретском делу дат је приказ функционисања уређаја за испитивање механичких карактеристика материјала, али и приказ теорије о оптерећењу материјала, еластичним и пластичним деформацијама, тврдоћи материјала и механици лома. Дат је опис метода одређивања тврдоће материјала и теоријски приказ процеса и услова при којима настаје лом.

2. Еластичност

Ако на неко тело делује спољашња сила, тело почиње да мења свој облик, а при довољној величини спољашње силе може доћи до разарања тела. Деловањем силе истовремено настају у телу напони који се супротстављају унутрашњим силама да не би дошло до промене облика тела. Промена облика тела изазвана деловањем спољашњих сила се назива деформација. При малим вредностима спољашњих сила настаје еластична деформација која по престанку деловања спољашњих сила, деформација нестаје, а тело се враћа у почетан облик [2].

У кристалној решетки се еластична деформација испољава само малим отклањањем атома из њиховог равнотежног положаја. Најмањи део кристала се зове елементарна ћелија, а више ћелија образују просторну решетку. За опис елементарне ћелије као и кретања атома у решетки, неопходно је дефинисати положај атома, правце и равни у ћелији. Овакве силе не делују у једној тачки површине, већ су "размазане" по делу површине тела на које делују. Стога се као карактеристична величина узима напон [3]:

$$\vec{\tau} \equiv \frac{d\vec{F}}{dS}$$

тј. сила по јединици површине на коју та сила делује. Јединица за напон је паскал, тј.:

$$[\tau] = Pa = \frac{N}{m^2}$$

и иста је као и јединица за притисак. Веома мали делић површине тела у првој апроксимацији може сматрати равним, тј. као да је реч о врло малом делу неке равни. Јединични вектор $\vec{n}$ нормалан на раван делића и усмерен ка спољашности тела се назива јединичним вектором нормале. Ако је $\vec{\tau}$ истог смера као $\vec{n}$, онда овакав нормалан напон настоји да повећа (издужи) тело у правцу свог деловања. А ако су супротног смера онда се често уместо нормалног напона посматра притисак $p = -\sigma$, ово σ представља интезитет нормалног напона. Тада је $\vec{\tau} = -p\vec{n}$ и овакав нормалан напон настоји да сабије тело. Напон $\vec{\tau}$ нормалан на $\vec{n}$, тј. напон који лежи у равни делића се назива тангенцијално напон или напон смицања и он доводи до промене облика тела и тек посредно до промене димензије дела. У општем случају вектор напона $\vec{\tau}$ може имати произвољну оријентацију у односу на површину делића. Овај вектор можемо раставити на његову тангенцијалну и нормалну компоненту и представити га као збир. Када знамо расподелу напона по некој површини S онда је укупна сила настала таквом расподелом напона [2]:

$$\vec{F} = \int_S d\vec{F} = \int_S \vec{\tau} dS$$

где се интеграција врши по посматраној површи S . Ако је O изабрани пол у односу на којег рачунамо момент силе, онда је укупни момент сила створених дејством напона $\vec{\tau}$ расподељених по површини S дат са:

$$\vec{M} = \int_S \vec{r}^0 \times d\vec{F} = \int_S \vec{r}^0 \times \vec{\tau} dS$$

где је $\vec{r}^0$ вектор положаја тачке интеграције у односу на пол O . Одавде се види да је резултујућа сила и резултујући момент спољашњих површинских сила дати:

$$\vec{F}_{res} = \oint_S \vec{\tau} dS, \quad \vec{M}^0 = \oint_S \vec{r}^0 \times \vec{\tau} dS$$

где је $\vec{\tau}$ укупан напон површинских тела и где се интеграција врши по целој површини тела на шта указује ознака $\oint$ са кружићем на ознаци за интеграл [2].

2.1. Деформације

Замислимо да смо чврсто тело изделили, не буквално већ само у мислима, на веома мале делиће. Нека на тело не делују никакве спољашње силе и нека оно мирује. При оваквим условима сви делићи тела заузимају своје равнотежне положаје одређене силама између делића, а за само тело кажемо да је недеформисано. Ако на тело применимо спољашње силе мења се и расподела унутрашњих сила због чега делићи настоје да пређу у нове равнотежне положаје, па се њихов узајамни положај мења. Промена узајамног положаја делића представља локалну деформацију тела. Услед локалних деформација, тело као целина мења свој облик те за њега кажемо да је деформисано. Када су резултујућа спољашња сила и резултујући момент спољашњих сила на тело једнаки нули, тело мирује и сви његови делови имају исту константну температуру [2].

2.2. Истежање и Хуков закон

Један од могућих видова деформације тела је истежање. Ако се исправљена жица затегне тако што на један њен крај делује сила $\vec{F}$ дуж правца жице, а на други крај супротна сила $-\vec{F}$ жица ће се истегнути тј. њена дужина L ће бити већа од дужине L_0 слободне жице. При малим силама истежања $\Delta L \equiv L - L_0$ је пропорционално примењеној сили F тј. вреди Хуков закон $\Delta L \sim F^3$. На слободном десном крају овог делића делује спољашња сила F а на супротном крају сила F која уравнотежава силу F . То значи да на десном крају делује сила једнака спољашњој сили F , једино што сада ово није спољашња сила већ сила којом крајње десни делић делује на њега, али и суседни делић је у равнотежи јер на њега делује његов леви сусед силом која уравнотежава F и тако редом. Закључујемо да се у сваком попречном пресеку жице јавља сила једнака по интезитету спољашњој сили F . На површину попречног пресека чија је нормала усмерена ка десном крају жице можемо сматрати да делује сила $\vec{F}$ док се на исту површину али са супротном усмереном нормалом може сматрати да делује сила $-\vec{F}$. Можемо да предпоставимо да је напон у свим тачкама десно краја жице исти тј. $\sigma = F/S$ и аналогно за леви крај. Нека је у недеформисаном стању његова дужина означена са l_0 , а у деформисаном стању l тако да је $\Delta l = l - l_0$. Ако је жица хомогена и ако смо је изделили на N делова једнаке дужине $l_0 = L_0 / N$, а с обзиром да је укупно истежање жице, збир истежања њених делова, закључујемо да су релативна истежања целе жице и савког њеног дела иста, тј. $\Delta L / L_0 = \Delta l / l_0$. Количник истежања Δl и дужине l_0 недеформисаног дела тј. његово релативно истежање се назива релативном деформацијом дела [2]:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Са друге стране није свеједно да ли је сила којом истежемо жицу примењена на дебелу или танку жицу. Дебела жица има мање релативно истежање, тачније иста сила изазива онолико пута веће релативно истежање колико је пута мања површина попречног пресека. Тако стижемо до ближе формуле Хуковог закона:

$$\sigma = E/\epsilon$$

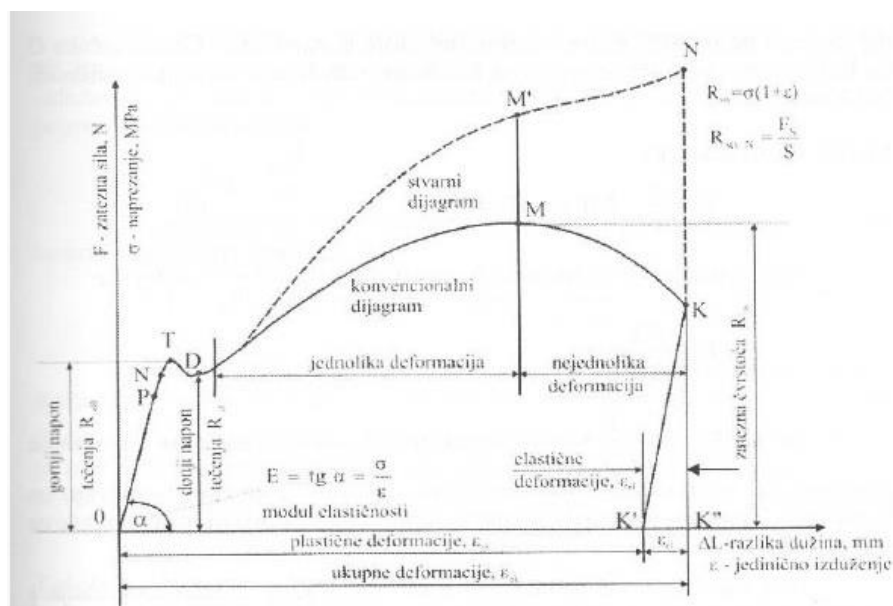
који каже да у свакој тачки тела нормални напон σ пропорционалан релативној деформацији ε . Константа пропорционалности:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

се назива Јангов модул еластичности. С обзиром да је релативна деформација бездимензионална величина, Јангов модул еластичности има димензију напона, те је његова SI јединица паскал:

$$[E] = \text{Pa}$$

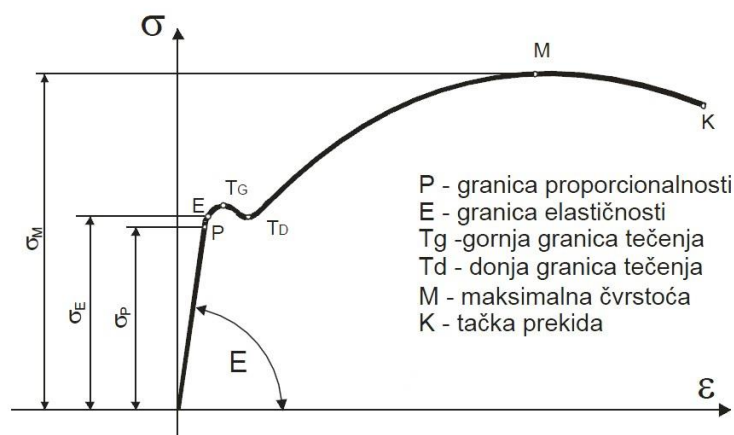
Јангов модул еластичности је карактеристика материјала која не зависи ни од напона нити од релативне деформације већ од осталих параметара стања материјала, на првом месту од његове температуре [2].



Слика 2.1 Хуков дијаграм [4]

2.3. Дијаграм нормалног напона и релативног истезања

Хуков закон важи само за мале релативне деформације. При већим релативним деформацијама веза између нормалног напона σ и релативне деформације ε постаје нелинеаран и њен типичан ток је дат на слици:

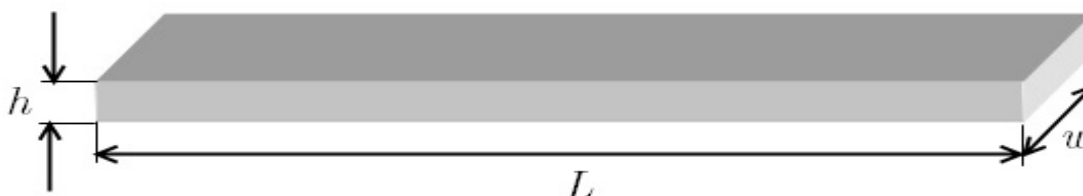


Слика 2.2 Дијаграм нормалног напона σ у функцији релативног издужења [5]

Као што се са слике види линеарна зависност напона σ од релативног издужења ε вреди у области малих релативних истезања нпр. мањих од 0,1% до тачке Р-тзв. граница пропорционалности тј. за напоне мање од напона σ_P који се назива напонам на граници пропорционалности. У области малих деформација закључно са тачком Е тело се по престанку дејства сила истезања враћа у првобитно стање, те за деформације у овој области кажемо да су еластичне док за деформације закључно са тачком Р кажемо да су линеарне и еластичне. У области између тачке Р и границе еластичности тачке Е, односно између напона σ_P и напона на граници еластичности σ_E , веза између напона и деформације више није линеарна, али су деформације и даље еластичне. У области након тачке Е деформације су пластичне тј. након престанка дејства сила истезања тело се не враћа у првобитни облик већ остаје делимично деформисан. Преласком горње границе течења T_g тело престаје да даје отпор истезању. Истежање расте само од себе, а напон пада све док тело не дође на доњу границу течења- тачку T_d . Област између тачака T_g и T_d је област очвршћивања. У њој се напон повећава при повећању истезања. Тачка М описује стање максималне чврстоће материјала, иза ње истезање само од себе расте, напон пада и тело се кида у тачки К [2].

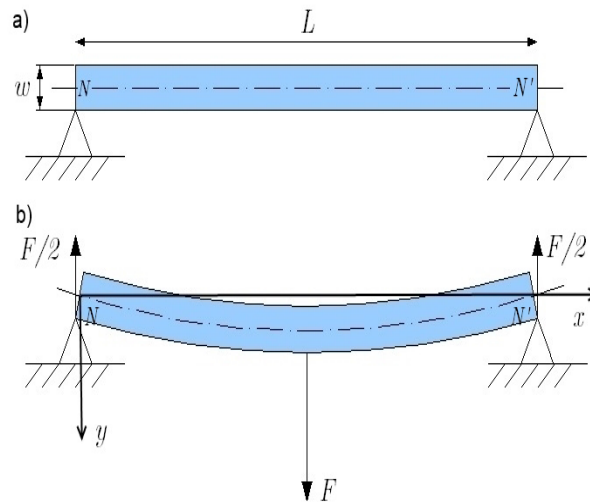
2.4. Савијање плоче

Савијање еластичне плоче је један од могућих видова њених деформација. У излагању које следи ћемо се ограничити на мала савијања при којима се јављају линеарне и еластичне деформације. Нека недеформисана плоча има облик квадра дужине L , висине h и ширине w ($h \ll w < L$) (слика 2.3) [5]:



Слика 2.3 Недеформисана плоча [5]

Нека је та плоча постављена на два ослоња и нека на њеној средини делуја сила F усмерена вертикално наниже. Под дејством ове силе, плоча се савија. И пре и после деформације ситуација у свим вертикалним пресецима плоче паралелним дужини плоче је иста, те се потпуна слика "дешавања" унутар плоче "пројектује на раван цртежа. Другим речима, плоча се понаша као дводимензионално тело и представљена је својом пројекцијом на раван цртежа. Хоризонталне дужи паралелне ширини плоче се не деформишу већ остају хоризонталне и паралелне ширини плоче. Хоризонталне дужи паралелне дужини плоче се криве. Све те дужи мењају дужину осим дужи из равни симетрије које се само криве не мењајући дужину. Овакве дужи образују неутралну површ и на цртежу се све пројектују на линију NN' за коју кажемо да је неутрална. Дужи паралелне висини плоче не мењају дужину, али мењају правац остајући нормалне на искривљену неутралну линију [5].



Слика 2.4 Плоча ослоњена на два ослоњаца [5]

Уведемо координату x дуж неутралне линије пре савијања, у координату усмеримо дуж силе F а координатни почетак поставимо у тачки N . У овом систему координата је при малим деформацијама неутрална линија дата изразом:

$$y(x) = \frac{Fx}{48EI}(3L^2 - 4x^2)$$

где је:

$$I = \frac{1}{12}wh^3$$

аксијални момент инерције попречног пресека правоугаоне плоче. Одавде је угиб λ , тј савијање плоче на њеној средини где је $x = L/2$, дат изразом:

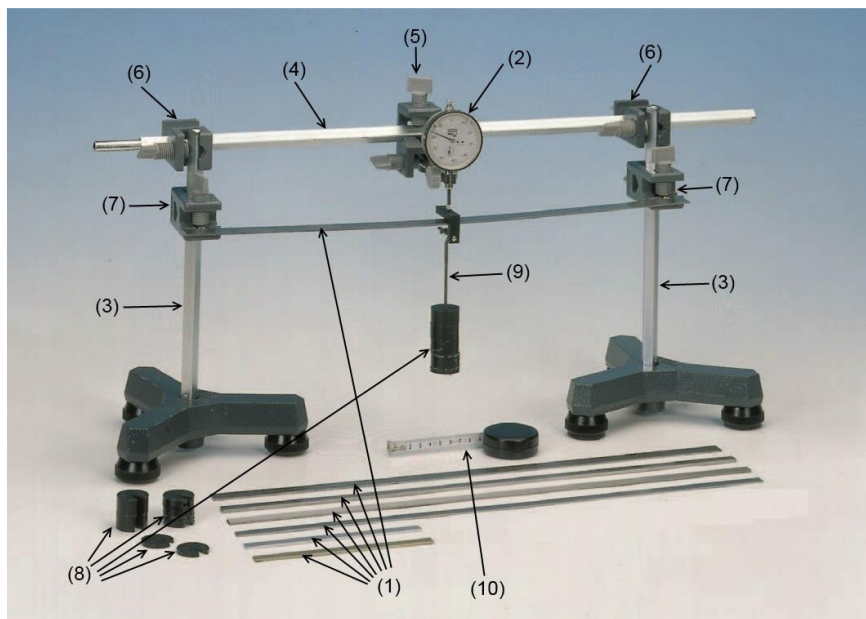
$$\lambda = \frac{FL^3}{48EI}$$

Што се може искористити за мерење модула еластичности [5].

2.5. Опис апаратуре

Апаратура за одређивање еластичности модула састоји се од [5]:

- неколико узорак плоча различитих величина и од различитих материјала (1),
- компаратора, тј инструмент за мерење померања (опсег 10 мм, тачност и резолуција 0,01 мм) (2),
- два постоља са носачима (3),
- хоризонталне конзоле (4),
- стеге у коју се поставља компаратор (5),
- стеге за причвршћивање конзоле (6),
- стеге за ослањање узорка (7),
- сета од две врсте тегова од по 50 грама и 10 грама (8),
- носача тегова (9),
- метарске траке (10).



Слика 2.5 Апаратура за одређивање модула еластичности [5]

Уз то користимо дигиталну вагу (опсег 610 грама, резолуција 0,01 грама, тачност 0,02 грама) за калибрацију компаратора, као и лењир са нонијусом и либелу за подешавање поставке апаратуре.

С обзиром на тешкоће са којима је везано прецизно одређивање овог граничног напона, усвојено је да се као практична вредност границе еластичности узима напон који изазива поуздано мерљиву малу вредност трајног издужења. Ове вредности се крећу између 0,01% и 0,005% мерне дужине L_0 . Према стандарду ЈУС С.А4.001 за границу еластичности узима се конвенционални напон при којем настају трајне пластичне деформације од 0,01% или 0,005% мерне дужине L_0 ($R_{p0,01}$ или $R_{p0,005}$). Када се врши испитивање у области еластичности, треба знати, да за једнаке прирасте оптерећења и пораст издужења мора бити једнак. Границе еластичности ($R_{p0,01}$ или $R_{p0,005}$) у већини случајева налазе се сасвим близу једна друге, близу границе развлачења. Малу вредност границе еластичности имају материјали нехомогене структуре, код којих под дејством спољних оптерећења долази до нарушавања равномерног напонског стања. Тако на пример, крти материјали као што је сиви лив има много малу границу еластичности, за разлику од чистих челика код којих се граница еластичности сасвим приближава граници развлачења [2].

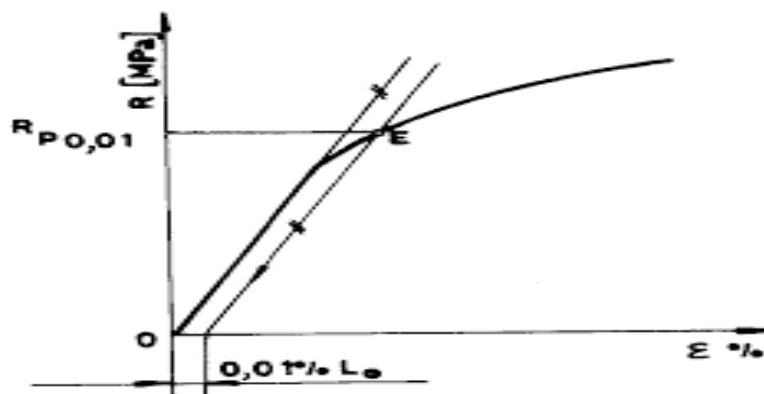
Граница еластичности се може одредити графичком методом и методом механичког екстензогра. Графичком методом границе еластичности одређује се тако што се права паралелна тангенти на праволинијски ток криве напон-јединично издужење повлачи на удаљењу од 0,01%, односно 0,005% мерне дужине L_0 . Условна (конвенционална) граница еластичности $R_{p0,01}$ или $R_{p0,005}$ одређује се методом механичког екстензогра. Поступак се изводи у неколико фаза. Најпре се усвоје потребно предоптерећење тестова који износи:

$$F_0 = 10\% F_{e0} ; (N)$$

где је: F_{e0} - очекивана сила на граници еластичности.

У том тренутку екстензогра се постављају у нулти положај. Оптерећење за смањење утицаја проклизавања епрувета [1]:

$$F_1 = 2 \cdot F_0 ; (N)$$



Слика 2.6 Графичко одређивање границе еластичности [2]

Почетно оптерећење за одређивање $R_{P0,01}$:

$$F_2 = 80\% F_{e0}$$

За усвојени прираштај оптерећења $\Delta R = 10 \text{ МПа}$ одговара прираштај силе:

$$\Delta F = \Delta R \cdot S_0$$

Величина заосталих деформација у материјалу до постизања условне границе еластичности $R_{P0,01}$:

$$\Delta L_{e0,01} = 0,01\% L_0 ; (\text{mm})$$

Број подеока на екстензометру који одговара деформацији $\Delta L_{e0,01}$:

$$n1 = \frac{\Delta L_{e0,01}}{0,002} ; (\text{подеока})$$

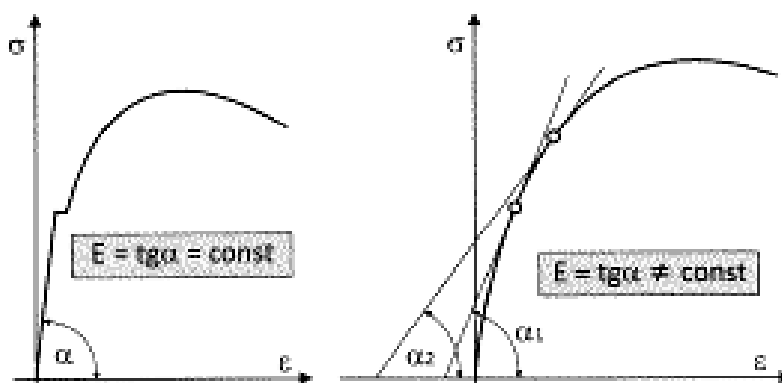
где је: 0,002 - тачност читања екстензометра.

Резултати мерења деформација до постизања условне границе еластичности $R_{P0,01}$, а на основу усвојених параметара, дају се табеларно. Величина оптерећења $F_{e0,01}$ при којој постижемо трајно издужење $\Delta L_{e0,01}$ износи:

$$F_{e0,01} = F_n + \Delta F1 ; (\text{N})$$

где је F_n претходно оптерећење пре постизања трајног издужења $\Delta L_{e0,01}$; величина $\Delta F1$ одређује се преко средње вредности броја подеока $n1$ методом линеарне интерполације. Условна граница еластичности износи:

$$R_{P0,01} = \frac{F_{e0,01}}{S_0}$$



Слика 2.7 Графичко одређивања модула еластичности код меког челика и код бакра [2]

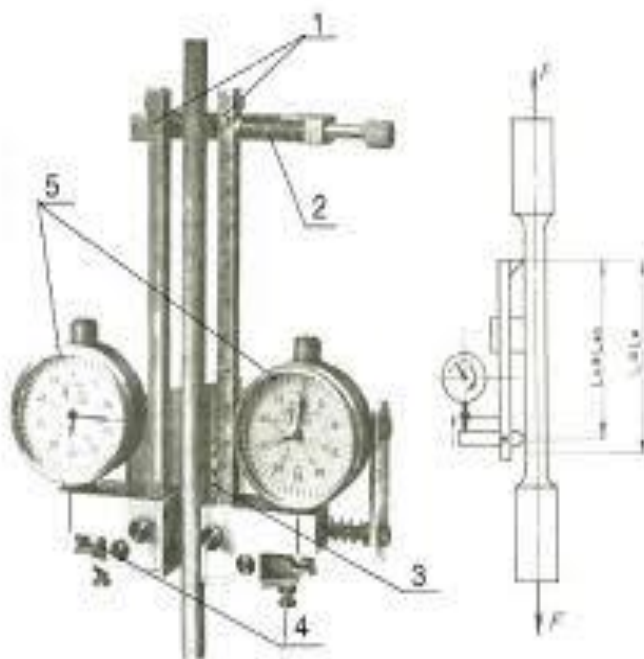
Деформације које настају у епрувети стандардних димензија, при напонима у подручју еластичности, толико су мале да се могу мерити једино прецизним екстензометрима. Најчешће су у примени три конструкције екстензометара, и то:

1. механички екстензометри,
2. оптички екстензометри,
3. електрични екстензометри-мерне траке [2].

2.6. Одређивање модула еластичности механичким екстензометром

При овом начину одређивања еластичности модула потребно је одредити прираштај силе ΔF чије се промене прате на машини за кидање. Такође је потребно знати површину попречног пресека (S_0) и мерну дужину (L_0) епрувете, на којој се прате издужења (ΔL). Промена издужења (ΔL) чита се на екстензометру након сваког прираштаја сила (ΔF). Постоји више врста механичких екстензометара, али се најчешће користи Мартенс-Кенедијев екстензометар.

Овај екстензометар ради на принципу полуге, користи се за мерење малих линеарних деформација. Пар горњих непокретних ножева (1) одређује једну од крајњих мерних тачака на епрувети, а причвршћују се за епрувету помоћу опруге (2). Други пар покретних ножева (3) одређује другу крајњу мерну тачку на епрувети. Растојање између ова два пара ножева представља мерну дужину (L_0). При малим деформацијама епрувете полуге (4) мерног инструмента се покрећу, а померања се региструју на одговарајућој скали компаратера (5). Мерна скала компаратера (5) има мерно подручје $\pm 3\text{мм}$. Вредност једног подеока је $0,01\text{мм}$, а пуног круга на скали $0,5\text{мм}$. При већој линеарној деформацији од $0,5\text{мм}$, број пуних кругова читава се на унутрашњој скали преко мале казальке. С обзиром на неједнаке деформације левих и десних влакана епрувете мерења се врше на обе стране епрувете преко два мерна инструмента (5). Крајњи резултат линеарне деформације добија се као средња вредност издужења леве и десне стране епрувете [2].



Слика 2.8 Механички Мартенс-Кенедијев екстензометар [2]

Да би се одредио модул еластичности механичким екстензометром најчешће се користи комбиновани експериментално-рачунски поступак. Поступак је врло једноставан, а састоји се у праћењу промене издужења епрувете под дејством приаштаја сила (ΔF) и аналитичке обраде добијених резултата. Измерене величине се најчешће дају табеларно. Вредност модула еластичности добија се преко израза:

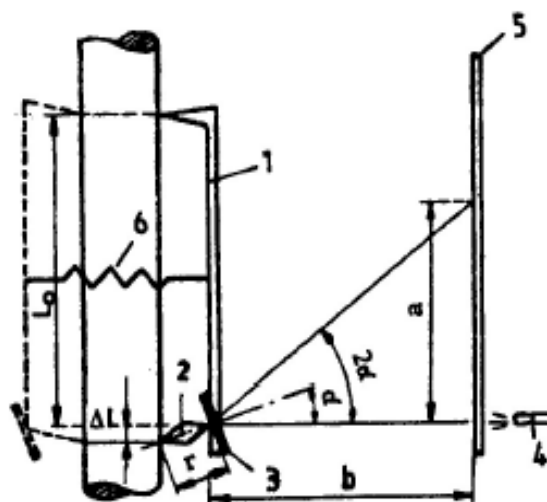
$$E = \frac{\Delta F * L_0}{S_0 * \Delta L} ; \text{ МПа}$$

где је: ΔL средња вредност издужења епрувете.

Најчешће се раде две вредности еластичности модула, па онда преко хармонијских средњих вредности добија средњи модул еластичности испитиваног материјала [2].

2.7. Одређивање модула еластичности оптичким екстензометром

Ова метода одређивања еластичности модула се примењује тада када се тражи већа тачност мерења деформација, него што је то могуће постићи механичким екстензометром. Код оптичког екстензометра деформације се могу мерити са тачношћу 1/5.000мм. Најчешће је у примени Мартенсенов оптички екстензометар или како се још чешће назива Мартенсеново огледало [2].



Слика 2.9 Шема Мартенсеновог огледала [2]

Оптички екстензометар типа Мартенс састоји се од носача (1) са непокретним и покретним ножевима, при чему растојање између ножева одређује мерну дужину екстензометра. Покретни нож (2) има облик призме и на њега је причвршћено Мартенсеново огледало (3), које мења свој положај променом угла α при појави линеарних деформација у епрувети. Издужење епрувета ΔL одређује се помоћу светлосног зрака који са извора (4) пада на огледало и од њега се одбија лењир (5) са милиметарском поделом. Пошто је огледало (3) постављено на нож под углом, пре оптерећења силом F одбојни зрак заклапа угао α . При деформацији епрувете нож са огледалом се помера при чему одбојни зрак добија двоструку вредност угла 2α [2].

Са слике се види да издужење епрувета ΔL одговара померању светлосног зрака по лењиру, па се добије да је:

$$\Delta L = r * \sin \alpha$$

$$a = b * \tan 2\alpha$$

Коефицијент увећања екстензометра је:

$$K = \frac{a}{\Delta L} = \frac{b \cdot \tan 2\alpha}{r \sin \alpha}$$

Ако се зна да су линеарне деформације врло мале, тј. угао $\alpha < 2^\circ$, може се прихватити да је $\tan 2\alpha = 2\alpha$ и $\sin \alpha = \alpha$. Тада је коефицијент увећања екстензометра:

$$k = \frac{2b}{r}$$

Линеарна деформација епрувета добија се изразом:

$$\Delta L = \frac{a}{k} = \frac{r}{2b} \cdot a; \text{ (mm)}$$

Код овог методе за одређивање линеарне деформације читава се само величина a на лењиру, док је r (дијагонала попречног пресека призме) константа инструмента. С друге стране, коефицијент увећања екстензометра (k) зависи од растојања лењира од огледала (б). Заменом вредности издужења ΔL у образац

$$E = \frac{\Delta F \cdot L_0}{S_0 \cdot \Delta L}$$

добија се модул еластичности:

$$E = \frac{F \cdot L_0}{S_0 \cdot \Delta L}; \text{ (МПа)}$$

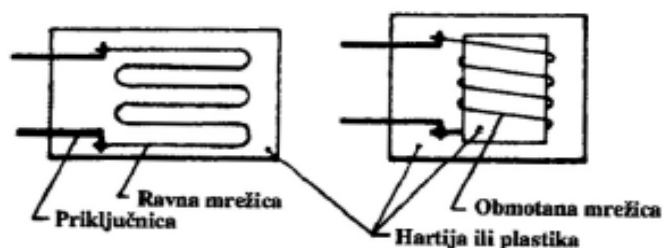
Као и код механичког екстензометра и овде се ради веће тачности мерење врши помоћу два пара ножева, који су уз епрувету причвршћени подесним опругом (б) [2].

2.8. Електрични екстензометри (мерне траке)

Мерне траке почеле су да се примењују за мерење деформација од 1940. године. Од тада се њихова примена толико проширила и усавршила да су практично потиснуле у други план све остале класичне поступке за мерење деформације на уграђеним конструкцијама. Принцип рада мерних трака заснива се на мерењу електричних параметара при деформацији епрувете, као што су електрични отпор и индуктивност.

Мерна трака је једноставне конструкција. Састоји се од мрежице израђене од танке жице пречника 0,02-0,03мм, електричног отпора 100-200Ω. Цик-цак савијена мрежица мерне траке залепљена је на танки специјални папир, чиме се одржава облик траке, обезбеђује изолацију проводника од површине материјала на коју је трака залепљена, обезбеђује прикључак за мерну инсталацију итд. Мрежице се углавном раде на два начина и то [2]:

1. наизменично превијањем жице у једној равни,
2. обмотавањем жице на цилиндар од хартије, који се затим спљошти.



Слика 2.10 Стандардни типови жичаних мерних трака са равном и обмотаном мрежицом [2]

Примена мерних трака омогућава мерење деформација не само у лабораторијским условима при статичком и динамичком оптерећењу, већ и у радним условима за праћење деформација уграђених елемената и конструкција. Захваљујући томе што мерна трака може бити веома далеко од региструјућег прибора, могу се мерити деформације на покретним и неприступачним деловима машина. На испитивану епрувету најпре се чврсто залепи специјални папир на којем се налази мерна трака, а затим се приступи испитивању. При деформацији епрувете настају и деформације прилепљене мерне траке (промена дужине проводника и термогеног отпора). Између деформације и промене електричног отпора постоји линеарна зависност, све до прекида жице-отпорника у мерној траци. Величина електричног отпора на почетку испитивања износи:

$$R_1 = \rho \frac{L}{S}$$

где је:

- ρ специфични отпор материјала мерне траке,
- L дужина проводника мерне траке,
- S површина пресека проводника.

У току испитивања долази до промене дужине и попречног пречника жице (проводника) мерне траке, због чега се повећава отпор за: $R_1 + \Delta R$. Из промене отпора налази се величина деформације епрувете. Веза између деформације ΔL и промене електричног отпора ΔR , мерена преко Винстоновог моста је:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \varepsilon = \frac{1}{K} \cdot \frac{\Delta R}{R_1}$$

где је:

- R_1 отпор мерне траке (Ω),
- ΔR промена отпора (Ω),
- ε јединично издужење,
- L_0 база мерне траке (mm),
- ΔL издужење траке (mm),
- K карактеристика мерне траке.

Константа мерне траке K креће се од 2-4, 2 и зависи од материјала мерне траке, а одређује је произвођач. На основу познатих података (константе K и почетног отпора R_1 мерне траке) и измерене промене отпора ΔR рачуна се издужење епрувете ΔL , преко израза:

$$\Delta L = L_0 * \frac{1}{K} * \frac{\Delta R}{R_1} ; (\text{mm})$$

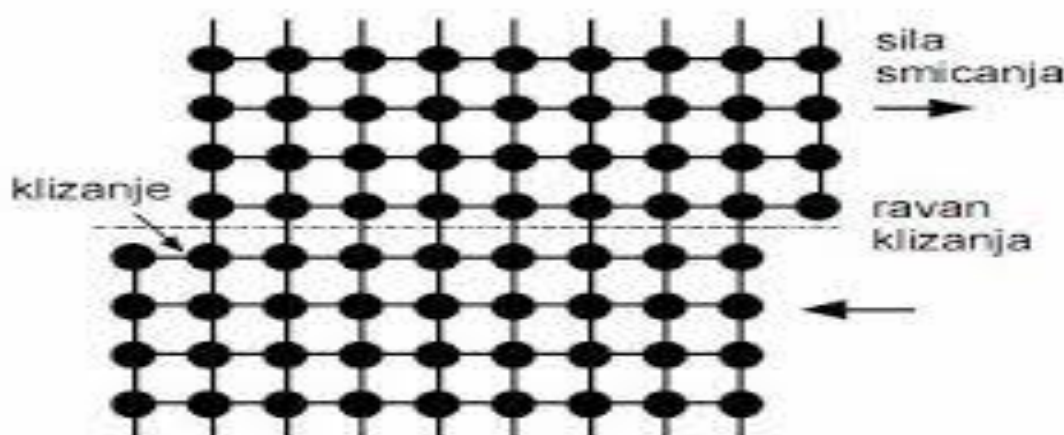
Вредност модула еластичности се добија преко израза:

$$E = \frac{\Delta F \cdot L_0}{S_0 \cdot \Delta L} ; \text{MPa}$$

где је: ΔL издужење мерне траке пре прекида [2].

3. Пластичност

Технологија пластичног деформисања обухвата процесе код којих се под дејством довољно великог оптерећења остварује пластична деформација односно комад трајно мења свој облик. Пластична деформација кристалних материјала настала било клизањем или двојниковањем остварује се кретањем дислокација. У оба ова случаја реч је о трајној промени облика која је изазвана смичућим напонима довољне величине. При пластичној деформацији клизањем, тим напонам се изазива померање два дела кристала дуж одређених кристалографских равни, на удаљеност која одговара вектору решетке. При двојниковању смичући напони у одређеном делу кристала доводе до померања већег броја суседних атомских равни. За разлику од клизања, при пластичној деформацији двојниковањем долази до померања многих атомских равни тако да релативно померање атома суседних равни не одговара целом вектору решетке [6].

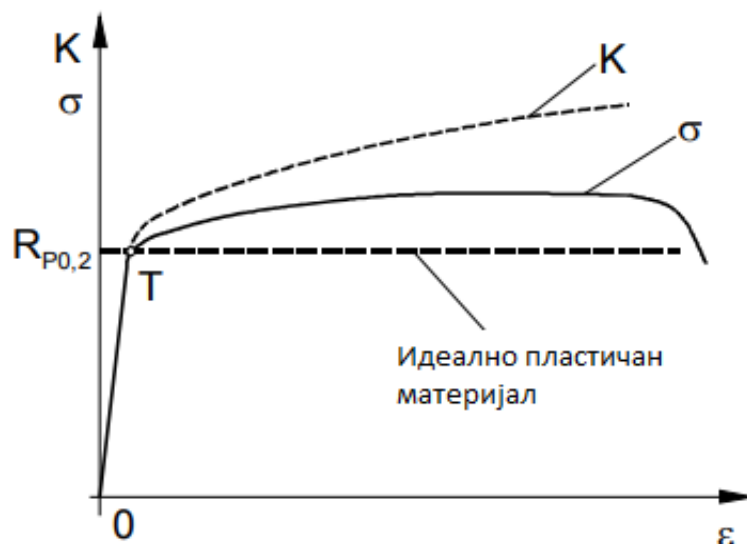


Слика 3.1 Деформисање кристала [3]

Пластично деформисање материјала се одвија под дејством одговарајућег спољашњег оптерећења које изазива унутрашње напоне и трајну промену облика полазног материјала. Укупна деформација је резултат пластичне деформације сваког појединачног кристалног зрна материјала, које међусобно не морају да буду једнаке. Раподела деформација по запремини комада може бити веома различита што зависи од типа и услова обликовања. При обради деформисањем не смеју се прекорачити вредности граничних износа деформације, јер се у противном разара структура материјала или појављују други неприхватљиви дефекти. Такође се не смеју прекорачити интезитети контактних напона јер може доћи до оштећења алата. Због тога се за сваку технолошку методу технологије пластичног деформисања изводи прорачун компоненти напона и деформација, затим прорачун деформационих сила рада. Ови параметри неопходни су за правилно димензионисање алата и избор одговарајућих машина. Током пластичног деформисања материјал мења своју структуру, што за последицу има промену механичких својстава у смислу повећања чврстоће и жилавости [6].

3.1. Услови пластичности

Под дејством спољашњег оптерећења полазни материјал се у првој фази деформише еластично, а онда у критичном тренутку почиње остваривање процеса пластичног обликовања који траје све до коначне промене облика [6].



Слика 3.2 Стварни и технички напон при једносмерном затезању [2]

Да би се остварио прелаз из еластичног у пластично деформисање, потребно је да буду испуњени одређени услови у погледу интензитета и међусобног односа напона који делује по заремини тела.

На слици је приказан прелаз из области еластичности у област пластичности на примеру једноосног затезања. Он се дешава у тачки Т кад технички, односно нормални напон достигне вредност границе течења $R_{p0,2}$. Главни нормални напон представља уједно и ефективни напон и напон течења, односно деформациони отпор К. Његов интензитет расте са порастом пластичне деформације (ефекат ојачавања). Деформациони отпор (напон течења, деформациона чврстоћа) једнак је еквивалентном напону σ_e током пластичног деформисања. У условима једноосног напонског стања σ_e је једнако главном моменту σ_1 , односно стварном напону F/A [6].

$$\sigma = \frac{F}{A_0} - \text{технички напон}$$

$$\sigma_1 = \frac{F}{A} = K = \sigma_e - \text{стварни напон}$$

3.2. Енергетски услов пластичности

Познат као Мизесов критеријум пластичности важи у општем случају просторних напонских стања. Да би отпочело пластично деформисање у напрегнутом телу, количина унутрашње енергије еластичне промене облика, по јединици запремине, треба да достигне један критичан износ у датим условима (брзина, температура, степен деформације). Ова енергије зависи од искључиво својства материјала, што практично значи да пластично деформисање почиње кад ефективни напон достигне вредност деформационог отпора. Зависност деформационог отпора од пластичне деформације одређује се експериментално при једноосном затезању или притискивању [6].

3.3. Услов највећег смичућег напона

Он је познат под називом Треска и гласи: да би отпочео процес пластичног деформисања, максимални смичући напон у материјалу треба да достигне одговарајућу критичну вредност [6].

$$\tau_{max} = Ks = const$$

Ks - смицајни деформациони отпор

$$\tau_{max} = \pm \left(\frac{\sigma_1}{2} - \frac{\sigma_3}{2} \right) = \tau_{13}$$

При једноосном затезању $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ и $\sigma_1 = K$ па је $\tau_{max} = \frac{K}{2} = Ks$

Коначно: $\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{K}{2}$; односно $|\sigma_{max} - \sigma_{min}| = K$

Значи према овом услови да би се отпочело пластично деформисање потребно је да максимални смичући напон достигне половину вредности деформационе чврстоће. С обзиром да се τ_{max} изражава преко нормалних напона, према услови највећег смицајног напона, пластично деформисање наступа кад разлика између највећег и најмањег главног нормалног напона достигне вредност деформационог отпора [6].

3.4. Деформационо ојачање и криве ојачања

Током процеса деформисања са повећањем остварене пластичне деформације расте напон течења потребан да се процес несметано одвија. Карактеристике пластичности и жилавости опадају док су својства чврстоће у порасту. Материјал се опире деформисању и у складу са његовим особинама треба деловати са већим деформационим силама. У право тај ефекат израженог пораста напона течења са повећањем пластичне деформације праћењем радом пластичности материјала представља деформационо ојачање. Најбољи начин за одређивање тог процеса је преко кривих ојачања [6].

Ефекат ојачања зависи од:

- врсте и особина материјала,
- температуре обраде,
- брзине деформације [6].

3.5. Хладно и топло деформисање

Ако је температура обраде нижа од температуре рекристализације ($T < T_r$) То је температура на којој се обнавља кристална структура и њена пластичност. У већини случајева хладно деформисање подразумева обраду на собној температури, што доноси уштеде у процесу производње [6].

У табели 3.1 су дате температуре рекристализације појединих метала изражено у степенима целзијуса ($^{\circ}\text{C}$):

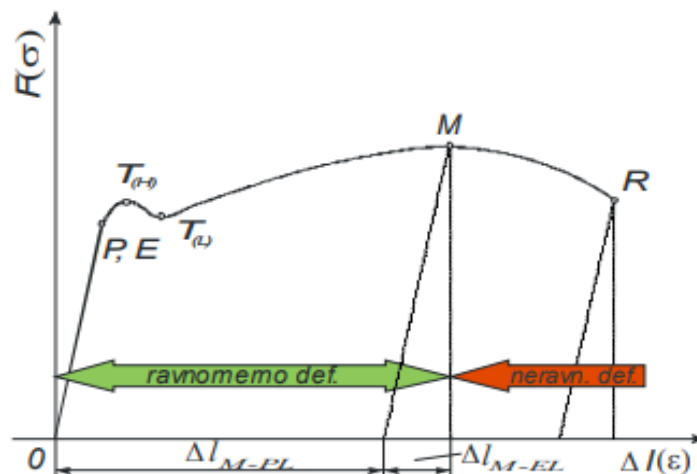
Табела 3.1 Температура рекристализације појединих метала [6]

Temperatura rekristalizacije pojedinih metala, °C			
Volfram	1200	Mesing	270
Gvožđe	450	Aluminijum	150
Nelegirani čelici	450–600	Kalaj	0
Srednje i visoko legirani čelici	600–800	Olovo	0

Деформисање у топлом стању се врши ако је температура обраде виша од температуре рекристализације. Основне карактеристике ове обраде су знатно нижи деформациони отпор, повећана пластичност, нижи квалитет површина и нижа тачност димензија и виши трошкови производње због загревања.

3.6. Крива ојачања

Оне представљају зависност деформационог отпора (напона течења, деформационе чврстоће) од остварене ефективне пластичне деформације. Показују интензитет ефекта деформационог ојачавања. Зависи од врсте материјала, температуре, брзине деформације. Криве ојачања се одређују експериментално, најчешће у условима једноосних напонских стања затезања и притиска у области еластичности. Тада постоји само један главни напон и у исто време је једнак и еквивалентном напону и деформационом отпору.



Слика 3.3 Дијаграм затезања [6]

Тест једноосног затезања се веома често користи за одређивање основних механичких карактеристика материјала а то су граница течења (R_e или $R_{p0,2}$) затезна чврстоћа R_M максималног издужења A . У области равномерног деформисања влада једноосно напонско стање и ту је могуће доћи до директних зависности између сила затезања, техничког напона и стварног напона који је у области пластичности једнак деформационом отпору и еквивалентном напону [6].

$$\sigma = \frac{F}{A_0} - \text{технички напон}$$

Веза између деформационог отпора K и напона σ се одређује:

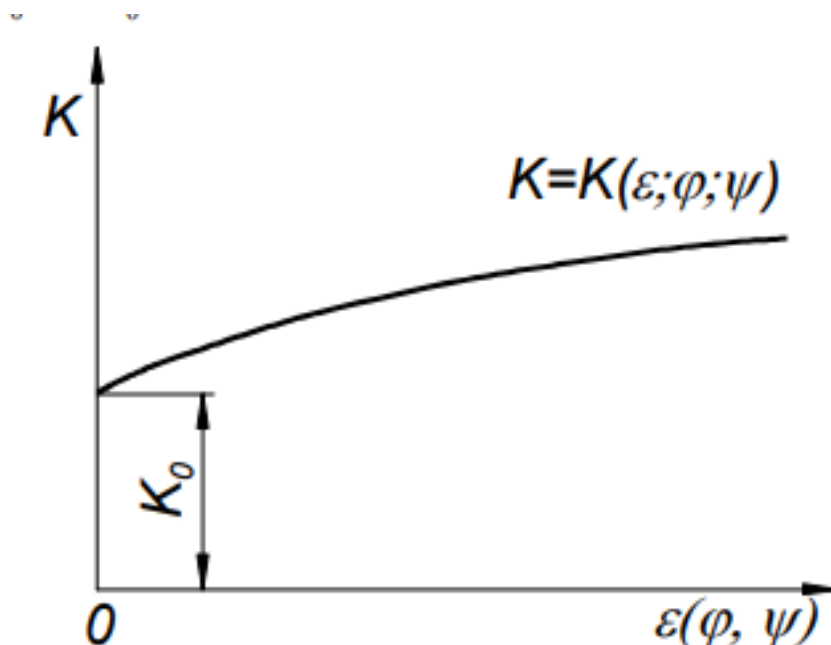
$$K = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \frac{l}{l_0} ; \quad K = \frac{F}{A_0} (1 + \varepsilon) = \sigma (l + \varepsilon)$$

на основу услова о непроменљивости запремине:

$$A_0 l_0 = A l$$

и основних дефиниција показатеља деформације:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1$$

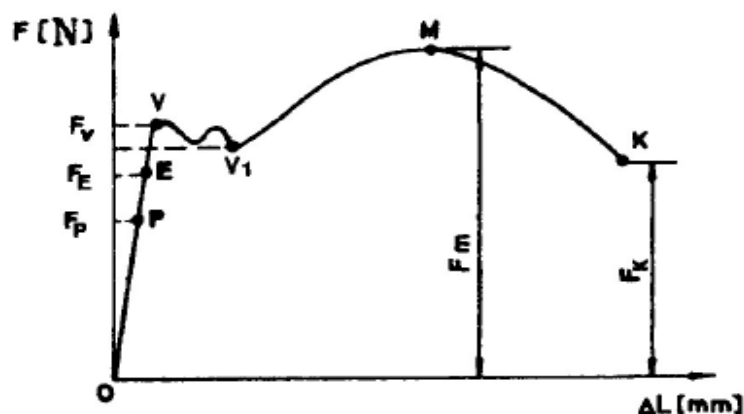


Слика 3.4 Крива ојачања [6]

3.7. Својства отпорности при затезном напрезању

Понашање метала и легура при испитивању затезањем може се представити дијаграмом истезања-кидања на чијој је ординати нанета сила затезања F (N), а на апсиси тренутно издужење ΔL (mm). Овај дијаграм има велику практичну примену у технологији материјала и техници уопште. Може се практично добити при испитивању епрувете на машини кидалици. На самој машини се налази дијаграм ваљак који омогућује аутоматско цртање дијаграма истезања и то тако што деформације обрћу ваљак око своје осе, а величина силе се региструје на мерачу силе. Различити материјали имају различите дијаграме кидања и они се могу груписати у две основне групе:

1. дијаграме кидања меких-растегљивих односно жилавих и пластичних материјала,
2. дијаграме кидања тврдих - кртих материјала [6].

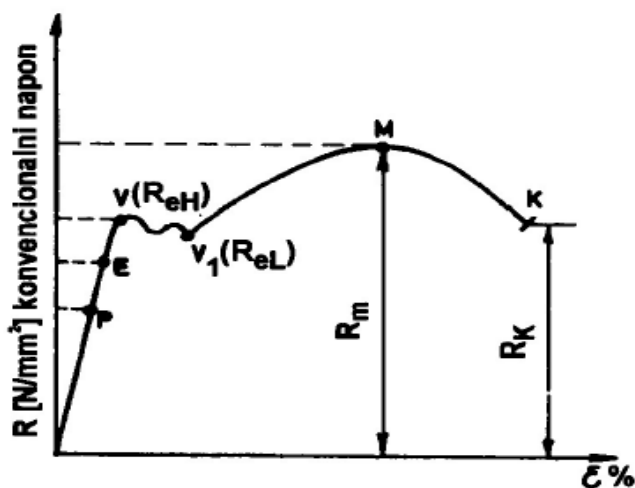


Слика 3.5 Дијаграм кривања нискоугљеничног челика са оштро истакнутом границом течења [2]

На дијаграму сила-тренутно издужење уочавају се следеће критичне тачке:

- P - сила на граници пропорционалности, $F_P(N)$
- E - сила на граници еластичности, $F_E(N)$
- V - сила на горњој граници течења, $F_{eH}(N)$
- V1 - сила на доњој граници течења, $F_{eL}(N)$
- M - максимална сила затезања, $F_m(N)$
- K - сила кривања, $F_K(N)$

Далеко већи практични значај за анализу резултата испитивања затезањем има дијаграм деформације, тј. дијаграм напон-јединично издужење $R = f_\epsilon$, који показује понашање материјала при испитању затезањем независно од димензије епрувета. Добија се тако што се на ординату нанесу напони $R = F/S_0$, а на апцису тренутно јединично издужење $\epsilon = \Delta L/L_0$. Код дијаграма напон-јединично издужење се не узимају у обзир стварни напони него конвенционални напони, тј. посматра се сила у било коме ком тренутку сведена на јединицу површине првобитног пресека F/S_0 . Дијаграм-напон јединично издужење $R = f_\epsilon$ добијен при затезном напрезању за нискоугљенични челик је дат на слици:



Слика 3.6 Дијаграм напон-јединично издужење нискоугљеничног челика [2]

Упоредјујући дијаграме са претходних слика, наилази се на велику међусобну сличност. Једина разлика између ова два дијаграма је у томе што се код дијаграма напон-јединично издужење у свакој карактеристичној тачки дијаграма сила дели са површином првобитног пресека теста, па је:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}; \text{ (МПа)-затезна чврстоћа}$$

$$R_p = \frac{F_p}{S_0}; \text{ (МПа)-граница пропорционалности}$$

$$R_E = \frac{F_e}{S_0}; \text{ (МПа)-граница еластичности}$$

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}; \text{ (МПа)-граница развлачења}$$

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}; \text{ (МПа)-прекидна чврстоћа}$$

3.8. Граница течења

Под појмом границе течења R_e подразумева се напон који производи сила F_e сведена на јединицу првобитног попречног пресека епрувете. За границу течења је карактеристично да при малим прираштајима силе настају знатно веће вредности издужења у односу на претходна. Граница течења се рачуна по образцу:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}; \text{ (МПа)}$$

Код неких врста челика у ваљаном и жареном стању граница течења је врло јасно истакнута. Она се лако распознаје по знатном пластичном деформисању-извлачењу материјала, при чему силу остаје константна или чак опада. У моменту опадања силе, односно напона, разликују се горња граница течења R_{eH} од које се напон смањује и доња граница течења R_{eL} до које се напон смањује, а затим се наставља даља деформација епрувета. Појава границе течења је препознатљива настајањем линије течења (Лидерсових линија) по обрађеним површинама епрувете. Ове линије представљају трагове пресека клизних слојева нагнутих под углом од 45° у односу на издужену осу епрувете. При затезању долази до издужења епрувета на рачун смањења попречног пресека (контракција). Попречно скупљање епрувете пропорционално је издужењу. Вредности границе течења које су прописане стандардима за квалитет материјала односе се на горњој граници течења. Сила која одговара горњој граници течења може се очитати на уређају за очитивање силе када казаљка након свог равномерног покрета први пут застане или почиње враћати уназад [2].



Слика 3.7 Уређај за одређивање границе течења [2]

Граница течења може да се посматра прелазом од еластичног ка пластичном подручју понашања материјала. По теорији дислокације (грешке у кристалној решетки), силе у еластичном подручју нису довољно велике да покрену дислокације концентрисаних страних атома (Котрелове атмосфере). Дислокације могу да превладају отпор, односно да се покрену, тек при вредностима силе која одговара граници течења, а даље и при мањим вредностима силу могу наставити да се крећу. По овом тумачењу кад би се испитивање затезањем непосредно поновило, на епрувети се не би примећивала граница течења. Међутим, ако има довољно времена да се страни атоми сакупе дифузијом у дислокацијама, граница течења се опет може констатовати.

Граница течења је од велике важности не само код техничке важних материјала (нпр. угљеничних челика и њих сличних материјала), него и за материјале код којих дијаграм напон-јединично издужење не показује изразено подручје течења. Код материјала који немају изражену границу течења (тврди и крти материјали), уместо границе течења конвенционално се одређује напон при којем трајно издужење износи 0,2% мерне дужине L_0 . Ова граница назива се условно-техничка граница течења $R_{p0,2}$ [2].

$$R_{p0,2} = \frac{F_{0,2}}{S_0} \quad (\text{МПа})$$

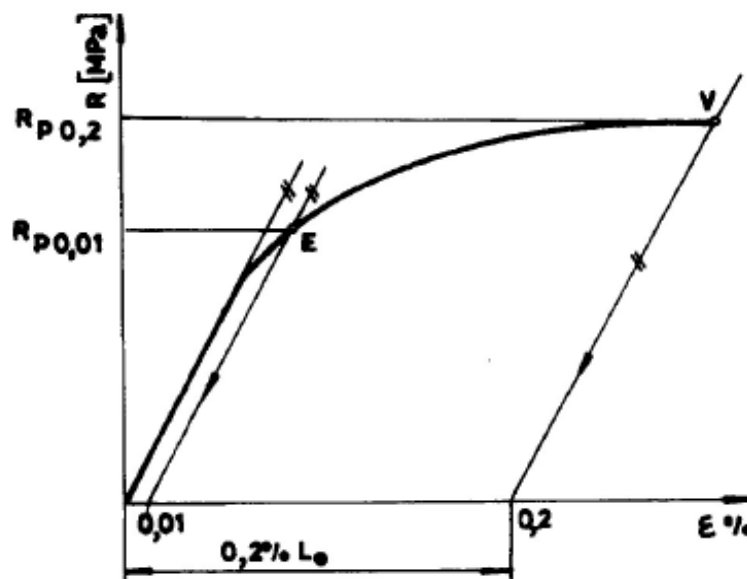
Према ЈУС-у Ц. А4.102 техничка граница 0,2% може се одредити:

- графичком методом из дијаграма кривања, ако је размера дијаграма по х оси није мања од 20: 1,
- методом механичког екстензометра.

Графичким методом техничка граница 0,2% одређује се из дијаграма напон-јединично издужење, тако што се на одстојању мери 0,2% дужине L_0 повуче права паралелна тангенти на праволинијски део криве. Ордината тачке пресека те праве са кривом напон-јединично издужење представља техничку границу од 0,2%, По методу механичког екстензометра техничка граница $R_{p0,2}$ одређује се тако што се епрувета поставља у чељусти машине и затеже предоптерећење F_0 , који не сме бити већи од 10% од очекиване силе на граници течења. Затим се на епрувету постављају екстензометри и епрувета се даље оптерећује до силе $F_1=2F_0$ ради смањења утицаја проклизавања епрувете. После држања под овим оптерећењем око 5-7 сек. смањи се оптерећење на F_0 . При томе се екстензометри враћају у нулти положај, што показује да се оптерећење налази у зони еластичних деформација.

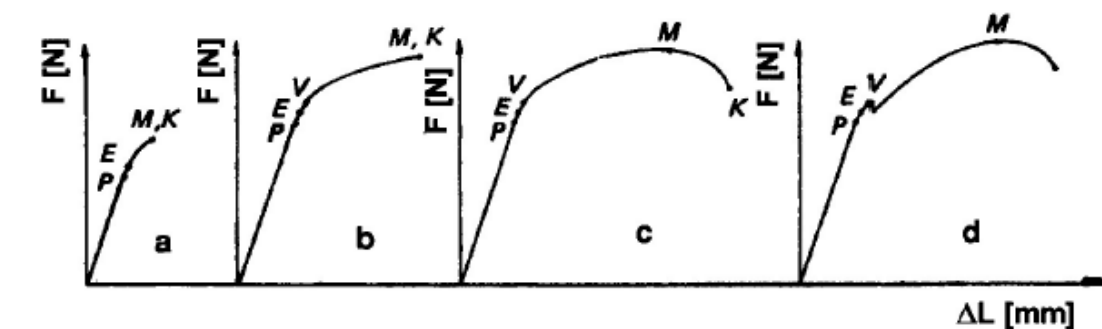
Са испитивањем се обично почиње са оптерећењем од 80% - 90% од очекиване вредности силе на граници течења. Затим се оптерећење постепено повећава са прираштајем од 10-20 МПа. После сваког додатог оптерећења мора се извршити растерећење епрувете до предоптерећења F_0 и измерити заостала издужења у епрувети. У тренутку када заостала издужења достигну вредност од 0,2% L_0 прекида се са испитивањем и утврђује оптерећење $F_{0,2}$ као и техничка граница течења $R_{p0,2}$ [2]:

$$R_{p0,2} = \frac{F_{0,2}}{S_0}$$

Слика 3.8 Графичко одређивање техничке границе $R_{p0,2}$ [2]

3.9. Затезна чврстоћа

При порасту напона изнад тачке V , односно по прелазу границе течења, настаје јако пластично деформисање материјала. У деформисаним слојевима долазе до концентрације напона које имају за последицу пораст тврдоће у односу на још недеформисане делове материјала, када се даљим затезањем исцрпи могућност за деформисања материјала.



Слика 3.9 Дијаграм затезне чврстоће [2]

4. Тврдоћа

Под појмом тврдоће метала и легуре подразумева се отпор који тај материјал пружа продирању неког тврдог тела. При томе је потребно да утискивач има већу тврдоћу од тврдоће испитиваног материјала, како се не би деформисао током испитивања. Утискивач мора имати одређени облик и димензије, а утискује се у материјал одређеном силом.

Према начину деловања силе све методе за одређивање тврдоће метала и легура се деле у две основне групе на:

1. статичке метода,
2. динамичке методе.

Разлика између ове две методе су у томе што се код статичких метода сила постепено повећава, а код динамичких метода сила делује променљиво-ударно.

Код статичких метода тврдоћа се изражава односом силе по јединици површине отиска, или мерењем дубине отиска који ствара утискивач у материјалу изражен у одговарајућим јединицама за тврдоћу.

Код динамичких метода тврдоћа се изражава односом силе по јединици површине отиска код неких метода, или је неименован број изражен у јединицама названим по проналазачу одговарајуће методе за мерење тврдоће. Статичке методе се много више примјењују за одређивање тврдоће метала легура него динамичке методе. Усвојена ознака за тврдоћу је H [2].

4.1. Статичке методе за одређивање тврдоће

Од статичких метода за одређивање тврдоће у пракси се најчешће користе следеће три методе и то [2]:

1. Бринелова метода HB ,
2. Викерсова метода HV ,
3. Роквелова метода HR .

4.1.1. Тврдоћа по Бринелу (HB)

Ова метода има велику примену за одређивање тврдоће нешто мекших метала и легура. Сам поступак утврђивања тврдоће према Бринелу прописан је југословенским стандардима JUS C.A4.003 (за челик), JUS C.A4.103 (за лаке метале и њихове легуре) и JUS C.A4.203 (за бакар и бакарне легуре).

Као утискивач се користи куглица стандардног пречника (D) израђена од каљеног високоугљеничног челика најмање тврдоће 850HB. Стандардни пречници куглице су: 10 mm, 5 mm и 2,5 mm, а изузетно 2 mm или 1mm. Куглица мора бити полирана [2]. Дозвољена одступања пречника куглице (D) дата су у табели 4.1:

Табела 4.1 Дозвољена одступања пречника куглице [2]

Пречник куглице [mm]	Дозвољено одступање [mm]
1,0	±0,0035
2,0	±0,0035
2,5	±0,0035
5,0	±0,0040
10,0	±0,0045

Избор куглице и силе утискивања зависи од врсте материјала. Да би се добили стварни резултати тврдоће, који могу да се упоређују, треба испунити услов:

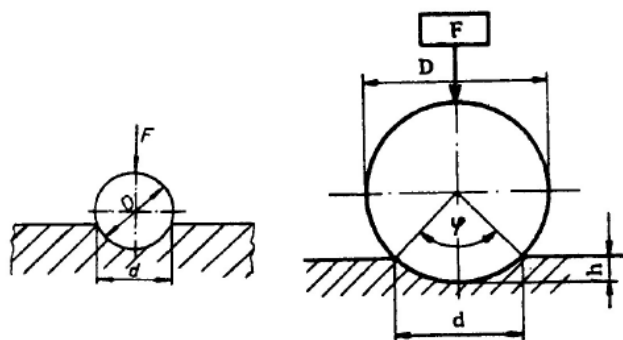
$$\frac{F}{D^2} = \text{const.}$$

Вредност константе F/D^2 зависи од врсте материјала који се испитује, односно од његове тврдоће. У табели 4.2 дата је вредност константе F/D^2 за технички најважније материјале:

Табела 4.2 Вредност константе F/D^2 за различите материјале [2]

Врста материјала	$F/D^2 = \text{const}$	Сила u [N] за пречник куглице D [mm]				
		10	5	2,5	2	1
Олово и меке легуре	12,5	1250	312,5	78,1	50	12,5
Бели метали и меке легуре	25	2500	625	156,2	100	25
Легуре алуминијума, меки bakar, легуре за лежишта	50	5000	1250	312,5	200	50
Тврде легуре алуминијума, легуре бакре	100	10000	2500	625	400	100
Челик, сиви liv, тврда бронза	300	30000	7500	1875	1200	300

Узорци за испитивање морају бити припремљени по стандарду. Површина на којој се врши утискивање куглице мора бити глатка и равна, а супротна површина паралелна испитиваној да би било равномерно налегање. Подлога на коју се ставља испитивани узорак треба да буде стабилна и да омогућити да правац силе утискивања буде управан на испитивану површину [2]. На слици шематски је приказан начин испитивања тврдоће према Бринелу:

**Слика 4.1** Испитивање тврдоће утискивањем челичне куглице [2]

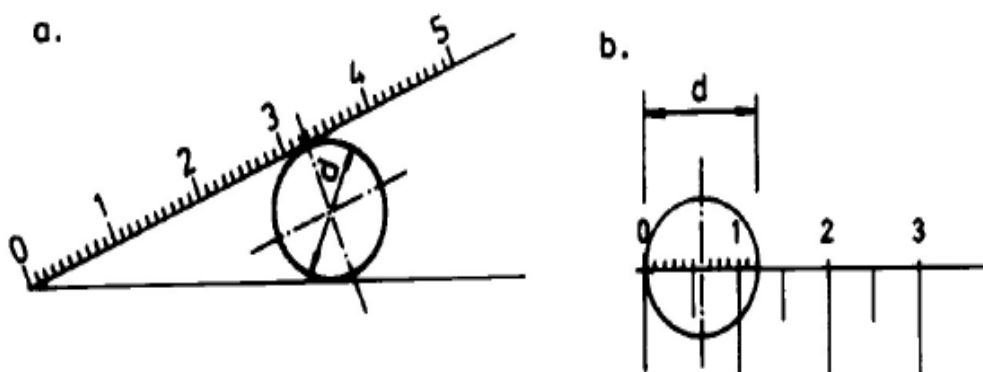
Тврдоћа по Бринелу рачуна се из односа силе утискивања и површине отиска насталог у материјалу. Отисак има облик калоте лопте чија је површина:

$$S = \pi D h = \frac{\pi D^2}{2} - \frac{\pi D}{2} \sqrt{D^2 - d^2} ; \quad (\text{mm}^2)$$

где је: h -дубина отиска, D -пречник куглице, d -пречник отиска. Тврдоћа по Бринелу HB је дата изразом:

$$HB = \frac{F}{S} = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} ; \quad \left(\frac{N}{\text{mm}^2} \right)$$

Мерење пречника отиска куглица може се извршити на више начина. Најчешће се користи микроскоп са микрометарским завртњем. У недостатку микроскопа се користе линеарна мерила са лупом разних увећања (слика 4.2) [2].

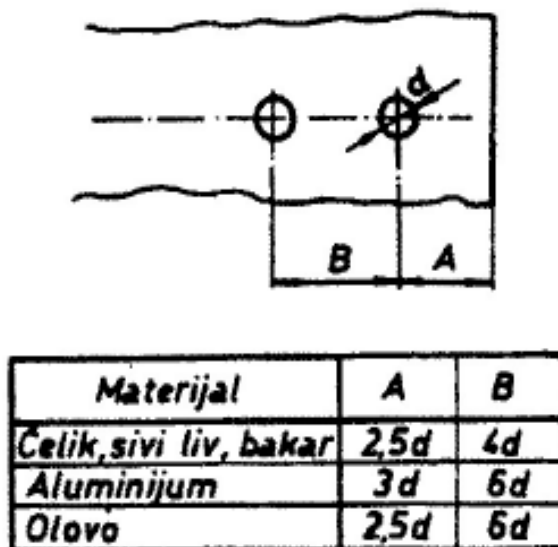


Слика 4.2 Мерење пречника отиска: а) лењиром; б) лупом [2]

Мерење пречника отиска лењиром врши се тако што краци лењира који су под оштрим углом тангирају отисак, при чему се пречник читава на градуираном делу лењира од 0 до тачке у којој је отисак тангиран (слика под а). Лењир је специјалне израде од стакла, провидног целуоида или плексигласа. Мерење пречника отиска лупом дато је на слици под б. При мерењу пречника отиска треба настојати да се измери прави пречник, јер од тачности мерења пречника отиска зависе и резултати тврдоће. При одређивању тврдоће Бринеловом методом потребно је да буду задовољени следећи услови:

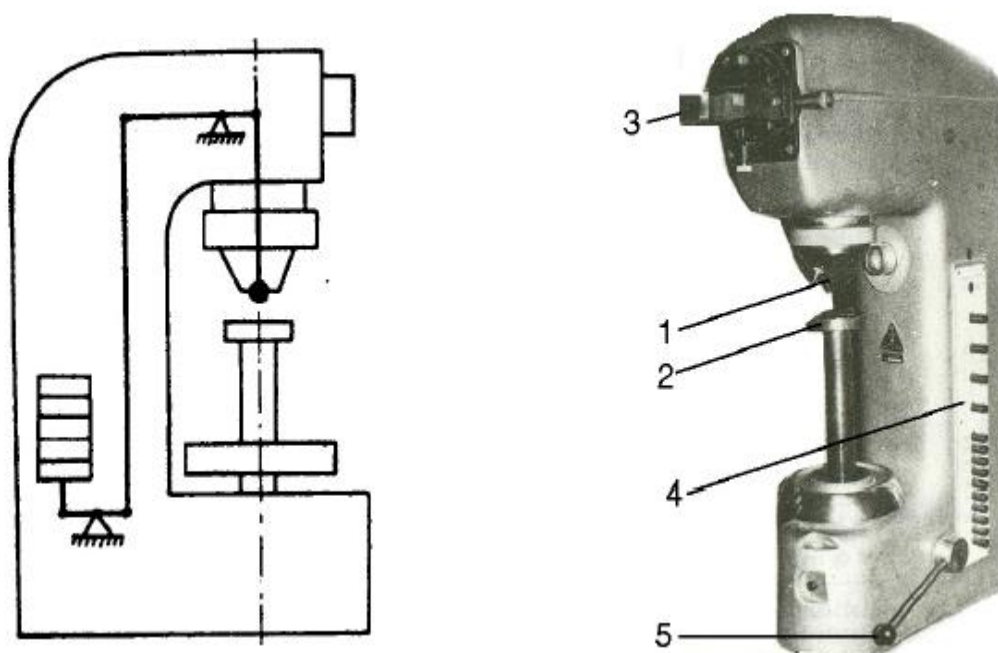
- Дебљина узорка мора бити најмање 8-10 пута већа од дубине отиска,
- Одстојање од средине отиска до ивице испитиваног узорка, као и растојање између два суседна центра отиска зависи од испитиваног материјала,
- Отисак који оставља утискивач мора бити такав да обезбеди што прецизније мерење, односно испуњавање услова $d = (0,25-0,5)D$,
- Угао између осе утискивача и површине узорка мора бити 90° [2].

Нашим стандардом за испитивање тврдоће препоручује се најмање три мерења. Већи број мерења само повећава тачност. Сила утискивања треба да се повећава постепено, без трзаја, док се не постигне прописана вредност. Време утискивања зависи од врсте материјала, најчешће се узима у интервалу од 15-30 секунди. Ознакама тврдоће по Бринелу HB додају се допунске ознаке које изражавају услове под којим је вршено испитивање, и то: пречник куглице, сила утискивања и време дејства силе [2].



Слика 4.3 Растојање између отисака [2]

На основу изабраних параметара (D , Φ , t) и измереног пречника отиска након испитивања, рачуна се Бринелова тврдоћа по образцу. На слици дата је најновија конструкција апарата за мерење тврдоће по Бринелу, код кога је избор силе утискивања и читање пречника отиска далеко прецизније. Овај апарат се може користити и за мерење тврдоћа по Викерсу, заменом утискивача и избором потребног оптерећења [2].



Слика 4.4 Слика Апарат за мерење тврдоће према Бринелу: 1) носач утискивача; 2) постолје; 3) оптички систем за читавање отисака; 4) дугмад за избор силе утискивања импулса; 5) ручица [2]

Произвођачи апарата за испитивање тврдоће према Бринелу и Викерсу израђују табеле из којих се може директно прочитати тврдоћа на основу измереног пречника отиска и употребљене силе [2]. Једна од тих табела за израчунавање тврдоће према Бринелу јесте:

Табела 4.3 Израчунавање тврдоће по Бринелу HB при употреби куглице као утискивача $D = 2,5 \text{ mm}$ [2]

Tabela za izračunavanje tvrdoće po Brinelu HB pri upotrebi kuglice kao utiskivača prečnika $D = 2,5 \text{ mm}$									
Veličina otiska kalote	Sila opterećenja $F \text{ [N]}$				Veličina otiska kalote	Sila opterećenja $F \text{ [N]}$			
$d \text{ (mm)}$	1875	625	312,5	156,25	$d \text{ (mm)}$	1875	625	312,5	156,25
0,51	9080	3030	1510	757	0,81	3540	1180	590	295
0,52	8730	2910	1450	728	0,82	3450	1150	570	287
0,53	8400	2800	1400	700	0,83	3370	1120	560	281
0,54	8090	2700	1350	674	0,84	3290	1100	550	274
0,55	7800	2600	1300	650	0,85	3210	1070	530	267
0,56	7520	2500	1250	627	0,86	3130	1040	520	261
0,57	7250	2420	1210	604	0,87	3060	1020	510	255
0,58	7000	2330	1160	583	0,88	2980	990	500	248
0,59	6760	2250	1120	563	0,89	2920	970	490	243
0,60	6530	2180	1090	544	0,90	1850	950	480	237
0,61	6320	2100	1050	527	0,91	2780	930	470	232
0,62	6110	2040	1020	509	0,92	2720	910	450	227
0,63	5920	1980	990	493	0,93	2660	890	440	222
0,64	5730	1910	950	478	0,94	2600	870	430	217
0,65	5550	1850	920	463	0,95	2550	850	420	212
0,66	5380	1790	890	448	0,96	2490	830	415	208
0,67	5220	1740	870	435	0,97	2440	810	404	203
0,68	5070	1690	850	422	0,98	2390	800	398	199
0,69	4920	1640	820	410	0,99	2340	780	390	195
0,70	4770	1590	790	397	1,00	2290	760	382	191
0,71	4640	1550	770	386	1,01	2240	750	373	187
0,72	4510	1500	750	376	1,02	2190	730	365	183

Експериментално је утврђено да код живих материјала, пре свега челика, постоји једноставна зависност између тврдоће према Бринелу и затезне чврстоће, а даје се изразом:

$$R_m = C \cdot HB$$

где је: C -константа за одређени материјал.

Вредности константе C за различите метале и легуре су дате у табели. Вредности затезне чврстоће израчунате преко тврдоће могу послужити само оријентационо, јер се појављују осетне разлике у односу на стварну затезну чврстоћу [2].

Табела 4.4 Вредности константе C за различите материјале [2]

Materijal	C	Materijal	C
Liveno gvožđe	0,20	Duraluminijum kaljen	0,40
Aluminijumski liv	0,26	Mehanički obrađena bronza	0,40
Hromčelik	0,34	Elektron i Mg legure	0,50
Ugljenični čelik	0,36	Mesing žaren	0,45-0,53
Duraluminijum otpušten	0,37	Bakar žaren	0,55

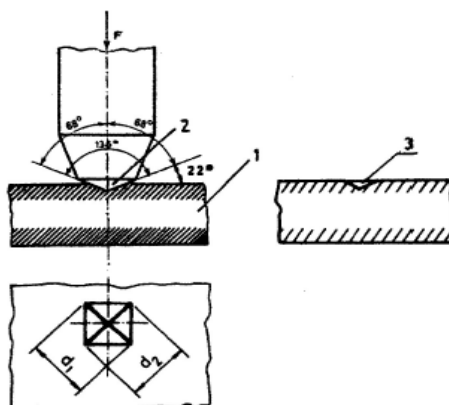
4.1.2. Тврдоћа по Викерсу

Испитивање тврдоће према Викерсу прописано је стандардима JUS C.A4.030 (за челик), JUS C.A4.104 (за лаке метале и његове легуре) и JUS C.A4.204 (за бакар и бакарне легуре). Према наведеним стандардима као утискивач код Викерсове методе користи се дијамантски врх правилне четворостране пирамиде са углом између наспрамних страна од $136^\circ \pm 0,5^\circ$. При наведеном углу стране пирамиде тангирају отисак (калоту) пречника $0,375D$, који би се добио утискивањем Бринелове куглице пречника D . Испитивање се изводи тако што се утискивач поставља управно на испитивану површину, без трзаја утискује у материјал све док сила утискивања не достигне одређену вредност. Ова сила одржава се 10-30 секунди зависно од врсте материјала. При испитивању утискивач оставља отисак у виду квадрата.

Тврдоћа по Викерсу даје се из односа из силе утискивања F (N) и површине насталог отиска S mm^2 :

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{d^2}{2\cos 22^\circ}} \approx \frac{1.854F}{d^2} ; \left(\frac{N}{mm^2} \right)$$

где је: d -дијагонала отиска [2].



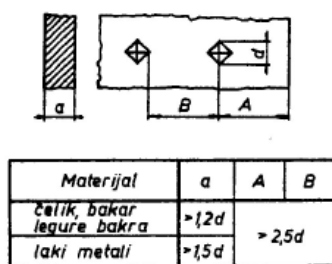
Слика 4.5 Испитивање тврдоће по Викерсу: 1) узорак; 2) дијамантски врх пирамиде; 3) отисак- d_1 , d_2 - дијагонале отиска [2]

За израчунавање тврдоће по Викерсу мере се дијагонале отиска d_1 и d_2 , а затим се рачуна средња вредност дијагонале d . Ради прецизности одређивања тврдоће потребно је направити најмање три отиска при једном испитивању. Заменом средње вредности дијагонале (d) у образац:

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{d^2}{2\cos 22^\circ}} \approx \frac{1.854F}{d^2} ; \left(\frac{N}{mm^2} \right)$$

израчунава се тврдоћа по Викерсу. Предност Викерсовог начина над Бринеловом је у чињеници да тврдоћа према Викерсу не зависи од величине примењене силе утискивања. Код испитивања челика најчешће се примењује сила од 300N, мада стандарди допуштају и коришћење других оптерећења, под условом да нису мање од 50N. Величина силе утискивања зависи од врсте материјала. Негативна страна Викерсове методе је што је скупа обрада дијамантског врха, који је јако крт, тако да са најмањим оштећењем није више за употребу. Због тога при руковању Викерсовим апаратом треба бити јако пажљив. Површина узорка која се испитује треба да буде равна и глатка како би се добили правилни и јасни отисци који се могу лако и прецизно мерити. Узорци се припремају лаганим глачањем и полирањем. Током припреме не сме доћи измене структуре услед загревања. Дебљина узорка треба да је најмање 1,2-1,5

пута већа од дужине дијагонале, што зависи од врсте материјала. Растојање центра отиска од ивице узорка, односно од контуре суседног отиска мора бити најмање 2,5 пута веће од дијагонале отиска [2].



Слика 4.6 Растојање суседног отиска [2]

С обзиром на мале дубине отисака које се добијају приликом испитивања ова метода је нашла велику примену за испитивање тврдоће танких лимова и танких термички обрађених површина нпр. цементираних, нитрираних и сл. Такође се користи и за одређивање тврдоће најтврђих материјала као што су синтероване тврде волфрамкарбидске легуре. Тврдоћа по Викерсу обележава се ознаком HV уз коју се додају допунске ознаке, којима се изражава вредност силе утискивања и време трајања дејства силе. На пример: $HV_{300/15}$ - означава тврдоћу по Викерсу за чије је одређивање употребљена сила од 300N у трајању од 15 секунди. Апарат за одређивање тврдоће према Бринелу у највећем броју случајева користи се и за одређивање тврдоће по Викерсу, само што се изврши замена утискивача и одабере одговарајуће оптерећење. За практично израчунавање тврдоће по Викерсу користе се табеле у којима се за сваку дијагоналну отиска налази одговарајућа вредност тврдоће [2]. Дат је приказ те табеле 4.5:

Табела 4.5 Табела за израчунавање тврдоће по Викерсу за силу од $F = 50N$ [2]

Veličina otiska d[mm]	Tabela za izračunavanje tvrdoće po Vickersu HV [N/mm ²] pri upotrebi sile od F = 50N									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,08	14480	14130	13790	13460	13140	12830	12530	12250	11970	11700
0,09	11440	11190	10950	10720	10490	10270	10060	9850	9650	9460
0,10	9270	9090	8910	8740	8570	8410	8250	8100	7950	7800
0,11	7660	7520	7390	7260	7130	7010	6890	6770	6660	6550
0,12	6440	6330	6230	6130	6030	5930	5840	5750	5660	5570
0,13	5490	5400	5320	5240	5160	5090	5010	4940	4870	4800
0,14	4730	4660	4600	4530	4470	4410	4350	4290	4230	4180
0,15	4120	4070	4010	3960	3910	3860	3810	3760	3710	3670
0,16	3620	3580	3530	3490	3450	3400	3360	3320	3280	3250
0,17	3210	3170	3130	3100	3060	3030	2990	2960	2930	2890
0,18	2860	2830	2800	2770	2740	2710	2680	2650	2620	2600
0,19	2570	2540	2510	2490	2460	2440	2410	2390	2360	2340
0,20	2320	2290	2270	2250	2230	2210	2180	2160	2140	2120
0,21	2100	2080	2060	2040	2020	2010	1990	1970	1950	1930
0,22	1920	1900	1880	1860	1850	1830	1810	1800	1780	1770
0,23	1750	1740	1720	1710	1690	1680	1660	1650	1640	1620
0,24	1610	1600	1580	1570	1560	1540	1530	1520	1510	1500
0,25	1480	1470	1460	1450	1440	1430	1410	1400	1390	1380
0,26	1370	1360	1350	1340	1330	1320	1310	1300	1290	1280
0,27	1270	1260	1250	1240	1230	1230	1220	1210	1200	1190
0,28	1180	1170	1170	1160	1150	1140	1130	1130	1120	1110
0,29	1100	1090	1090	1080	1070	1070	1060	1050	1040	1040
0,30	1030	1020	1020	1010	1000	1000	990	984	977	971
0,31	965	958	952	946	940	934	928	922	917	911
0,32	905	900	894	889	883	878	872	867	862	856
0,33	851	846	841	836	831	826	821	816	811	807
0,34	802	797	793	788	783	779	774	770	765	761
0,35	757	752	748	744	740	736	731	727	723	719
0,36	715	711	707	704	700	696	692	688	685	681
0,37	677	673	670	666	663	659	656	652	649	645
0,38	642	639	635	632	629	625	622	619	616	613
0,39	609	606	603	600	597	594	591	588	585	582

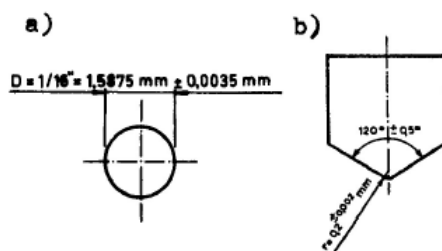
Пример: Употребљена је сила од 100N, а средња вредност дијагонале отиска од $d = 0,19\text{mm}$. Из табеле 10 се директно читава Викерсова тврдоћа у колони под 5 и износи: $HV = 4880\text{N} / \text{mm}^2$ [2]. Испод је дата табела 4.6:

Табела 4.6 Израчунавање тврдоће по Викерсу за силу од $F = 100\text{N}$ [2]

Veličina otiska d [mm]	Tabela za izračunavanje tvrdoće po Vickersu HV [N/mm ²] pri upotrebi sile od F=100N									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,11	15320	15050	14780	14520	14270	14020	13780	13540	13320	13090
0,12	12880	12660	12460	12250	12060	11870	11680	11490	11320	11140
0,13	10970	10800	10640	10480	10330	10170	10020	9880	9740	9600
0,14	9460	9330	9190	9070	8940	8820	8700	8580	8460	8350
0,15	8240	8130	8020	7920	7820	7720	7620	7520	7430	7330
0,16	7240	7150	7060	6980	6890	6810	6730	6650	6570	6490
0,17	6420	6340	6270	6190	6120	6050	5990	5920	5850	5790
0,18	5720	5660	5600	5540	5480	5420	5360	5300	5250	5190
0,19	5140	5080	5030	4980	4930	4880	4830	4780	4730	4680
0,20	4640	4590	4540	4500	4460	4410	4370	4330	4290	4240
0,21	4200	4160	4130	4090	4050	4010	3970	3940	3900	3870
0,22	3830	3800	3760	3730	3690	3660	3630	3600	3570	3540
0,23	3500	3470	3440	3420	3390	3360	3330	3300	3270	3250
0,24	3220	3190	3170	3140	3110	3090	3060	3040	3010	2990
0,25	2970	2940	2920	2900	2870	2850	2830	2810	2790	2760
0,26	2740	2720	2700	2680	2660	2640	2620	2600	2580	2560
0,27	2540	2520	2510	2490	2470	2450	2430	2420	2400	2380
0,28	2360	2350	2330	2310	2300	2280	2270	2250	2240	2220
0,29	2200	2190	2170	2160	2140	2130	2120	2100	2090	2070
0,30	2060	2050	2030	2020	2010	1990	1980	1970	1950	1940
0,31	1930	1920	1900	1890	1880	1870	1860	1840	1830	1820
0,32	1810	1800	1790	1780	1770	1760	1740	1730	1720	1710
0,33	1700	1690	1680	1670	1660	1650	1640	1630	1620	1610
0,34	1600	1590	1590	1580	1570	1560	1550	1540	1530	1520
0,35	1510	1500	1500	1490	1480	1470	1460	1450	1450	1440
0,36	1430	1420	1410	1410	1400	1390	1380	1380	1370	1360
0,37	1350	1350	1340	1330	1330	1320	1310	1300	1300	1290
0,38	1280	1280	1270	1260	1260	1250	1240	1240	1230	1230
0,39	1220	1210	1210	1200	1190	1190	1180	1180	1170	1160
0,40	1160	1150	1150	1140	1140	1130	1120	1120	1110	1110

4.1.3. Тврдоћа по Роквелу

За разлику од тврдоћа према Бринелу и Викерсу, код којих се тврдоћа изражава односом силе и површина насталог отиска, тврдоћа према Роквелу се одређује на основу трајне дубине отиска коју направи утискивач на испитиваној површини. Разликује се више поступака Роквелове методе за одређивање тврдоће метала и легура, које су обухваћене стандардом JUS C.A4.031. У пракси се најчешће примењују Роквел „В“ и Роквел „С“ метода. Код Роквел „В“ методе као утискивач користи се челична куглица пречника $1/16$ ($1,5875 \pm 0,0035\text{mm}$) најмање тврдоће 8500 НВ. Код Роквел „С“ методе као утискивач користи се дијамантски конус (купа) са заобљењем на врху $r = 0,2 \pm 0,002\text{mm}$ и углом конуса од $120^\circ \pm 0,5^\circ$. С обзиром на тврдоћу утискивача Роквел Метод „В“ се користи за одређивање тврдоће меких материјала, а Роквел „С“ метода за тврде материјали слично Викерсовој методи [2]. Шематски изглед утискивача дат је на слици 4.7:



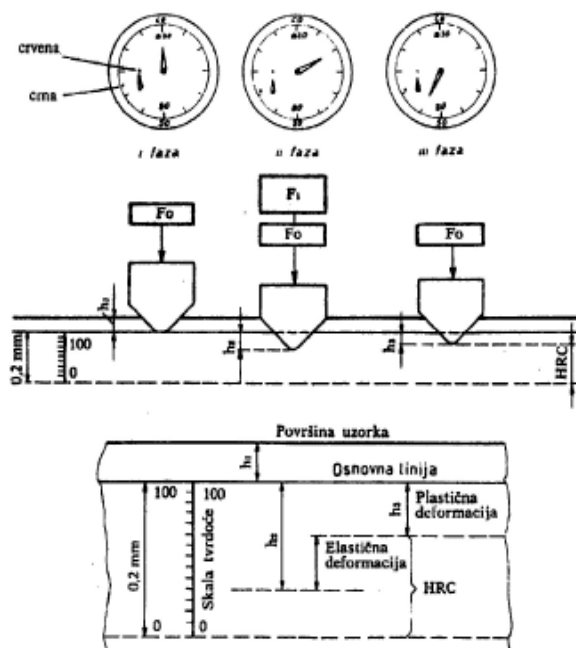
Слика 4.7 Утискивачи код Роквелове методе: а) челична куглица, б) дијамантски конус [2]

Обе методе користе две врсте оптерећења:

- почетну силу F_0 која за обе методе износи $F_0 = 100 \pm 2\text{N}$
- главну силу F_1 , која код Роквел "В" методе износи $F_1 = 900 \pm 4,5\text{N}$ код Роквел "С" методе $F_1 = 1400 \pm 7\text{N}$

Према томе, укупна оптерећења код Роквелове "В" методе је $1000^0 \pm 6,5\text{N}$, а код Роквел "С" методе је $1500 \pm 9\text{N}$. Почетна сила F_0 од 100N се додаје да би се избегли неравнине на површини узорка. Иако се површина узорка пажљиво припрема она ипак садржи неравнине које се морају поништити почетним силом. Опште ознаке за Роквелову тврдоћу су HRB и HRC.

Испитивање Роквелове тврдоће одвија се у три фазе: прва фаза се састоји у оптерећивању узорка почетном силом F_0 од 100N и равномерно од 0 до 100N , ради уклањања неравнина са површине испитиваног узорка. При овој утискивач продире на дубину h_1 . Тада се компаратер којим се мери дубина продирања доведе у почетни положај. Друга фаза се састоји у додавању главне силе F_1 која износи за HRB методу 900N , а за HRC методу 1400N . При овој утискивач продире у материјал на дубину h_2 , а материјал трпи пластичне и еластичне деформације. Трећа фаза састоји се у растерећењу када се уклања главна снага F_1 , а на утискивач остаје да делује почетна сила F_0 . Овим се ослобађају еластичне деформације и утискивач се подиже са дубине h_2 на дубину h_3 . Настала трајна дубина отиска h_3 узима се као мера тврдоће. Ова вредност дели се са константом 0,002 да би тврдоћа изразила у Роквеловим јединицама [2].



Слика 4.8 Испитивање тврдоће по Роквелу „В“ методу са утискивачем у облику конуса [2]

Како је дубина отиска код меких метала и легура већа од дубине отиска код тврдых материјала, то би испало да мекши материјали имају већу тврдоћу и обратно (ако се посматра еталон е). Зато је усвојено да се вредност еталона е одузима од утврђених константи које износе:

- за Роквел „В“ методу 130
- за Роквел „С“ методу 100

Према томе, тврдоћа према Роквелу даје се изразом:

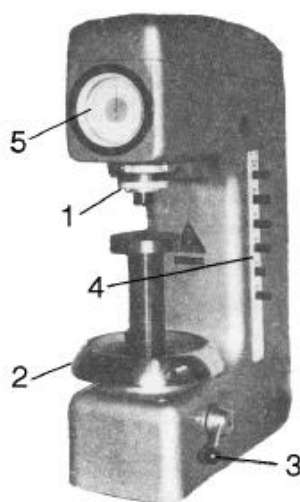
- за Роквел "В" методу:

$$HRB = 130 - \frac{h_3}{0,002} \text{ (Роквел "В" јединица)}$$

- за Роквел "С" методу:

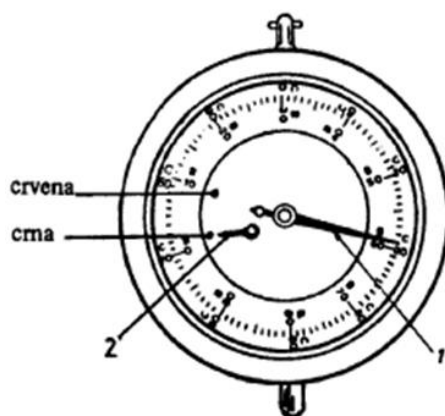
$$HRC = 100 - \frac{h_3}{0,002} \text{ (Роквел "С" јединица)}$$

Дебљина узорка, односно дебљина слоја који се испитује мора бити најмање 8 пута већа од трајне дубине отиска h_3 . Одстојање центра отиска од ивице узорка, или међусобно одстојање центара два суседна отиска треба да износи најмање 3mm [2]. Роквелов апарат за испитивање тврдоће дат је на слици 4.9:



Слика 4.9 Роквелов апарат за испитивање тврдоће: 1) носач утискивача; 2) точак; 3) ручица; 4) дугмад за избор силе утискивања; 5) скала [2]

На показивачу Роквеловог апарата налазе се две скале: спољашња са црним подеоцима од 0 до 100 за Роквелову „С“ методу и унутрашња скала са црвеним подеоцима од 30 до 130 за Роквел „В“ метод, распоред скала може бити и обрнут. Скале су подешене тако да се нула спољашње скала поклапа са бројем 30 унутрашње скале. На показивачу се налазе мала и велика казаљка, као и црна и црвена тачка. Када апарат не ради мала казаљка се налази на црној тачки, а велика казаљка се може наћи било где на показивачу (слика 4.10) [2].



Слика 4.10 Показивач Роквеловог апарата: 1) велика казаљка; 2) мала казаљка [2]

Припрема за испитивање се састоји од избора удара силе помоћу дугмета (4) која се налази са стране апарата и постављању испитиваног узорка на покретно постоље. Затим се ручним покретањем точка (2) подиже постоље заједно са узорком све док мала казаљка не пређе пут од црне до црвене тачке. То је знак да је узорак оптерећен почетном силом од 100N. Померајући поље са скалама подеси се да велика казаљка поклопи 0 спољашње скале и број 30 унутрашње скале. Затим се обарање ручица (3) додаје главна сила од 900N или од 1400N, при чему се велика казаљка помера на показивачу. Сачека се интервал 15 ± 30 секунди да се велика казаљка умири и утискивач продре на одређену дубину. Након тога врши се растерећење подизањем ручице на горе, при чему је велика казаљка врати нешто уназад узимајући одговарајући положај на скали. Према положају велике казаљке, са црне или црвене скале директно се очита Роквел „В“ или Роквел „С“ тврдоћа. Као што се види апаратом је врло једноставно руковати, само је потребно приликом рада ручицу полако подизати и спустати. С обзиром на кратко време испитивања, као и могућност директног читавања тврдоће на показивачу, Роквелова метода има одређене предности у односу на Бринелову и Викерсов метод. Поред описаних поступака испитивања Роквелове тврдоће (HRB и HRC методе) су у употреби и други поступци са нешто измењеним условима испитивања (другачија сила испитивања и облик утискивача). Методе за испитивање тврдоће према Роквелу груписане су у три групе (табела 4.7) [2].

Табела 4.7 Методе за одређивање Роквелове тврдоће [2]

Група	Врста поступка	Карактеристике поступка			
		Ознака тврдоће	Утискивач	Укупна сила утискивања [N]	Боја скале
I	B	HRB	1/16" кугла	1000	црвена
	C	HRC	Дјамант. купа	1500	црна
II	A	HRD	Дјамант. купа	600	
	D	HRE	Дјамант. купа	1000	
	E	HRE	1/8" кугла	1000	
	F	HRF	1/16" кугла	600	црвена
	G	HRG	1/16" кугла	1500	
	H	HRH	1/8" кугла	600	
	K	HRK	1/8" кугла	1500	
III	L	HRL	1/4" кугла	600	
	M	HRM	1/4" кугла	1000	
	P	HRP	1/4" кугла	1500	
	R	HRR	1/2" кугла	600	
	S	HRS	1/2" кугла	1000	
	V	HRV	1/2" кугла	1500	
Мерење тврдоће површинских слојева		15 N	Дјамант. купа	150	100 делова специјалне скале
		30 N	Дјамант. купа	300	
		45 N	Дјамант. купа	450	
		15 N	1/16" кугла	150	
		30 N	1/16" кугла	300	
		45 N	1/16" кугла	450	

Статичке методе за одређивање тврдоће метала и легура имају низ предности и недостатака. Највише предност има Викерсова метода. Она даје правилне отиске који омогућавају велику тачност читања дијагонале отиска. Код ње вредност тврдоће не зависи од величине употребљене силе [2].

4.2. Испитивање тврдоће динамичким дејством силе

Да би се добила поуздана представа о механичким особинама метала или легура, није довољно урадити само статичка испитивања. Далеко је већи број случајева где је материјал изложен динамичком-ударном дејству силе. Ово је нарочито изражено код покретних делова машина изложених динамичким-променљивим оптерећењима, као што су: осовине, вратила, зупчаници, разни носачи итд. Код њих може доћи до лома при далеко нижим напрезањима, која би у случају статичког дејства силе изазвала само еластичне деформације у материјалу.

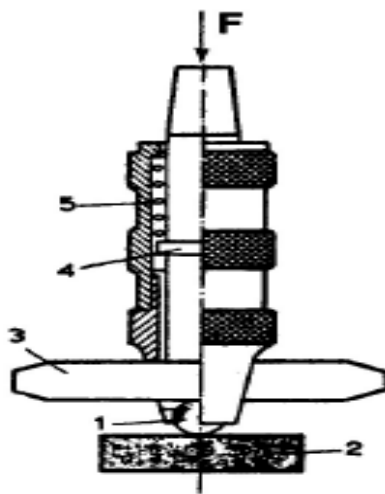
Постоји велики број метода за испитивање материјала изложених динамичком дејству силе као што су: динамичко испитивање тврдоће, испитивање жилавости, испитивање замора материјала итд. Резултати ових испитивања служе као полазна основа за прорачун код конструкције различитих елемената и делова машина. Динамичко испитивање тврдоће може се вршити ударом или еластичним одскоком утискивача од испитане површине [2]. Од динамичких метода за утврђивање тврдоће најчешће се примењују следеће три методе:

1. методом Полдијевог чекића или методом упоређења,
2. склероскопска метода,
3. дуроскопска метода.

Уређаји за испитивање тврдоће са динамичким дејством силе су врло једноставне конструкције. Рад са њима је једноставан и брз због чега се све чешће се примењују за одређивање тврдоће финалних производа, материјала на складишту, великих комада, уграђених конструкција [2].

4.2.1. Метода Полдијевог чекића

Метода Полдијевог чекића у суштини представља једну врсту Бринелове методе. Састоји се у упоређењу тврдоће познатог материјала (еталона) са тврдоћом испитиваног материјала. Код Полдијеве методе као утискивач се користи окаљена челична куглица пречника $D = 10\text{mm}$. Утискивач се истовремено утискује у испитивани материјал и еталон познат тврдоће. На слици приказан је Полдијев чекић за испитивање тврдоће метала и легура [2].



Слика 4.11 Полдијев чекић за испитивање тврдоће: 1) куглица; 2) испитивани узорак; 3) еталон; 4) ударно тело; 5) опруга [2]

Припрема за рад састоји се у постављању еталона у одговарајући отвор изнад куглице при чему куглица налаже на еталон. Затим се Полдијев чекић поставља на испитивану површину тако да оса чекића буде управна на њу. Замахом руке испитивача уз коришћење обичног чекића, производи се динамичка сила која се преко опруге (4) и ударног тела (5) преноси на куглицу утискивача. При овој утискивач се истовремено утискује у испитивани материјал и еталон, остављајући у њих отиске (калоте). Јачина удараца треба да је толика да остави отисак пречника 2-4 mm [2]. Ако се искористи Бринелова формула за израчунавање тврдоће, добиће се:

$$H1 = H_e = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - de^2})} ; \left(\frac{N}{mm^2} \right)$$

$$H2 = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} ; \left(\frac{N}{mm^2} \right)$$

где је:

D- пречник куглице, D = 10 mm

de- пречник отиска у еталону, mm

d - пречник отиска у испитиваном материјалу, mm

H1 = Он - тврдоћа еталона која је позната, $\left(\frac{N}{mm^2} \right)$

H2 - тврдоћа испитиваног материјала, $\left(\frac{N}{mm^2} \right)$.

Деобом друге једначине са првом у циљу са првом у циљу елиминације силе F, чију вредност не можемо да региструјемо, добиће се:

$$\frac{H2}{H1} = \frac{\frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - de^2})}}{\frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}}$$

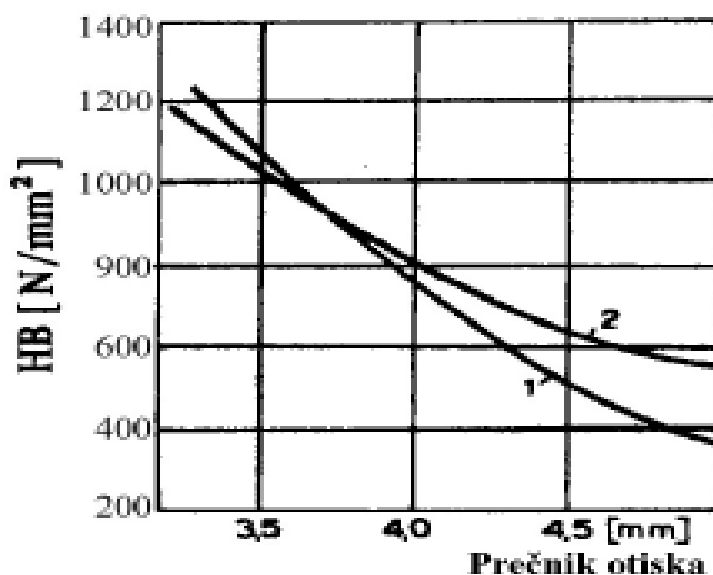
онда следи да је тврдоћа испитиваног материјала:

$$H2 = H1 \frac{D - \sqrt{D^2 - de^2}}{D - \sqrt{D^2 - d^2}} ; \left(\frac{N}{mm^2} \right)$$

При одређивању тврдоће са овим методом потребно је само измерити пречник отиска у еталону и испитиваном материјалу, па заменом у образац $H2 = H1 \frac{D - \sqrt{D^2 - de^2}}{D - \sqrt{D^2 - d^2}}$ израчунати тврдоћу. Мере се најмање три отиска међусобно удаљено бар за два пречника. Тврдоћа еталона може се одредити Бринеловим методом. Између вриједности тврдоћа одређених Бринеловим и Полдијевим методом постоји извесна разлика, што је и разумљиво с обзиром на различит начин деловања силе. Разлика у тврдоћама је у директној зависности од пречника отиска [2].

4.2.2. Склероскопска метода

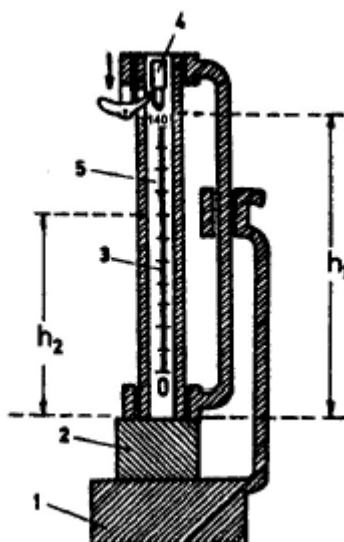
Склероскопска метода спада у групу динамичких метода. Ради на принципу еластичног одскока тега мале масе (утискивача) од испитиване површине. Као мера тврдоће код ове методе сматра се висина одскока тега од испитиване површине, који се након слободног пада са одређене висине одбија од ње. Пошто је одскок у великој мери зависан од еластичних својстава испитиваног материјала, то се тврдоће одређене овом методом могу међусобно упоређивати само код материјала који имају приближно једнаке модуле еластичности. У противном, може се поткрасти врло опасна грешка да се због еластичних својстава материјала добију потпуно погрешни резултати, тако нпр. може се добити да гума има већу тврдоћу од челика, што наравно није тачно. Вредности тврдоћа одређене поступцима еластични одскакивања зависе и од: облика врха тега, масе тега, висине пада, величине испитиваног комада, квалитета обраде испитане површине и др. [2].



Слика 4.12 Упоредне вредности тврдоћа: 1) Полдијева тврдоћа; 2) Бринелова тврдоћа [2]

Узимајући у обзир све напред напред поменуто, може се констатирати да ова метода налази мању примену за одређивање тврдоће метала и легура у односу на статичке методе. За испитивање склероскопске тврдоће најчешће се користи Шоров склероскоп, који је приказан на слици. Шоров склероскоп састоји се од постоља (1) који је преко рама повезан са стакленом цеви (5), уз коју је причвршћена скала (3) са 140 подеока - Шорових јединица. У стакленој цеви налази се челични тег (4) маса 0,0245N са заобљеним дијамантским врхом. При испитивању тег се пусти да слободно падне са висине $h_1 = 254 \text{ mm}$ на испитивану површину, одскочи од ње на висину одскока h_2 која се очита на скали. Висина одскока h_2 представља тврдоћу по Шору. Новије конструкције ових апарата има својство да се при испитивању тег задржи на максималној висини одскока, што повећава тачност очитавања тврдоће. При испитивању врши се више пута пуштање да падне на испитивану површину, при чему се узорак за сваки следећи пад помери за 3 - 5 mm [2].

На слици 4.13 је приказан Шоров склероскоп:



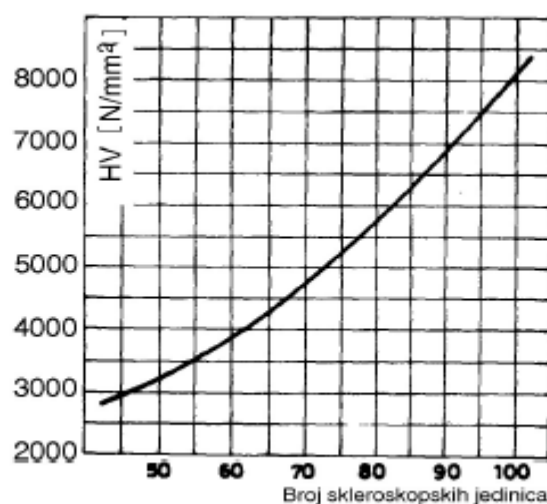
Слика 4.13 Шоров склероскоп: 1) постоље; 2) испитивани узорак; 3) Шорова скала; 4) тег; 5) стаклена цев [2]

На тај начин чита се већи број одскака тега, а затим и аритметичком средином израчуна тврдоћа у Шоровим јединицама по образцу:

$$HS = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n}{n}$$

где је: n - број одскака тега и што је n веће резултат је тачнији; $h_1, h_2, \dots, h_n$ - појединачне висине одскока [2].

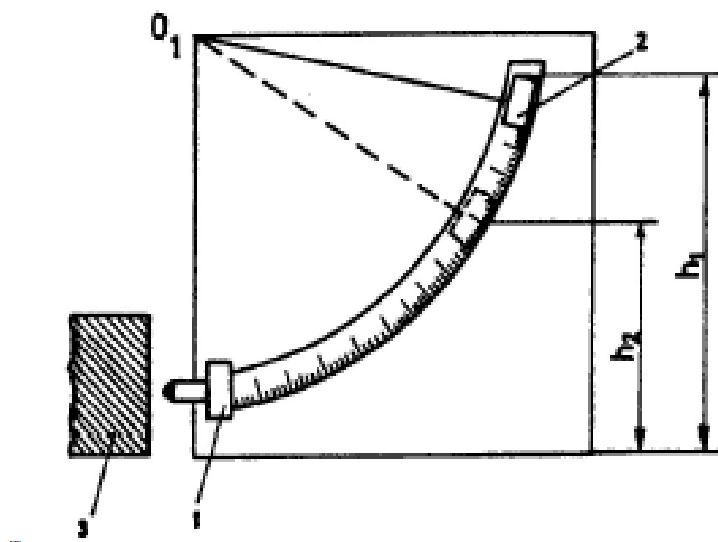
Испитивани узорци морају бити што је могуће боље припремљени, испитиване површине изглачане како би се осигурала потпуна паралелност супротних страна ради бољег налегања. Иако је овај начин утврђивања тврдоће врло брз и једноставан, због великог броја утицајних фактора резултати испитивања нису сасвим поуздани нарочито код одређивања тврдоће метала и легура. Склероскопска метода се углавном препоручује за испитивање тврдоће челика и тврдих лимова у интервалу тврдоће изнад 2250-9400HV. Склероскопском методом не треба мерити тврдоћу предмета тањи од 2mm [2]. Звисност између броја склероскопских јединица, тј. Склероскопске тврдоће и Викерсове тврдоће дата је на дијаграму слике 4.14:



Слика 4.14 Звисност између броја склероскопских јединица, тј. Склероскопске тврдоће и Викерсове тврдоће [2]

4.2.3. Дуроскопска метода

Дуроскопска метода, слично Шоровој методи, базирана је на еластичном одскоку клатна (утискивача) од испитиване површине. Код ове методе лако се уочава висина одскока клатна, јер се заједно са клатном одбија и казаљка која остаје на највећој висини одскока. Тврдоћа се изражава у дуроскопским јединицама као неименован број. За одређивање дуроскопске тврдоће користе се различити типови дуроскопа. Дуроскоп је врло једноставно конструкције, лакши је, мале димензије и служи за брзо одређивање тврдоће [2]. На слици дат је шематски изглед дуроскопа:



Слика 4.15 Шематски изглед дуроскопа: 1) утискивач; 2) клатно са тегом; 3) испитивани узорак [2]

На предњем делу апарата налази се лучна цев са скалом изградуисраном од 0 до 70 дуроскопских јединица. Кроз цев клизи тег (2) који је причвршћен на клатно обртно у тачки O_1 . Тег удара у утискивач (1) који је постављен на предњој бочној страни апарата. Утискивач је изменљив у зависности од врсте материјала. Принцип рада дуроскопа је базиран на слободном паду тега са почетне висине h_1 и његовог ударања у утискивач (1), који је наслоњен на површину испитиваног узорка (3). Услед еластичног одскока тег се подиже на висину h_2 на којој се задржава и казаљка. Висина одскока одређена положајем казаљке, читава се на скали дуроскопа и представља тврдоћу у дуроскопским јединицама. Подизање тега на висину h_1 и његово активирање врши се помоћу два дугмета која се налазе на задњој страни апарата. Пре почетка испитивања дуроскоп се доводи у хоризонтални положај помоћу либеле која се налази на њему, чиме се постиже добро налагање утискивача на испитивану површину. Узорци за испитивање морају се добро подесити како би се осигурала паралелност страна ради бољег налагања.

Врши се најмање 5 мерења, с тим што се при сваком наредном мерењу узорак помери. Маса узорка је од битног утицаја на величину тврдоће. Због великог броја утицајних фактора на тврдоћу, дуроскопска метода се ретко користи за одређивање тврдоће метала и легура [2].

5. Механика лома

Лом или прелом је крајњи резултат пластичне деформације и наступа када се исцрпи сва могућност материјала у погледу еластичне и пластичне деформације [7].

Лом се такође може дефинисати као макроскопско раздвајање материјала који доводи до губитка носивости чврстог тела. Физички узрок лома је деловање напрезања који заједно са утицајем околине уништава атомску или молекулску везу, чиме се формира слободна површина [7].

5.1. Подела ломова

Подела ломова може се извршити у складу са потрошњом енергије која је потребна за прелом. Мала енергија се троши код кртог лома, а велика код жилавог лома. У стаклу и керамичким материјалима обично се налазе пукотине или друге грешке које изазивају концентрацију напона.

Пре прелома материјали, чак и они који су ^{изузетно} крти, се бар мало пластично деформишу те настају микропукотине због нагомилавања дислокација на границама кристала или зрна које клизе по непаралелним клизним равнинама. Пропагација пукотина у поликристалу се лако спроводи по границама кристалних зрна или кроз кристална зрна по одређеним равнинама клизања [7]. Узимајући у обзир утицај различитих фактора, ломови се могу класификовати према:

1. Начину оптерећења:

- ломови настали услед статичких- краткотрајних или трајних оптерећења,
- ломови узроковани услед динамичких ударних или варијабалним оптерећењима.

2. Карактеру напрезања, где се ломови могу поделити према:

- преломи унутар зрна,
- преломи по граници зрна.

3. преломи према степену развоја пластичне деформације:

- брзи преломи,
- ломови без пластичне деформације и пластични ломови,
- ломови са пластичном деформацијом [7].

У овој подели под пластичном деформацијом се подразумева деформација која узрокује сталне промене геометријског дела односно макро деформација [5]. Ова подела не показује при којој врсти оптерећења настају ломови, односно да ли при статичком или динамичном оптерећењу, колика енергија је утрошена за лом, после колико времена је дошло до лома и по каквом механизму се одвија. Подела ломова која узима у обзир услове оптерећења је на [7]:

а. тренутни лом:

- са деформацијом
- без деформације

б. трајни лом:

- услед клизања
- услед замарања

Према брзини ширења пластичне деформације постоје ломови са:

- брзим ширењем,
- умереним ширењем,
- врло малим ширењем,
- лаганим ширењем [7].

Према величини пластичне деформације ломови се могу класификовати према:

- ломови са великом пластичном деформацијом(већом од 10%)
- ломови са малом пластичном деформацијом(мањом од 10 %)

Највише се користи подела ломова на крте и жилаве, затим ломови услед замора и ломови услед пузања. Ова подела према литератури[5] назива се подела ломова према механизму његовог настанка. Постоји више начина према којима пластична деформација доводи до лома, а то су:

1. лом настао смицањем
2. лом настао раздвајањем
3. жилави лом
4. интеркристални крти лом
5. лом услед замора

5.2. Ломови настали смицањем

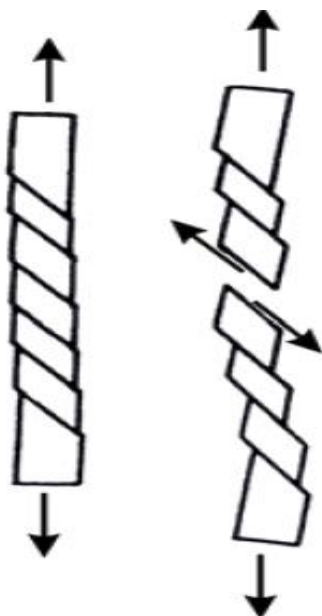
Приликом лома монокристала на овај начин ломови се деле на[7]:

- а) лом при једноставном клизању
- б) лом при вишеструком клизању
- ц) лом потпомогнут двојниковањем

5.2.1. Ломови при једноставном клизању

Када једном деформација започне дуж оних трака клизања у којима је најлакше активирати изворе дислокација, она се може наставити на њима без значајног повећања отпора клизању. Ово ствара грубе, издвојене, широке траке клизања како је приказано на слици 5.1.

Под условом да се други процес пластичне деформације, као што је двојниковање или клизање на некој другој равни изузев базалне не догоди у касном стадијуму процес пластичне деформације може довести до тога да се кристал комплетно смакне и створи два дела дуж једне од грубих трака клизања. Смицање дељењем је један од могућих начина лома монокристала [7].



Слика 5.1 Широке траке клизања по базалној равни под утицајем повишене температуре и мале брзине испитивања [7]

5.2.2. Лом при вишеструком клизању

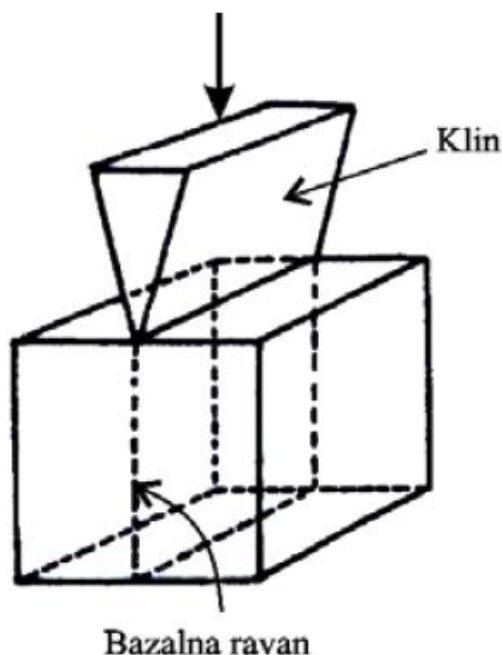
Изузев извесних хексагоналних метала, просто клизање је више изузетак него правило код монокристала. Код кубних метала, после само релативне мале деформације, лако и једносатвно клизање се прекида и прелази у вишеструко по два или више система. Оно што се дешава је да доста рано долази до тога да се један део мерне дужине деформише брже него остали делови. Попречни пресек у овој области постаје мањи него у осталим деловима узорка, са одговарајућим повећањем смичућег напона.

Ако више од два система клизања делују за време деформације металних кристала и при томе долази до сужења, лом се може десити када је попречни пресек смањен тачке. Међутим, лом не мора увек код вишеструког клизања бити у виду тачке, изглед зависи од почетне орјентације кристала [7].

5.3. Ломови настали механизмом раздвајања

5.3.1. Раздвајање кристала

Под извесним условима могуће је раздвојити кристале на два дела дуж равни са ниским индексима. На слици 5.2 приказан је блок-монокристал цинка. Ако се клин води дуж базалне равни и ако је температура довољно ниска, кристал ће се раздвојити на два дела дуж те равни. Ова појава се зове раздвајање [7].



Слика 5.2 Раздвајање кристала цинка [7]

5.3.2. Пропагација пукотина раздвајањем

Повећани износ енергије потребан за лом метала може се објаснити потребом повећане енергије за пропагацију кристалне пукотине раздвајања. Ово је проузроковано пластичном деформацијом која обично прати кретање пукотине кроз кристал. Ниска температура и висока брзина деформације теже да повећају напон течења метала и потисну пластичну деформацију. Пластична деформација повезана са кретањем пукотина је већином одговорна да се она управо дешава при врху пукотине [7].

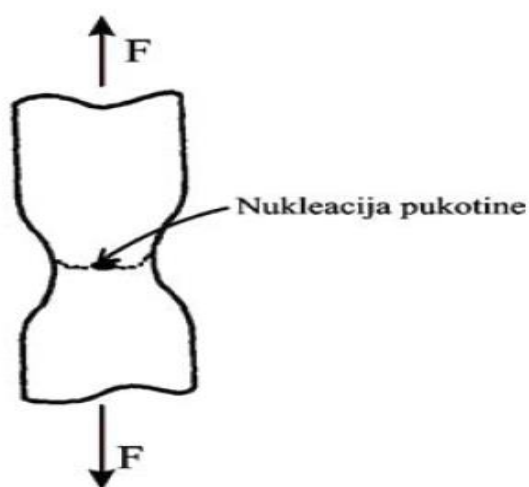
5.3.3. Ефекат границе зрна на лом

Мало заокретање угаоне границе у монокристалу доприноси тешкоћама кретања пукотина раздвајања увођењем степенице у равни лома. Границе зрна у поликристалним металима такође сметају ширењу пукотина раздвајања и постоје докази да величина утицаја граница зрна може бити велика и могуће је наћи пукотине раздвајања у деформисаном полукристалном узорку за испитивањем затезањем. Лом не настаје кретањем чела једне пукотине, него се формира од бројних сегмената пукотина који се спајају у једну. Пошто поједини сегменти пукотине могу бити на исто нивоу, ово обично проузрокује пластично чупање између сегмената површине лома [7].

5.4. Жилави лом

Између кртог и жилавог лома није могуће повући неку оштру границу обзиром да у свим врстама ломова постоји извесна пластична деформација.. То указује на чињеницу да уопште нема чистог кртог лома [5].

Жилав лом се карактерише интензивном пластичном деформацијом у свим етапама лома и настаје при напону изнад напона течења. До лома лако доводе процеси пластичне деформације [7]. Жилави лом при испитивању затезањем састоји се из три етапе. У етапи један се образује сужење пресека у којем настају ситне поре које теже да се сједине једна са другом. У етапи два долази до пораста пора до критичних величина када се стварају услови за њихово брзо простирање кроз попречни пресек. У етапи три већ створена пукотина се простире кроз пресек и излази на површину са правцем под углом од 45° у односу на осу затезања [7].

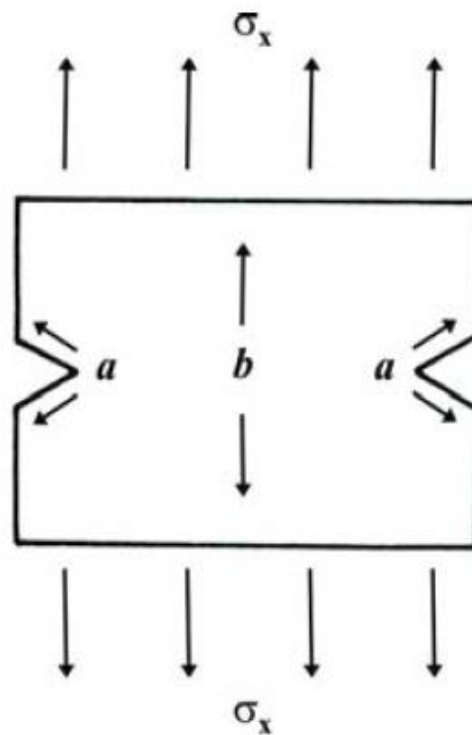


Слика 5.3 Изглед и настајање жилавог лома [7]

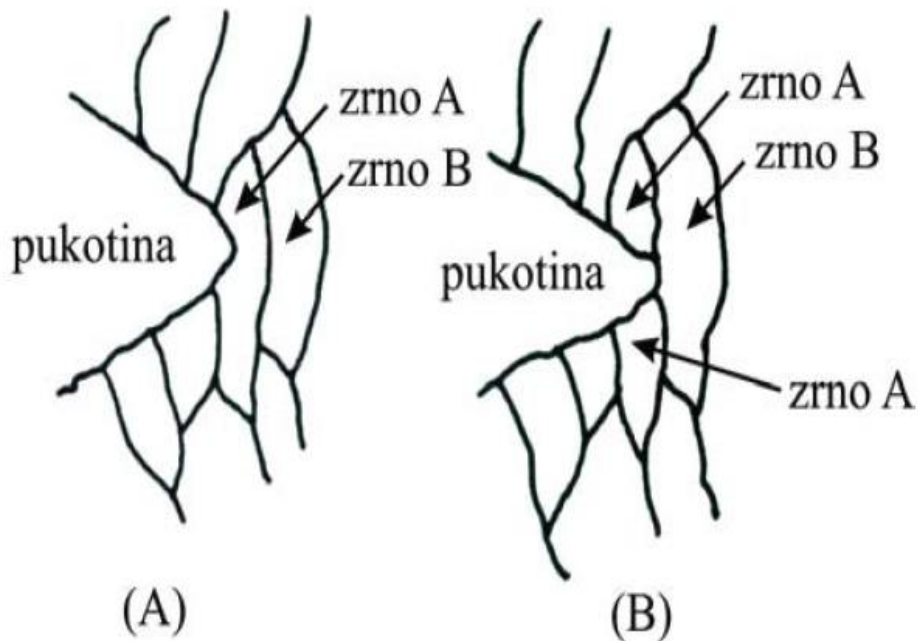
У извесним околностима пресека настаје интензивно пластично течење које је размештено у равнинама под углом од 45° па пукотина наилазком на та места више пута мења смер кретања, што изгледу лома даје цик-цак линију. Сам излаз ове цик-цак линије на површину представља крај трајекторије пукотине и управљен је под углом од 45° , тако да је укупан облик лома чашасти.

Приказано је већ да у суженој области узорка испитиваног затезањем, мале поре се могу формирати у метали близу центра попречног пресека пре него се појаве видљиве пукотине. Неметални укључци и секундарне фазе су један од извора стварања пора у узорку при испитивању затезањем. Поре се могу формирати и као резултат дислокационих реакција и других сметњи. Брзина пластичне деформације на површини зареза је већа него на некој удаљености од зареза у унутрашњости(слика 5.4).

Брзина деформације у тачки а је већа од брзине у тачки б. Са слике се види да разлика у брзини деформације може бити велика и зависи од оштрине зареза. Може се закључити да за време испитивања затезањем кристали који леже на површини зареза деформишу се брже него они у унутрашњости узорка. Кретање дуктилне пукотине је тако представљено као сукцесивно растезање кристала који наилазе сукцесивно на површину зареза(слика 5.5).

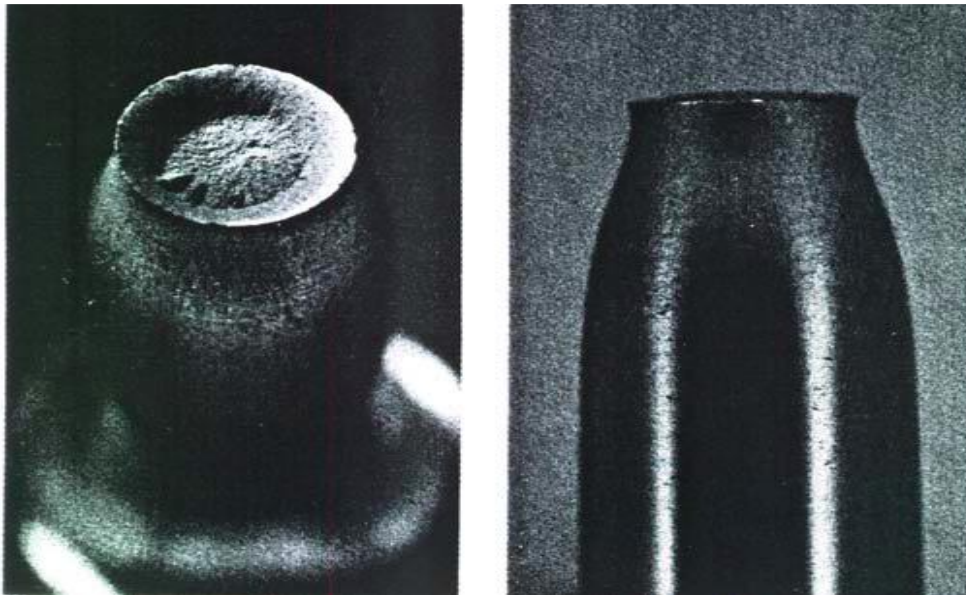


Слика 5.4 Брзина деформације у тачки *a* је већа него у тачки *б* [7]

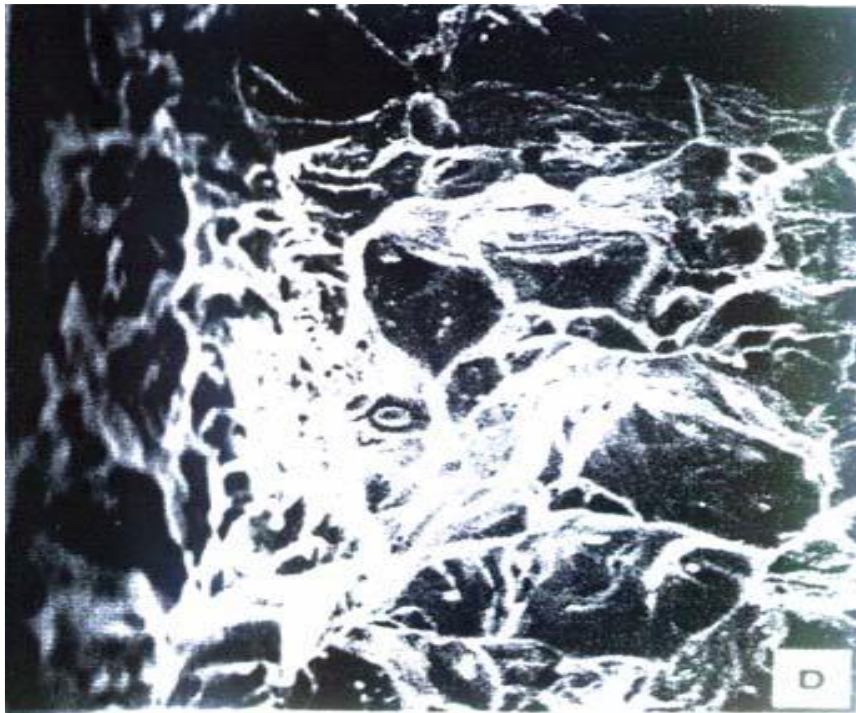


Слика 5.5 Пропагациони механизам дуктилне пукотине [1] (A) пукотина се простира до зрна *A*; (B) пукотина пролази кроз зрно *A* и долази до зрна *B* [7]

Овај механизам важи за ширење сваке дуктилне пукотине без обзира да ли је то кретање унутар спољашњег зареза или унутрашње пукотине која је настала из поре. Изглед дуктилног лома је дат на следећим сликама:



Слика 5.6 Изглед дуктилног лома после испитивања затезањем [7]



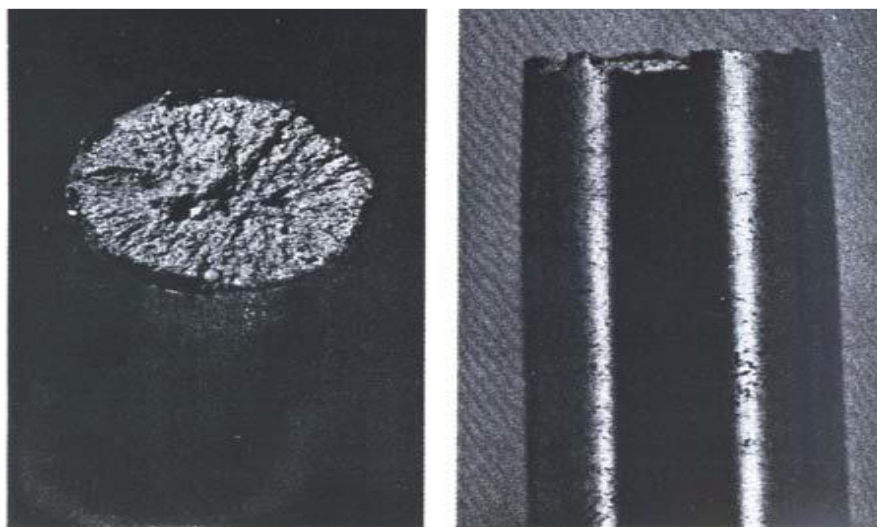
Слика 5.7 Изглед дуктилног лома после испитивања ударом [7]

Код веома дуктилних материјала као што су бакар, алуминијум, сребро и злато, лом настаје у облику двоструке а чаше. Са макроскопског становишта дуктилни лом има следеће карактеристике [7]:

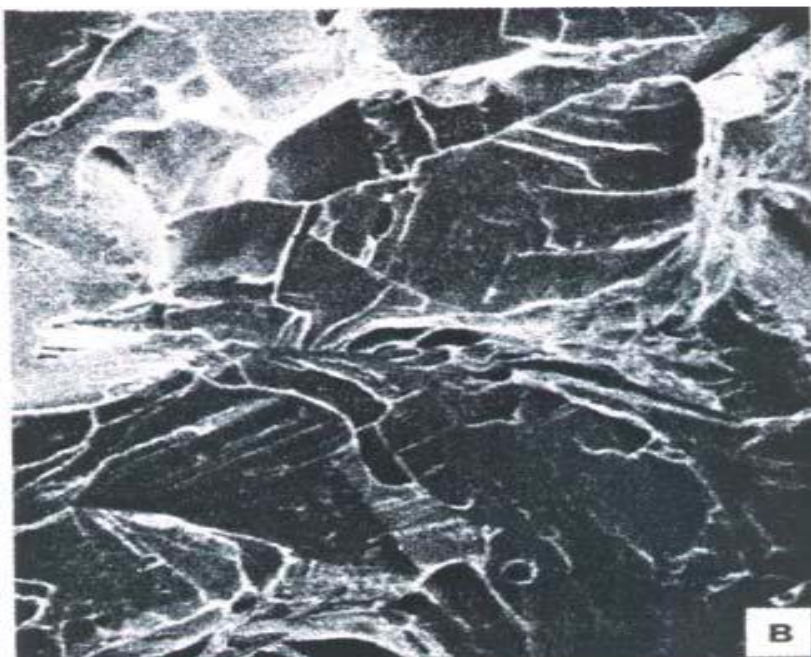
- лому претходи велики степен пластичне деформације,
- у условима експлоатације дуктилни лом је већином последица преоптерећења,
- при испитивању на затезање, лому који се јавља у виду чаше или купе претходи стварање врата на епрувети,
- површина лома је сива и разуђена,
- дуктилна пукотина расте споро.

5.5. Крти лом

Крти лом се карактерише врло ниским нивоом утрошене енергије за његов настанак као и потпуним одсуством пластичних деформација. Основна разлика између кртог и жилавог лома је то што код жилавог лома при распростирању централне пукотине мора постојати знатна пластична деформација, док код кртог лома простирање пукотине није условљено пластичном деформацијом. Крти лом се јавља оп правилу у унутрашњости кристала, а шири се дуж просте кристалографске равни појединих зрна поликристала који се назива раван лома [7].



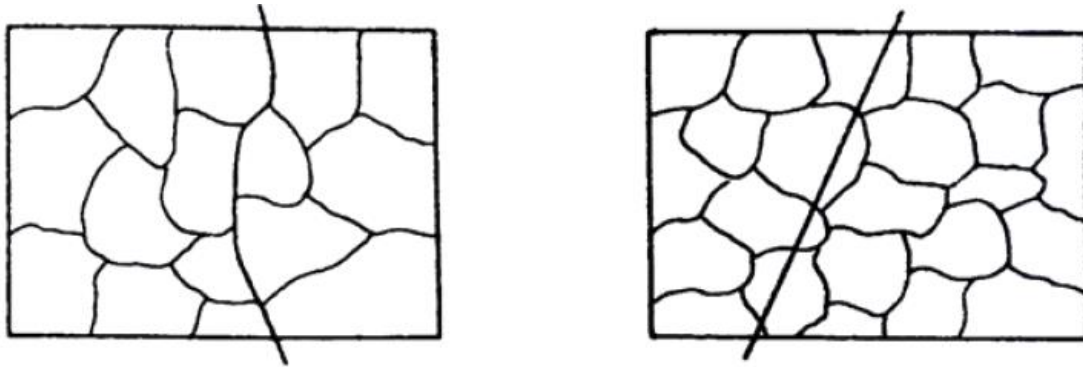
Слика 5.8 Изглед кртог лома после испитивања затезањем [7]



Слика 5.9 Крти лом после испитивања ударом [7]

Појава кртог лома је везана како за структурну грађу, тако и за експлоатационе услове, првенствено радну температуру, брзину наношења оптерећења и постојање или одсуство зареза. Снижењем радне температуре крти лом као врло сложен процес углавном настаје по границама металног зрна када се говори о интеркристалном лому иако зависно од структурних особина може настати лом по самим кристалима када се говори о транскристалном лому [7].

Уочено је да нема велике повезаности између облика лома, затезне чврстоће и напона течења, при чему је познато да друго својство чврстоће у знатно већем степену зависи од температуре. Тако при некој температури долази и до изједначења њихових вредности односно криве затезне чврстоће и напона течења у функцији температуре. Та температура се назива критична температура. Ако је температура виша, пре ће настати крти лом, с обзиром да се критични напон раније достиже [7].



Слика 5.10 Интеркристални лом и транскристални лом [7]

Интеркристални лом је лом који настаје кретањем крте пукотине по границама зрна. У неким случајевима може бити проузрокован филмом на граници зрна тврђе, крте, секундарне фазе. У другим случајевима то је због концентрације раствора у металу уз саму границу зрна [7].

Транскристални лом се одвија механизмом раздвајања дуж равни раздвајања. Код поликристалних агрегата, кристална зрна су различите оријентације, па пукотина при прелазу из једног у друго зрно мења правац стварајући неравну површину лома [7].

6. Закључак

Мерење механичких карактеристика има широку и разнородну примену у индустрији и са њима се изводе различита испитивања материјала. У овом раду је детаљно описан начин мерења механичких карактеристика материјала, уређајима са којима се мери и опис функционисања тих уређаја. Са тим се може закључити који уређаји и које методе испитивања материјала дају најтачније резултате.

Користе се за испитивање еластичности материјала, затим пластичности, тврдоће и испитивање материјала на лом и у раду је наведен поступак одређивања модула еластичности.

Литература

[1] Horst Czichos, Tetsuya Saito, Leslie Smith, *Springer Handbook of Materials Measurement Methods*, Springer Science + Business Media, Inc., Лајпциг, 2006.

[2]

http://www.rgf.bg.ac.rs/predmet/RO/III%20semestar/Tehnologija%20materijala/Download/Metode%20ispitivanja%20vezbe.pdf?fbclid=IwAR0S_mi90VxvWXMO4qmrS1HUFuuzPJ_sJ06u1OLIBScuMCgtx9dewRaxeU8, пруступљено 18.10.2018. год.

[3] Вукић Лазих, Нада Ратковић, Драган Адамовић, Милорад Јовановић, *Машински материјали*, Крагујевац, 2003. год.

[4] <https://www.scribd.com/doc/129937693/Masinski-materijali-pdf> , пруступљено 18.10.2018. год.

[5]

<https://emineter.files.wordpress.com/2013/10/d0bed0b4d180d0b5d192d0b8d0b2d0b0d19ad0b5-d0bcd0bed0b4d183d0bbd0b0-d0b5d0bbd0b0d181d182d0b8d187d0bdd0bed181d182d0b81.pdf> , пруступљено 18.10.2018. год.

[6] Србислав Александровић, Милентије Стефановић, *Технологија пластичног обликовања метала*, Крагујевац, 2010. год.

[7]

https://www.researchgate.net/profile/Mirsada_Oruc/publication/316430672_Lomovi_i_osnove_mehanike_loma/links/593fab06458515a62173a5f6/Lomovi-i-osnove-mehanike-loma , пруступљено 18.10.2018. год.