



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ



Душан Петковић
Јелена Миловановић
Предраг Јанковић
Горан Раденковић

ПРАКТИКУМ ЗА ЛАБОРАТОРИЈСКЕ ВЕЖБЕ ИЗ МАШИНСКИХ МАТЕРИЈАЛА

ПРАКТИКУМ ЗА ЛАБОРАТОРИЈСКЕ ВЕЖБЕ ИЗ МАШИНСКИХ МАТЕРИЈАЛА

Ниш, 2020.

УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ

Машински факултет

Душан Петковић
Јелена Миловановић
Предраг Јанковић
Горан Раденковић

**ПРАКТИКУМ ЗА ЛАБОРАТОРИЈСКЕ ВЕЖБЕ ИЗ
МАШИНСКИХ МАТЕРИЈАЛА**

Ниш, 2024.

Наслов публикације: **ПРАКТИКУМ ЗА ЛАБОРАТОРИЈСКЕ ВЕЖБЕ ИЗ
МАШИНСКИХ МАТЕРИЈАЛА**

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Нишу, бр. 612-437-3-1/2020 од 27.10.2020. године, рукопис је одобрен за објављивање као помоћни универзитетски уџбеник.

Аутори: Душан Петковић
Јелена Миловановић
Предраг Јанковић
Горан Раденковић

Рецензенти: др Марко Ракин
др Миодраг Манић

Издавач: Машински факултет у Нишу, Александра Медведева 14, 18000 Ниш.

Дизајн корица: Саша Ђорђевић

ИСБН: 978-86-60551-37-7

Штампа: „Графика ГАЛЕБ“, Ниш.

Тираж: 50.

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

620.1:621(075.8)(076)

ПРАКТИКУМ за лабораторијске вежбе из Машинских материјала /
Душан Петковић ... [и др.]. - Ниш : Машински факултет, 2020 (Ниш :
Графика Галеб). - 133 стр. : илустр. ; 30 cm

На врху насл. стр.: Универзитет у Нишу. - Тираж 50. - Библиографија: стр.
132-133.

ISBN 978-86-60551-37-7

1. Петковић, Душан, 1982- [аутор]
а) Машински материјали -- Испитивање -- Вежбе

COBISS.SR-ID 26218505

САДРЖАЈ

ПРЕДГОВОР	5
ИСПИТИВАЊА МАТЕРИЈАЛА - појам и подела	6
Механичка својства материјала (појам напона и деформације)	9
1. ИСПИТИВАЊЕ ЗАТЕЗАЊЕМ (SRPS EN ISO 6892-1:2017)	10
Циљ испитивања	10
Опрема за испитивање	10
а) Епрувете за испитивање затезањем	11
б) Машина за испитивање затезањем	13
ц) Потребна мерна опрема	14
Поступак испитивања	14
Величине које се одређују при испитивању затезањем	18
Одређивање својстава отпорности и деформације	20
Дефиниције карактеристичних величина:	22
Технички и стварни напон	22
РАДНИ ЛИСТ	24
ВЕЖБА БР. 1: ИСПИТИВАЊЕ ЗАТЕЗАЊЕМ	24
РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА И ЗАДАТАК ПРАКТИЧНОГ ДЕЛА ВЕЖБЕ	27
2. ОДРЕЂИВАЊЕ УСЛОВНЕ ГРАНИЦЕ ТЕЧЕЊА	33
Графичко одређивање условне границе течења	33
Експериментално одређивање условне границе течења	34
Екстензометри	35
РАДНИ ЛИСТ	37
ВЕЖБА БР. 2: ОДРЕЂИВАЊЕ УСЛОВНЕ ГРАНИЦЕ ТЕЧЕЊА	37
РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА И ЗАДАТАК ПРАКТИЧНОГ ДЕЛА ВЕЖБЕ	39
3. ОДРЕЂИВАЊЕ МОДУЛА ЕЛАСТИЧНОСТИ	40
Графичко одређивање модула еластичности	41
Експериментално-аналитичка метода одређивања модула еластичности	42
РАДНИ ЛИСТ	45
ВЕЖБА БР. 3: ОДРЕЂИВАЊЕ МОДУЛА ЕЛАСТИЧНОСТИ	45
РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА И ЗАДАТАК ПРАКТИЧНОГ ДЕЛА ВЕЖБЕ	47

4. ИСПИТИВАЊЕ ПРИТИСКИВАЊЕМ.....	49
Циљ испитивања	49
Опрема за испитивање	49
а) Епрувете за испитивање притискивањем.....	49
б) Машина за испитивање притискивањем.....	50
ц) Потребна мерна опрема	50
Поступак испитивања.....	51
Величине које се одређују при испитивању притискивањем.....	52
Одређивање својстава отпорности и деформације.....	53
Дефиниције карактеристичних величина:	55
РАДНИ ЛИСТ.....	56
ВЕЖБА БР. 4: ИСПИТИВАЊЕ ПРИТИСКИВАЊЕМ.....	56
РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА И ЗАДАТАК ПРАКТИЧНОГ ДЕЛА ВЕЖБЕ	58
5. ОДРЕЂИВАЊЕ ТВРДОЋЕ СТАТИЧКИМ МЕТОДАМА	62
СТАТИЧКЕ МЕТОДЕ	62
1. Бринелова метода	62
Утискивач и сила утискивања.....	64
Време утискивања.....	64
Услови испитивања	65
Бринелов уређај за мерење тврдоће	65
Поступак испитивања.....	66
2. Викерсова метода	66
Утискивач и сила утискивања.....	67
Пример означавања тврдоће по Викерсу	68
Време утискивања.....	68
Викерсов уређај за мерење тврдоће.....	68
Услови испитивања	69
Поступак испитивања.....	69
3. Роквелова метода	70
Утискивач и сила утискивања.....	70
Време утискивања.....	72
Услови испитивања	72
Поступак испитивања.....	73
РАДНИ ЛИСТ.....	74

ВЕЖБА БР. 5: ОДРЕЂИВАЊЕ ТВРДОЋЕ СТАТИЧКИМ МЕТОДАМА	74
РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА И ЗАДАТАК ПРАКТИЧНОГ ДЕЛА ВЕЖБЕ	75
6. ОДРЕЂИВАЊЕ ТВРДОЋЕ ДИНАМИЧКИМ МЕТОДАМА	79
Полдијева метода	79
Услови испитивања:	80
Поступак испитивања	81
Склероскопска метода (метода по Шору).....	81
Уређај за мерење тврдоће Шоровом методом.....	81
Услови испитивања:	81
Поступак испитивања.....	82
Дуроскопска метода (Кирнерова)	82
Уређај за мерење тврдоће по Кирнеру.....	82
Услови испитивања:	83
Поступак испитивања.....	83
РАДНИ ЛИСТ.....	84
ВЕЖБА БР. 6: ОДРЕЂИВАЊЕ ТВРДОЋЕ ДИНАМИЧКИМ МЕТОДАМА	84
РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА И ЗАДАТАК ПРАКТИЧНОГ ДЕЛА ВЕЖБЕ	86
7. ИСПИТИВАЊЕ ЖИЛАВОСТИ.....	88
а) Епрувете за испитивање жилавости	88
б) Машина на којој се изводи испитивање	89
ц) Фактори који утичу на вредност жилавости.....	91
1. Облик и димензије епрувете.....	91
2. Утицај претходне технолошке и термичке обраде	91
3. Утицај температуре	92
4. Утицај брзине удара.....	93
8. ИСПИТИВАЊЕ ЖИЛАВОСТИ НА СНИЖЕНИМ ТЕМПЕРАТУРАМА	94
Појам и врсте лома	94
Прелазна (транзитна) температура	95
Услови испитивања:.....	96
РАДНИ ЛИСТ.....	98
ВЕЖБА БР. 7 и 8: ИСПИТИВАЊЕ ЖИЛАВОСТИ НА СОБНОЈ И СНИЖЕНИМ ТЕМПЕРАТУРАМА.....	98
РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА И ЗАДАТАК ПРАКТИЧНОГ ДЕЛА ВЕЖБЕ	101
9. ТЕХНОЛОШКА ИСПИТИВАЊА.....	103
1. Испитивање савијањем	104

2.	Испитивање дубоким извлачењем- Ериксенов поступак	105
	Ериксенов поступак.....	105
	Поступак испитивања.....	106
3.	Испитивање жица и лимова наизменичним превијањем	106
	Услови испитивања	107
	РАДНИ ЛИСТ.....	109
	ВЕЖБА БР. 9: ТЕХНОЛОШКА ИСПИТИВАЊА	109
	РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА И ЗАДАТАК ПРАКТИЧНОГ ДЕЛА ВЕЖБЕ	111
1.	Испитивање савијањем	111
2.	Испитивање дубоким извлачењем	111
3.	Испитивање жица наизменичним превијањем	112
10.	ИСПИТИВАЊА БЕЗ РАЗАРАЊА.....	113
1.	Визуелна контрола	113
2.	Димензиона контрола	115
3.	Испитивање прозрачивањем X и γ зрацима (радиографија)	115
	3.1 Испитивање прозрачивањем рентгенским зрацима	115
	3.2 Испитивање прозрачивањем гама зрацима.....	117
4.	Испитивање ултразвуком	119
	Ултразвучни уређај	120
5.	Магнетна испитивања.....	123
6.	Испитивање пенетрантима (капиларне методе).....	124
	РАДНИ ЛИСТ.....	125
	ВЕЖБА БР. 10: ИСПИТИВАЊА БЕЗ РАЗАРАЊА.....	125
	РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА И ЗАДАТАК ПРАКТИЧНОГ ДЕЛА ВЕЖБЕ	127
	ЛИТЕРАТУРА.....	128

ПРЕДГОВОР

Писање овог Практикума наметнула је потреба, да се у једној књизи систематизују, обраде и осавремене упутства и препоруке за разноврсна лабораторијска испитивања машинских материјала. У Практикуму су на свеобухватан и концизан начин описане теоријске основе и објашњена потреба за одређеним врстама, првенствено, механичких испитивања материјала. Поред њих, у књизи је по једно поглавље посвећено технолошким испитивањима и испитивањима без разарања (дефектоскопији).

Основна намена Практикума је помоћ студентима за савладавање и усвајање основних знања из области испитивања машинских материјала. Сходно томе, писан је према наставном плану и програму рада предмета *Машински материјали*, који слушају студенти 1. године основних академских студија Машинског инжењерства на Машинском факултету у Нишу. Аутори сматрају да Практикум, у одређеном обиму или у целини, може бити од користи и другим студентима техничких наука, а нарочито машинства.

Садржај Практикума тематски је подељен у десет поглавља. У сваком поглављу је у уводном делу наведен разлог испитивања, а потом објашњен физички феномен преко кога се нека својства материјала могу посматрати, мерити и квантификовати. У наставку су описана упутства за припрему узорака и епрувета, објашњена мерна опрема која се користи и уређаји на којима се изводе испитивања. Наведене су и формуле које се користе за израчунавање карактеристичних величина са одговарајућим мерним јединицама.

На крају сваког поглавља, налази се радни лист намењен студентима. Сваки радни лист састављен је из два дела. Први део чине питања из поглавља, која имају за циљ рекапитулацију и лакше савладавање теоријског градива. Други део радног листа се односи на резултате испитивања и практични део лабораторијске вежбе. Он заправо представља извештај са испитивања и служи као помоћ студентима да лакше забележе, обраде и прикажу резултате и закључке о изведеној лабораторијској вежби.

Аутори користе ову прилику, да се јавно захвале рецензентима књиге проф. др Марку Ракину, редовном професору Технолошко-металуршког факултета у Београду и проф. др Миодрагу Манићу редовном професору Машинског факултета у Нишу, који су корисним саветима и сугестијама допринели бољем квалитету Практикума.

У Нишу, августа 2020. године

Аутори

ИСПИТИВАЊА МАТЕРИЈАЛА - појам и подела

Познавање својстава машинских материјала неопходно је из више разлога. На пример: да би се, у процесу конструисања и пројектовања, могао извести правилан избор материјала или да би се спровео правилан поступак обраде, односно израде машинског елемента.

Машинске материјале, који се користе за израду машинских елемената, карактеришу бројна, веома различита својства. Та својства могу да се поделе на различите начине. Једна од подела је на:

- физичка,
- хемијска,
- механичка,
- технолошка и
- металографска својства.

Понашање материјала под дејством спољашњег оптерећења од велике је важности у многим областима науке, инжењерства и индустрије. У овој књизи предмет интересовања су, првенствено, механичка и технолошка својства материјала, па ће, у складу са тим, бити описан већи број испитивања, заједно са теоријским основама и детаљним описом за практично извођење.

Механичким испитивањима одређују се величине отпорности и деформабилности материјала, које представљају одговор материјала на спољашња механичка дејства. Технолошка испитивања служе за одређивање величина које карактеришу понашање материјала приликом технолошког процеса обраде. На пример: начин деформисања или оштећења која се јављају услед дејства сопљашњих сила, погодност за одређени вид обраде и сл.

Да би се одредила својства машинских материјала, они се подрвгавају испитивањима. Како је број карактеристика које изражавају својства материјала веома велики, то је сасвим разумљиво да је и број метода и поступака испитивања велики. У погледу начина дејства силе, врсте напрезања и услове при којима се ова својства одређују, постоји више подела механичких испитивања.

Према некој најгрубљој подели, сва испитивања се могу поделити у две групе, и то:

- стандардне методе испитивања, код којих су начин и услови испитивања прописани стандардом и
- специјалне методе испитивања, које се обављају на начин договорен између заинтересованих страна.

Због потребе да се омогући поређење резултата добијених једном врстом испитивања, без обзира где се и када изводило испитивање, користе се стандардизоване процедуре испитивања, прописане од стране посебних организација за стандардизацију. У нашој земљи уређењем и издавањем стандарда бави се Институт за стандардизацију Србије (серија стандарда са ознаком СРПС), а на међународном нивоу највиши ниво представља Међународна организација за стандарде (ISO). Стандарди прописују облик и димензије узорка

(епрувете) на коме се изводи испитивање, начин на који се изводи испитивање, терминологију, ознаке, као и величине које се у конкретном случају одређују испитивањем.

Механичка испитивања, за разлику од физичких, електричних или других, често доводе до деформација и/или лома испитиваног елемента. С обзиром на то, и поступци испитивања могу се поделити на:

- методе које доводе до разарања материјала и
- методе и поступке којима се врши испитивање без разарања материјала.

Надаље, како се материјали различито понашају под дејством потенцијалне и кинетичке енергије, односно при статичким и динамичким оптерећењима, то се и испитивања деле на:

- статичка и
- динамичка испитивања.

Под статичким испитивањима подразумевају се она која се обављају при мирном дејству силе тако да напон постепено расте, обично не брже од 10 МПа у секунди. Код динамичког испитивања сила делује ударом или се учестало мења по одређеном закону. Број промена оптерећења обично се креће у границама од 3 до 20.000 у минути.

С друге стране, спољашње оптерећење, које делује на машински елемент, може имати различит период деловања, па се могу спроводити испитивања:

- при краткотрајном дејству оптерећења и
- при доготрајном дејству оптерећења.

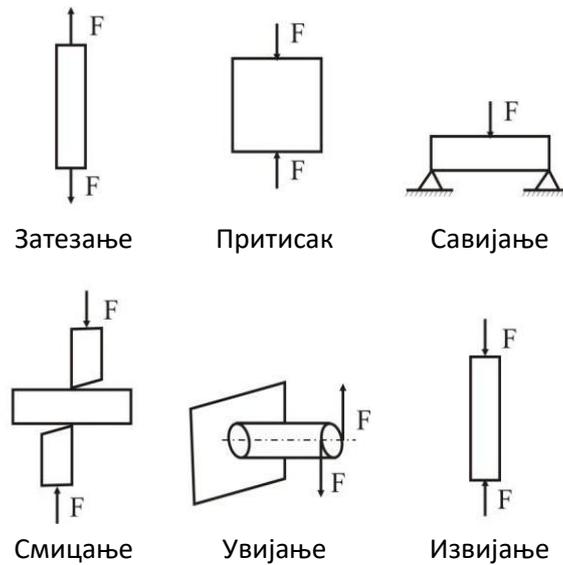
У односу на температурне услове, поступци испитивања се деле на:

- испитивања на нормалним темепратурама,
- испитивања на повишеним темепратурама и
- испитивања на сниженим температурама.

Најчешће се испитивања изводе на собној темепратури (између 10 и 35°C). Испитивања се такође могу изводити:

- у контролисаним условима на температури 23 ± 5 °C,
- на повишеним температурама 400°C , 500°C, 600°C и више и
- на сниженим температурама (испод 0°C).

У погледу врсте напрезања које у материјалу изазива спољашње оптерећење, разликују се испитивања на: затезање, притисак, савијање, увијање, смицање (слика 1), уз могућност њиховог комбиновања. Сва ова испитивања могу се изводити при статичком или динамичком дејству силе на различитим температурама, тако да је могуће остварити доста велики број разних комбинација.



Слика 1. Видови спољашњег оптерећења

Данас, практично, није могуће замислити ниједно предузеће које се бави прерадом метала, односно израдом производа од металних материјала, без сопствене лабораторије са опремом за различите врсте испитивања. Под појмом метални материјали, у овом приручнику, подразумевају се чисти метали (железо, алуминијум, бакар, цинк, ...) и легуре метала (челик, гвожђе, месинг, бронза, силумин, дуралуминијум, ...). Метални материјали се углавном користе за израду конструкција и најоптерећенијих машинских елемената, код којих се захтева велика носивост. Карактеришу се добром топлотном и електро проводљивошћу, имају добру чврстоћу и крутост, добру обрадивост и отпорност према удару. На слици 2, сажето је приказана подела механичких испитивања у зависности од услова при којима се испитивања изводе.

МЕХАНИЧКА ИСПИТИВАЊА			
СТАТИЧКА		ДИНАМИЧКА	
КРАТКОТРАЈНА	ДУГОТРАЈНА	КРАТКОТРАЈНА	ДУГОТРАЈНА
Затезање	Пузање	Жилавост	Замарање
Притисак	Релаксација	Тврдоћа	
Савијање			
Увијање			
Тврдоћа			
НА СОБНОЈ ТЕМПЕРАТУРИ		НА ПОВИШЕНОЈ ТЕМПЕРАТУРИ	НА СНИЖЕНОЈ ТЕМПЕРАТУРИ

Слика 2. Подела поступака механичких испитивања

Механичка својства материјала (појам деформације и напона)

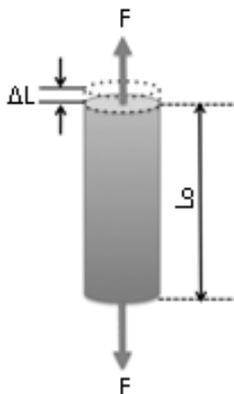
Када на материјал, без обзира на врсту, дејствује спољашње оптерећење, оно изазива промену димензија машинског елемента, тј. јављају се деформације. У зависности од вида спољашњег оптерећења, јављају се различите врсте деформација. На пример: при затезању се јавља издужење, при притиску скраћење, а при савијању угиб - величина која описује деформацију оптерећеног машинског елемента. Деформација може да се мери, а изражава се у апсолутном износу (у милиметрима, степенима или друго), или чешће као однос апсолутне деформације и величине почетне мерене димензије. Тада се добија величина која се назива јединична деформација (ϵ) и карактеристична је за одређени материјал, тј. за дати материјал увек има исту вредност, без обзира на димензије испитиваног елемента.

Пре и током деформисања, унутар материјала од кога је израђен машински елемент, јавља се отпор (напрезање) којим се материјал супротставља дејству спољашњег оптерећења. На величину тог отпора не утиче само величина спољашњег оптерећења, већ и димензије оптерећеног елемента. Да би се добила величина која не зависи од вредности спољашњег оптерећења, односно пресека оптерећеног машинског елемента, уведен је појам напона. Вредност напона се добија када се величина спољашњег оптерећења сведе на јединицу површине пресека елемента, где оптерећење дејствује.

1. ИСПИТИВАЊЕ ЗАТЕЗАЊЕМ (SRPS EN ISO 6892-1:2017)

Циљ испитивања

Испитивање затезањем базира се на излагању одређеног елемента оптерећењу на затезање и праћењу својстава отпорности и деформација материјала у зависности од задатог оптерећења.



Слика 3. Елемент оптерећен на затезање

Када се на материјал дејствује спољашњом силом затезања, његова природна реакција је супротстављање том дејству у виду пружања отпора. Мера тог отпора дефинисана је напоном затезања (σ). Наравно, да постоји граница пружању тог отпора без трајних последица на материјал, а након тога упоредо са отпором јавља се и деформација-издужење (ΔL). Под деформацијом се подразумева свака промена облика и димензија неког елемента.

Испитивање затезањем је најчешћи и најзначајнији метод одређивања механичких својстава материјала као што су чврстоћа, модул еластичности, условна граница течења и својстава деформабилности, где спадају издужење и сужење. Ово испитивање спада у најважнија механичка испитивања из следећих разлога:

- пружа најбољи опис понашања материјала под оптерећењем,
- добијени подаци о својствима материјала служе као основа за прорачун и димензионисање машинских елемената, склопова и конструкција,
- релативно је једноставно за извођење, лако се израчунавају основна својства материјала, а у новије време испитивање је и скоро потпуно аутоматизовано.

Својства отпорности и деформација која се одређују при испитивању затезањем представљаће карактеристичне вредности за један материјал уколико се при испитивању увек добијају исти резултати, без обзира на место (лабораторију) испитивања, испитивача, облик и величину испитиваног елемента. То је могуће обезбедити само ако су испуњени тачно одређени услови испитивања, који су дефинисани стандардима. Процедура за испитивање метала затезањем се изводи по стандарду SRPS EN ISO 6892-1.

Опрема за испитивање

За извођење сваког испитивања, па тако и испитивања затезањем, потребно је обезбедити:

- a) Одређен број епрувета за испитивање.

- b) Машину на којој се изводи испитивање.
- c) Одговарајућу мерну опрему потребну за одређивање вредности оптерећења (силе) и деформација тј. димензија епрувете пре и након кидања.

Као последица дејства оптерећења (у случају затезања то су силе које дејствују у истом правцу, а супротног су смера) јављају се деформације машинског елемента - издужење ΔL , као и отпор којим се материјал супротставља дејству спољашњег оптерећења - напон σ .

a) Епрувете за испитивање затезањем

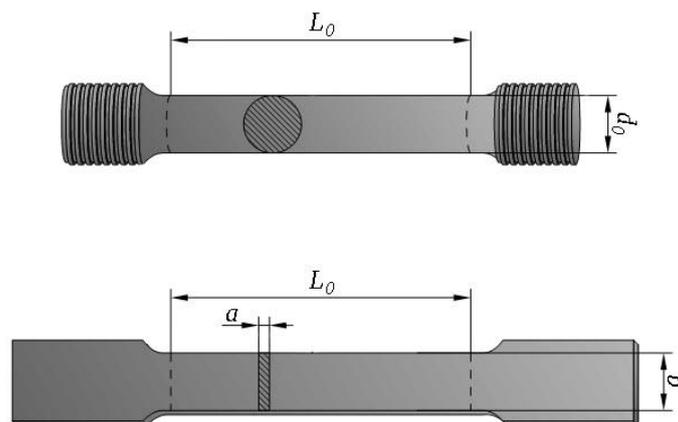
Епрувета је тело стандардизованог облика, димензија и квалитета обрађених површина, које је израђено из узорка и служи за испитивање. Од целокупне количине материјала који треба испитати издваја узорак од кога се израђују епрувете.

Епрувете могу бити **обрађене** (стандардне) и **необрађене** (техничке).

Необрађене (техничке) епрувете се користе када се испитивање затезањем изводи на готовим елементима и деловима конструкција, који су при раду изложени силама затезања, како би им се установила носивост, односно сила потребна да изазове прекид. Одсечци ланаца, жица, трака, бетонског челика, цеви и профила једноставнијег облика попречног пресека, могу се без посебне обраде, непосредним стезањем у чељустима машине, испитати затезањем

Обрађене (стандардне) епрувете могу бити пропорционалне и непропорционалне. Стандард за испитивање затезањем предвиђа употребу пропорционалних епрувета кружног, квадратног или правоугаоног попречног пресека (за испитивање лимова).

Пропорционалне епрувете имају централни (мерни) део (**мерна дужина** – L_0) који је константног попречног пресека са задебљањима (проширењима) на крајевима, која служе за стезање у чељустима машине за испитивање.



Слика 4. Стандардне епрувете за испитивање затезањем правоугаоног и кружног попречног пресека са карактеристичним димензијама

Прелазни између пресека различитих димензија израђују се са радијусима заобљења, како би се елиминисали утицаји концентрације напона.

Мерни део ових епрувете мора бити израђен у квалитету обраде који прописује стандард (N7) и има најмањи попречни пресек како би до прекида (лома) епрувете дошло на том делу епрувете. Издужење епрувете се мери у централном (мерном) делу, на коме су бојом или фломастером означене тачке или линије између којих ће се пратити промена дужине приликом испитивања. Те ознаке никако не треба правити оштрим предметом у виду зареза, јер се тиме смањује попречни пресек који се супротставља зазезном оптерећењу и уноси извесна концентрација напона, што на крају може довести до умањених вредности карактеристичних напона.

Пропорционалне епрувете представљају епрувете код којих је мерна дужина пропорционална квадрату површине попречног пресека (који може бити кружни, квадратни или правоугаони, слика 5), а рачуна се према формули:

$$L_0 = 11,3(5,65) \cdot \sqrt{S_0} \quad (1)$$

где је:

- 11,3 – Коефицијент пропорционалности за дугу епрувету,
- 5,65 - Коефицијент пропорционалности за кратку епрувету и
- S_0 - Површина попречног пресека мерног дела епрувете.

Растојање између нанетих ознака назива се **почетна мерна дужина** - L_0 . Карактеристичне димензије мерног дела епрувете су:

- d_0 - почетни пречник у mm (за случај епрувете кружног облика),
- b - ширина у mm (за случај епрувете правоугаоног облика),
- a - дебљина у mm (за случај епрувете правоугаоног облика),
- L_0 - почетна мерна дужина у mm.

Уколоко димензије узорка то допуштају, почетни пречник епрувете обично износи $d_0=10$ mm, док је уобичајено да почетна мерна дужина буде десет пута већа, тј. $L_0=10 \cdot d_0 =100$ mm. То су пропорционално дуге епрувете.

У случају да нема довољно материја да се направи таква епрувета, израђује се пропорционално кратка епрувета код које је почетна мерна дужина једнака $L_0=5 \cdot d_0=50$ mm.



а) правоугаоног ПП

б) кружног ПП

Слика 5. Изглед пропорционалних епрувета за испитивање затезањем

б) Машина за испитивање затезањем

За извођење испитивања неопходна је машина која треба да обезбеди равномерно преношење силе на епрувету стегнуту у њене чељусти (део машине где се стежу проширени крајеви епрувете). Епрувета се у аксијалном правцу излаже затезним силама до прекида, при чему се на уређају за регистровање оптерећења прати ток промене силе. Испитивање затезањем се обично изводи на тзв. **универзалној машини за испитивање**, на којој се поред испитивања затезањем може изводити и испитивање притискивањем и савијањем. По принципу рада могу бити механичке или хидрауличне. На слици 6 показане су неке од машина за испитивање затезањем. Максималне вредности силе које могу да постигну крећу се у опсегу од 10 - 500 kN.



Слика 6. Машине за испитивање затезањем – кидалице

Како се на оваквој машини најчешће изводи испитивање затезањем, при чему на крају испитивања долази до лома, тј. кидања епрувете, машина се уобичајено назива кидалица.

Чине је веома крути рам, покретне летве, чељусти за стезање епрувете, сензор силе (динамометар), погонски систем и контролна јединица. Може се користити и додатни уређај за мерење деформације епрувете (екстензиометар, скраћено тензометар). Проширени крајеви епрувете постављају се у чељусти машине, с тим, да је једна од чељусти непокретна, док је друга покретна, чиме се обезбеђује затезање епрувете

Машине за испитивање затезањем у последње време су знатно осавремене, нарочито у погледу тачности показивања и могућности регулисања брзине оптерећивања и брзине деформисања. Ово је омогућено, углавном, применом различитих електронских компоненти и уређаја.

Савремене конструкције ових машина треба да задовоље следеће захтеве:

- да су што једноставније, а при том довољно чврсте и круте, да се ниједан део машине током дејства силе не деформише,
- да се оптерећење може преносити на епрувету, која се испитује жељеном брзином, и да се оно у сваком тренутку може очитати са потребном тачношћу,
- да се оптерећење постиже мирно, без удара и да се по потреби може одржавати дуже време на константним вредностима,
- да уређај за стезање епрувете буде једноставан, лак за манипулисање и да при томе онемогући клизање крајева епрувете.

На већини машина за испитивање затезањем уграђују се уређаји за аутоматско цртање дијаграма **сила затезања – издужење**. За прецизније регистровање овог дијаграма користе се механичко – електронски тензометри.

ц) Потребна мерна опрема

Током испитивања прати се вредност оптерећења, тј. силе која дејствује на епрувету, коришћењем динамометра постављеног на машини за испитивање. Бројна вредност силе се очитава помоћу казаљке на сату динамометра или бележе дигитални записи, у случају коришћења савремених кидалица.

За мерење димензија епрувете пре и након испитивања користи се помично мерило, са тачношћу од стотог дела милиметра (слика 7).



Слика 7. Помично мерило са дигиталним дисплејом

Поступак испитивања

Епрувета се ставља у чељусти машине (слика 8), помоћу којих се спољашње оптерећење преноси на епрувету. Машина је тако конструисана да обезбеђује константну брзину

деформисања или сталан пораст напрезања. Са порастом оптерећења (у овом случају силе затезања) долази до све већег издужења епрувете, које је у почетку сразмерно сили, када настају само еластичне (привремене, реверзибилне) деформације на епрувети. Даљи пораст оптерећења силе затезања доводи до појаве и пластичних (трајних, иреверзибилних) деформација.

Појава локализоване пластичне деформације претходи разарању материјала. Испитивање се завршава у тренутку кидања епрувете, тј. након достизања максималне силе затезања коју та епрувета може да издржи.

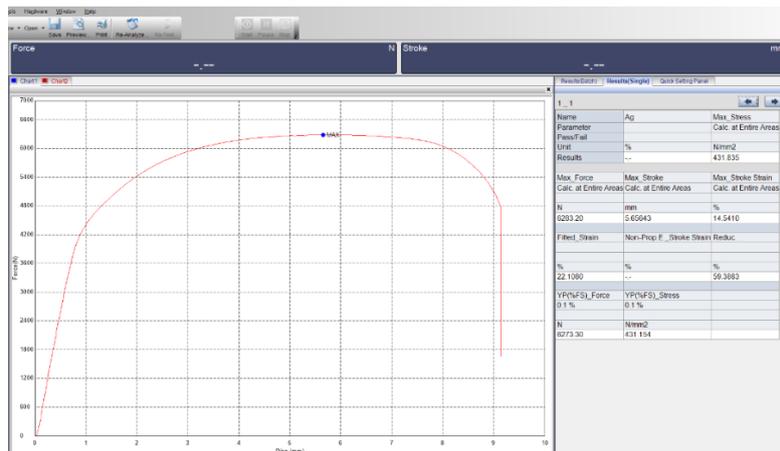


Слика 8. Изглед епрувете за време испитивања затезањем

Током испитивања, помоћу специјалног уређаја који је саставни део машине за испитивање, црта се **дијаграм кидања** или дијаграм сила - издужење.

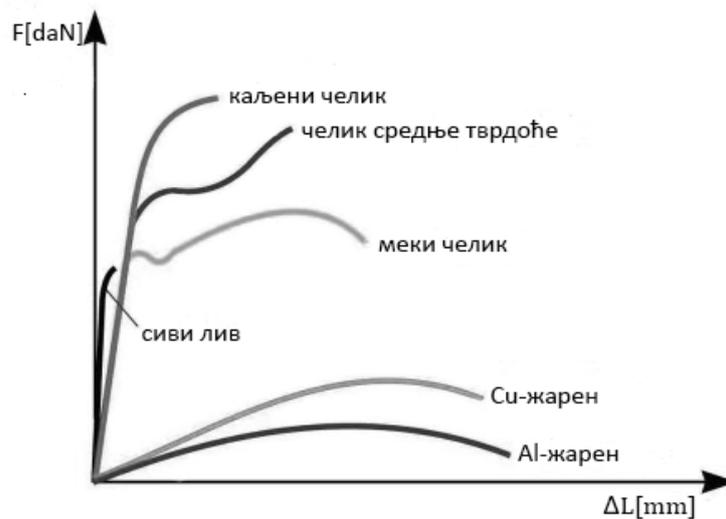
Дијаграм се црта у правоугаоном координатном систему на чијој ординати се наноси вредност силе која делује на епрувету у Њутнима (N), а на апсциси тренутно издужење у милиметрима (mm). Издужење епрувете представља повећање мерне дужине L_0 , тј. размака између ознака које су нанете на средишњи, испитни, део епрувете.

Са тог дијаграма се, у одређеној размери, могу прочитати карактеристичне вредности сила потребних за одређивање карактеристичних напона при затезању. Код машина са механичким регистравањем силе дијаграм се црта писачем на милиметарском папиру, а вредности сила и издужења се одређују помоћу фактора размере за силу и издужење, који показују колико нпр. јединица силе (N) одговара једном милиметру на дијаграму. Код машина са електронским регистравањем силе и издужења, дијаграм се приказује на екрану рачунара, преко кога се управља машином (слика 9).



Слика 9. Изглед генерисаног извештаја о испитивању затезањем у одговарајућем софтверу

Изглед дијаграма кидања (дијаграм сила затезања - издужење) зависи од врсте и стања материјала. На слици 10 дати су изгледи карактеристичних дијаграма кидања за неке материјале.



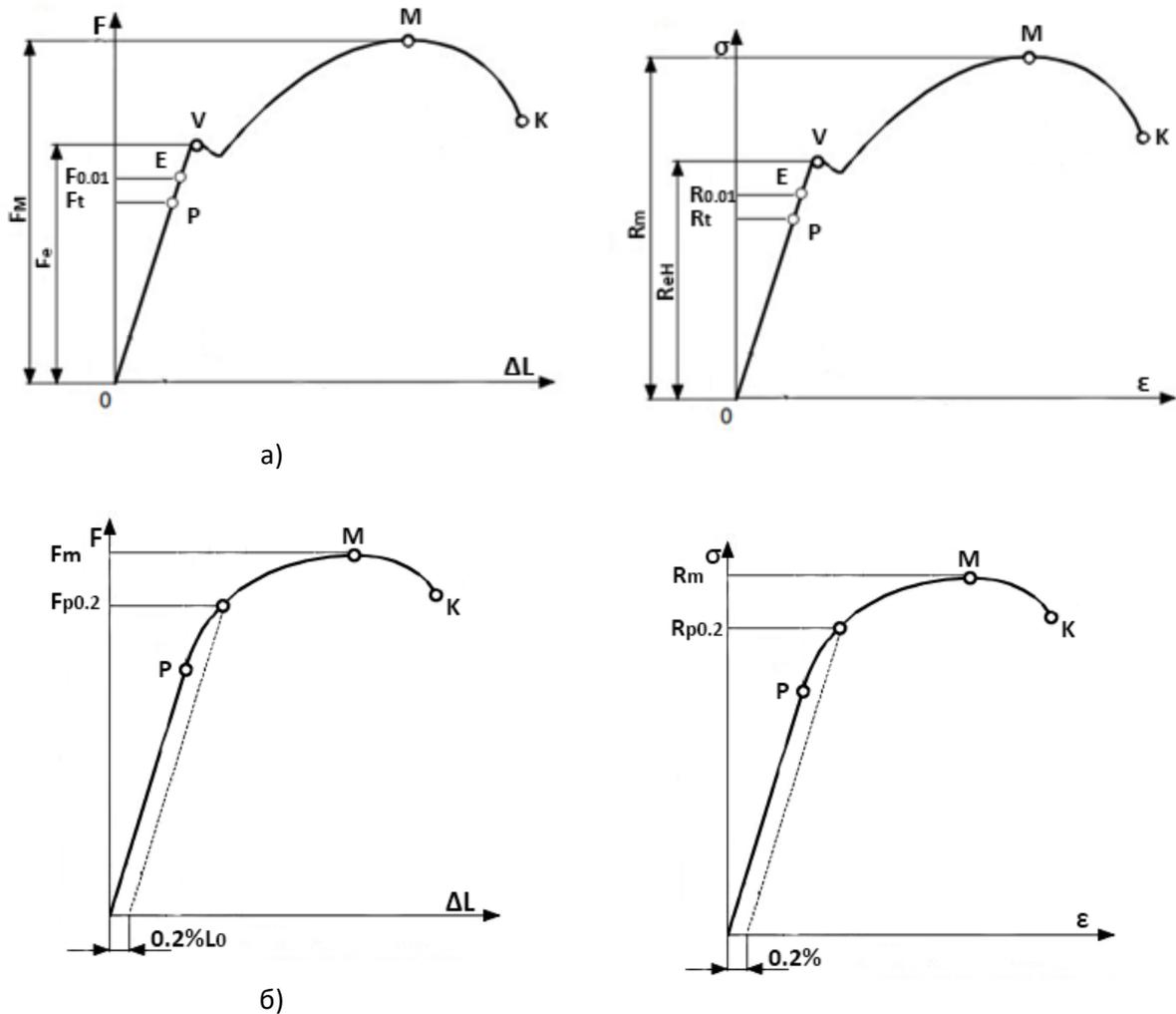
Слика 10. Дијаграми кидања за различите материјале

Посматрањем дијаграма кидања карактеристичног за нискоугљенични челик могу се уочити одређене карактеристичне тачке (слика 10).

Свођењем силе на површину попречног пресека добија се напон σ , а свођењем издужења које је изазвало дејство одговарајуће силе на почетну мерну дужину епрувете добија се јединично издужење тј. деформација ϵ .

$$\sigma = \frac{F}{S_0}, [MPa] \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}, [] \quad (3)$$



Слика 11. Дијаграм напон – деформација (јединично издужење) са израженом границом течења за нискоугљенични челик б) условни (технички) напон течења

У почетном делу крива има најчешће праволинијски ток, што значи да између силе и тренутног издужења постоји линеарна зависност (Хуков закон). Тренутна издужења у овом подручју су тако мала да се могу мерити само прецизним инструментима. По престанку линеарне зависности (тачка P на дијаграму) прираштаји дужине за једнаке прираштаје силе постају све већи, па се крива постепено савија ка апсциси (има све мањи нагиб). Граница до које је издужење пропорционално оптерећењу, назива се **граница пропорционалности**, а точка P се назива точка на граници пропорционалности. Тој тачки на дијаграму одговара сила на граници пропорционалности F_r .

Ако се епрувета у подручју праволинијског пораста напона растерети, тренутно издужење ће нестати, тј. епрувета се враћа у своје почетне димензије. Деформација је потпуно еластична. Са даљим порастом силе затезања изнад одређене вредности (тачка E на дијаграму), епрувета се по растерећењу не враћа на првобитну дужину. То се зове **граница еластичности**, тј. E је точка на граници еластичности. Тачка E уједно представља границу која раздваја област у којој постоје само еластичне деформације (када је вредност силе мања од силе у тачки E) и област у којој се, поред еластичних, јављају и пластичне (трајне) деформације. Након излагања епрувете оптерећењима већим од силе на граници еластичности, по растерећењу, она се не враћа на своје почетне димензије јер је дошло до трајног издужења.

Када напрезање материјала премаши границу еластичности, издужења постају знатно већа, па дијаграм прелази у криву линију, јер истим прираштајима напрезања одговара већи прираштај издужења.

Код кртих материјала лом настаје убрзо након постизања границе еластичности, пре него што настану већа трајна издужења епрувете. Такво понашање материјала се јасно види на дијаграму за сиви лив, приказаном на слици 10.

Код деформабилних материјала (слика 11а) изнад границе еластичности крива се све више повија ка хоризонтали, све до тачке V, која представља тачку на **граници течења**. Достизањем силе F_e , која одговара граници течења, јавља се појава која се назива течење материјала. Карактерише се таласастим изгледом линије дијаграма сила затезања - издужење, тј. појавом значајних пластичних деформација (расте издужење) при приближно константној вредности силе затезања (не расте, чак долази и до извесних падова).

Код материјала код којих ова граница није изражена, на дијаграму се не може уочити тачка у којој почиње течење материјала, па самим тим и напон течења (R_e или R_{eH}). Договором је утврђено да се уместо те величине одређује тзв. условна граница течења ($R_{p0,2}$), слика 11б.

Према многим стандардима, укључујући и српске, утврђено је да условна граница течења представља напон након кога долази до појаве трајног издужења које износи 0,2% од почетне мерне дужине. Условна граница течења је веома значајна величина која се користи при димензионисању конструкција и много се чешће користи него (стварни) напон течења.

Након савладавања могућности материјала да тече, за даље издуживање епрувете сила постепено расте све до прекида епрувете, тачније, до достизања максималне вредности (тачка M на дијаграму) после које поново опада, док у једном тренутку не дође до разарања материјала (кидања епрувете).

Све док се не достигне максимална сила (F_m – у тачки M) епрувета се по целој дужини равномерно издужује и сужава. При даљем затезању на једном ограниченом делу мерне дужине појављује се уочљиво сужење попречног пресека. Даље затезање доводи до деформације епрувете само у подручју сужења све до коначног разарања материјала, тј. лома епрувете.

Величине које се одређују при испитивању затезањем

Пре извођења испитивања мере се почетни пречник епрувете d_0 и почетна мерна дужина L_0 , слика 12. Мерење пречника изводи се на више места на мерном делу епрувете, а за даљи прорачун се узима најмања измерена вредност. Почетна мерна дужина одређује се на основу величине епрувете и наносе се одговарајуће ознаке на мерном делу епрувете.



а) Мерење почетне мерне дужине L_0

б) Мерење почетног пречника d_0

Слика 12. Одређивање почетних димензија епрувете

Током испитивања може се пратити промена вредности силе, посматрањем казаљке динамометра, или дигиталном показивачу. Циљ је одређивање вредности две карактеристичне силе:

- силе на граници течења F_e и
- максималне силе која је дејствовала на епрувету, пре него што је дошло до лома F_m .

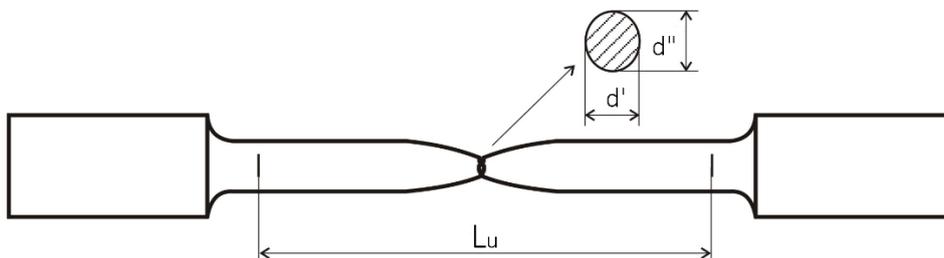
Сила на граници течења (F_e) се може одредити посматрањем казаљке на сату динамометра и уочавањем тренутка када, после равномерног кретања, први пут застане или крене у назад.

Код материјала код којих граница течења није изражена сила F_m је највећа вредност силе која се јавља током испитивања и њену вредност показује положај казаљке на сату динамометра која се налази у најдаљем положају.

Савремене кидалице користе електронски начин регистровања силе и издужења, а резултате аутоматски користе за израчунавање жељених механичких карактеристика и приказују на екрану компјутера преко кога се врши управљање кидалицом.

Након кидања епрувете потребно је одредити и њене крајње димензије (укупну мерну дужину L_u и пречник епрувете на месту прекида d_u).

Изглед епрувете и њене крајње димензије након кидања приказане су на слици 13.

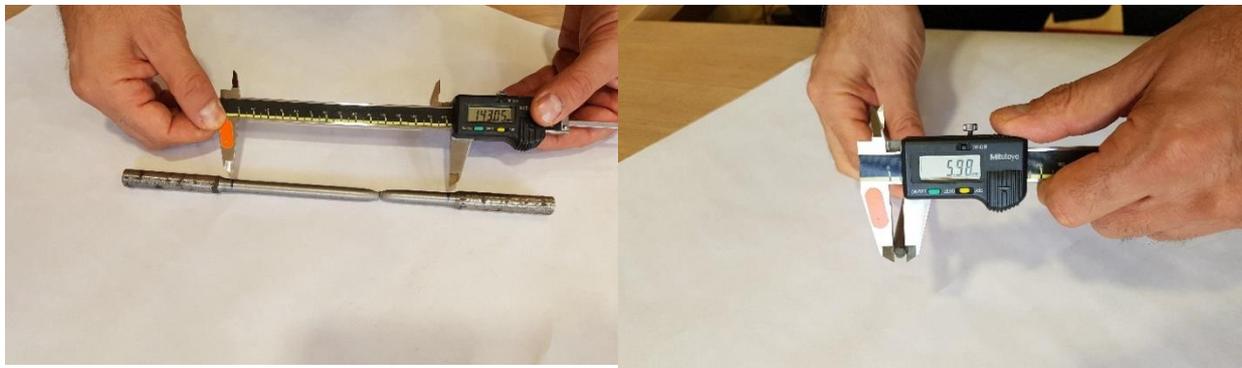


Слика 13. Карактеристичне димензије епрувете након кидања

$$d = \frac{d' + d''}{2} \quad (4)$$

Да би се одредила укупна мерна дужина епрувете, крајеви покидане епрувете прислањају се један уз други и мери се растојање између ознака на мерном делу епрувете, које су нанете пре почетка испитивања.

Пречник епрувете на месту лома се мери у два унакрсна правца, а затим одређује средња вредност пречника на месту лома.



а) Мерење укупне дужине L_u

б) Мерење крајњег пречника d_u

Слика 14. Одређивање крајњих димензија епрувете

Одређивање својстава отпорности и деформације

На основу величина измерених пре, током и након испитивања рачунају се карактеристичне величине за испитивани материјал. Наиме, измерене вредности силе и издужења су карактеристичне за ту испитивану епрувету, јер се са променом димензија епрувете мењају вредности тих величина. Због тога, као што је већ поменуто, сила се своди на јединицу површине, а издужење на јединицу дужине, чиме се добијају величине које су карактеристичне за један материјал и увек су исте, без обзира на димензије епрувета на којима се изводи испитивање.

Да би се елиминисао утицај димензија епрувете на облик дијаграма за дати материјал, уобичајено је да се у пракси користи дијаграм напон затезања - јединично издужење, који је за исти материјал увек исти и изгледа идентично као и дијаграм сила затезања - издужење, с тим да су карактеристичне тачке увек на истој вредности.

На слици 11а је приказан општи изглед дијаграма напон затезања - јединично издужење за ниско-угљенични челик.

Израчунавају се следеће карактеристичне вредности напона:

- R_t - **напон за утврђено укупно издужење** (граница пропорционалности),

$$R_t = \frac{F_t}{S_0} \quad (5)$$

- R_r - **напон за утврђено трајно издужење** (условна граница еластичности),

$$R_r = \frac{F_r}{S_0} \quad (6)$$

$$(R_{0.005} = \frac{F_{0.005}}{S_0}; R_{0.01} = \frac{F_{0.01}}{S_0}) \quad (7)$$

- R_e - **напон течења**

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (8)$$

- $R_{p0.2}$ - **условни напон течења** - рачуна се код материјала код којих граница течења није изражена.

$$R_{p0.2} = \frac{F_{0.2}}{S_0} \quad (9)$$

У овом случају потребно је одредити силу $F_{p0.2}$. То је сила која изазива појаву трајних деформација од 0,2% почетне мерне дужине епрувете.

Вредност силе $F_{0.2}$ може да се одреди на два начина, што је детаљно описано у наредном поглављу-вежби, и то:

- графички коришћењем дијаграма сила-издужење, ако величина и размера дијаграма то омогућава и
- експериментално мерењем малих деформација.

R_m - максимални напон (**затезна чврстоћа**).

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (10)$$

Од својстава деформације израчунавају се:

- ΔL_u - укупно издужење епрувете,

$$\Delta L_u = L_u - L_0 \quad (11)$$

- ϵ_u - укупно јединично издужење епрувете

$$\epsilon_u = \frac{\Delta L_u}{L_0} \quad (12)$$

- процентуално издужење епрувете

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100\% \quad (13)$$

- Z- процентуално сужење попречног пресека

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100\% \quad (14)$$

Дефиниције карактеристичних величина:

R_t – напон за утврђено укупно издужење, који представља напон при коме долази до одступања од праволинијске зависности силе и издужења.

R_r – напон за утврђено трајно издужење представља напон при коме остаје одређена вредност трајног издужења (0,01 или 0,005 % L_0).

R_e – напон течења представља напон при коме долази до повећаних пластичних деформација епрувете без пораста силе. Разликује се горњи и доњи напон течења. Горњи напон течења (R_{eH}) представља први напон у области течења после кога долази до пада силе.

R_m – затезна чврстоћа је максимални технички напон који материјал може да издржи при испитивању затезањем.

ΔL_u – укупно издужење епрувете представља разлику између укупне дужине епрувете после кидања и почетне мерне дужине епрувете. Укупна дужина епрувете после кидања се одређује тако што се измери растојање између мерних тачака на састављеним деловима скидане епрувете.

E_u – укупно јединично издужење епрувете представља однос укупног издужења ΔL_u и почетне мерне дужине L_0 .

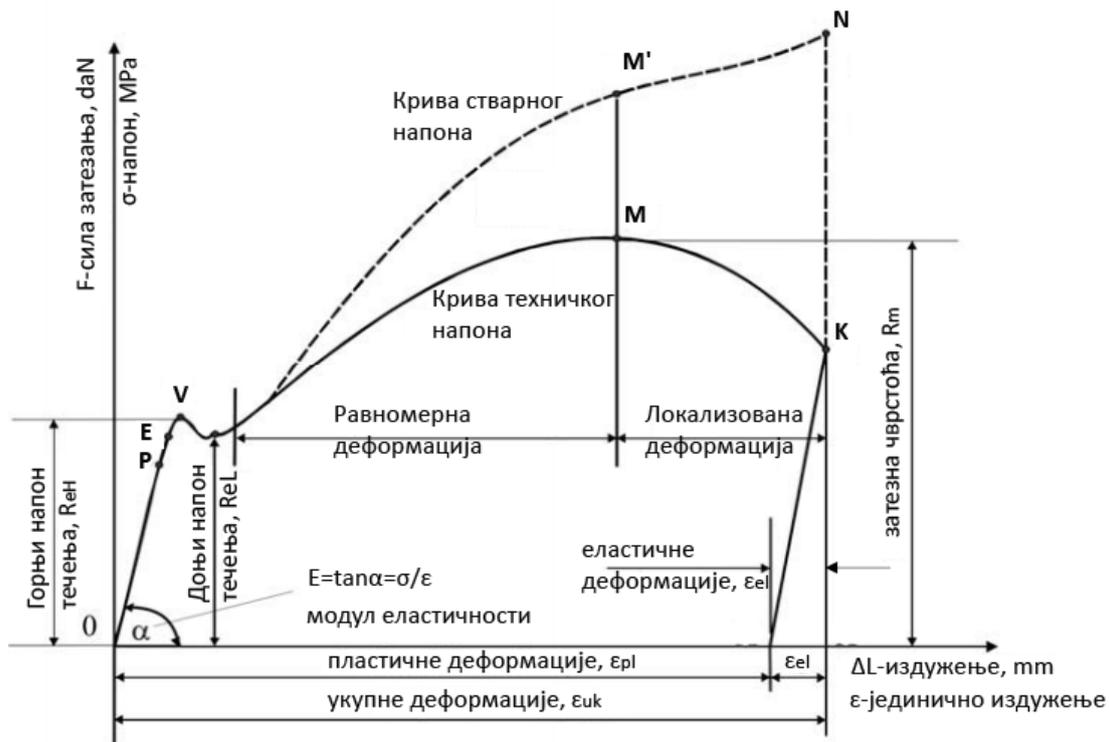
A – непропорционално процентуално издужење представља укупно јединично издужење изражено у процентима. Непропорционално процентуално издужење зависи од односа дужине епрувете L_0 и почетног пречника d_0 , тако да се у индексу ознаке A може наћи број који представља тај однос ($A_{11,3}$; A_8 ; A_{10}) или ако нема индекса подразумева се да је однос L_0/d_0 једнако пет односно то одговара ознаци A_5 .

Z – процентуално сужење попречног пресека представља процентуално смањење попречног пресека епрувете на месту прекида у односу на почетни попречни пресек.

Технички и стварни напон

Приликом израчунавања, горе наведених, карактеристичних напона при затезању, може се приметити да се тренутна вредност силе увек дели са истом и то почетном површином

попречног пресека. Такав договор је учињен због немогућности одређивања димензија попречног пресека епрувете у сваком тренутку испитивања, као што је то случај са вредношћу оптерећења (силе затезања). То условљава да одређена вредност напона није једнака стварној вредности која се јавља у материјалу и због тога се такав напон назива **технички (условни)** напон. То значи да претходни дијаграм приказан на слици 11 представља дијаграм техничког напона и јединичног издужења. Вредности стварног напона који се јавља у материјалу су утолико веће, уколико је смањење површине попречног пресека епрувете веће. Такав случај је нарочито присутан након прелаза тачке на граници течења, после које је сужење попречног пресека све веће, а самим тим је и разлика између техничког и стварног напона све већа. На слици 15. су приказани дијаграми стварног и техничког напона.



Слика 15. Дијаграми стварни и технички напон - јединично издужење

Са слике се може запазити да до разарања материјала, тј. кидања епрувете, долази када је реални напон којем је материјал изложен највећи.

9. Дати дефиницију напона течења и затезне чврстоће.

10. Уписати вредности: $350 \text{ MPa} = \text{_____ N/mm}^2$; $25 \text{ kN/cm}^2 = \text{_____ MPa}$; $3500 \text{ daN} = \text{_____ kN}$

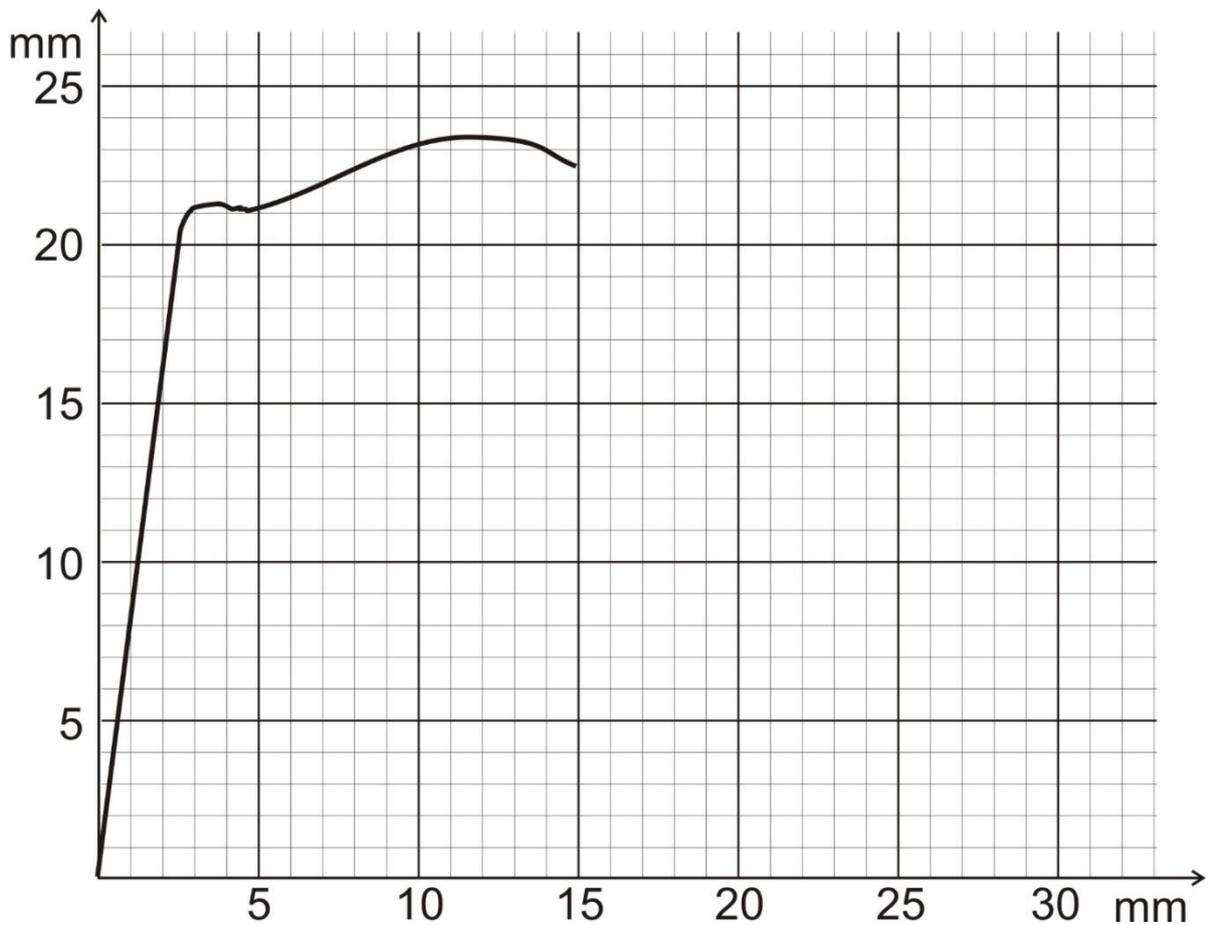
РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА И ЗАДАТАК ПРАКТИЧНОГ ДЕЛА ВЕЖБЕ

Име и презиме: _____, бр. индекса: _____

Материјал: _____

Почетне димензије епрувете: $L_0=$ _____ $d_0=$ _____

Дијаграм сила издужење добијен током испитивања:



Размера за силу $U_F=$

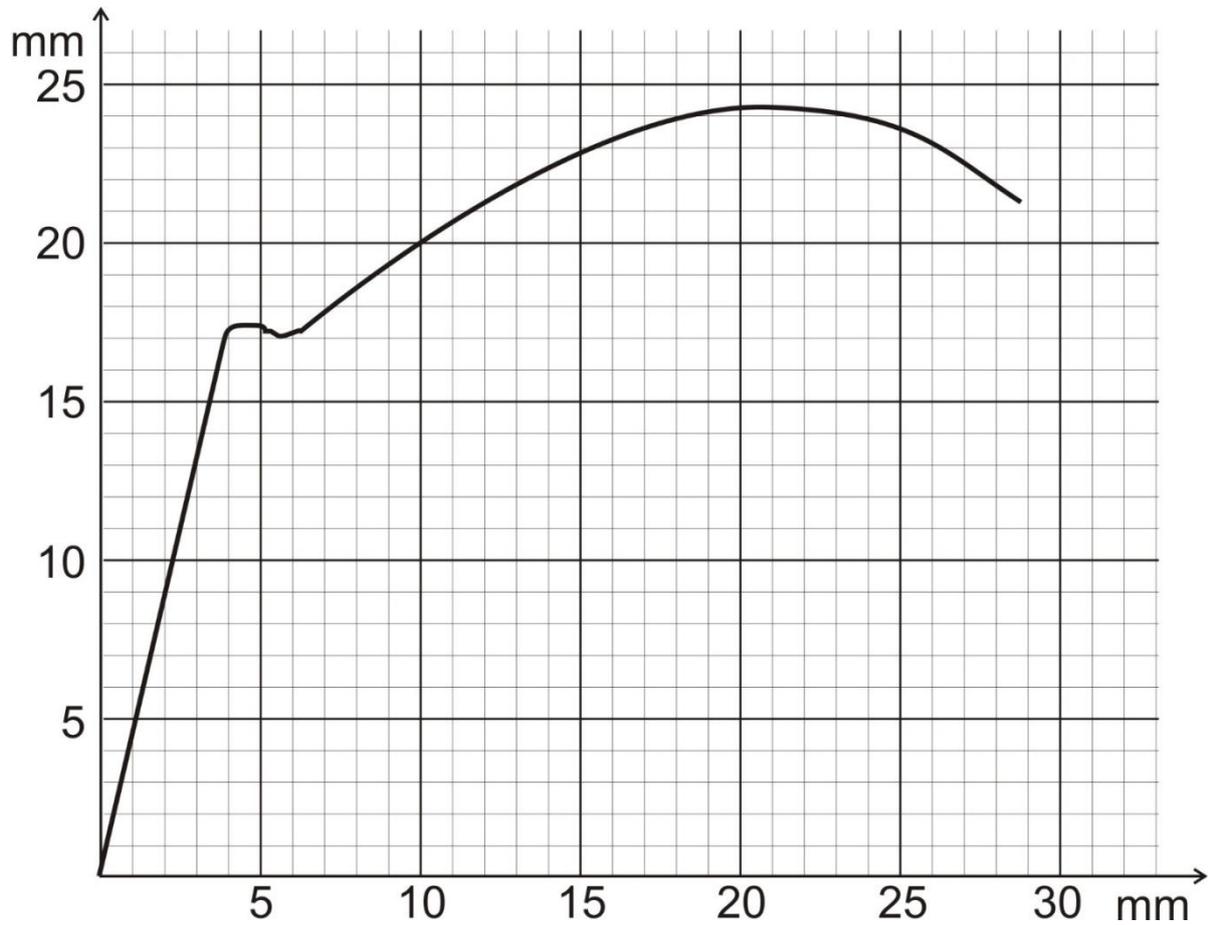
Измерене димензије епрувете након кидања: $L_u=$ _____ ; $d_u=$ _____

Предметни асистент

Материјал: _____

Почетне димензије епрувете: $L_0 =$ _____ $d_0 =$ _____

Дијаграм сила издужење добијен током испитивања:



Размера за силу $U_F =$ _____

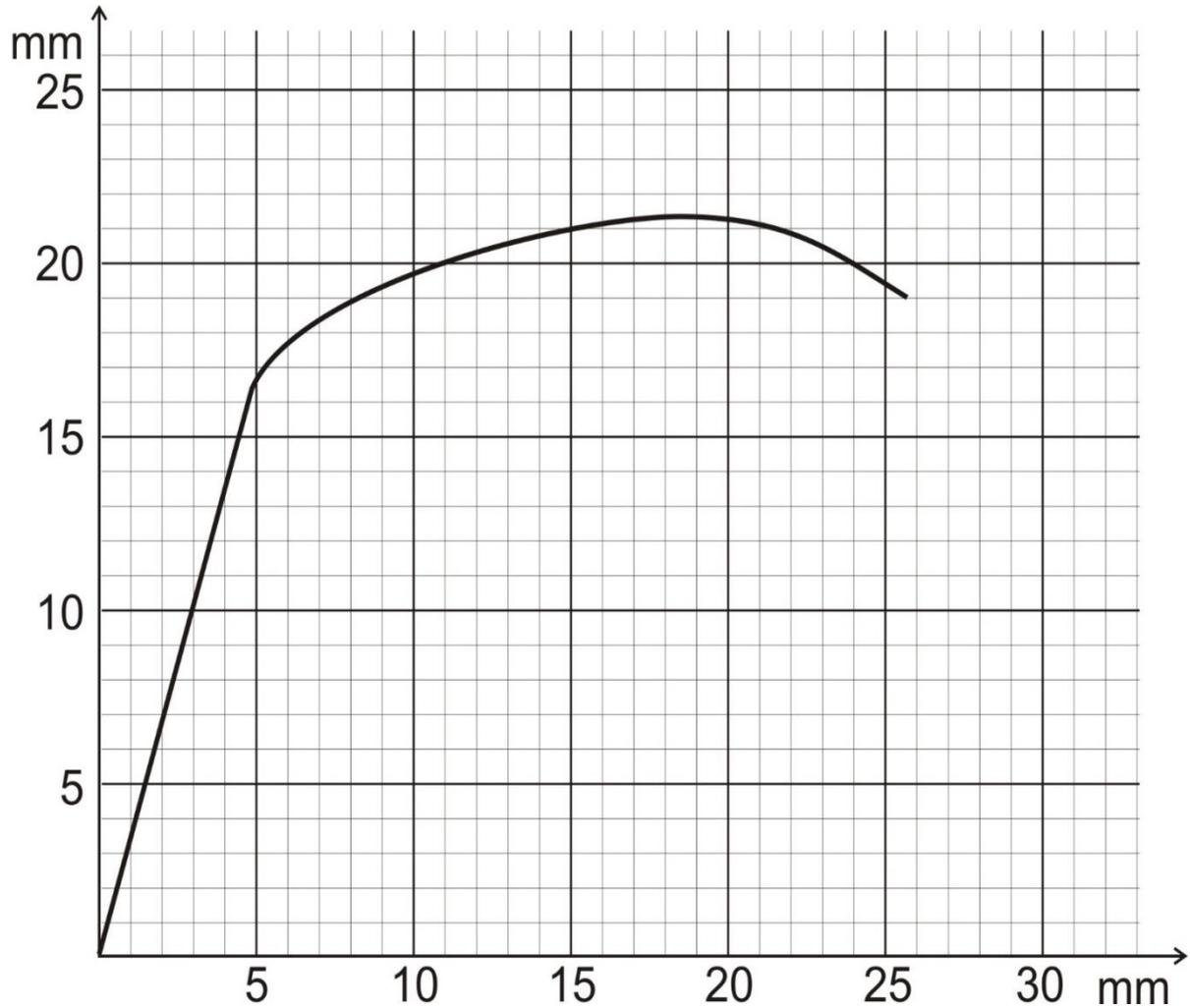
Измерене димензије епрувете након кидања: $L_u =$ _____ ; $d_u =$ _____

Предметни асистент

Материјал: _____

Почетне димензије епрувете: $L_0 =$ _____ $d_0 =$ _____

Дијаграм сила издужење добијен током испитивања:



Размера за силу $U_F =$ _____

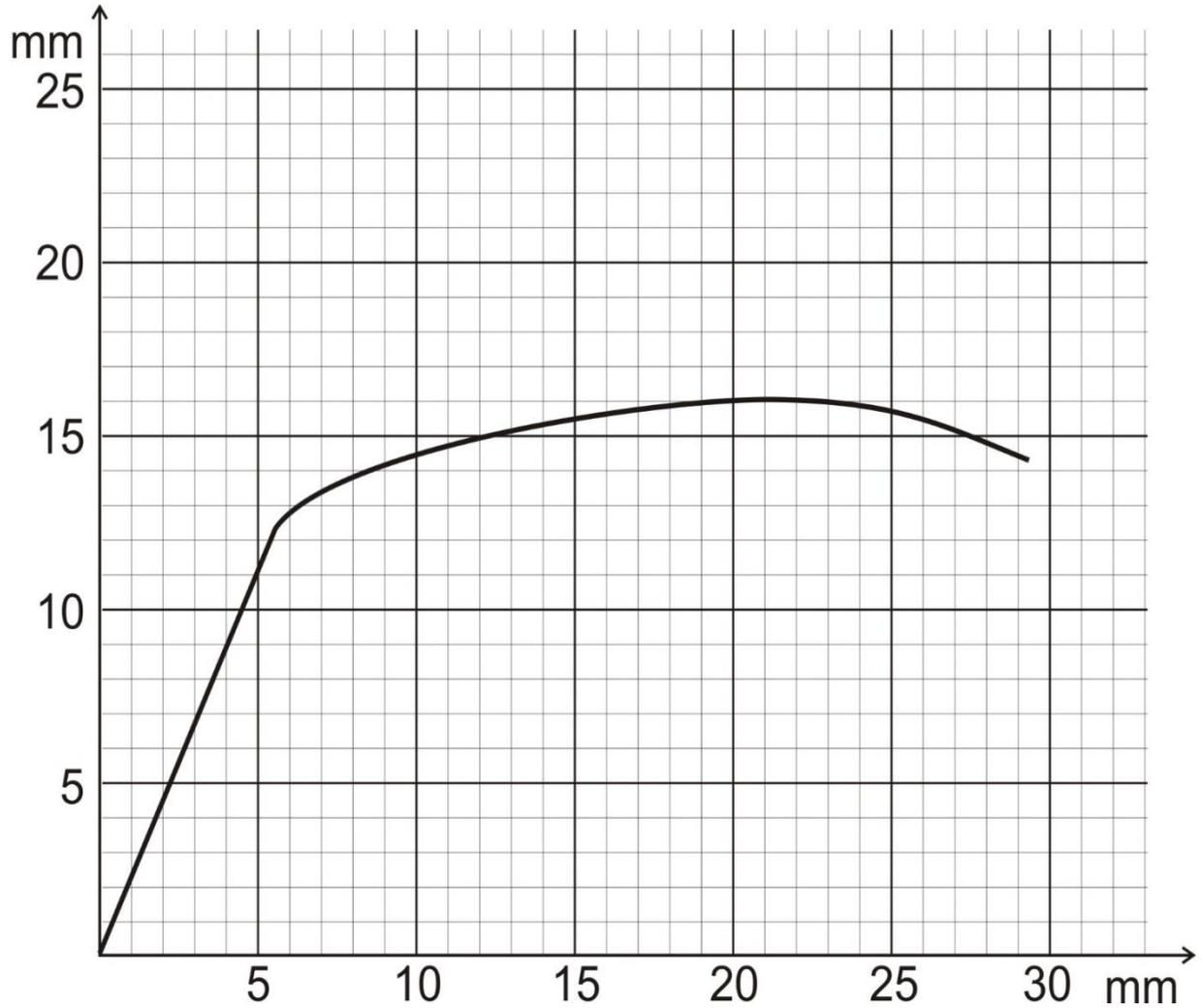
Измерене димензије епрувете након кидања: $L_u =$ _____ ; $d_u =$ _____

Предметни асистент

Материјал: _____

Почетне димензије епрувете: $L_0 =$ _____ $d_0 =$ _____

Дијаграм сила издужење добијен током испитивања:



Размера за силу $U_F =$ _____

Измерене димензије епрувете након кидања $L_u =$ _____ ; $d_u =$ _____

Предметни асистент

Име и презиме: _____, бр. индекса: _____

- I. Скицирати епрувету у одговарајућој размери која је коришћена при испитивању са означеним карактеристичним димензијама

- II. Унети очитане вредности сила са графика које одговарају напону течења(условног напона течења) и затезној чврстоћи (користити дату размеру за силу)

$F_e =$

$F_{p0.2} =$

$F_m =$

- III. Израчунати површине попречног пресека епрувете на почетку и након кидања (Написати формуле и приказати цео поступак са бројним вредностима и јединицама)

$S_0 =$

$S_u =$

- IV. Израчунати вредности карактеристичних напона R_m i $R_e(R_{p0.2})$ (Написати формуле и приказати цео поступак са бројним вредностима и одговарајућим јединицама)

$R_e =$

или

$R_{p0.2} =$

$R_m =$

- V. Израчунати вредности карактеристичних деформација. (Написати формуле и приказати цео поступак са бројним вредностима и одговарајућим јединицама)

$\Delta L =$

$\epsilon =$

$A =$

$Z =$

2. ОДРЕЂИВАЊЕ УСЛОВНЕ ГРАНИЦЕ ТЕЧЕЊА

При већини прорачуна металних конструкција користи се дозвољени напон R_{doz} , који ислучује могућност појаве трајних деформација при експлоатацији конструкција. Вредност дозвољеног напона би, сходно описаним захтевима, требала да се рачуна као количник напона на граници пропорционалности R_p и степена сигурности, који узима у обзир утицаје радних услова, врсте оптерећења, концентрације напона, као и присуство грешака у материјалу. Међутим, одређивање напона на граници пропорционалности није уобичајено, те се подаци о том напону ретко налазе у табелама које описују и класификују челике (метале). Сходно томе, као напон меродаван за рачунање дозвољеног напона конструкција узима се напон течења, јер је по вредности врло близак напону на граници пропорционалности. Да би се могли употребљавати и материјали, код којих се на дијаграму напон затезања-јединично издужење не може уочити тачка у којој почиње течење материјала (објашњено у претходној вежби), па самим тим и напон течења (R_e или R_{eH}), договором је утврђено да се уместо те величине одређује тзв. **условна граница течења** или **условни напон течења** ($R_{p0.2}$).

Према многим стандардима, укључујући и српски (SRPS стандард), утврђено је да условна граница течења представља напон затезања који изазива трајно издужење епрувете за 0,2% од почетне мерне дужине. Условна граница течења је веома значајна величина која се користи при димензионисању конструкција и много се чешће користи него (стварни) напон течења.

Вредност условне границе течења израчунава се помоћу следећег израза:

$$R_{p0.2} = \frac{F_{0.2}}{S_0} \quad (15)$$

где су:

- $F_{p0.2}$ – сила која изазива појаву трајних деформација у износу од **0,2% почетне мерне дужине епрувете**,
- S_0 – почетна површина попречног пресека епрувете на којој се изводи испитивање.

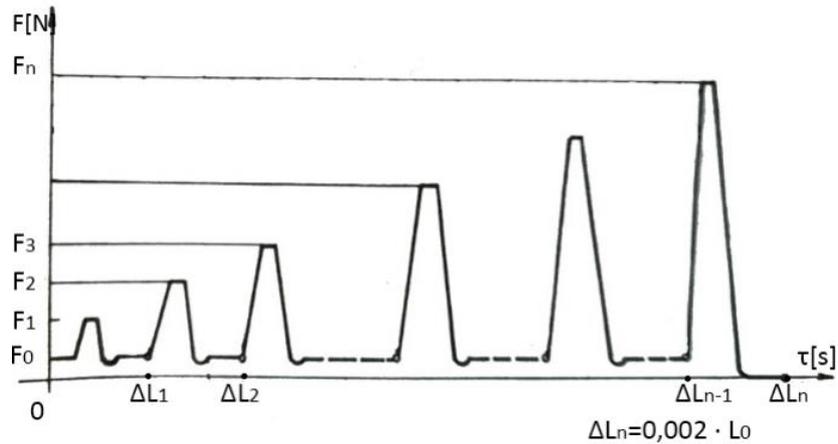
Вредност силе $F_{p0.2}$ може да се одреди на два начина и то:

- графички коришћењем дијаграма сила затезање-издужење, уколико величина и размера дијаграма то омогућавају и
- експериментално мерењем малих деформација (издужење епрувете)

Графичко одређивање условне границе течења

Најпре се на дијаграму сила затезања-издужење одреди положај тачке С, која се налази на хоризонталној оси и при чему је:

$$\Delta L_{OC} = \frac{0,2}{100} \cdot L_0 = 0,002 \cdot L_0 \quad (16)$$



Слика 17. Промена вредности силе током одређивања силе $F_{p0,2}$

Током испитивања резултати се уписују у табелу (таб. 1) и то:

- вредност силе којом је епрувета била оптерећена и
- вредност трајног издужења након дејства те силе.

Вредност силе се читава на сату динамометра (машине за испитивање затезањем), а вредност деформације читава се на посебним инструментима монтираним на епрувети, који се називају екстензиометри или скраћено тензометри и служе за мерење малих вредности деформација. Испитивање се прекида када се на једном од тензометара чита вредност трајног издужења које одговара издужењу од 0,2% почетне мерне дужине, сила која је изазвала то издужење представља силу $F_{p0,2}$.

Табела 1 Вредности које се мере при одређивању силе $F_{p0,2}$

Вредност силе (N)	Показивање левог тензометра (mm)	Показивање десног тензометра (mm)
$F_0 =$	0	0
$F_1 =$	0	0
$F_2 = F_1 + \Delta F$		
...
...
...
$F_{p0,2} = F_n = F_{n-1} + \Delta F$	$0,002 \cdot L_0$	$0,002 \cdot L_0$

Екстензиометри

За тачно одређивање вредности малих деформација користе се екстензиометри или скраћено тензометри. Могу бити различитих конструкција: механички, оптички или електрични. У наставку ће бити објашњен принцип рада механичког екстензиометра.

На слици 18 приказан је механички тензометар који се заправо састоји из два тензометра, који су у раду потпуно независни један од другог. Мерење издужења се изводи на обе стране епрувете, због неједнаких деформација бочних страна епрувете. Деформације (издужења) на обе стране се читавају независно на оба екстензометра.

Екстензометар приказан на слици 18 има пар (горњих) непокретних ножића који одређују једну од крајњих мерних тачака на епрувети, саставни су део тела екстензометра, а причвршћени су за епрувету помоћу опруга. Други пар (доњи) покретних ножића одређује другу мерну тачку на епрувети. При малим издужењима епрувете, помера се доњи пар ножића, а то померање путем полужног преноса региструје мерним сатовима са одговарајућом скалом.



Слика 18. Механички тензометар

Под дејством неке силе затезања долази до издужења епрувете за вредност ΔL . Како нема клизања између два ножића и епрувете, то ће промена дужине епрувете проузроковати померање покретног ножића и последично померање казаљке по скали тензометра за број подеока који одговара промени дужине епрувете. Почетно растојање између ножића l_0 представља дужину на којој се мери деформација, и назива се база тензометра. Најчешће база тензометра износи 100 mm, али може бити другачија у зависности од намене и конструкције самог тензометра.

5. Шта су екстензометри? Објаснити њихов принцип рада.

РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА И ЗАДАТАК ПРАКТИЧНОГ ДЕЛА ВЕЖБЕ

Материјал: _____

Епрувета: $L_0 =$ _____; $d_0 =$ _____;

Тензометар: $l_0 =$ _____; $k =$ _____;

Изабрана вредност прираштаја силе: $\Delta F =$ _____

Вредност силе (_____)	Показивање левог тензометра (_____)	Показивање десног тензометра (_____)
$F_0 =$	0	0
$F_1 =$		
$F_2 =$		
$F_3 =$		
$F_4 =$		
$F_5 =$		

1. Очитана вредност силе $F_{P0.2}$:

$F_{P0.2} =$

2. Израчунати вредност условне границе течења (Написати формулу и приказати **цео** поступак са бројним вредностима и одговарајућим јединицама)

$R_{P0.2} =$

3. ОДРЕЂИВАЊЕ МОДУЛА ЕЛАСТИЧНОСТИ

На основу добијених дијаграма сила затезања-издужење ($F-\Delta L$) односно напон затезања-јединично издужење ($R-\varepsilon$), јасно се може уочити постојање почетног праволинијског дела криве, где се јавља линеарна зависност између напона затезања и јединичног издужења (деформације). Математички се та зависност може исказати на следећи начин:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \left[\frac{N}{mm^2} = MPa \right] \quad (17)$$

где су:

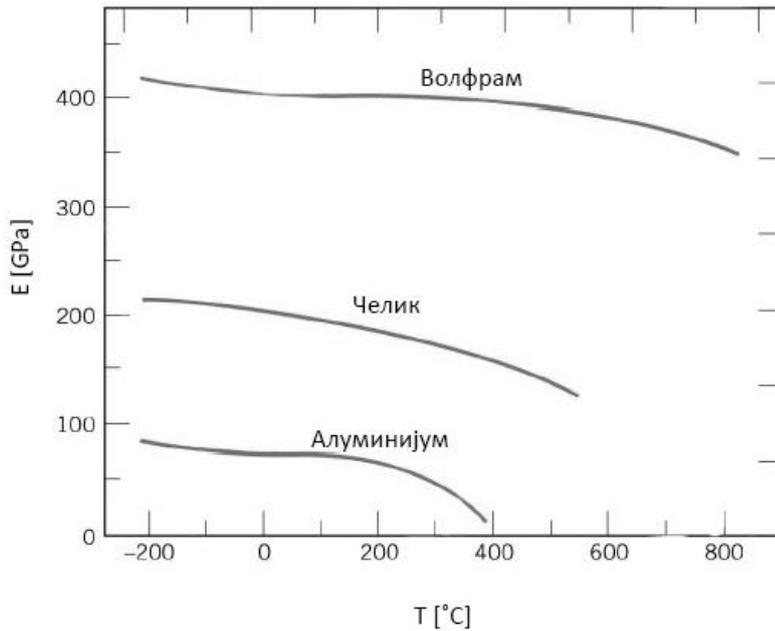
- σ - нормални напон затезања [N/mm^2],
- E - Young-ov модул еластичности [N/mm^2],
- ε - јединично издужење [-]

Ова линеарна зависност између напона затезања и јединичног издужења позната је као Хуков закон (engl. *Hook*) који важи само у подручју еластичних деформација. Константа E у овом случају представља механичко својство материјала, које зависи од јачине везе између атома у кристалној решетки односно молекула у аморфној структури, и назива се (Young-ov) модул еластичности. Сходно томе, јача веза обезбеђује већу вредност модула еластичности. У том смислу, највећу вредност модула еластичности има дијамант.

Свеобухватније, Хуков закон важи за све материјале и све врсте напрезања, при чему постоје одређени, директно зависни односи између напона и њиме изазваних деформација. При затезању, притискивању и савијању (где се јављају нормални напони) коефицијент пропорционалности је модул еластичности, док се при увијању (где се јавља тангенцијални напон) тај коефицијент пропорционалности назива модул клизања.

Посматрајући димензионо претходну једначину, може се закључити да модул еластичности има исту мерну јединицу као и напон [N/mm^2]. Већи нагиб на дијаграму напон затезања-јединично издужење, подразумева и већу вредност за модул еластичности. То надаље значи да су потребне силе већих интензитета за раздвајање атома у материјалу и појаву еластичне деформације. Веома је важно истаћи, да је модул еластичности заправо мера крутости неког материјала, те већа вредност модула еластичности значи и већу крутост материјала и обрнуто.

Вредност модула еластичности код метала мања је него код керамичких материјала, док је већа у односу на полимерне материјале. Поменути разлике су директна последица различитих типова и јачина атомских веза. Треба још напоменути да са порастом температуре опада вредност модула еластичности (слика 19), као последица већег осциловања атома око равнотежног положаја.



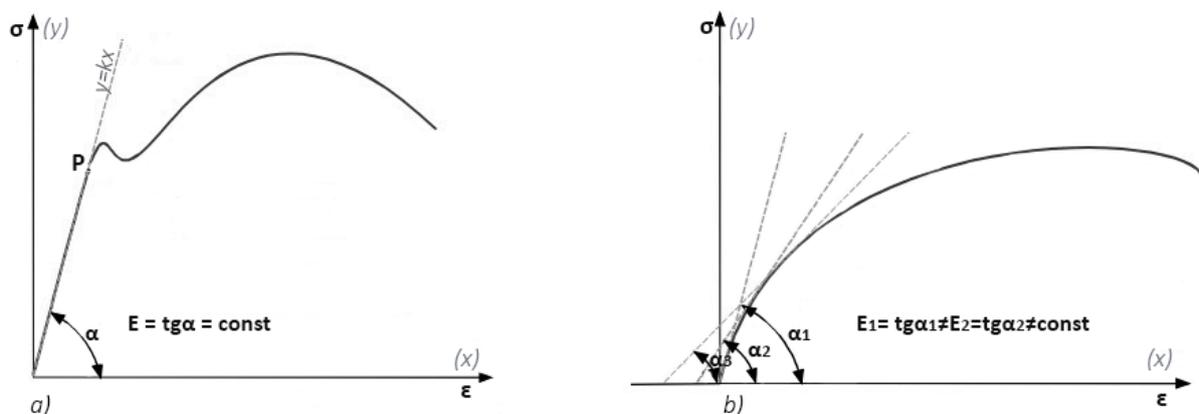
Слика 19. Зависност модула еластичности од температуре за неке материјала

Вредност модула еластичности се може одредити:

- графичком методом и
- експериментално-аналитички, мерењем силе и малих деформација.

Графичко одређивање модула еластичности

Графичком методом може да се одреди приближна вредност модула еластичности. Код материјала који показују линеарну зависност промене напона у односу на промену деформације (слика 20 а), угао α има константну вредност у подручју пропорционалности, а $\operatorname{tg}\alpha$ представља бројну вредност модула еластичности. Код оваквих материјала модул еластичности не зависи од оптерећења (напона).



Слика 20. Графичко одређивање модула еластичности

Код материјала који немају линеарну (праволинијску) зависност промене напона у односу на промену деформације (слика 20 б), модул еластичности се мења у зависности од напона. Код оваквих материјала модул еластичности се може изразити вредношћу тангенса угла који

тангента повучена на криву за тај напон гради са хоризонталном осом. У овом случају модул еластичности није константна величина, већ опада са порастом оптерећења (напона).

Експериментално-аналитичка метода одређивања модула еластичности

Већ је у уводном делу напоменуто, да модул еластичности представља меру крутости неког материјала и једнак је односу напона и одговарајуће деформације. У случају затезања то би било:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{F}{S_0}}{\frac{\Delta L}{L_0}} = \frac{F \cdot L_0}{S_0 \cdot \Delta L}, [MPa] \quad (18)$$

где су:

- σ - нормални напон затезања [MPa],
- F - сила затезања [N],
- ε - јединично издужење [-],
- L_0 - усвојена мерна дужина [mm],
- S_0 - површина попречног пресека епрувете [mm²],
- ΔL - издужење [mm].

Да би се утврдила вредност модула еластичности према претходној формули, неопходно је усвојити претпоставку да се извесне величине не мењају у току испитивања. Да би се одредио модул еластичности усвајају се претпоставке да се услед малих деформација не мења попречни пресек S_0 и дужина епрувете, тј. база тензометра L_0 .

Сила F у току затезања изазива ипак незнатну, али мерљиву промену дужине L_0 за вредност ΔL . Интензитет силе зависи од врсте и стања материјала, као и од попречног пресека епрувете на којој се изводи испитивање. Максимална вредност прираштаја силе при одређивању модула еластичности се бира тако да не изазове појаву пластичних (трајних) деформација. Зато оптерећења при одређивању модула еластичности морају бити у области еластичних деформација, тј. испод границе пропорционалности. Међутим, у пракси се за ову прилику користи постепено равномерно повећање оптерећења. Повећањем броја степена (n) оптерећења повећава се прецизност мерења. Избор максималне силе испитивања се бира тако да буде за 20% мања од границе течења. Прираштај силе затезања при испитивању се мери (или подешава) на машини за испитивање и треба да буде константан за сваки степен испитивања. Уобичајено се бира у опсегу 200-500 daN, зависно од машине, врсте материјала и димензије епрувете.

Експериментално-аналитичка метода одређивања модула еластичности је прилично једноставна за извођење, јер заправо представља праћење промене издужења епрувете услед дејства познатог оптерећења и касније аналитичке обраде добијених вредности.

За одређивање модула еластичности потребна је једна епрувета као код затезања, машина за затезање и екстензометар. Након неопходних мерења, епрувета се поставља у чељусти

машине за затезање. На њу се причвршћује екстензометар, подеси на почетни положај и провери цео систем за регистровање издужења и силе затезања.

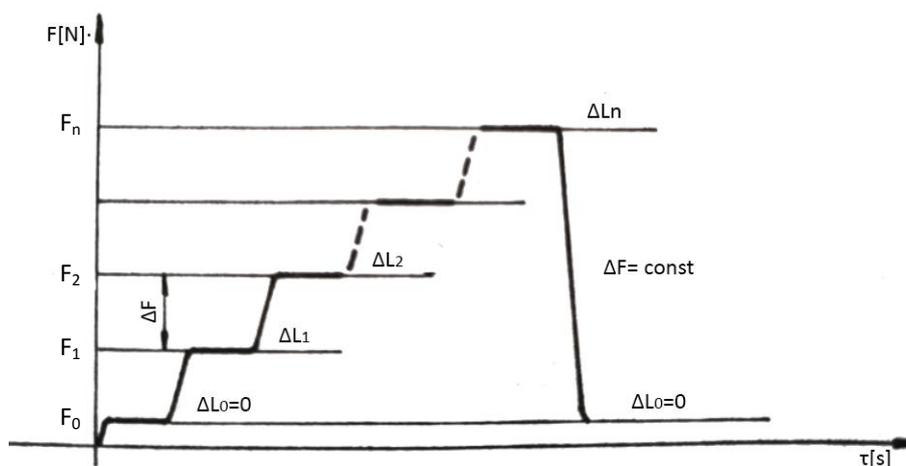
Поступак испитивања се састоји из следећих корака:

- Провера одабраног максималног оптерећења са неколико мерења-истим прираштајем силе и враћањем у нулти положај проверава се да ли је максимална сила у подручју еластичних деформација.
- Изводи се предоптерећење епрувете силом F_0 (10-100 daN), како би се смањило/елиминисао утицај проклизавања епрувете у чељустима машине. Након редоптерећења тензометри се постављају на почетни (нулти) положај.
- Постављају се 2 тензометра на епрувету - један са леве, други са десне стране епрувете, а њихова показивања постављају се на нулу.
- Епрувета се оптерећује силама, и то скоковито, све до максималне силе испитивања. Број степена оптерећења (n) се бира, али је повољније да буде што већи, односно прираст силе што мањи, јер се тиме повећава тачност.

Прираштај силе је дефинисан изразом:

$$\Delta F = F_2 - F_1 = F_3 - F_2 = \dots = F_n - F_{n-1} = \text{const}$$

При сваком повећању силе направи се застој, како је то графички приказано на слици 21, да би се машина и екстензометар умирили, а након тога очитале вредности издужења.



Слика 21. Графички приказ тока силе затезања код одређивања модула еластичности

Током испитивања подаци се уписују у табелу (таб. 2) и то: вредност силе којом је тренутно оптерећена епрувета ($F_0, F_1, F_2, \dots, F_n$), показивања левог и десног тензометра у тензометарским јединицама (или у деловима милиметра – у зависности од типа тензометра) који показују издужење епрувета под дејством силе и колоне у којима се рачунају вредности прираштаја издужења које се јавило између два узастопна пораста силе.

Табела 2. Вредности које се одређују при одређивању модула еластичности

Вредност силе (N)	Показивања тензометара			
	леви		десни	
	издужење (mm/Т.Ј.)	прираштај издужења $\Delta l'$ (mm/Т.Ј.)	Издужење (mm/Т.Ј.)	прираштај издужења $\Delta l''$ (mm/Т.Ј.)
$F_0 =$	0		0	
$F_1 = F_0 + \Delta F =$				
$F_2 = F_0 + 2\Delta F =$				
...
...
...
$F_n = F_0 + n\Delta F =$				

На крају се епрувета растерети до силе F_0 и провери да ли се тензометри враћају на почетно (нулто) стање и тиме потврђује да је одређивање модула еластичности обављено у еластичном подручју.

4. Објаснити поступак есперименталног одређивања модула еластичности.

РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА И ЗАДАТАК ПРАКТИЧНОГ ДЕЛА ВЕЖБЕ

Материјал: _____

Епрувета: $L_0=$ _____; $d_0=$ _____;

Тензометар: $l_0=$ _____; $k=$ _____;

Изабрана вредност прираштаја силе: $\Delta F=$ _____

Вредност силе (_____)	Показивање тензометара			
	ЛЕВИ		ДЕСНИ	
	Издужење (_____)	Прираштај издужења $\Delta L'$ (_____)	Издужење (_____)	Прираштај издужења $\Delta L''$ (_____)
$F_0=$	0		0	
$F_1=$				
$F_2=$				
$F_3=$				
$F_4=$				
$F_5=$				

1. Израчунате средње вредности прираштаја издужења за леви и десни тензометар:

$$\Delta L' = \frac{L_1' + L_2' + L_3' + \dots + L_n'}{n} =$$

$$\Delta L = \frac{L_1'' + L_2'' + L_3'' + \dots + L_n''}{n} =$$

2. Средња вредност прираштаја издужења износи:

$$\Delta L_{sr} = \frac{\Delta L' + \Delta L''}{2} =$$

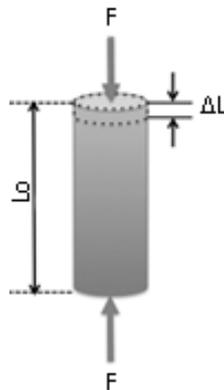
3. Вредност модула еластичности изражена у N/mm^2 износи:

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

4. ИСПИТИВАЊЕ ПРИТИСКИВАЊЕМ

Циљ испитивања

Испитивање притискивањем базира се на излагању одређеног елемента оптерећењу на притисак и праћењу својстава отпорности и деформација материјала у зависности од задатог оптерећења.



Слика 22. Елемент оптерећен на притисак

За разлику од испитивања затезањем, испитивање материјала притиском се много ређе изводи и углавном је ограничено на крте материјале (сиви лив, бетон, камен, месинг и сл.) који се под дејством силе притиска ломе, па је код њих могуће пратити својства отпорности (притисна чврстоћа), као и својства деформације (процентуално скраћење и процентуално проширење), што је и циљ самог испитивања. Код деформабилних материјала не долази до лома, већ само до деформације услед дејства силе притиска, па се испитивање углавном своди на одређивање величине деформације која се том приликом јавља.

Опрема за испитивање

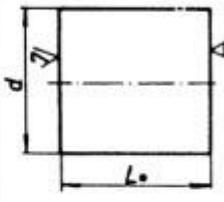
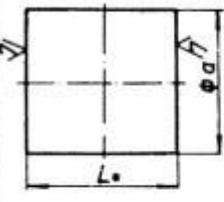
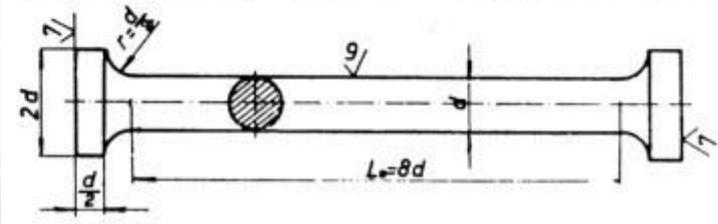
За извођење испитивања притискивањем, потребно је обезбедити:

- a) одређен број епрувета на којима се изводи испитивање,
- b) машину за испитивање.
- c) одговарајућу мерну опрему потребну за одређивање вредности оптерећења (силе) и деформација тј. димензија епрувете пре и након притискивања.

Као последица дејства притисног оптерећења јављају се деформације епрувете - скраћење ΔL_c , као и отпор којим се материјал супротставља дејству притисног оптерећења - напон притиска R_c .

a) Епрувете за испитивање притискивањем

Епрувета је тело стандардизованог облика, димензија и квалитета обрађених површина, које је израђено из узорка и служи за испитивање. Од целокупне количине материјала који треба испитати издваја се узорак од кога се израђују епрувете (слика 23, 24).

ВРСТА ИСПИТИВАЊА	СКИЦА ЕПРУВЕТЕ И ДИМЕНЗИЈЕ		
Одређивање притисне чврстоће			<p>Димензије</p> <p>$d = 10 - 30 \text{ mm}$</p> <p>$L_0 = (1 - 3) d$</p> <p>препорука $L_0 = d$</p>
Одређивање техничке границе великог скраћења и модула еластичности			

Слика 23. Стандардна епрувета за испитивање притиском за сиви лив и челик



Слика 24. Епрувета за испитивање притискивањем

б) Машина за испитивање притискивањем

Испитивање притискивањем се обично изводи на тзв. **универзалној машини за испитивање** (слика 6), на којој се, како је већ напред речено, може изводити и испитивање затезањем и савијањем. По принципу рада могу бити механичке или хидрауличне, а детаљнији опис машина се налази у поглављу које описује испитивање затезањем.

ц) Потребна мерна опрема

Слично као и током испитивања затезањем, и овде се прати вредност силе притиска која дејствује на епрувету и то помоћу динамометра уграђеног на машини за испитивање. Бројна вредност силе се очитава помоћу казаљке на сату динамометра или дигитално у случају коришћења електронског мерења вредности оптерећења.

За одређивање димензија епрувете пре и након испитивања са тачношћу од стотог дела милиметра користи се помично мерило..

Поступак испитивања

Епрувета се ставља на једну притисну плочу, а притиска се другом плочом (слика 25). Једна од плоча има сферни ослонац (на слици је то доња плоча), како би се обезбедила равномерна расподела притиска на чеоној површини епрувете.

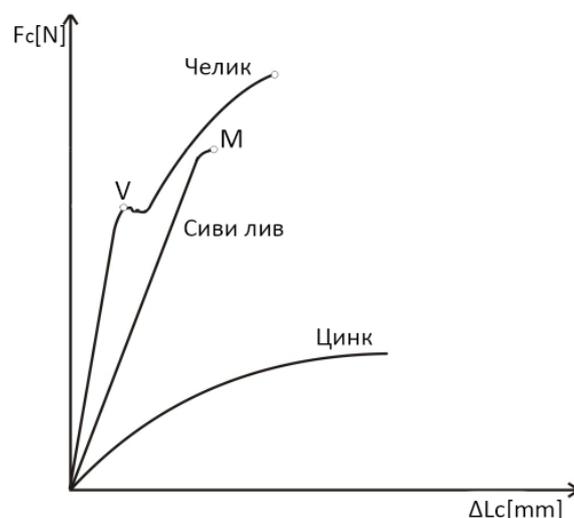


Слика 25. Притисне плоче на машини за испитивање притискивањем

Машина је тако конструисана да обезбеђује константну брзину деформисања. Са порастом оптерећења (вредности силе притискивања) долази до све већег скраћења епрувете. Испитивање се завршава ломом епрувете код кртих материјала или након достизања максималне силе коју машина може да оствари код изразито деформабилних материјала.

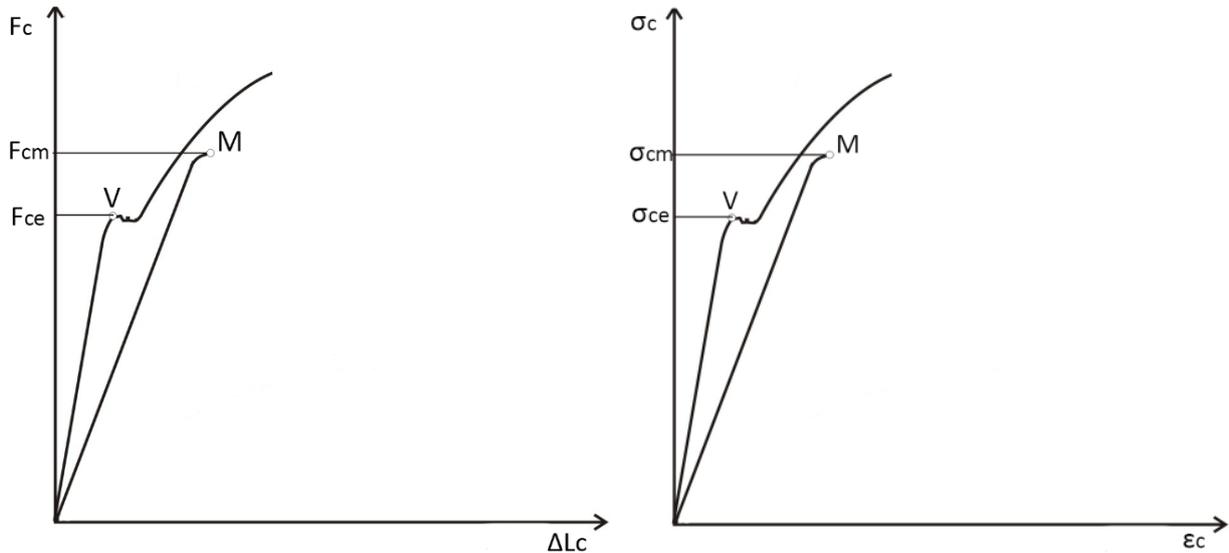
Током испитивања, помоћу специјалног уређаја који је саставни део машине за испитивање, црта се дијаграм сила притиска – скраћење. Са тог дијаграма се, у одређеној размери, могу прочитати вредности сила потребних за одређивање карактеристичних напона при притискивању. Дијаграм се црта на милиметарском папиру, а вредности сила и скраћења се одређују помоћу фактора размере за силу и скраћење, који показују нпр. колико јединица силе (N) одговара једном милиметру на дијаграму.

Изглед дијаграма (сила притиска - скраћење) зависи од врсте и стања материјала. На слици 26 приказани су ови дијаграми за неке материјале.



Слика 26. Изглед дијаграма сила притискивања-скраћење за неке материјале

Примери дијаграма сила притиска-скраћење и напон притиска-јединично скраћење за деформабилан и крт материјал са карактеристичним тачкама приказани су на слици 27.



Слика 27. Дијаграм сила притиска-скраћење и напон притиска-јединично скраћење за деформабилан и крт материјал

Свођењем силе притиска на површину попречног пресека добија се напон σ_c , а свођењем скраћења које је изазвало дејство одговарајуће силе притиска на почетну мерну дужину епрувете добија се јединично скраћење тј. деформација ϵ_c

$$\sigma_c = \frac{F_c}{S_0}, [MPa] \quad (19)$$

$$\epsilon_c = \frac{\Delta L_c}{L_0}, [-] \quad (20)$$

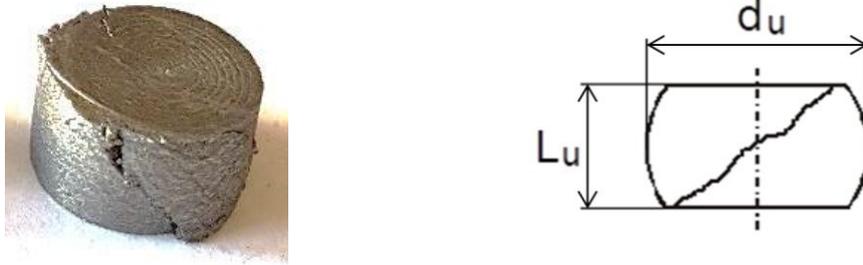
Величине које се одређују при испитивању притискивањем

Пре извођења испитивања, као и код испитивања затезањем, мери се почетни пречник епрувете d_0 и почетна мерна дужине L_0 .

Током испитивања може се пратити промена вредности силе, посматрањем казаљке на сату динамометра, или дигиталном показивачу. Циљ је одредити вредности две карактеристичне силе - силе на граници гњечења F_{ce} и максималне силе притиска коју је епрувета могла да издржи непосредно пре лома F_{cm} .

Сила F_{cm} је највећа вредност силе која се јавља током испитивања и њену вредност показује положај казаљке на сату динамометра, која се налази у најдаљем положају, или се дигитално читава (зависно од типа машине).

Након лома епрувете (јавља се само код кртих материјала) потребно је одредити и њене карактеристичне димензије, слика 28.



Слика 28. Изглед епрувете од сивог лива након лома код испитивања притискивањем

Димензије које су од значаја након лома епрувете су пречник након лома d_u и мерна дужина епрувете након лома L_u , које се мере помичним мерилом као и код испитивања затезањем.

Пречник епрувете након лома се мери у два унакрсна правца, а затим одређује средња вредност пречника.

Одређивање својстава отпорности и деформације

На основу величина измерених пре, током и након испитивања приступа се израчунавању карактеристичних величина за дати материјал. Наиме, измерене вредности силе и скраћења су карактеристичне за дату епрувету, јер се са променом димензија епрувете мењају и вредности тих величина. Због тога, као што је већ напред поменуто, сила притиска се своди на јединицу површине, а скраћење на јединицу дужине и тиме се добијају величине које су карактеристичне за један материјал и увек су исте без обзира на димензије епрувета које се испитују.

Да би се елиминисао утицај димензија епрувете на облик дијаграма за дати материјал уобичајено се у пракси користи дијаграм напон притиска-јединично скраћење, који за исти материјал изгледа идентично као и дијаграм сила притиска-скраћење, али су карактеристичне тачке увек при истим вредностима напона.

Израчунавају се следеће карактеристичне величине напона:

- R_{ct} - **напон за утврђено укупно скраћење** (граница пропорционалности):

$$R_{ct} = \frac{F_{ct}}{S_0} \quad (21)$$

- R_{cr} - **напон за утврђено трајно скраћење** (условна граница еластичности):

$$R_{cr} = \frac{F_{cr}}{S_0} \quad (22)$$

$$(R_{0.005} = \frac{F_{0.005}}{S_0}; R_{0.01} = \frac{F_{0.01}}{S_0}) \quad (23)$$

- R_{ce} - **напон гњечења** :

$$R_{ce} = \frac{F_{ce}}{S_0} \quad (24)$$

- $R_{cp0.2}$ - **условни напон гњечења** код материјала код којих граница гњечења на дијаграму напон притиска- јединично скраћење није јасно изражена:

$$R_{cp0.2} = \frac{F_{cp0.2}}{S_0} \quad (25)$$

У овом случају потребно је одредити силу $F_{cp0.2}$. То је сила која изазива појаву трајних деформација (скраћење) епрувете за 0,2% од почетне мерне дужине.

Вредност силе $F_{cp0.2}$ може да се одредити графички на исти начин као и одређивање силе условног напона течења (описано у 2. поглављу).

- R_{cm} - максимални напон (**притисна чврстоћа**):

$$R_{cm} = \frac{F_{cm}}{S_0} \quad (26)$$

Од својстава деформације израчунавају се:

- ΔL_{cu} - укупно скраћење епрувете:

$$\Delta L_{cu} = L_0 - L_u \quad (27)$$

- ϵ_{cu} - укупно јединично скраћење епрувете:

$$\epsilon_{cu} = \frac{\Delta L_u}{L_0} \quad (28)$$

- A_c - процентуално скраћење епрувете:

$$A_c = \frac{L_0 - L_u}{L_0} \cdot 100\% \quad (29)$$

- Z_c - процентуално проширење попречног пресека:

$$Z_c = \frac{S_u - S_0}{S_0} \cdot 100\% \quad (30)$$

Дефиниције карактеристичних величина:

R_{ct} - напон за утврђено укупно скраћење представља напон притиска, при коме долази до првог одступања од праволинијске зависности силе притиска и скраћења. **Може се одредити и код деформабилних и код кртих материјала.**

R_{cr} – напон за утврђено укупно скраћење представља напон притиска, при коме долази до првог одступања од праволинијске зависности силе притиска и скраћења. Уобичајено се одређују референтне вредности овог напона чијим дејством је настало трајно скраћење (0,01 или 0,005)% L_0 . **Може се одредити и код деформабилних и код кртих материјала.**

R_{ce} – напон гњечења представља напон при коме долази до повећаних пластичних деформација, тј. скраћења епрувете без пораста силе притиска и може се **одредити само код изразито деформабилних материјала**. Код осталих материјала код којих није изражен напон гњечења одређује се условни напон гњечења ($R_{cp0.2}$).

R_{cm} – притисна чврстоћа је максимални технички напон притиска који материјал може да издржи при испитивању притискивањем и **може се одредити само код кртих материјала код којих долази до лома епрувете.**

ΔL_{cu} - укупно скраћење епрувете представља разлику између почетне мерне дужине епрувете и укупне дужине епрувете после испитивања притискивањем.

ϵ_c – укупно јединично скраћење епрувете представља однос укупног скраћења ΔL_{cu} и почетне мерне дужине L_0 .

A_c - непропорционално процентуално скраћење епрувете представља укупно јединично скраћење мерног дела епрувете изражено у процентима.

Z_c - процентуално проширење попречног пресека епрувете представља повећање површине попречног почетног пресека чеоних површина епрувете изражено у процентима .

3. Објаснити понашање кртог и деформабилног материјаа током испитивања притискивањем.

4. Дефинисати и објаснити израчунавање карактеристичних деформација (написати формуле са мерним јединицама и у наставку њихове дефиниције.

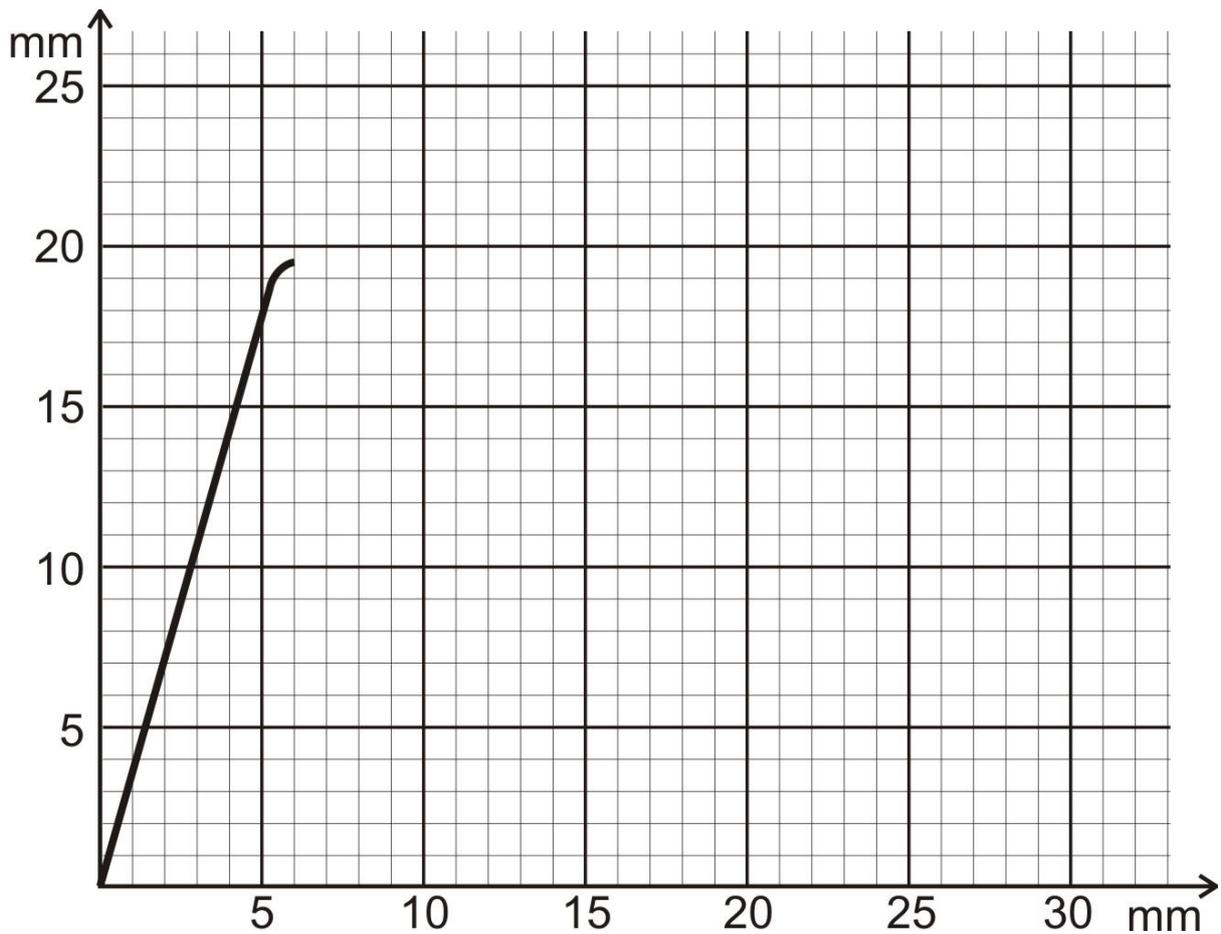
РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА И ЗАДАТАК ПРАКТИЧНОГ ДЕЛА ВЕЖБЕ

Име и презиме: _____, бр. индекса: _____

Материјал: _____

Почетне димензије епрувете: $L_0 =$ _____ $d_0 =$ _____

Дијаграм **сила притиска-скраћење** добијен током испитивања:



Размера за силу $U_{Fc} =$ _____

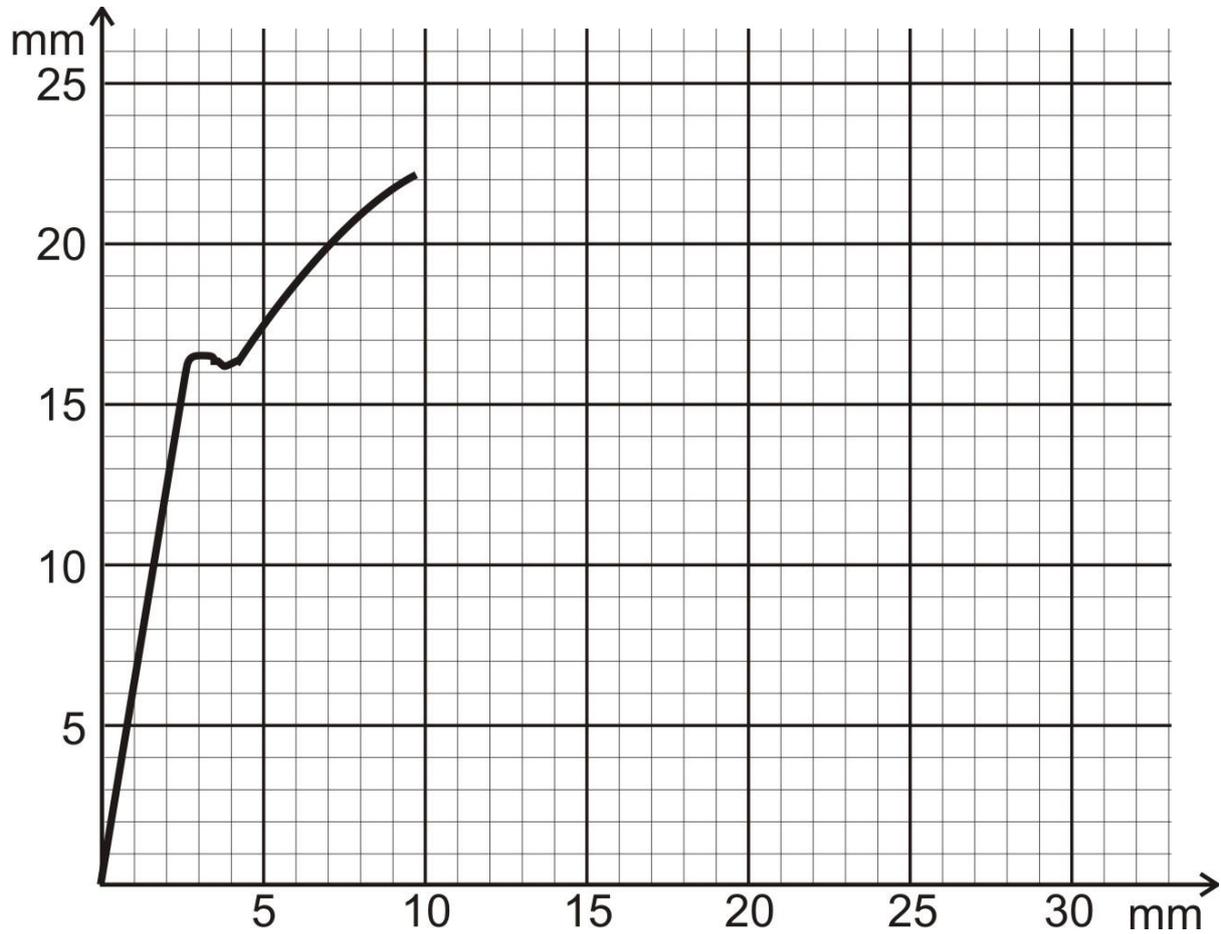
Измерене димензије епрувете након притискавања: $L_u =$ _____ ; $d_u =$ _____

Предметни асистент

Материјал: _____

Почетне димензије епрувете: $L_0 =$ _____ $d_0 =$ _____

Дијаграм **сила притиска-скраћење** добијен током испитивања:



Размера за силу $U_{Fc} =$ _____

Измерене димензије епрувете након притискивања: $L_u =$ _____ ; $d_u =$ _____

Предметни асистент

Име и презиме: _____, бр. индекса: _____

I. Скицирати епрувету у одговарајућој размери која је коришћена при испитивању са означеним карактеристичним димензијама.

II. Израчунати карактеристичне вредности сила са графика које одговарају напону гњечења и притисној чврстоћи (користити дату размеру за силу притиска).

$F_{ce} =$

$F_{cm} =$

III. Израчунати површине попречног пресека епрувете на пре и након испитивања (Написати формуле и приказати цео поступак са бројним вредностима и јединицама)

$S_0 =$

$S_u =$

- IV. Израчунати вредности карактеристичних напона R_{cm} и R_{ce} (Написати формуле и приказати цео поступак са бројним вредностима и одговарајућим јединицама).

$R_{ce} =$

$R_{cm} =$

- V. Израчунати вредности карактеристичних деформација. (Написати формуле и приказати цео поступак са бројним вредностима и одговарајућим јединицама).

$\Delta L_c =$

$\epsilon_c =$

$A_c =$

$Z_c =$

5. ОДРЕЂИВАЊЕ ТВРДОЋЕ СТАТИЧКИМ МЕТОДАМА

Под тврдоћом се подразумева отпор којим се једно тело супротставља продирању другог, тврђег тела у његову површину. Мерењем тврдоће може се врло брзо и једноставно доћи до податка о својствима испитиваног материјала. Због тога се методе за мерење тврдоће веома често примењују за контролу квалитета материјала за израду машинских елемената и делова конструкција.

Постоје статичке, динамичке и специјалне методе за испитивање тврдоће.

Код **статичких** метода сила испитивања која делује на утискивач постепено расте до максималне вредности. Код **динамичких** испитивања, сила на утискивачу се остварује ударом, или се тврдоћа одређује на основу еластичног одскока утискивача од површине која се испитује.

Најчешће коришћене **статичке** метода су:

- *Бринелова (Brinell) метода*, у ознаци *HB*,
- *Викерсова (Vickers) метода*, у ознаци *HV* и
- *Роквелова (Rockwell) метода*, у ознаци *HRC*.

Најчешће коришћене **динамичке** методе су:

- *Полдијева (Poldy) метода*, у ознаци *HP*,
- *Склероскопска метода по Шору (Shore)*, у ознаци *HSh* и
- *Дуроскопска метода (по Кирнеру) HD*.

Вредности тврдоће добијене при испитивању једном од ових метода не могу се замењивати са вредностима тврдоће које су добијене другом методом, јер различит начин и услови испитивања доводе до извесних разлика у резултатима.

СТАТИЧКЕ МЕТОДЕ

1. Бринелова метода

Тврдоће по Бринелу дефинише се као количник силе (која преко утискивача у облику челичне куглице делује на површину) и површине отиска, коју тај утискивач оставља на површини предмета чија се тврдоћа испитује (слика 29).

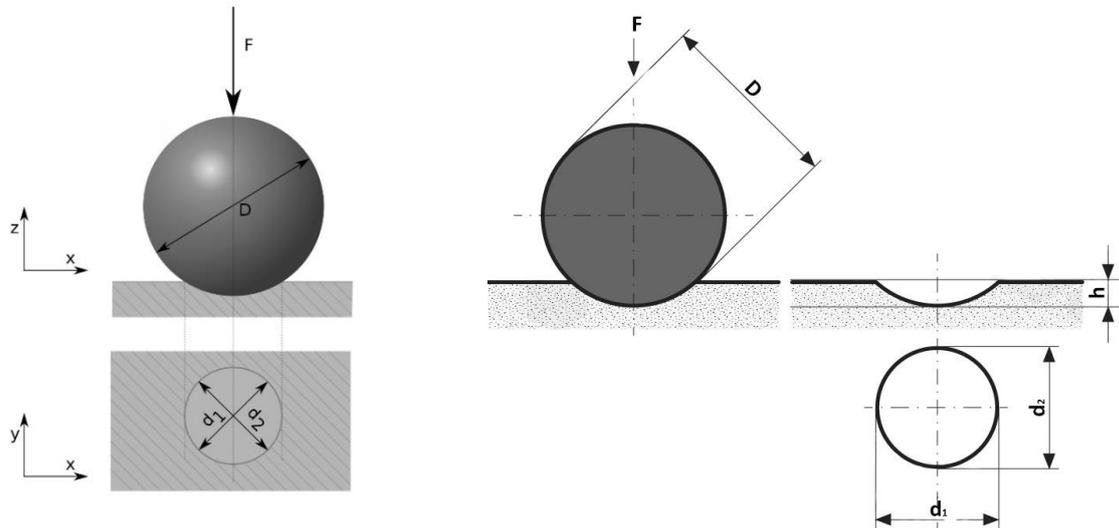
$$HB = \frac{F}{S}, \left[\frac{\text{daN}}{\text{mm}^2} \right] \quad (31)$$

- F [daN]-сила утискивања
- $S = \pi \cdot D \cdot h$, [mm²] - површина калоте (отиска)

$$HB = \frac{F}{D \cdot \pi \cdot h} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (32)$$

Где је:

- F [daN]-сила утискивања,
- D [mm]-пречник куглице (утискивача),
- d [mm]-пречник отиска,
- h [mm]-дубина отиска.



Слика 29. Шематски приказ испитивања тврдоће Бринеловом методом

Бринелова метода се користи за меке и средње тврде материјале. Зависно од материјала куглице, ознака за тврдоћу по Бринелу може бити:

HBS - када је утискивач челична куглица тврдоће 850 HV, која се користи за мерење тврдоће до 450 HB и

HBW-када је утискивач куглица од тврдог метала (65 HRC), која се користи за мерење тврдоће до 650 HB.

Бројна вредност измерене тврдоће се уноси испред ознаке за тврдоћу, а иза ознаке у индексу се редом могу уносити следећи подаци:

- пречник куглице (D) у mm,
- сила утискивања (F) у daN,
- време утискивања (τ) у секундама.

Пример:

190HBS_{5/187,5/15}, где су:

190	HBS	/	5	/	187,5	/	15
Измерна вредноаост тврдоће (daN/mm ²)	Ознака тврдоће		Пречник утискивача D (mm)		Сила утискивања F (daN)		Време утискивања τ (s)

Утискивач и сила утискивања

За испитивање се користи челична куглица пречника 10, 5 и 2,5 mm, изузетно 1 и 2 mm. Пречник куглице зависи од дебљине и тврдоће испитиваног материјала. Већа куглица се користи када је испитивани материјал дебљи и мекши.

Сила утискивања (F) зависи од пречника куглице и тврдоће материјала и одређују се из услова

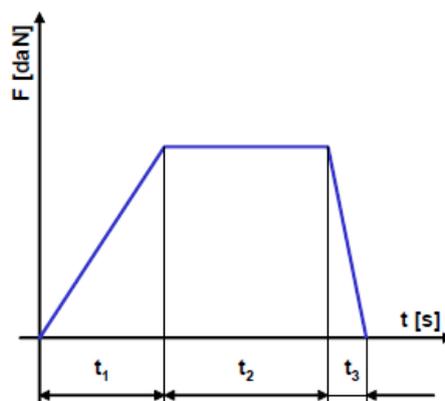
$F = k \cdot D^2$ Вредност коефицијента k , зависи од врсте материјала и креће се у границама од 1 до 30. За тврђе материјале износи 30 (15), док је за мекше материјале 10 или мање.

Табела 3 Препоруке за избор коефицијента $k=F/D^2$

Врста материјала		$k = F/D^2$
Челик		30
Ливено гвожђе	Тврдоће до 140 НВ	10
	Тврдоће изнад 140 НВ	30
Бакар и његове легуре	Тврдоће до 35 НВ	5
	Тврдоће од 35 НВ до 200 НВ	10
	Тврдоће изнад 200 НВ	30
Лаки метали и њихове легуре	Тврдоће до 35 НВ	1,25; 2,5
	Тврдоће од 35 НВ до 80 НВ	5; 10; 15
	Тврдоће изнад 80 НВ	10; 15
Олово и калај		1; 1,25

Време утискивања

Време трајања утискивања (слика 30) зависи од врсте материјала (таб. 4). За тврђе материјале време утискивања износи 10-15 s, док је за мекше материјале време утискивања 30 s или 60 s.



Слика 30. Време утискивања код Бринелове методе: t_1 – време пораста оптерећења до максималне вредности (min 2 s, max 8 s), t_2 – Време трајања дејства пуног оптерећења (ово време се уноси при обележавању тврдоће) и t_3 – време растерећења

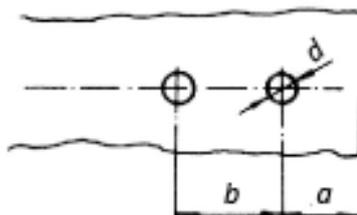
Код мекших материјала је потребно дуже време утискивања јер су својства деформабилности израженија, при утискивању настаје течење материјала и потребно је дуже време утискивања да би утискивач достигао коначну дубину.

Табела 4. Препоручене вредности за време утискивања

Врста материјала		Време утискивања (t_2) [s]
Челик	$R_m < 1100 \text{ MPa}$	30
	$R_m > 1100 \text{ MPa}$	15
	$R_m > 1400 \text{ MPa}$	10
Бакар и његове легуре		10-15
Алуминијум и његове легуре		30
Олово		60
Магнезијуми и његове легуре		120
Легуре за лежишта (бронзе)		180

Услови испитивања

- Површина мора бити глатка и равна;
- Дебљина узорка мора бити 8-10 пута већа од дубине отиска (h);
- Одстојање између 2 суседна центра отиска (b) и одстојање од средине отиска до ивице узорка (a), слика 31, зависи од врсте материјала (таб. 5);



Слика 31. Прописана одстојања

- Отисак куглице мора да буде такав да обезбеди што већу тачност мерења, тј. $d = (0,24-0,6) \cdot D$;
- Правац дејства силе мора бити управан на површину узорка;
- Температура испитивања треба да буде у границама од 10°C до 35°C , а у контролираним условима $23 \pm 5^\circ\text{C}$;
- Изводе се најмање три утискивања.

Табела 5. Вредности минималног одстојања отисака зависно од врсте материјала

МАТЕРИЈАЛ	a	b
Челик, SL, Cu	$2,5 \cdot d$	$4 \cdot d$
Al	$3 \cdot d$	$6 \cdot d$
Pb	$2,5 \cdot d$	$6 \cdot d$

Бринелов уређај за мерење тврдоће

Бринелов уређај (апарат) за мерење тврдоће приказан је на слици 32. На тржишту се могу наћи и универзални апарати на којима се може мерити тврдоћа помоћу све 3 статичке методе.



Слика 32. Бринелови уређаји за мерење тврдоће

Поступак испитивања

Поступак испитивања обухвата следеће кораке:

- Најпре се изабере куглица, сила и време утискивања (у зависности од врсте и дебљине материјала који се испитује);
- Утискивач се причврсти у одговарајући носач;
- Припремљени узорак се поставља на постоље апарата и притеже уз носач утискивача помоћу завојног вретена;
- Куглица се утискује у површину узорка изабраном силом;
- Након одређеног времена утискивања врши се растерећење.
- На крају се мери пречник отиска помоћу лупе или мерног микроскопа.

Тачност мерења пречника отиска не сме бити мања од 0,25% пречника утискивача D.

2. Викерсова метода

Ова метода је универзална и примењује се подједнако и за тврде и меке материјале. Викерсовом методом се могу испитивати сви метали независно од тврдоће и дебљине узорка, јер се као утискивач користи дијамантска пирамида.

Тврдоћа по Викерсу се дефинише као количник силе којом се врши утискивање и површине одговарајућег отиска на површини предмета који се испитује.

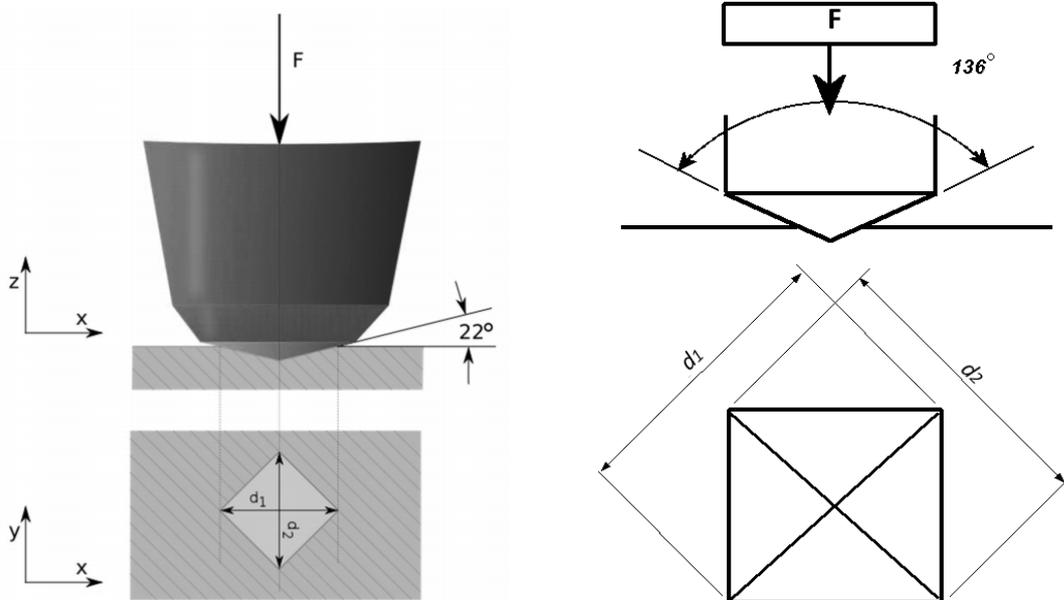
$$HV = \frac{F}{S}, \left[\frac{daN}{mm^2} \right] \quad (33)$$

где су :

- F (daN) – сила утискивања
- S (mm²) – површина отиска

Утискивач и сила утискивања

Као што је већ поменуто, као утискивач код Викерсове методе се користи дијамантска пирамида са квадратном основом и са углом на врху од 136°, слика 33.



Слика 33. Шема Шематски приказ испитивања тврдоће Викерсовом методом

Отисак у хоризонталној пројекцији представља квадрат са дијагоналама (d_1) и (d_2).

Пошто се дијагонале могу разликовати површина отиска се одређује преко средње вредности дијагонала:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (34)$$

Коначни образац за израчунавање тврдоће Викерсовом методом је:

$$HV = \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = \frac{1,8544 \cdot F}{d^2}, \left[\frac{\text{daN}}{\text{mm}^2} \right] \quad (35)$$

где је:

- d (mm)- средња вредност дијагонала

Према величини примењене силе разликујемо 3 области испитивања тврдоће по Викерсовој методи (таб. 6).

Табела 6. Области испитивања тврдоће по Викерсу

Сила F [N]	Ознака тврдоће	Област испитивања
$0,098 \leq F < 1,961$	HV 0.01 до <HV 0.2	Микротврдоћа
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0.2 до < HV 5	Прелазна област тврдоће
$49,03 \leq F \leq 980,7$	\geq HV 5 до HV 100	Макротврдоћа

Величина силе утискивања зависи од дебљине и тврдоће материјала који се испитује. Уколико је тврдоћа и дебљина мања, примењује се мања сила утискивања.

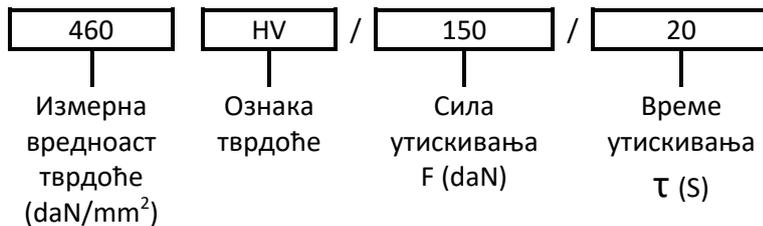
Пример означавања тврдоће по Викерсу

Бројна вредност тврдоће се уноси испред ознаке, а иза ознаке у индексу се могу (али није обавезно) се могу додати подаци за

- силу утискивања у daN,
- време утискивања, ако је веће од 15 секунди.

Пример:

460HV_{150/20}, где су:



Време утискивања

Време трајања утискивања зависи од врсте материјала. Уобичајено износи 10-15 секунди за тврде материјале, а може бити 30, 60 и 120 секунди за меке материјале.

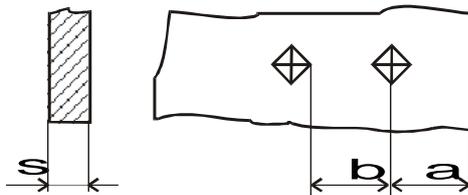
Викерсов уређај за мерење тврдоће



Слика 34. Уређај за испитивање тврдоће по Викерсу

Услови испитивања

- Дебљина узорка мора бити 1,5 пута већа од дијагонале отиска (минимална дебљина узорка се утврђује на основу силе утискивања);
- Одстојање од центра отиска до ивице узорка или до контуре било ког другог отиска не сме бити мање од дијагонале отиска, слика 35;



Слика 35. Услови испитивања

- Вредности параметара a , b и s се могу наћи у одговарајућим табелама у зависности од врсте материјала, таб. 7.

Табела 7. Вредности параметара a , b и s у зависности од врсте материјала

Материјал	s	a	b
Челик, Си, легуре Си	1,5	2,5	4
Лаки метали		3	7

- Површина узорка мора да буде брушена и чиста;
- Утискивач мора бити управан на површину узорка;
- Температура испитивања треба да буде у границама 10-35°C, а у контролираним условима 23±5°C.
- Изводе се најмање три утискивања.

Поступак испитивања

Поступак испитивања обухвата следеће кораке:

- Најпре се припреми дијамантски утискивач и учврсти у одговарајући носач;

- Проверава се јасноћа пројектовања слике отиска на екран;
- Бира се вредност силе утискивања;
- На постоље апарата поставља се узорак чија се тврдоћа испитује;
- Завојним вретеном се причвршћује узорак уз носач утискивача;
- Након тога се утискивач утискује у припремљену површину узорка изабраном силом;
- Врши се растерећење и на екрану апарата после аутоматске замене утискивача, лупом се пројектује слика површине отиска:
- Помоћу оптичког система на уређају, мере се дијагонале отиска:
- На крају се рачуна средња вредност дијагонале и помоћу ње рачуна вредност тврдоће.

3. Роквелова метода

Код ове методе се као мерило тврдоће узима дубина отиска. Метода има преко 20 поступака подељених у 4 групе. Поступци се међусобно разликују по облику утискивача и величини силе утискивања.

Прва група поступака се највише користи и ту спадају поступци В и С.

Утискивач и сила утискивања

За В поступак као утискивач користи се челична куглица пречника $D=1/16''$ (1,588 mm).

За С поступак као утискивач користи се дијамантска купа са углом конуса од 120° , која има полупречник заобљења на врху од 0,2 mm.

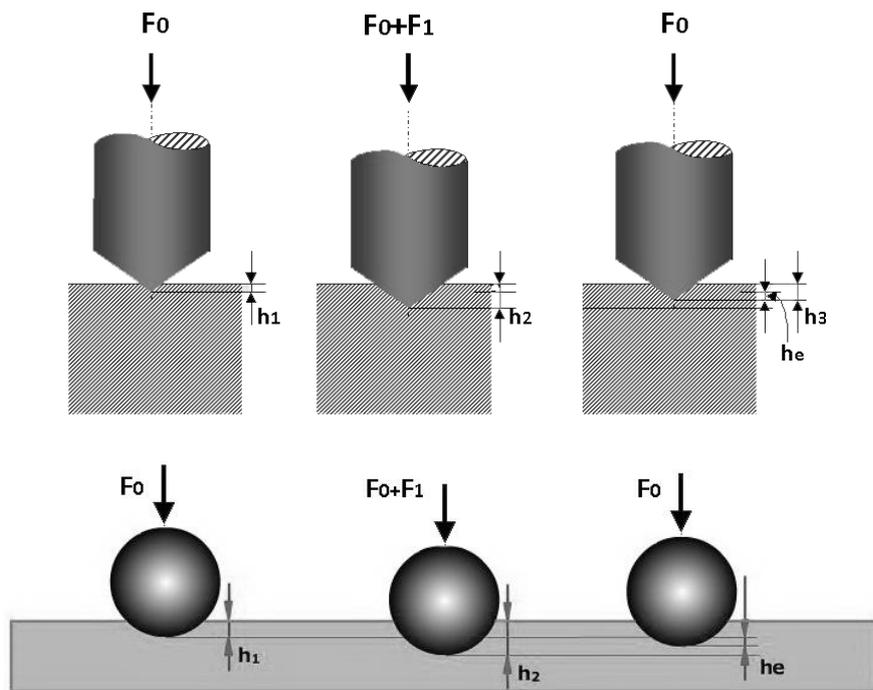
Поступак се бира у зависности од врсте материјала; за мекше материјале користи се В поступак а за тврде материјале (каљенен челике) користи се С поступак.

Испитивање тврдоће по Роквел методи одвија се у три фазе:

У ПРВОЈ ФАЗИ делује се силом предоптерећења F_0 , да би се отклонио утицај површинских неравнина. Сила предоптерећења износи 10 daN и она изазива продирања утискивача до дубине h_1 .

У ДРУГОЈ ФАЗИ додаје се главно оптерећење F_1 , које за В поступак износи 90 daN, а за С поступак 140 daN, тако да укупна сила утискивања износи 100 односно 150 daN за В и С поступак респективно. Под дејством укупне силе настају еластичне деформације (до дубине h_e) и пластичне деформације (до дубине h_p), а дубина утискивања се повећава на h_2 .

У ТРЕЋОЈ ФАЗИ врши се растерећење утискивача, тј. отклања се главно оптерећење, тако да остаје само сила предоптерећења F_0 . При томе нестају еластичне деформације узорка и машине настале у другој фази и дубина продирања се смањује на h_3 , слика 36.



Слика 36. Шема испитивања по Роквелу, а) поступак С, б) поступак В

Према Роквел методи тврдоћа је одређена дубином трајног утискивања под дејством главне силе и израчунава се према следећим обрасцима:

$$HRB = 130 - \frac{h_3 - h_1}{0,002} \text{ за поступак В} \quad (36)$$

$$HRC = 100 - \frac{h_3 - h_1}{0,002} \text{ за поступак С} \quad (37)$$

где је:

- $h_3 - h_1$ - дубина утискивања
- 0,002 - једна Роквелова-ова јединица

У пракси, величина тврдоће директно се читава на скали уређаја за мерење тврдоће по Роквелу (слика 37).

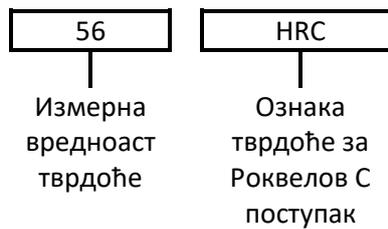


Слика 37. Роквелови уређаји за мерење тврдоће

Пример:

97HRB - тврдоћа мерена HRB методом

56 HRC- тврдоћа мерена HRC методом, где су:

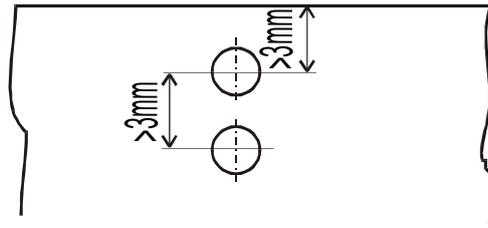


Време утискивања

Утискивање се изводи све док се казаљка мерног сата не умири, тако да може трајати и мање од 10 s.

Услови испитивања

- Одстојање између 2 суседна центра отиска и одстојање од средине отиска до ивице треба да буде веће од 3 mm (слика 38);
- Површина узорка мора да буде брушена и чиста;
- Утискивач мора бити управан на површину узорка;
- Изводе се најмање три утискивања;
- Температура испитивања треба да буде у границама 10-35°C, а у контролисаним условима 23±5°C.



Слика 38. Прописана одстојање отисака на узорку

Поступак испитивања

- Најпре се изабере и постави одговарајући утискивач, зависно од поступка (куглица или дијамантска купа) у носач утискивача;
- Узорак се поставља на одговарајуће постоље апарата и завојним вретеном доведе у додир са носачем утискивача;
- Бира се сила главног оптерећења F_1 у зависности од методе;
- Окретање завојног вретена и притезање узорка (довођењем мале казаљке на реперну црту, а велике на нулу) доводи до предоптерећења силом F_0 , услед почетка продирања утискивача у узорак;
- Врши се утискивање главним оптерећењем F_1 ;
- По истеку времена потребног за утискивање, утискивач се растеређује до силе F_0 , казаљка се зауставља и читава се вредност тврдоће директно на скали апарата;
- Спуштањем завојног вретена ослобађа се утискивач.

РАДНИ ЛИСТ

ВЕЖБА БР. 5: ОДРЕЂИВАЊЕ ТВРДОЋЕ СТАТИЧКИМ МЕТОДАМА

Име и презиме: _____, бр. индекса: _____

1. Како се дефинише тврдоћа?
2. Навести статичке методе за испитивање тврдоће.
3. Навести и скицирати утискиваче за сваку од статичких метода за одређивање тврдоће
4. Навести услове испитивања по Бринеловој методи

РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА И ЗАДАТАК ПРАКТИЧНОГ ДЕЛА ВЕЖБЕ

I. Одређивање тврдоће Бринеловом методом

МАТЕРИЈАЛ	Сила утискивања F [daN]	Пречник утискивача D [mm]	Измерени пречници отиска		d_{sr} [mm]
			d' [mm]	d'' [mm]	
1.					
2.					

1. Израчунати пречнике отисака на основу измерених пречника d' и d'' (написати формуле и приказати цео поступак са бројним вредностима и јединицама).

МАТЕРИЈАЛ 1: $d_{sr} =$

МАТЕРИЈАЛ 2: $d_{sr} =$

2. Израчунати површине отисака (приказати све бројне вредности са одговарајућим јединицама)

МАТЕРИЈАЛ 1: $S = \frac{1}{2}\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2}) =$

МАТЕРИЈАЛ 2: $S = \frac{1}{2}\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2}) =$

3. Израчунати вредности тврдоће по Бринеловој методи (написати формуле и приказати цео поступак са бројним вредностима и јединицама).

МАТЕРИЈАЛ 1: HBS=

МАТЕРИЈАЛ 2: HBS=

4. Написати добијене вредности тврдоће стандардним ознакама узимајући у обзир услове испитивања

II. Одређивање тврдоће Викерсовом методом

МАТЕРИЈАЛ	Сила утискивања	Измерене дијагонале отиска		Средња вредност дијагонале отиска
		d_1 [mm]	d_2 [mm]	d [mm]
1.				
2.				

1. Израчунати средњу вредност дијагонале отисака на основу измерених вредности дијагонала (написати формуле и приказати цео поступак са бројним вредностима и јединицама).

МАТЕРИЈАЛ 1: $d =$

МАТЕРИЈАЛ 2: $d =$

2. Израчунати површине отисака (приказати све бројне вредности са одговарајућим јединицама)
- 3.

МАТЕРИЈАЛ 1: $S =$

МАТЕРИЈАЛ 2: $S =$

4. Израчунати вредности тврдоће по Викерсовој методи (написати формуле и приказати цео поступак са бројним вредностима и јединицама).

МАТЕРИЈАЛ 1: $HV =$

МАТЕРИЈАЛ 2: $HV =$

5. Написати добијене вредности тврдоће стандардним ознакама узимајући у обзир услове испитивања

III. Одређивање тврдоће Роквеловом методом

- Унети у току мерења тврдоће потребне вредности у табелу.

МАТЕРИЈАЛ	МЕТОДА	Сила утискивања (daN)	Утискивач	Очитане вредности тврдоће за 3 мерења (HRB/HRC)		
				I мерење	II мерење	III мерење
1.						
2.						

- На основу измерених вредности израчунати тврдоће по В и С методи (написати формуле и приказати цео поступак са бројним вредностима и јединицама)

МАТЕРИЈАЛ 1: HR__=

МАТЕРИЈАЛ 2: HR__=

6. ОДРЕЂИВАЊЕ ТВРДОЋЕ ДИНАМИЧКИМ МЕТОДАМА

Поред статичких метода за испитивање механичких својстава машинских материјала развијене су и динамичке методе.

Код динамичких метода за испитивање тврдоће материјала, утискивач се утискује у површину узорка под дејством кинетичке енергије. У зависности од ефеката који се при томе остварују, ове методе се деле у две групе, и то:

- динамичке методе код којих утискивач у испитиваном материјалу изазива његово трајно (пластично) деформисање, тј. оставља у њему отисак и
- динамичке методе код којих утискивач на месту дејства изазива само еластично деформисање материјала, после удара одскаче, не остављајући било какав отисак на узорку.

Уређаји за динамичка испитивања тврдоће, у поређењу са уређајима за статичка испитивања тврдоће, су једноставнији, мањи, лакши и јефтинији. Лако се њима рукује, а због мале тежине преносни су, што омогућава обављање испитивања и на терену. Недостатак динамичких метода је мања тачност испитивања у односу на статичке методе. Најчешће коришћене динамичке методе су: Полдијева, Склероскопска и Дуроскопска.

Полдијева метода

Полдијева метода спада у динамичке методе испитивања тврдоће код којих утискивач у испитиваном материјалу ствара трајни отисак, тј. изазива његово пластично деформисање. Користи се у случају, када се тврдоћа из неког разлога не може одредити статичким методама. Полдијева метода је метода испитивања тврдоће ударом и у пракси се често користи, а за њену примену неопходан је тзв. Полдијев апарат, слика 39.



Слика 39. Полдијев апарат за мерење тврдоће и пратећа опрема за мерење

Мерење тврдоће је засновано на ударном дејству утискивача који се истовремено утискује у испитивани материјал и у материјал познате тврдоће (еталон). Како је утискивач челична куглица, а оба отиска (и на материјалу и на еталону) су настала услед дејства исте силе F , коришћењем израза за тврдоћу по Бринелу испитиваног материјала и еталона добија се израз за тврдоћу по Полдију:

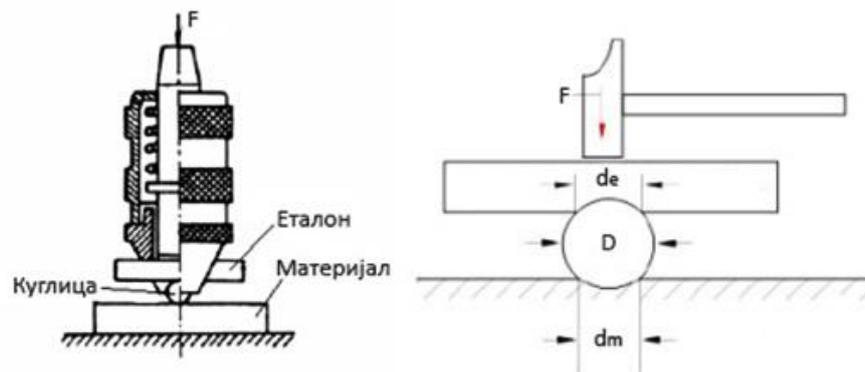
$$HP = HB_E \cdot \frac{D - \sqrt{D^2 - d_E^2}}{D - \sqrt{D^2 - d_M^2}} \left[\frac{daN}{mm^2} \right] \quad (38)$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (39)$$

где је:

- HB_E – позната тврдоћа еталона (daN/mm^2),
- D – пречник куглице (10 mm),
- d_E – пречник отиска у еталону (mm),
- d_M – пречник отиска у материјалу који се испитује (mm).

Шема испитивања по Полдију дата је на слици 40.



Слика 40. Шема испитивања Полдијевом методом

Услови испитивања:

- Пречник утикивача тј. челичне куглице, која се у овом случају користи, је увек $D=10$ mm;
- Овом методом се могу мерити тврдоће до 450 HB;
- Оптерећење под којим утикивач (челична куглица) ствара отиске у еталону и узорку задаје се ударцем ручног чекића по Полдијевом уређају;
- Тврдоћа еталона мора бити равномерна и што ближе тврдоћи која се очекује на испитиваном материјалу, а одређује се по Бринеловој методи;
- Површина мерења мора да је чиста и машински обрађена;
- Оса под којом се задаје ударац мора бити управна на површину предмета (апарат мора да се држи вертикално);
- Пречници отисака морају бити у границама од 2-4 mm;
- Пречници отисака се мере у два нормална правца и као меродавна узима се њихова средња вредност.

Поступак испитивања

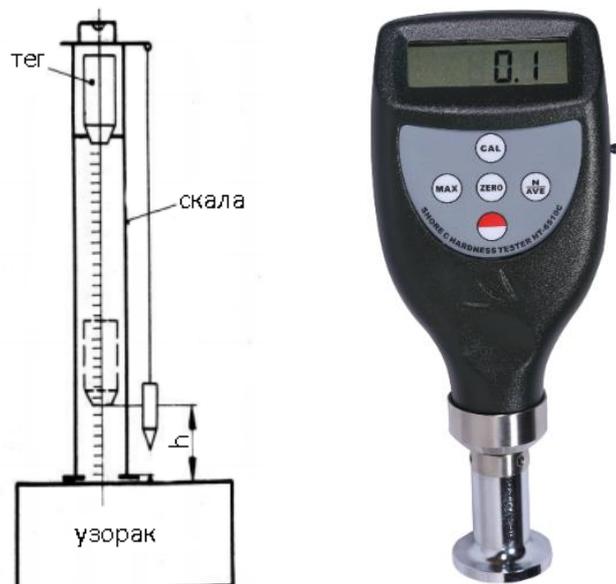
- Испитивање почиње тиме што се у Полдијев уређај изнад утискивача постави еталон-плочица познате тврдоће која належа на утискивач захваљујући притиску опруге;
- На припремљену површину материјала чија се тврдоћа мери, постави се Полдијев уређај, и то тако да доња страна утискивача належа на површину материјала и да његова оса буде управна на површину материјала;
- Ударом ручног чекића изводи се утискивање куглице - утискивача у површину еталона и материјала;
- Уз помоћ лупе са скалом се мере пречници отисака на површини предмета и еталона;
- Уколико су пречници отиска мањи од 2 mm или већи од 4 mm испитивање се мора поновити
- Овако измерене вредности уносе се у израз за израчунавање тврдоће по Полдију и израчунава вредност тврдоће.

Склероскопска метода (метода по Шору)

Принцип мерења тврдоће код ове методе заснива се на еластичном одскоку и на визуелном мерењу висине његовог првог одскока.

Уређај за мерење тврдоће Шоровом методом

Уређај за мерење тврдоће Шоровом методом (слика 41) састоји се од једне стаклене цеви дужине 254 mm подељене на 140 подеока, у којој се налази тег масе 2.5 g са дијамантским купастим врхом.



Слика 41. Шоров уређај : класични - лево, дигитални - десно

Услови испитивања:

- Температура испитивања треба да је собна;

- Изводи се најмање 5 појединачних мерења након чега се за вредност тврдоће узима средња вредност тих мерења;
- Маса постоља на које се ставља узорак материјала чија се тврдоћа мери треба да се креће у границама од 2-5 kg;
- Површина узорка мора бити хоризонтално постављена, равна и глатка;
- Примењује се при мерењу тврдоће челика и тврдих ливова опсега тврдоћа од 225 до 940 HV.

Поступак испитивања

Шоров апарат се поставља управно на површину узорка или готовог дела чија се тврдоћа мери. Контрола управности се контролише либелом. Тег се подиже у највиши положај и пушта да слободно падне (притиском на дугме) на површину узорка. Услед еластичних деформација узорка, тег одскаче од површине и визуелним читавање висине првог одскока (h) одређује се вредност тврдоће, која је представљена у Шоровим јединицама. Као што је већ поменуто скала је дужине 254 mm и подељена је на 140 подеока (Шорових јединица). Изводи се најмање 5 мерења на различитим местима, па се као меродавна величина тврдоће узима њихова средња вредност.

Дуроскопска метода (Кирнерова)

Дуроскопска метода за одређивање тврдоће се заснива на еластичном одскоку као и Шорова метода.

Уређај за мерење тврдоће по Кирнеру

Уређај који служи за мерење тврдоће овом методом зове се дуроскоп (слика 42). Он је лак, малих димензија и једноставне конструкције. Нарочито је погодан за мерење тврдоће вертикалних површина.



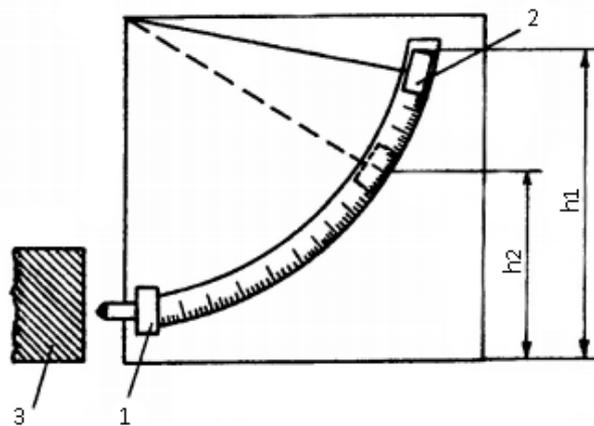
Слика 42. Изглед дуроскопа

Услови испитивања:

- Температура испитивања треба бити собна;
- Изводи се најмање 5 појединачних мерења након чега се за вредност тврдоће узима средња вредност тих мерења;
- Потребно је да маса узорка буде знатно већа од масе тега на клатну;
- Може се користити за испитивање метала и неметала;
- Површина која се испитује треба да буде глатка и вертикално постављена.

Поступак испитивања

Уређај (дуроскоп) се прислања уз вертикалну површину предмета. Пре почетка испитивања дуроскоп се доводи у хоризонтални положај помоћу либеле. Клатно (мали тег клатна) се поставља у горњи положај до висине h_1 , слика 43. Притиском на дугме ослобађа се тег који се пушта са висине h_1 да слободно падне и удари у утискивач, **који је постављен на предњој бочној страни инструмента и наслоњен на површину предмета**. На лучној скали која се налази на предњем делу дуроскопа означена су 70 подеока (Дуроскопских јединица). У зависности од еластичних својстава површине испитиваног материјала као и њене тврдоће клатно (тег) ће одскочити до одређене висине висине h_2 коју ће показати казаљка на скали инструмента. Резултати мерења тврдоће овом методом се изражавају у дуроскопским јединицама. Изводе се најмање 5 мерења на различитим местима, па се као меродавна величина тврдоће узима њихова средња вредност.



Слика 43. Дуроскопска метода-шематски приказ 1- утискивач, 2- тег, 3 узорак

РАДНИ ЛИСТ

ВЕЖБА БР. 6: ОДРЕЂИВАЊЕ ТВРДОЋЕ ДИНАМИЧКИМ МЕТОДАМА

Име и презиме: _____, бр. индекса: _____

1. Навести динамичке методе за испитивање тврдоће и њихову поделу.
2. На шта се своди мерење тврдоће по Полдијевој методи?
3. Скицирати утискивач који се користи код Полдијеве методе и назначити димензије утискивача.
4. Дефинисати тврдоћу по Полдијевој методи, дати образац и навести јединицу за тврдоћу.
5. Навести услове испитивања по Полди методи
6. Скицирати Склероскопску методу (по Шору) и написати у којим јединицама се мери тврдоћа по Шору.

7. Скицрати Дуроскопску методу и дати јединице за тврдоћу по овој методи.

|

РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА И ЗАДАТАК ПРАКТИЧНОГ ДЕЛА ВЕЖБЕ

Име и презиме: _____, бр. индекса: _____

I. Одређивање тврдоће по Полдијевој методи

МАТЕРИЈАЛ	Тврдоћа еталон плочице	Пречник утискивача D (mm)	Измерени пречници отиска на еталону		Измерени пречници отиска на узорку	
	HV _E (daN/mm ²)		d' (mm)	d'' (mm)	d' (mm)	d'' (mm)
1.						
2.						

1. Израчунати пречник отиска d_M на узорку на основу измерених пречника у два нормална правца (написати формулу, унети нумеричке вредности и јединице).

МАТЕРИЈАЛ 1.: $d_M =$

МАТЕРИЈАЛ 2.: $d_M =$

2. Израчунати пречник отиска d_E на еталону (написати формулу, унети вредности и јединице)

МАТЕРИЈАЛ 1.: $d_E =$

МАТЕРИЈАЛ 2.: $d_E =$

3. Израчунати површину отиска на узорку

МАТЕРИЈАЛ 1.: $S_M = \frac{1}{2}\pi D(D - \sqrt{D^2 - d_M^2}) =$

МАТЕРИЈАЛ 2.: $S_M = \frac{1}{2}\pi D(D - \sqrt{D^2 - d_M^2}) =$

4. Израчунати површину отиска на еталону

МАТЕРИЈАЛ 1.: $S_E = \frac{1}{2}\pi D(D - \sqrt{D^2 - d_E^2}) =$

МАТЕРИЈАЛ 2.: $S_M = \frac{1}{2}\pi D(D - \sqrt{D^2 - d_E^2}) =$

5. Израчунати вредност тврдоће по Полдијевој методи користећи израчунате вредности за S_M , S_E и познату вредност H_{VE} (Написати формуле и приказати цео поступак са бројним вредностима и јединицама).

МАТЕРИЈАЛ 1.: $HR =$

МАТЕРИЈАЛ 2.: $HR =$

II. Одређивање тврдоће по Склероскопској методи (методи по Шору)

Материјал	Измерене висине одскока					Вредност тврдоће по Шору
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	HSh

7. ИСПИТИВАЊЕ ЖИЛАВОСТИ

Претходно описана испитивања (осим динамичке тврдоће) спадају у групу статичких, јер њихови резултати пружају информације о понашању материјала под дејством статичких напрезања. Међутим, током радног века многи елементи машина и уређаја изложени су дејству динамичких и ударних оптерећења, која могу изазвати нежељене ломове. Када је материјал изложен дејству ударних оптерећења, брзина деформисања је велика и материјал показује много „кртије“ понашање, него што показује при испитивању затезањем. Ломови услед ударних оптерећења су непожељни, јер доводе у опасност људске животе, стварају економске губитке, застоје у раду читавих постројења, изазивају еколошке испаде, пожаре и сл. Из тог разлога, неопходно је проверити понашање и отпорност материјала према дејству таквих врста напрезања.

Жилавост је способност материјала да се пластично деформише и представља меру количине енергије коју материјал може апсорбовати пре лома. С друге стране, жилавост се може дефинисати и као количина енергија коју је потребно утрошити да би дошло до лома материјала. Жилавост се најчешће одређује испитивањем ударне жилавости по Шарпију (engl. *Charpy*). То је релативно једноставно, брзо, јефтино, али врло ригорозно испитивање, код кога се са сигурношћу оцењује својство материјала и његово стање при собним, повишеним или сниженим температурама у условима најнеповољнијег напрезања. При испитивању ударом, оптерећење делује великом брзином у кратком временском интервалу, при чему долази до размене велике количине енергије.

Ударна жилавост (надаље жилавост) представља способност материјала да се супротставља ударном оптерећењу. Будући да описује (показује) понашање материјала приликом ударног дејства оптерећења, жилавост је постала основни критеријум за избор материјала код анализе одређених технолошких и конструктивних задатака, на пример :

- код оцене склоности ка кртом лому,
- код оцене употребљивости материјала за рад на ниским температурама,
- код оцене способности рада у условима термичких шокова,
- код оцене заварљивости челика,
- код анализе узрока отказа (лома) одређених елемената или конструкција,...

Жилавост се дефинише као енергија која се утроши на сламање епрувете по јединици површине попречног пресека на месту лома епрувете:

$$K = \frac{A_0}{S} \left[\frac{J}{cm^2} \right] \quad (40)$$

где су:

- A_0 - рад утрошен за лом епрувете,
- S - површина попречног пресека епрувете на месту лома.

Јединица мере за жилавост је J/cm^2 односно J за јединични попречни пресек ($S = 1 cm^2$)

а) Епрувете за испитивање жилавости

Бројна вредност жилавости зависи од димензија епрувете, али превасходно од димензија и облика жлеба (зареза). Избор епрувете углавном зависи од димензија и облика зареза на

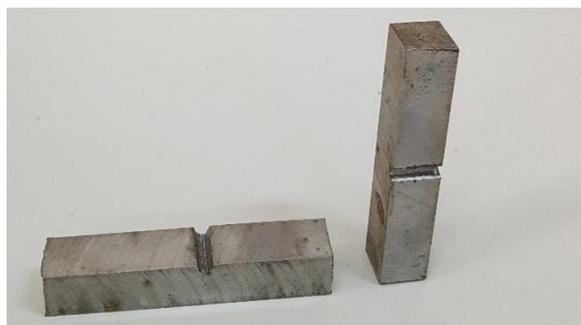
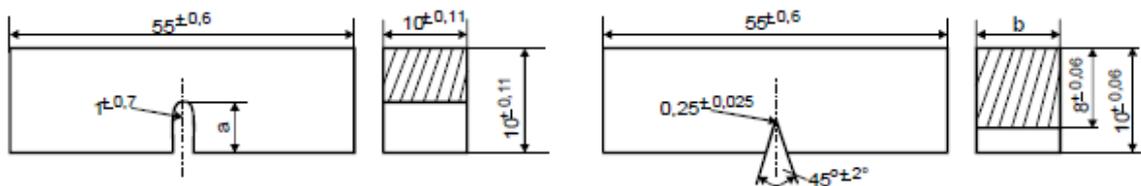
конструкцијама. Зареzi, као што су жлебoви за клинoве на вратилима, навоји у рупама за завртње, неметални укључци у металу, представљају концентратoре напона. Што је оштрији зарез, виши је локални напон на врху зареза, иако је вредност средњег напона мала. Код жилавих материјала (метала), у случају образовања прслине на врху зареза, вероватно неће доћи до њеног проширења, јер ће метал локално пластично попустити или се деформисати, смањујући напон на врху прслине. Код кртог метала, нема пластичног попуштања на врху прслине довољно брзо и она ће наставити да се шири кроз метал, што извесно води до лома.

Узорци од којих се израђују епрувете узимају се са карактеристичних места у материјалу. Правац и њихов смер у односу на правац претходне прераде (обrade) одређен је максималним напрезањем. При изради епрувета посебну пажњу треба обратити на израду зареза, како у погледу толеранције израде, тако и у погледу храпавости (не сме бити никаквих рисева).

Епрувете за испитивање жилавости могу бити стандардне и нестандартне. Стандардне епрувете су квадратног попречног пресека 10×10 mm, дужине 55 mm. На средини епрувете урезује се стандардни зарез (жлеб), који може бити:

- „U“ зарез дубине 5 mm или
- „V“ зарез дубине 2 mm.

На слици 44. приказане су димензије стандардних епрувета са попречним пресеком на месту урезаног зареза.



Слика 44. Изглед и димензије стандардне епрувете за испитивање жилавости

Када се користе нестандартне епрувете са плићим „U“ зарезом, ознака ударног рада лома се допуњава бројем, који представља дубину зареза у mm (нпр. KU3, KU2). У случају, када је дебелина узорка (материјала) мања од 10 mm, користе се нестандартне танке епрувете са „V“ зарезом дубине 5 mm. Тада се ударни рад лома означава са KV5.

б) Машина на којој се изводи испитивање

Машина за испитивање ударне жилавости назива се Шарпијево клатно, које конструктивно представља физичко клатно састављено од тега тежине G на неком растојању од осе обртања, слика 45. Тег има облик ножа, чије стране заклапају угао од 30° а завршен је задебљањем полупречника 2 mm.



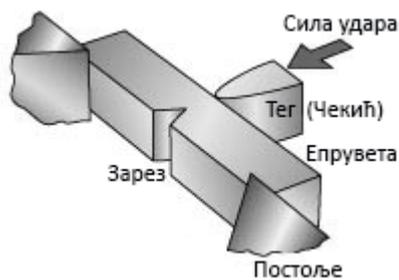
Слика 45. Шематски Шарпијевог клатна

Примери класичне и савремене машине за мерење ударне живавости дати су на слици 46.



Слика 46. Класичне и савремене конструкције Шарпијевог клатна

Извођењем тега у почетни положај (висина h_1) клатно добија почетну енергију од око 300 J ($A_1=300$ J). Епрувета се поставља у равнотежни положај клатна, и то тако да клатно наилази на епрувету са стране супротно од зареза, слика 47.



Слика 47. Положај епрувете на машини за испитивање

Затим се клатно пушта да слободно падне, при чему оно при проласку кроз равнотежни положај удара у епрувету и пролази на другу страну. Клатно пре удара у епрувету има кинетичку енергију вредности A_1 . Енергија коју ће клатно имати после лома епрувете (A_2) је одређена висином h_2 коју клатно достиже са друге стране равнотежног положаја. Та енергија је од почетне енергије A_1 мања за вредност енергије коју је клатно утрошило на

сламање епрувете односно

$$A_0 = A_1 - A_2$$

Приликом практичног извођења испитивања вредност енергије која је утрошена на сламање епрувете (A_0) читава се директно на скали, која се налази на самом уређају за испитивање жилавости. Услови испитивања:

- За испитивање се користе најмање две епрувете од истог материјала;
- Облик и димензије епрувете су прописане стандардом;
- Брзина удара клатна треба да буде 5 - 7 m/s;
- Почетна енергија удара треба да износи око 300 J (за материјал мање жилавости 150 J);
- Када се епрувета стави на постоље машине, оштрица тега клатна треба да је додирује по целој висини (контрола положаја вертикалности);
- При пуштању клатна "на празно" (без епрувете) губици у раду треба да износе мање од 1 %.

ц) Фактори који утичу на вредност жилавости

Будући да вредност жилавости за исти материјал зависи од низа фактора, потребно је приликом испитивања о томе водити рачуна. Најзначајнији фактори који утичу на вредност измерене жилавости су:

1. облик и димензије епрувете односно зареза,
2. претходна технолошка и термичка обрада,
3. температура и
4. брзина удара.

1. Облик и димензије епрувете

На бројну вредност ударне жилавости утичу облик и димензије епрувете, па се резултати добијени са различитим епруветама не упоређују.

Утицај облика зареза на жилавост је значајан, а такође и дубина зареза и величина полупречника заобљења на дну зареза.

Од облика зареза зависи напонско стање у материјалу на месту зареза, као и величина зоне у којој се материјал деформише. При испитивању на епруветама од истог материјала већа вредност жилавости се добија код епрувета са зарезом у облику слова U него код епрувета са зарезом, исте дубине, у облику слова V.

Са смањењем радијуса заобљења смањује се и вредност жилавости, што је нарочито изражено код пластичних материјала, док је код кртих тај утицај веома мали или никакав. Поред тога, повећање дубине зареза изазива пад вредности жилавости код деформабилних материјала.

2. Утицај претходне технолошке и термичке обраде

На ударну жилавост утиче стање и структура материјала, а оне су последица претходне технолошке (ливење, стругање, деформисање итд.) и термичке (жарење, каљење,...) обраде.

На смањење ударне жилавости утичу разне груписане примесе и нечистоће при ливењу, а такође и појава неједнородности структуре, пора, мехурића, напрлина и слично. Обрада деформисањем у топлом стању (ковање), где долази до уситњавања структуре, као и видови термичке обраде који доводе до хомогенизације структуре и уситњавања зрна (жарење, побољшање и др.) повећавају вредност ударне жилавости.

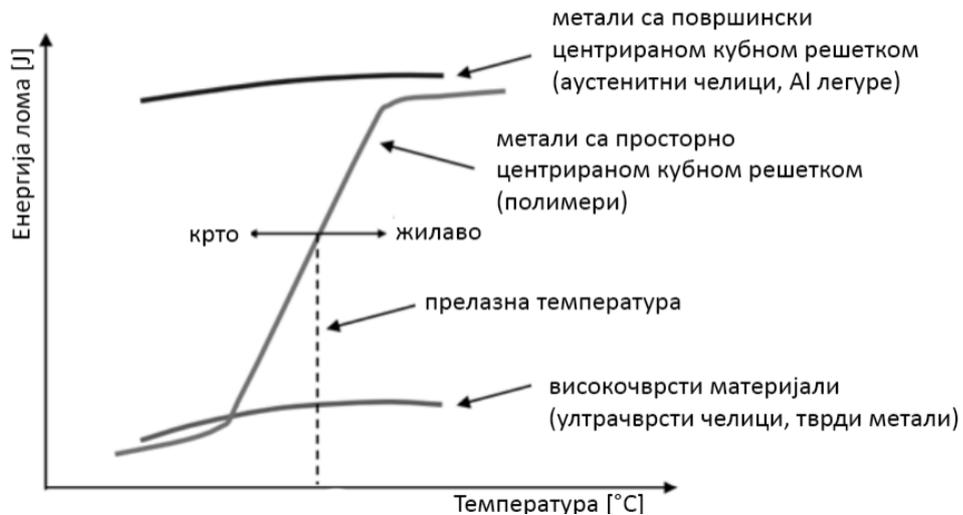
3. Утицај температуре

Резултати испитивања ударне жилавости на различитим температурама показују да температура битно утиче на вредност ударне жилавости метала и легура. Познато је да се у условима ниских температура, лакше ломе машине и конструкције, што је последица опадања пластичних својства и жилавости са снижењем температуре. С друге стране, на високим температурама метални материјали показују својство пластичности. Тако се након испитивања жилавости на повишеној температури на епрувети уочава јако изражена деформација на месту удара (лома), а површина прелома има ситнозрнату (влакнасту) структуру. Како на ниским температурама материјали постају крти, након лома епрувете на сниженој температури не уочавају се знаци деформације на месту лома, а површина прелома има кристалну крупнозрнату структуру (слика 48).



Слика 48. Изглед жилавог и кртог лома епрувете

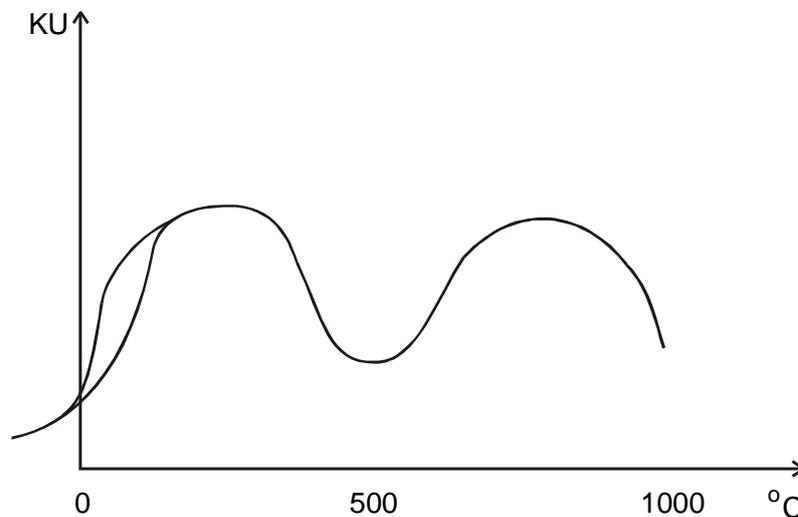
Температура на којој материјал из пластичног прелази у крти лом назива се прелазна температура. За одређивање прелазне температуре користе се стандардне Шарпијеве епрувете са „V“ зарезом. Прелазна температура се не може одредити за све материјале. Наиме, метали са површински центрираном кубном решетком (легура бакра и алуминијума, аустенитни челици) задржавају пластичност чак и на веома ниским температурама. Међутим, метали са запремински центрираном кубном и густо пакованом хексагоналном решетком (челик, магнезијум, цинк и његове легуре и др.) прелазе из пластичног у крти лом са опадањем температуре, слика 49. Прелазна температура зависи од много фактора, а неки од њих су хемијски састав, микроструктура, величина кристала зрна, хrapавост површине, облик и дубина зареза.



Слика 49. Утицај температуре на жилавост у зависности од типа кристалне решетке

Утицај температуре на вредност жилавости челика види се са криве на слици 50. На дијаграму се могу уочити три минимума (карактеристична пада жилавости) и то:

- при температурама испод $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ када настаје хладни лом,
- при температури $450\text{-}550\text{ }^{\circ}\text{C}$ када се јавља топли лом (плава ломкост) и
- при температурама од $800\text{-}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ када се јавља лом у црвеном усијању, или црвена ломкост.



Слика 50. Промена вредности жилавости челика у зависности од температуре

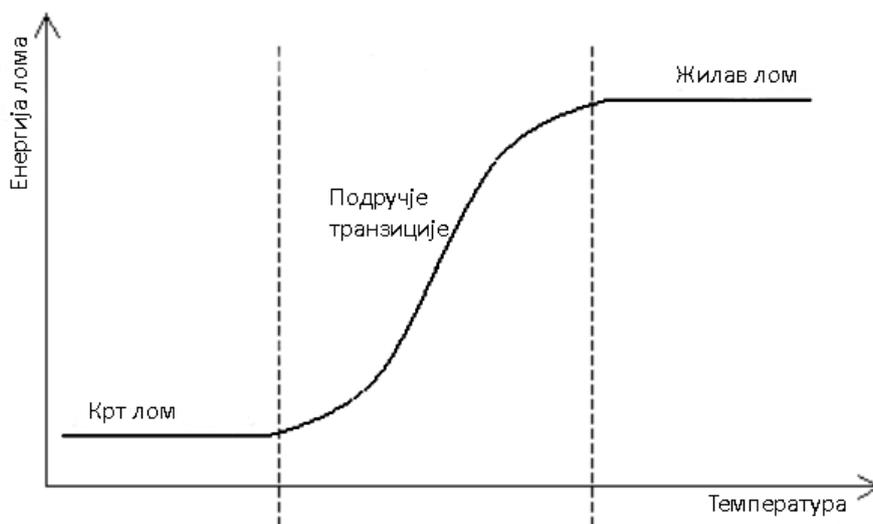
4. Утицај брзине удара

Брзина удара која се остварује код испитивања на Шарпијевом клатну износи $5\text{-}7\text{ m/s}$. Повећањем брзине удара не долази до значајног опадања вредности жилавости, све до достизања брзине од преко 50 m/s , када долази до наглог пада жилавости материјала и појаве кртог лома.

8. ИСПИТИВАЊЕ ЖИЛАВОСТИ НА СНИЖЕНИМ ТЕМПЕРАТУРАМА

Позната је чињеница, да са снижењем температуре чврстоћа метала расте, а способност деформисања (живавост) опада. Код неких метала живавост опада постепено до одређене температуре, а затим нагло опада. Температура при којој настаје нагло смањење способности деформисања односно живавости, назива се критичном температуром или температуром кртог лома.

Код угљеничних челика, са снижавањем температуре, живавост нагло пада у уском температурном интервалу. На кривој се уочава превојна тачка која одређује прелазну температуру, као границу живавог и кртог лома, слика 51.



Слика 51. Зависност живавости челика од температуре – прелазна област

Појам и врсте лома

Лом настаје као последица стварања и ширења прслине у оптерећеном пресеку материјала. Метални материјали се ломе на различите начине, зависно од врсте и стања метала и легура, температуре, брзине оптерећења, напонског стања, радне средине и др. Разликују се два основна облика лома: крти и жилави (дуктилни) лом.

Кртом лому предходи веома низак степен пластичне деформације, као и низак ниво апсорбоване енергије пре лома (мала живавост). Лом се дешава веома брзо и при ниском нивоу утрошене енергије. Настала прслина се брзо шири и без повећања напона. Површина лома је макроскопски равна, управна на осу епрувете и нема видљиве пластичне деформације. Структура прелома је зрнаста (грануларна) или кристаласта са великим бројем равних пљосни које рефлектују светлост.

Жилав лом има преломне површине са јасно видљивом пластичном деформацијом. Површина лома је неравна, ситнозрнаста и влакнаста. Дуктилна прслина расте споро, а са повећањем степена деформације, прслина расте према крајевима епрувете.

На величину енергије удара значајно утиче ниска температура. На ниским температурама долази до изразитог смањења енергије удара, на шта су посебно осетљиви метали са

запремински центрираном кубном и густо пакованом хексагоналном решетком (конструкциони челик, магнезијум, цинк и његове легуре и др.). Код њих са јавља прелаз из пластичног у крти лом са опадањем температуре. Због тога је посебно важно одредити понашање материјала при дејству ударног оптерећења на ниским температурама.

Прелазна (транзитна) температура

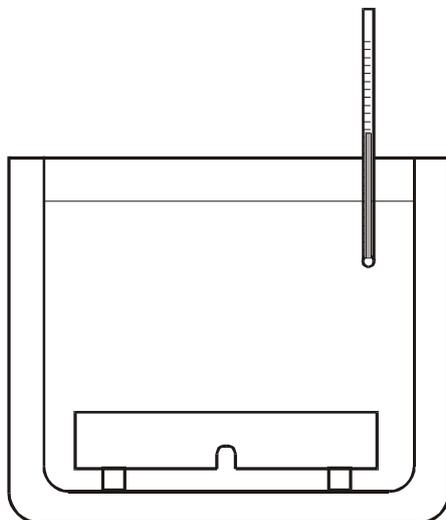
Испитивање жилавости на сниженој температури се обавља на исти начин као и испитивање жилавости на собној температури, али се епрувете претходно хладе до одговарајуће температуре. Циљ испитивања жилавости на сниженим температурама је утврђивање зависности жилавости од температуре и дефинисање температуре наглог пада жилавости тј. **прелазне (транзитне) температуре.**

За температуре до -80°C потребан је суви лед (односно чврсти CO_2). Он се у лабораторијским условима добија експанзијом гаса угљен-диоксида (CO_2) из челичних боца под притиском, слика 52.



Слика 52. Апаратура и поступак хлађења епрувете за испитивање жилавости помоћу сувог леда

Додавањем потребне количине сувог леда средству за хлађење (ацетон, алкохол, бензин или друго једињење са ниском тачком мржњења), које се налази у криостату (слика 53), врши се корекција или одржавање температуре. Ниске температуре до -120°C се мере термометрима, а за мерење нижих температура користе се термопарови.



Слика 53. Шематски приказ епрувете у криостату са термометром

Услови испитивања:

- Епрувета се држи у течности за хлађење 5, 15 или 30 минута, тако да температура буде уједначена по целом попречном пресеку;
- Епрувета се мора изнети из течности за хлађење и поломити у року од 5 секунди;
- Температура течности се мери са прецизношћу од 2°C ;
- Остали услови испитивања су исти као на собној температури.

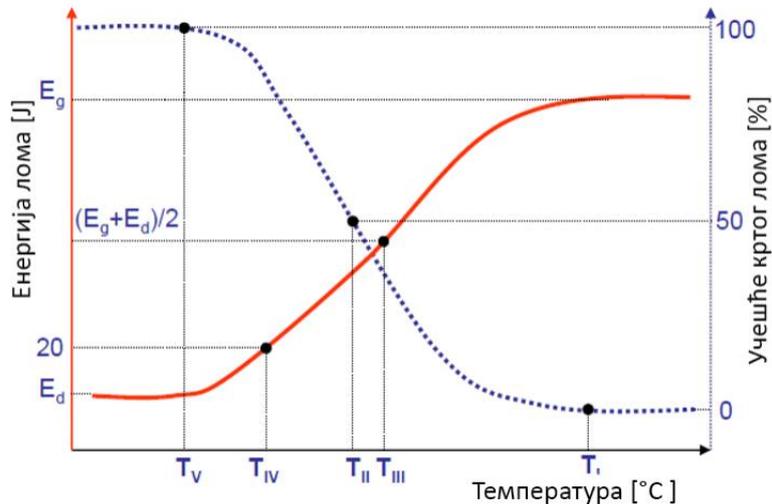
За испитивање на врло ниским температурама, од око -100°C до близу апсолутне нуле (око 1°K), хлађење епрувета се обавља у специјалним уређајима-криостатима који могу бити различитих конструкција, али је готово увек у њиховом саставу тзв. Дјуаров суд (енгл. *Dewar vessel*). Дјуаров суд је добро изолована посуда (најчешће високим вакуумом) у којој се налази оговарајући гас у течном стању (ваздух, кисеоник, водоник, азот или хелијум).

За испитивање на температурама од 0 до -80°C најчешће није потребно имати специјалне уређаје, већ само одговарајућу керамичку посуду са алкохолним термометром. У посуду треба сипати течност или смешу за постизање захтеване температуре и то: за 0°C смешу воде и леда (1:1), до -12°C смешу воде, леда и кухињске соли (NaCl), до -80°C смешу ацетона или метил алкохола са угљен-диоксидом у чврстом стању (тзв. „сувим ледом“). Угљен-диоксид у чврстом стању добија се наглом експанзијом гаса у затворен простор (најчешће врећа од јеленске коже или нека посуда).

Услови испитивања у конкретном примеру предвиђају да се епрувета хлади 5-30 минута и брзо постави на ослонце Шарпијевог клатна (временски интервал од вађења из расхладне течности до лома на клатну највише 5 секунди). Због нагле промене температуре при преносу епрувете, обично се она охлади на $3-6^{\circ}\text{C}$ нижу температуру од испитне. Када се захтевају веома тачна

испитивања, промене температуре при преносу епрувете се мери уз помоћ термпарова и посебне апаратуре.

Испитивање жилавости на ниским температурама треба да обухвати следеће температуре: 20°C, 0°C, -10°C, -20°C, -30°C, -40°C, -50°C и -60°C. За сваку температуру одређује се параметар жилавости, а затим формира дијаграм зависности жилавости од температуре. На дијаграму се дефинишу превојне тачке и очитавју карактеристичне температура за пад жилавости, слика 54 .



Слика 54. Дијаграм карактеристичних температура код пада жилавости

Карактеристичне температура које се очитавју са дијаграма добијеног на основу лабораторијских испитивања код одређивања прелазне (транзитне) температуре су:

T_I - прелазна температура потпуне жилавости - температура при којој се потпуно жилави лом први пут трансформише у мешовити.

T_{II} - прелазна температура 50% жилави - 50% крти лом – температура при којој жилави и крти лом учествују са по 50% и одређује се на основу процентуалног учешћа ломова.

T_{III} - прелазна температура 50% апсорбоване енергије - температура при којој је апсорбована енергија једнака аритметичкој средини енергије доњег и горњег прага.

T_{IV} - прелазна температура 20 J – температура при којој је апсорбована енергија од 20 J.

T_V - прелазна температура нулте жилавости - температура при којој се мешовити лом први пут трансформише у потпуно крти лом.

Пример кртог и жилавог лома дат је на слици 48.

РАДНИ ЛИСТ

ВЕЖБА БР. 7 и 8: ИСПИТИВАЊЕ ЖИЛАВОСТИ НА СОБНОЈ И СНИЖЕНИМ ТЕМПЕРАТУРАМА

Име и презиме: _____, бр. индекса: _____

1. Дефинисати ударну жилавост?
2. Навести машину на којој се испитује жилавост и поступак испитивања
3. Скицирати стандардне типове епрувета за испитивање жилавости
4. Навести услове испитивања жилавости
5. Написати ознаку, образац и јединицу за жилавост

10. Каква врста лома се јавља на ниским температурама. Објаснити карактеристике таквог лома.

РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА И ЗАДАТАК ПРАКТИЧНОГ ДЕЛА ВЕЖБЕ

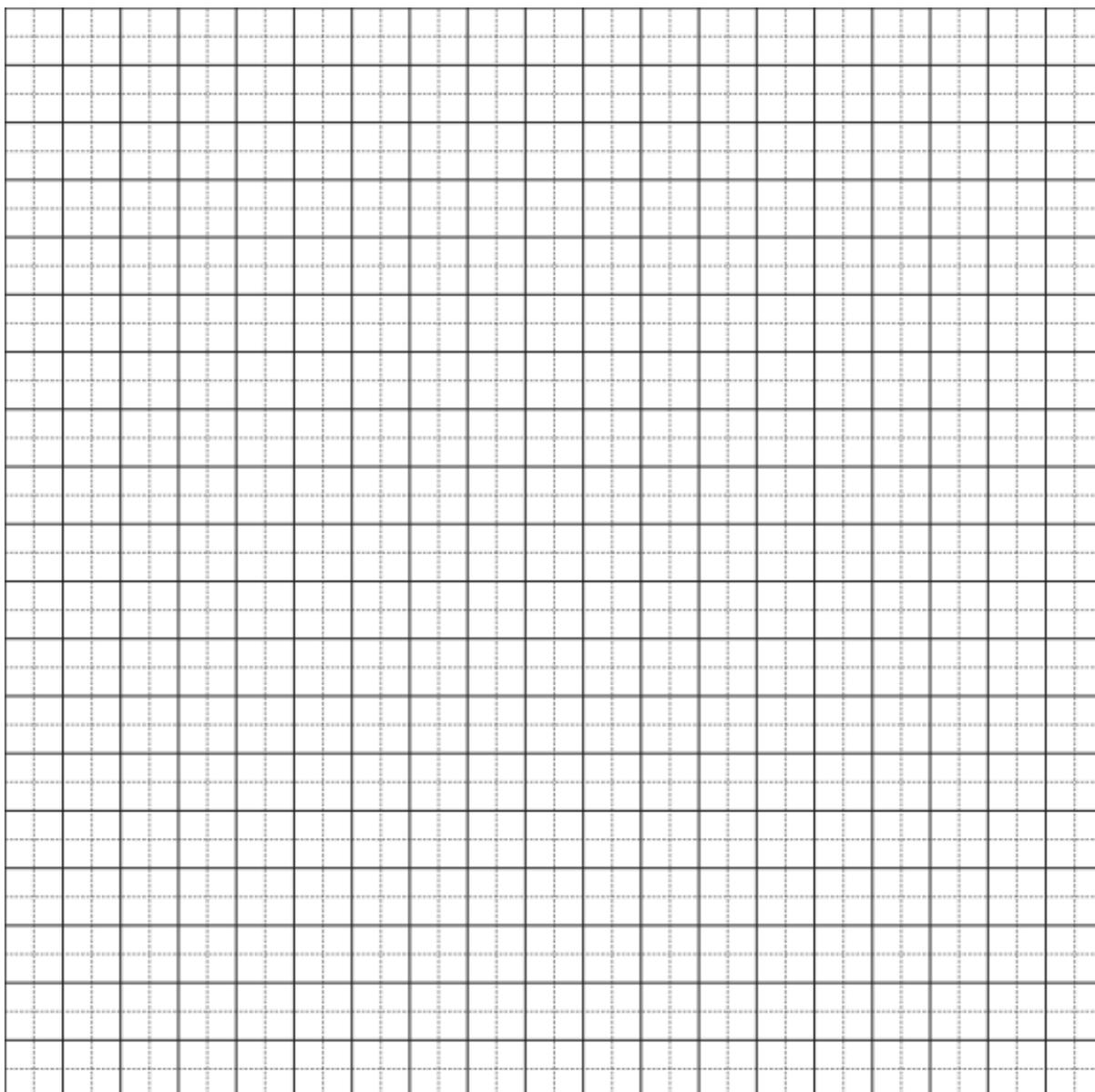
Име и презиме: _____, бр. индекса: _____

1. Материјал:
2. Скицирати епрувету за испитивање жилавости са свим димензијама
3. Унети одговарајуће податке и резултате испитивања у табелу

Облик и димензије зареза									
Температура [°C]									
Утрошени рад [J]									

4. Написати образац и израчунати вредност жилавости на собној температури
5. Написати образац и израчунати вредност жилавости на температури _____

6. Нацртати дијаграм зависности параметра жилавости од температуре:



11. Написати стандардну ознаку испитивања жилавости у конкретном случају

9. ТЕХНОЛОШКА ИСПИТИВАЊА

Технолошким испитивањима се одређују тзв. технолошка својства материјала. Циљ технолошких испитивања материјала је да се установи у којој је мери и под којим условима одређени материјал погодан за одређену врсту машинске (технолошке) обраде.

Технолошка испитивања су најстарија испитивања својстава материјала, а сами поступци испитивања су, углавном, једноставни. Данас за већину поступака постоје прописи и стандарди који тачно дефинишу услове испитивања, као и услове које поједини стандардизовани производи треба да испуне. Како су технологије и методе машинске обраде многобројне и суштински разнолике, то су и методе и поступци технолошких испитивања веома различити и многобројни. Међутим, свима им је заједничко то, да услови испитивања буду што приближнији самом поступку обраде.

За разлику од механичких својстава, технолошка својства су упоредне величине, тј. упоређују се резултате испитивања различитих материјала да би се утврдило који од њих је погоднији за конкретну машинску обраду.

Технолошка испитивања могу имати за циљ:

- a. проверу технолошког квалитета материјала, тј. да ли се он може деформисати до прописаних (дозвољених) вредности и
- b. одређивање максималне технолошке могућности одређеног материјала.

Зависно од температуре на којој се изводе испитивања, све методе и поступци технолошких испитивања деле се у две групе:

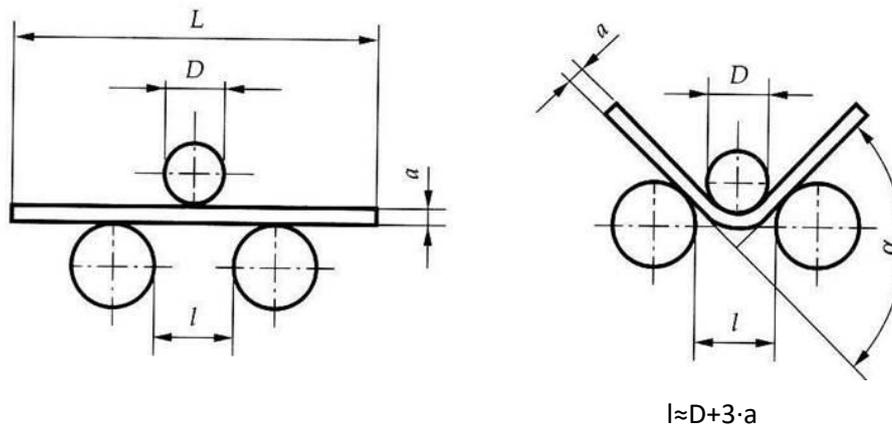
- Технолошка испитивања на собној температури, као што су:
 - испитивање савијањем,
 - испитивање дубоким извлачењем,
 - испитивање лимова и жица наизменичним превијањем,
 - испитивање сабијањем,
 - испитивање цеви,
 - испитивање раскивањем ...
- Технолошка испитивања на повишеним температурама, као што су:
 - испитивање сабијањем,
 - испитивање савијањем,
 - испитивање пробијањем и др.

1. Испитивање савијањем

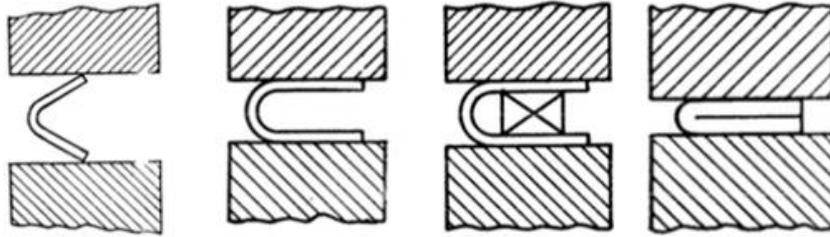
Ово испитивање има за циљ да се установи способност материјала за обраду савијањем у хладном стању. Испитивање се изводи на епруветама, најчешће правоугаоног попречног пресека, чије се димензије према врсти полуфабриката могу наћи у одговарајућим табелама.

На слици 55 приказан је поступак испитивања. Епрувета се поставља на два ослонца и врши се савијање ваљкастим притискачем пречника D , све док оба крака епрувете не достигну прописани угао, или до појаве прве прскотине дужине најмање 2 mm. У том тренутку испитивање се прекида, а резултат испитивања је угао (α), који је мера способности материјала на савијање.

Прскотина се јавља са доње стране (супротно од стране са које делује притискивач), јер на тој страни делују напони затезања. Ако се прскотина не појави наставља се савијање преко одговарајућег уметка, или без њега, док кракови епрувете не буду међусобно паралелни. За мање вредности угла α савијање се изводи у једној фази. Ако се на тај начин епрувета не може савијати до жељеног угла, савијање се наставља директним притискивањем кракова епрувете на преси до прописаног угла. Ако је потребно, може се употребити уметак одговарајуће дебљине, слика 56.



Слика 55. Поступак испитивања савијањем



Слика 56 Друга фаза савијања са и без уметка

Упоређењем вредности измерених углова савијања пре појаве прскотине добијених испитивањем већег броја идентичних епрувета од различитих материјала процењује се који је од испитиваних материјала погоднији за обраду савијањем.

2. Испитивање дубоким извлачењем - Ериксенов поступак

Поступак обраде материјала дубоким извлачењем подразумева израду шупљих просторних тела, добијених из равне табле лима, као што су чауре, кухињско посуђе, делови каросерије аутомобила и сл.

Циљ ових испитивања је да се установи погодност неког материјала за ову врсту обраде, тј. установи његова способност да поднесе одређени степен деформације. Данас постоји већи број поступака испитивања својстава материјала за ову врсту машинске обраде, као што су АЕГ-поступак, Фуки-ев, Ериксенов поступак и др.

Ериксенов поступак

Овим поступком изводи се испитивање лимова и трака дебљине од 0,2 до 2,0 mm. За испитивање служи уређај приказан на слици 57.

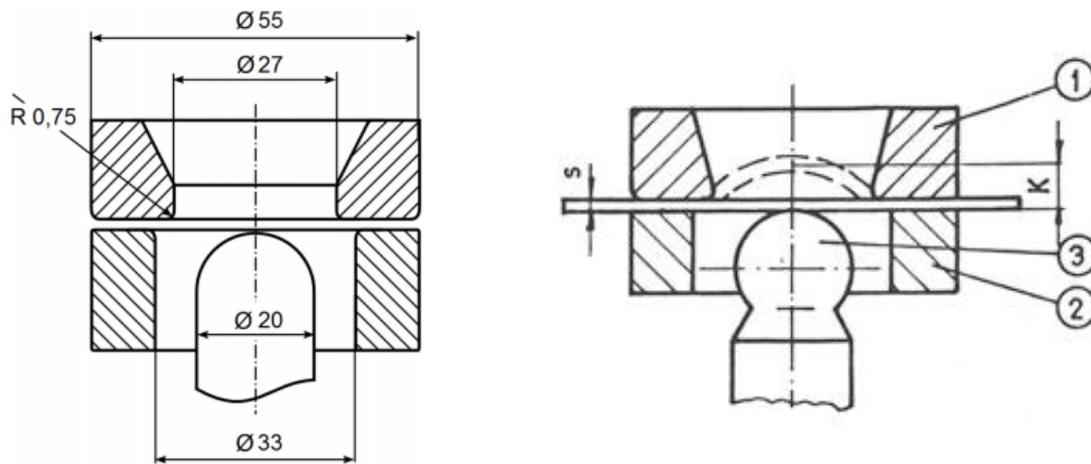


Слика 57. Варијанте уређаја за испитивање дубоким извлачењем по Ериксену

Епрувета на којој се изводи испитивање треба имати облик квадратне плоче димензија 70x90 mm, кружне плоча пречника 90 mm или траке лима ширине 90 mm.

Поступак испитивања

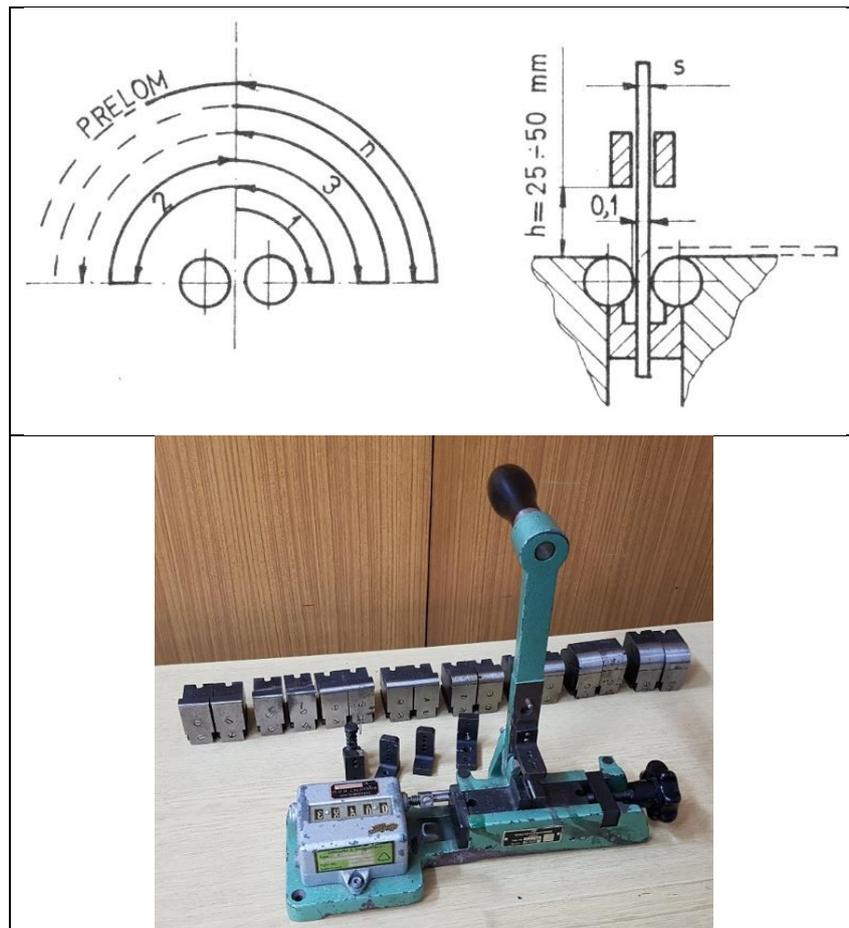
Површина епрувете и утискивача се премажу графитном машћу. Епрувета се најпре стегне између прстена за извлачење (сл.58. поз. 1) и држача лима (поз. 2) силом од 10 kN. Потом се утискивачем (поз. 3) испитивани материјал (лим) дубоко извлачи све до појаве прскотине дуж целе дебљине лима (кроз прскотину може да прође светлост). Извлачење се обавља малом брзином (5-20 mm/min), с тим, што се брзина утискивача смањује при крају испитивања, да би се тачније одредио тренутак настанка пукотине. Тренутак појаве пукотине праћен је падом силе. Тада се утискивање прекида, а затим читава дубина продора утискивача тј. висина калоте (K) која представља меру подобности материјала за обраду дубоким извлачењем.



Слика 58. Поступак испитивања дубоким извлачењем

3. Испитивање жица и лимова наизменичним превијањем

Испитивање се изводи помоћу уређаја приказаног на слици 59. Оно се састоји у наизменичном превијању преко ваљака одређеног полупречника основе R (препоруче дате у одговарајућим стандардима), наизменично на једну и другу страну, све до лома епрувете или до прописаног броја превоја. Број превијања до прелома (узима се цео број, тј. не рачуна се непотпуно-последње превијање) представља критеријум за оцењивање способности материјала. Епрувете су правоугаоног облика ширине 15-20 mm или узроци жица дебљине од најмање 0.3 mm.



Слика 59. Поступак испитивања наизменичним превијањем и уређај за наизменично превијање

Услови испитивања

- Испитивање се уобичајено изводи на собној температури 23 ± 5 °C;
- Оса епрувете мора бити нормална на раван у којој леже осе ваљака;
- Осе ваљака морају бити међусобно паралелне и нормалне на раван у којој се изводи превијање;
- Између епрувете и сваког ваљка мора постојати зазор не већи од 0,1 mm, мерено у равни превијања;
- Радијуси кривина ваљака (R) су стандардизовани и износе: 2,5; 5,0; 7,5; 10; 15 и 20 mm, али могу имати и друге вредности које се могу наћи у одговарајућим стандардима;
- Одстојање h зависи од дебљине епрувете и креће од 25 до 50 mm за епрувете пречника до 2,5 mm и од 50 до 75 mm за епрувете пречника изнад 2,5 mm (таб. 8);
- Узорак тј жица се једним крајем причврсти у стезач уређаја, тако да се приликом испитивања не помера, а други се крај ставља у вођицу;
- Превијање треба изводити брзином до једног превијања у секунди.

Табела 8. Препоруке за избор R | h

Дебљина жице d_0 (mm)	Ридијус заобљења R (mm)	Одстојање h (mm)	Дужина епрувете L (mm)
0,3 – 0,5	1,25	25 - 50	≈ 50
0,5 - 0,7	1,75		
0,7 - 1,0	2,5	50 - 75	
1,0 - 1,5	3,75		
1,5 - 2,0	5		
2,0 - 3,0	7,5		
3,0 - 4,0	10		
4,0 - 6,0	15		
6,0 - 8,0	20		

5. Испитивање наизменичним превијањем (скицирати и објаснити)

РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА И ЗАДАТАК ПРАКТИЧНОГ ДЕЛА ВЕЖБЕ

Име и презиме: _____, бр. индекса: _____

1. Испитивање савијањем

Материјал: _____

Почетне димензије епрувете: _____

- I. Скицирати поступак испитивања савијањем. Унети димензије епрувете и пречнике ослонаца, ваљка за савијање и растојање између ослонаца.

- II. Унети измерену вредност величине која је мера технологичности при испитивању савијањем.

2. Испитивање дубоким извлачењем

Материјал: _____

Почетне димензије епрувете: _____

- III. Скицирати Ериксонов поступак. Унети димензије епрувете и величину која је меродавна за испитивање технологичности материјала дубоким извлачењем.

3. Испитивање жица наизменичним превијањем

Материјал 1: _____

Материјал 2 _____

Почетне димензије жице 1: _____

Почетне димензије жице 2: _____

IV. Скицирати поступак за наизменично превијање жица.

V. Унети вредности величина које су меродавне за меру технологичности код наизменичног превијања жица.

Материјал 1

Материјал 2

VI. Упоредити испитиване материјале са аспекта технологичности на основу добијених вредности (дати закључак)

10. ИСПИТИВАЊА БЕЗ РАЗАРАЊА

Наука која се бави откривањем грешака (дефеката) у материјалу, методама испитивања без разарања материјала назива се дефектоскопија. Материјал који се испитује помоћу ових метода не трпи никакво разарање, па се дефектоскопија може придружити технолошком процесу производње, као завршна фаза контроле готових производа или полупроизвода. Дефектоскопијом се могу открити скоро све грешке настале у поступку производње или обраде материјала.

Испитивања без разарања представљају скуп метода, утемељених на принципима, појавама и законима физике, за утврђивање својстава материјала и откривање различитих грешака у њему, без утицаја на функционалност испитиваног материјала. Њихова основна примена усмерена је на откривање евентуалних грешака у материјалу и готовим деловима, које могу настати као последица производње (ливење, ваљање, заваривање и сл.), машинске обраде или експлоатације већ направљених елемената. Поред основне намене, испитивања без разарања се подједнако успешно користе и за одређивање неприступачних димензија и дебљине материјала на местима где се то не може другачије урадити (оплате бродова, затворених сандучастих конструкција, судова, боца и сл.).

Примена метода испитивања без разарања је нарочито погодна за проверу квалитета и настанак унутрашњих грешака у првим фазама израде скупих и одговорних делова, као што су велики одливци или отковци, одговорни заварени спојеви и слично, чиме се постиже одбацивање неисправних делова још у првим фазама њихове израде и избегавање стварања даљих трошкова.

У савременој дефектоскопији најчешће се примењују следеће методе (поступци):

1. визуелна контрола,
2. димензиона контрола,
3. испитивање прозрачивањем X и γ зрацима (радиографија),
4. ултразвучно испитивање,
5. магнетна испитивања,
6. испитивања помоћу пенетраната и др.

1. Визуелна контрола

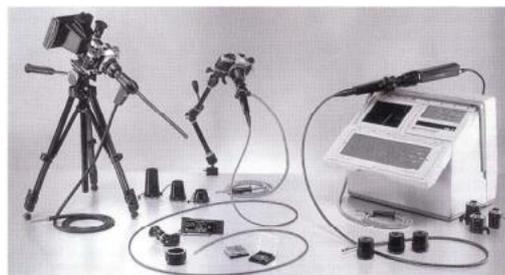
Визуелна контрола или оптичко испитивање служи за откривање низа површинских грешака типа корозија, контаминација, квалитет завршне обраде површине, површинске грешке спојева (завара, заптивки и сл.). Код заварених спојева, пре било које друге методе контроле, спроводи се визуелна контрола. Ова метода је јефтина и брза, а може пружити веома корисне информације, како о квалитету површине посматраног материјала и заварених спојева, тако и о потреби контроле неком другом методом.

Може се спроводити са или без помоћних уређаја. Поред испитивања посматрањем „голим оком“ користе се разна помагала и уређаји, који омогућавају посредно визуелно испитивање скривених или неприступачних површина, као и специјалне камере за сликање, снимање и увећање слике.

Приликом визуелне контроле користе се следећа помагала и уређаји: вештачки извори светлости, лупе, огледала, бороскоп, флексибилни фиберскоп, видеоскоп, оптички микроскопи и профилни пројектори (слика 60 и 61). Вештачки извори светлости користе се када природно осветљење не даје довољну количину светлости. Лупе су пластична или стаклена сабирна сочива, која служе за увећање слике површине посматраног простора. Огледала су глатке полиране рефлектујуће површине које служе за репродукцију слике са површина које није могуће видети директним погледом. Бороскоп је оптички уређај који се користи за визуелно испитивање неприступачних површина, цевовода, унутрашњости посуда и других неприступачних простора радних машина и постројења. Флексибилни фиберскоп је савитљив уређај који се састоји од влакна за осветљење (пречника 30 μm), влакна за слику (пречника 6-17 μm), сочива објектива, променљивих кућишта објектива за испитивање, окулара и команди за управљање фибероскопом на даљину. Видеоскоп (за ендоскопску контролу) је фиберскоп који уместо окулара има камеру, која слику преноси на монитор. Оптички микроскоп са увећањем 5-500 пута се користи за визуелну контролу. Профилни пројектор служи за проверу тачности малих и сложених облика производа (у алатницама за израду профилних ножева).



Слика 60. Помагала и уређаји за визуелну контролу (лупе, микроскопи, стаклени лењери, стерео микроскопи, видео микроскопи, ендоскопи, профилни пројектори)



Слика 61. Уређаји за преглед неприступачних површина (бороскоп, фиброскоп, видеоскоп)

2. Димензиона контрола

Димензиона контрола служи за утврђивање геометријске тачности облика и димензија полупроизвода, неких позиција, израдака и заварених спојева. За димензиону контролу користе се стандардни и специјални мерни уређаји. Према конструкцији, могу бити аналогни или дигитални, контактни или бесконтактни. Најчешће се користе следећи мерни уређаји: мерни лењири, траке и летве, универзална помична мерила, микрометри и компаратери (мерни сатови са кружном скалом), угломери, шаблони, шестари либеле, ласерски мерни инструменти, инструменти за мерење храпавости површина, профилни пројектори и микроскопи итд.

3. Испитивање прозрачивањем X и γ зрацима (радиографија)

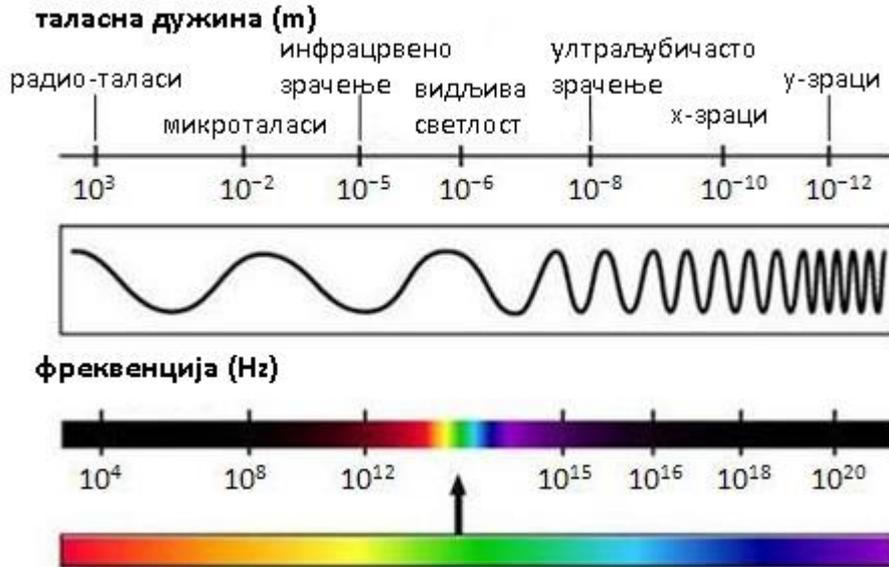
Радиографска испитивања изводе се прозрачивањем материјала рентгенским (X) и гама (γ) зрацима. Испитивање прозрачивањем заснива се на способности пролажења рентгенских зрака кроз метал и при томе њиховој, мањој или већој апсорбцији. Ови зраци бивају мање апсорбовани при проласку кроз лункере (непожељне шупљине у металном одливку) и друге грешке у маси материјала, него при пролазу кроз неоштећен хомоген материјал, што се региструје, а на основу тога доноси закључак о постојању дефеката.

Основне карактеристике X и γ зрака:

- крећу се праволинијски као светлосни зраци,
- не могу се скретати помоћу оптичких инструмената,
- пролазе кроз све материјале,
- при проласку кроз материјал бивају апсорбовани у мањој или већој мери, зависно од њихове таласне дужине, густине и дебљине материјала и др.
- делују на фото-емулзију као светлост,
- јонизују материју кроз коју пролазе,
- радиоактивни су и невидљиви,
- имају штетно дејство на живе ћелије.

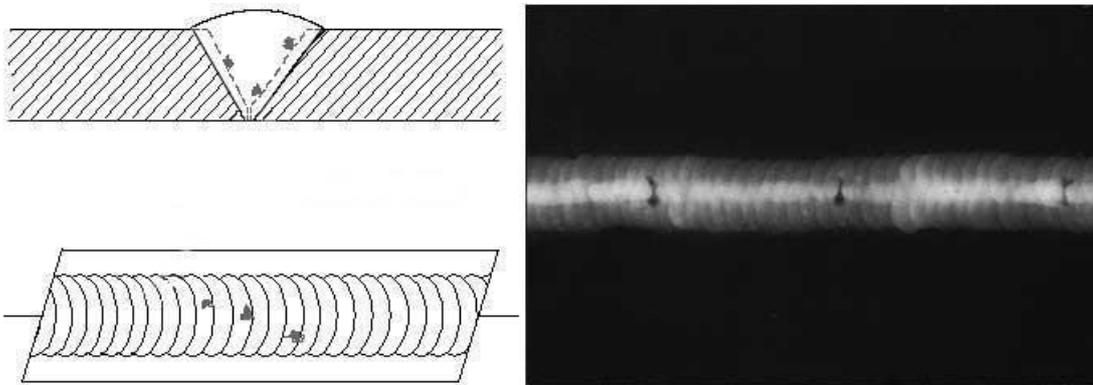
3.1 Испитивање прозрачивањем рентгенским зрацима

Wilhelm Conrad Röntgen открио је ове зраке 1895. године и назвао их X зраци. То су електромагнетни таласи који се по својој природи не разликују од видљиве светлости или радио таласа, једино им је таласна дужина значајно краћа (10^{-8} - 10^{-11} cm), слика 62.



Слика 62. Електромагнетни спектар зрачења

Испитивање рентгенским зрацима заснива се на способности пролажења рентгенских зрака кроз метал и при томе њиховој, мањој или већој апсорбцији. Ови зраци бивају мање апсорбовани при проласку кроз шупљине, лункере и друге грешке у маси материјала, него при пролазу кроз неоштећен хомоген материјал, што се на фотоснимку или екрану види као мање или веће зацрњење, слика 63.



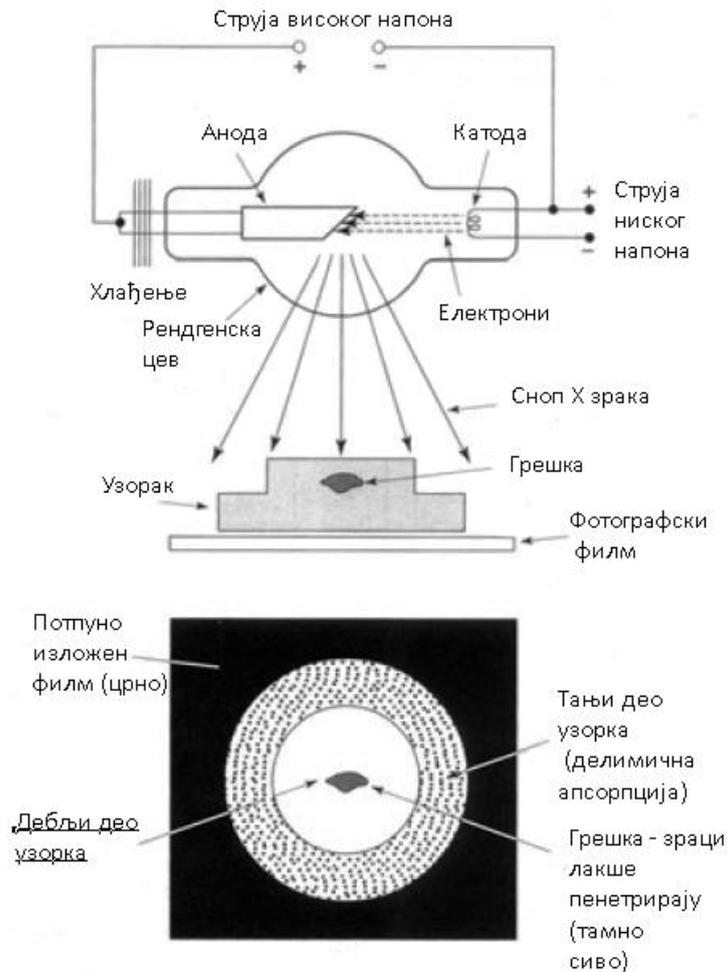
Слика 63. Изглед фотоснимка завара са дефектом

У циљу добијања фотоснимка (радиограма) испитивани комад се ставља између извора зрачења, тј. рентгенске цеви и касете са филмом на што мањем растојању (слика 64). Грешка у материјалу се региструје визуелним посматрањем на екрану или на снимку.

Овом методом могуће је детектовати макроскопске грешке као што су лункери, гасни мехури, троска, неметални укључци, пукотине, сегрегације, разлике у дебљинама зида делова и сл. Основни разлози због којих се ова метода све више користи у индустријској дефектоскопији су:

- могућност откривања веома малих грешака,
- геометријска тачност слике,
- добијање трајног документа о квалитету,
- једноставна интерпретација налаза.

Као извор X зрака користи се Рентгенска цев, која је састављена од стаклене цеви у којој влада вакуум и у којој су смештене катода (волфрамова нит) и анода (плочица од бакра). Зраци настају као последица електричног пражњења, јер су катода и анода повезане на високи напон, чија вредност може да се мења. Подешавањем напона (потенцијалне разлике) између катоде и аноде може се постићи регулација таласне дужине X зрака, а самим тим њихов интензитет и могућност продирања, слика 64.



Слика 64. Испитивање прозрачивањем помоћу Рентгенских зрака

Рентгенски зраци који се користе у техници испитивања добијају се под напонима убрзања до 400 kV. Они су у подручју електромагнетног зрачења са таласним дужинама између 0,01 и 10 nm, што приближно одговара подручју између ултравиолетног и гама зрачења.

3.2 Испитивање прозрачивањем гама зрацима

Принцип испитивања прозрачивањем гама зрацима је исти као и при испитивању рентгенским зрацима. Гама зрачење, за разлику од рентгенског, настаје спонтаном радијационом емисијом радиоактивних елемената или њихових изотопа. У новије време се за дефектоскопију примењују само вештачки изотопи због погоднијих својстава. И једни и други емитују гама зраке одређене и сталне таласне дужине, која је карактеристична за сваки радиоактивни елемент.

Захваљујући малој таласној дужини и високој фреквенци, радиоактивни зраци имају својство да продиру кроз све материјале у знатно већој мери од рентгенских зрака. За испитивање гама зрацима користе се изотопи приказани у табели 9.

Табела 9. Радиоактивни изотопи и њихова својства

Редни број	Врста изотопа	Таласна дужина	Енергија зрачења (meV)	Полувреме распадања	Величина (mm)	Aktivitet (U Ci)	Област примене - mm челика
1	Иридијум 192	Дуга	0,296 0,468	74 дана	1x1	7	10-60
					2x2	30	
					4x4	-	
2	Тулијум 170	Веома дуга	0,084	127 дана	2x2	15	3-13
					4x4	-	
3	Кобалт 60	Кратка	1,170 1,330	53 год.	2x2	5	40-150
					4x4	30	
					6x6	-	
4	Цезијум 137	Средња	0,663	30 год.	2x2	-	20-75
					4x4	-	
					6x6	10	

Да би се могли користити, радиоактивни изотопи се смештају у посебним уређајима – дефектоскопима, слика 65.



Слика 65. Дефектоскоп

Основна функција дефектоскопа је да омогући почетак и прекид прозрачивања, постављање извора зрачења у жељени положај у односу на предмет који се испитује и да заштити људе од радиоактивног зрачења. Сама техника регистрације гама зрака је иста као и код примене X зрака.

Материјали са малом атомском масом врло добро пропуштају гама зраке, док их материјали са великим атомским масама апсорбују у много већој мери. Зацрњење негатива радиограма на местима прозрачивања зависи од односа јачине снопа зрачења после пролаза гама зрака кроз материјал, тј. од степена апсорпције кроз материјал. Свака нехомогеност у материјалу појављује се на снимку као различита густина зацрњења. Гамаграфска испитивања се могу изводити појединачно или панорамским прозрачивањем више узорака гама зрацима.

Испитивање гама зрацима је једноставније од рентгенског, јер је уређај (дефектоскоп)

једноставан, мали и преносан. При избору извора гама зрачења треба водити рачуна о врсти и дебљини узорка, времену полураспада изотопа, расположивој активности и димензијама радиоактивних извора. За време испитивања, радиоактивни извор се поставља у носач изотопа, а након испитивања, радиоактивни извор се ставља у бункере, који су посебно заштићени.

Предности гамаграфске методе испитивања би биле:

- Уређаји за испитивање (дефектоскопи) су лакши, преносиви и мање осетљиви на начин руковања и превоза, а практично не могу да се покваре;
- Рад са изотопима не захтева извор електричне енергије, мерне инструменте и трансформаторе;
- Димензије гама радиоактивног извора су врло мале, тако да могу прозирати и врло уске, рентгенској цеви неприступачне узорке;
- Гама зрачењем могуће је прозирати машинске делове и конструкције веће дебљине него рентгенским зрачењем.

Недостаци гамаграфске методе у односу на рендгенографску су:

- Контрасти на гама радиограму су слабији него на рентгенограму;
- Радиоактивни изотоп стално емитује зраке и представља опасност за околину;
- Прозирање код радиоактивних изотопа прилично дуго траје, тако да је оператер дуже време изложен јонизујућем зрачењу;
- Треба имати неколико извора гама зрака, да би се у конкретном тренутку изабрао изотоп најпогодније енергије зрачења.

4. Испитивање ултразвуком

Испитивање ултразвуком користи се за откривање унутрашњих грешака и нехомогености, као што су лункери, двослојност, сегрегације, гасни мехури и сл. Испитивање ултразвуком има своје предности и слабости у односу на методе испитивања прозирањем. Иако се подручја примене обе методе преплићу, када је у питању испитивање унутрашњости материјала, ниједна од метода није супериорна у односу на другу. Развој тих метода је текао паралелно и данас се користе како би надопуниле једна другу, а као пример тога ваља истаћи контролу заварених конструкција. За тачнија испитивања, уз захтев за дуже чување докумената о изведеним испитивањима, користи се рентгенографија. С друге стране, за серијска испитивања или испитивања целих конструкција користи се ултразвук, јер је много јефтинији. Савремене лабораторије обично користе више метода, а у конкретном случају користе ону која је најприкладнија и/или најекономичнија. У савременој пракси, испитивање ултразвуком је непогрешива метода за испитивање дебелих металних плоча, заварених спојева, носећих греда, блокова, лимова, жица, одливака и др.

Ултразвуком се могу изводити испитивања у циљу:

- откривања унутрашњих грешака у материјалу,
- одређивања својства материјала,
- мерења унутрашњих напона,
- мерења дебљина материјала.

Принцип ултразвучних метода је да се звучни таласи високе учестаности, који стварају пиезо елементи (кварцни кристал или баријум цијанат), пуштају кроз део који се испитује и региструје њихова промена. Ултразвук се у чврстој и течној средини поростире без већих губитака, а на граници између две средине, као што је то метал-ваздух, долази до његовог одбијања.

Ултразвучни уређај

Звук преставља механички талас фреквенце од 16 Hz до 20 kHz, тј. у опсегу чујних фреквенција за људско ухо. Ултразвук је механички талас са фреквенцама осциловања од 20 kHz до 10 GHz. Звук настаје периодичним осциловањем извора звука који непосредној околини мења притисак медијума, који се преноси на суседне честице у медијуму и шири у облику таласа. Ширење звука омогућавају еластичне везе између молекула медијума. Кроз флуиде звук се шири у облику лонгитудиналних таласа, док се кроз чврсте средине шири у облику лонгитудиналних и трансферзалних таласа. Звук се шири без преноса масе, али се звуком преноси импулс силе и енергија и не може се ширити у вакууму.

Ултразвук који се користи за ултразвучна испитивања металних материјала настаје на два начина:

- пиезоелектричним ефектом и
- магнетострикцијским ефектом.

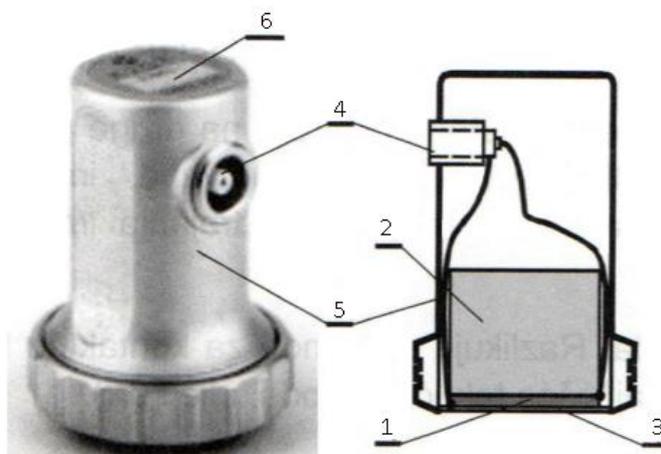
Пиезоелектрични ефекат настаје када се плочица кварца притисне или издужи неком силом у правцу кристалографске осе, тада долази до поларизације и стварања наелектрисања. Предзнак електричног наелектрисања зависи од правца деформације, а интензитет од употребљене силе. Обрнута појава се јавља када под дејством истосмерног електричног поља кварцна плочица промени своје димензије. Ако се уместо једносмерне, пропусти наизменична струја, кварцна плочица ће вибрирати у ритму фреквенце наизменичног електричног поља. Магнетострикција је појава која се јавља код феромагнетних материјала да мењају облик под утицајем магнетног поља, што је слична појава пиезоелектричном ефекту.

Ултразвучни таласи се кроз материјале крећу у константним размацима, тј. константном дужином таласа. Брзина простирања таласа представља константну вредност за сваки материјал. Оно што је посебно важно, на чему се између осталог и базира провера дефеката у материјалу, је да на граници два медијума (материјала, структура) долази до одбијања и преламања ултразвучних таласа.

При управном улазу ултразвучног снопа у испитивани материјал, на граници два медијума долази до делимичног одбијања ултразвучних таласа. Уколико ултразвучни талас наиђе на грешку (дефект) у материјалу, он не пролази кроз њу, већ се одбија од ње. За случај када су грешке мање, део ултразвучног таласа ће проћи кроз њу, а део одбити.

Извори ултразвука (кристали) који се користе у дефектоскопији материјала раде на принципу пиезоелектричног ефекта, па се често називају пиезокристали. Најчешће се користе кристали од кварца или баријум-титаната. Да би могли да се користе у дефектоскопији, ултразвучни таласи се помоћу тзв. сонди емитују у виду импулса (може бити састављен од једне или више ултразвучних осцилација) кроз материјал који се испитује. Најчешће се користе равне сонде,

које могу бити предајник или пријемник, а најчешће и једно и друго – у једном циклусу емитује ултразвучне таласе у испитивани узорак, а у другом (наредном) региструје одбијене ултразвучне таласе. Изглед и делови једне равне ултразвучне сонде приказани су на слици 66.



Слика 66. Изглед и делови равне ултразвучне сонде (1. Пиезоелектрични кристал, 2. Пригушивач, 3. Заштитна плоча (фолија), 4. Прикључак, 5. Кућиште, 6. Ознака сонде)

Избор ултразвучне сонде врши се према врсти пиезокристала, његовом пречнику и потребној фреквенци. Већи пречник кристала пружа већу осетљивост методе, а већа фреквенца омогућава боље распознавање грешке у материјалу. Фреквенца ултразвучних уређаја за испитивање техничких материјала креће се од 0,5-10 MHz, а пречници пиезокристала од 5 mm до 34 mm. Да би се побољшао прелаз ултразвучних таласа од сонде у материјал користи се контактено средство, којим се ослоји површина испитиваног елемента. Најчешће се као контактено средство користи уље код храпавих површина и вода код глатких површина; код веома храпавих површина користи се вазелин или товатна маст.

Дубина продирања ултразвучних таласа зависи од јачине импулса, површине узорка и контактеног средства. Горња граница за дубину продирања код челика је 8 m, мања за челични лив, док је за сиви лив око 0,5 m.

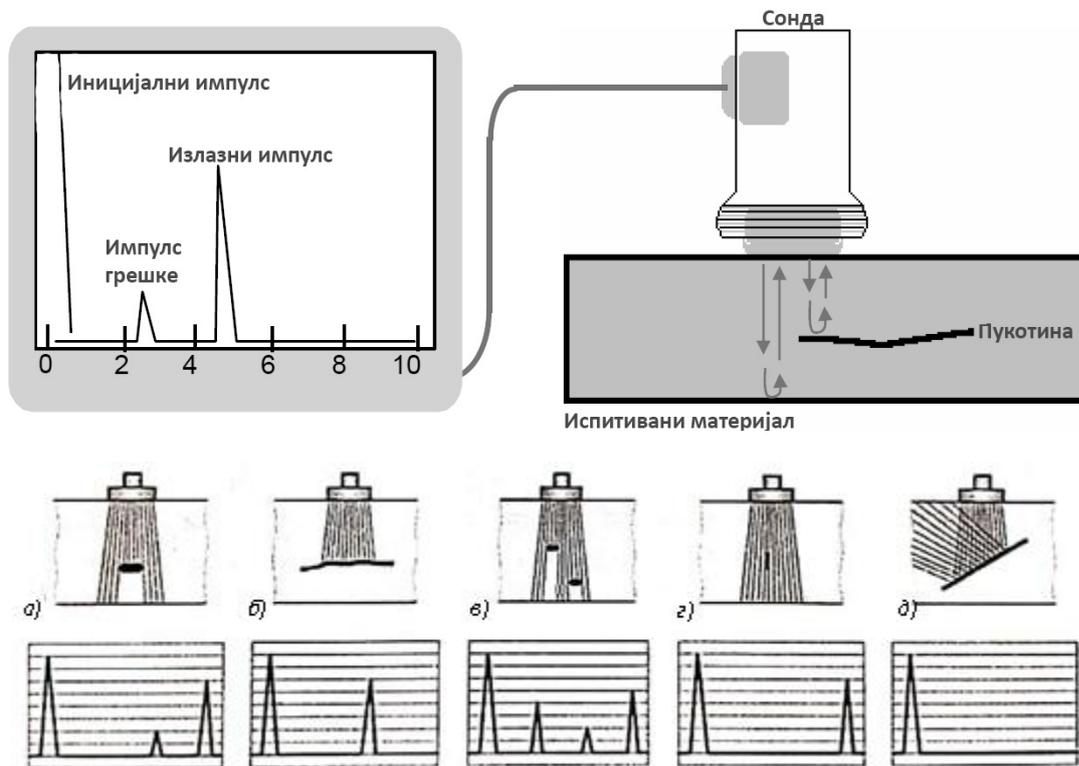
Мада постоји више метода испитивања ултразвуком, највише су у примени следеће методе:

- импулсна (ехо) метода,
- метода сенке (прозвучавања) и
- резонантна метода.

Импулсна (ехо) метода се најчешће користи и заснива се на одбијању ултразвучних таласа од граничне површине метала и ваздуха или материјала различитих густина и мерењу времена простирања ултразвучног таласа. Ултразвучна сонда, која је и емитер и пријемник, прима рефлектовани ултразвучни талас, који се као пропорционални сигнал показује на екрану ултразвучног уређаја.

Уколико у материјалу нема грешака ултразвучни талас у виду импулса одбија се од границе материјала и ваздуха која одговара дебљини материјала. Међутим, ако на свом путу, талас наиђе на пукотину или неки дефект, долази до његовог ранијег одбијања што се региструје на екрану у виду међу-импулса. Апсциса на екрану се подеси и калибрише према путу

ултразвучног таласа у материјалу, тако да се на њој може прецизно читавати дубина на којој се налази грешка (или нека промена) у материјалу. Такође, овом методом се, по истом принципу, може мерити и дебљина узорка (најчешће зидова затворених делова и конструкција). На слици 67 илустративно је приказано неколико примера испитивања импулсном методом.



Слика 67. Испитивање импулсном (ехо) ултразвучним апаратом као и различити примери испитивања: а) грешка паралелна са задњом површином: одбијање од грешке и задње површине, б) грешка већа од ултразвучног снопа: одбијање само од грешке, в) две грешке паралелна са задњом површином: два одбијања од грешке и од задње површине, г) грешка лежи паралелно са ултразвучном сондом: одбијање само од задње површине, д) грешка је велика и лежи под неповољним углом: има само улазно одбијање.

Предности импулсне методе су следеће:

- може се одредити положај и величина разних нехомогености (дефеката) у материјалу,
- могу се одредити подручја у материјалу која нису добро термички обрађена,
- може се испитивати материјал тешко приступачан и то када се може прићи само једној страни дела који се испитује,
- велика брзина рада и прецизност,
- осетљивост ове методе је далеко већа од методе сенке.

Недостатак ове методе је тзв. „мртва зона“ – не могу се открити грешке у материјалу близу контактне површине са сондом (минимална дебљина ове зоне је око 5 mm)

Метода сенке се заснива на одашиљању ултразвучних таласа са једне стране испитиваног узорка и њиховом регистровању са друге стране. У случају хомогености материјала нема слабљења интензитета ултразвучног таласа тако да се на пријемнику региструје иста количина таласа која је и одаслата. На местима где се налази дефект у материјалу региструје се слабљење ултразвука. Карактеристика ове методе је висока продуктивност (континуална), али

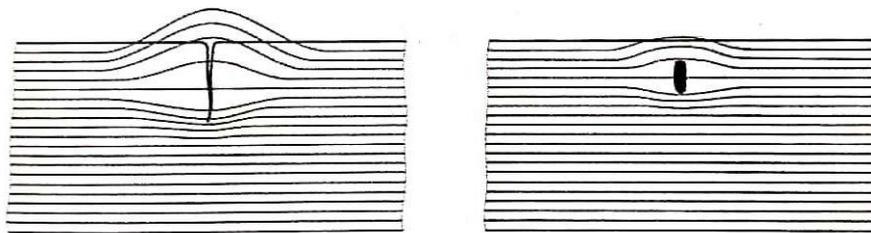
не омогућује откривање малих дефеката у материјалу и у случају откривања грешке не може се одредити дубина на којој је грешка.

Резонантна метода највише се користи за испитивање дебљине и двослојности испитиваног материјала. Ултразвучни таласи се одбијају од задњег зида узорка и враћају у пријемну сонду, при чему се они интерферирају са емитованим таласима. Оног тренутка када у узорку настане резонанца, на екрану се појави сигнал или огласи звучни сигнал на уређају.

5. Магнетна испитивања

Магнетне методе се користе за откривање макроскопских грешака у површинским слојевима феромагнетних материјала (железо и челици).

Принцип испитивања се заснива у стварању магнетног тока у испитиваном делу, што се постиже његовим довођењем у магнетно поље сталног магнета или електромагнета. Линије магнетних сила теку паралелно и правилно у случају хомогене структуре, али ако наиђу на грешку у материјалу (прскотина, зарез, укључак), због мале магнетне пермеабилности, доћи ће до њиховог скретања, односно обилажења грешке због смањења магнетног флукса на месту где постоји прскотина, слика 68. Тако око грешке долази до гомилања магнетних линија сила, а нарочито, ако је правац грешке управан на правац линија сила.



Слика 68. Распоред магнетних линија сила око грешке у материјалу

Да би се присуство грешака могло уочити, по површини предмета, који се испитује, наноси се феромагнетни прах, који ће се такође нагомилати око грешке. Најчешће се употребљава суспензија феромагнетног праха (оксид железа Fe_3O_4) у минералном уљу (мокри поступак), али се могу користити и магнетни прахови крупнијег зрна за суво наношење (суви поступак).

Мокри поступак наношења магнетног праха је погодан за испитивање мањих узорака, јер се лакше урањају у суспензију и мање је расипање феромагнетног праха. Суви поступак је погоднији за одређивање грешака испод површине материјала, а примењује се скоро увек приликом коришћења преносивих уређаја. Прах је обојен да би се добио бољи контраст и лакше уочила грешка. Због максималне осетљивости на грешке испод површине, овај поступак се примењује за испитивање заварених спојева.

Уређаји који се користе за магнетна испитивања материјала називају се магнетни дефектоскоп или магнетоскоп. Изглед једног магнетног дефектоскопа са неопходним прибором за рад приказан је на слици 69.

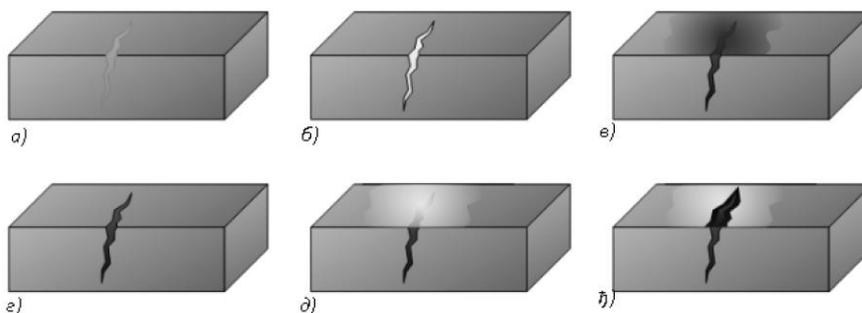


Слика 69. Магнетни дефектоскоп са прибором

6. Испитивање пенетрантима (капиларне методе)

Испитивање пенетрантима (пенетрантским течностима) користе се за испитивање (откривање) површинских грешака у материјалу или грешака које су у вези са површином испитиваног узорка. Познат је већи број поступака испитивања, који се базирају на продирању течности у испитну површину. Ове методе испитивања често се називају и капиларне, дифузионе или пенетрантске.

Оно што је заједничко за све поступке јесте да користе продирајуће (пенетрирајуће) течности, које имају способност да продру у врло уске зазоре (реда величине 0,001 mm) и да буду апсорбоване од стране развијача. Након наношења развијача посматра се испитивани узорак, тј. његова површина и закључује о степену продирања пенетраната у њега. Тако се може утврдити колика је величина и значај неке грешке. Поступак испитивања помоћу пенетраната је приказан на слици 70.



Слика 70. Поступак испитивања пенетрантима: а) узорак за испитивање, б) одмашћивање и прање површине узорка, в) наношење пенетрантске течности, г) одстрањивање вишка пенетрантске течности, д) наношење развијача, е) посматрање и утврђивање величине и значаја грешке

Постоје више поступака испитивања пенетрантима, а разликују се према врсти пенетранта (течности) коју користе. На основу тога разликују се:

- испитивања уљем (потапање у вруће минерално уље на око 150°C),
- испитивања обојеним течностима,
- испитивања флуоресцентним течностима,
- испитивања хемијским нагризањем (за челик – врућа разређена хлороводонична киселина, за алуминијум и његове легуре – врућ натријум хидроксид).

РАДНИ ЛИСТ

ВЕЖБА БР. 10: ИСПИТИВАЊА БЕЗ РАЗАРАЊА

Име и презиме: _____, бр. индекса: _____

1. Шта је дефектоскопија?
2. Које се методе најчешће примењују у дефектоскопији?
3. Шта је визуелна контрола?
4. Шта је димензиона контрола?
5. Како и зашто се изводи испитивање прозрачивањем X и γ зрацима (радиографија)?
6. Објаснити ултразвучно испитивање.

7. Објаснити магнетна испитивања.

8. Објаснити испитивања помоћу пенетраната.

РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА И ЗАДАТАК ПРАКТИЧНОГ ДЕЛА ВЕЖБЕ

Име и презиме: _____, бр. индекса: _____

ЛИТЕРАТУРА

- [1] <https://www.tec-science.com/material-science/material-testing/tensile-test/>
- [2] Витез, И, Оруч, М., Сунулахпашић, Р., Испитивање металних материјала - механичка и технолошка испитивања, Зеница, Босна и Херцеговина, Универзитет у Зеници, Факултет за металургију и материјале Зеница, 2006..
- [3] Вукућевић, Д., Машински материјали: Механико-технолошка својства и њихова испитивања са практикумом за лабораторијске вежбе, Део 1, Универзитет у Нишу, Машински факултет, 1988.
- [4] Ralls, K., Courtney, T. H., Wulff, J., Introduction to Materials Science and Engineering. John Wiley & Sons, 1976.
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Brinell_scale
- [6] <https://matmatch.com/learn/process/hardness-comparison>
- [7] Прокић-Цветковић, Р., Смиљанић, П., Радаковић, З., Бакић, Г., Поповић, О., Ђукић, М., Машински материјали: приручник за лабораторијске вежбе. Део 1, Универзитет у Београду, Машински факултет, 2006.
- [8] Прокић Цветковић, Р., Поповић, О., Машински материјали 1, Универзитет у Београду, Машински факултет, 2012.
- [9] Јовановић, М., Адамовић, Д., Лазић, В., Ратковић Н., Машински материјали, универзитетски уџбеник, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003.
- [10] Callister, W. D. Fundamentals of materials science and engineering: An interactive e.text. New York: Wiley, 2001.
- [11] Callister, W.D.: Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach, 4th Ed., Wiley and Sons, 2012.
- [12] Callister, W.D., Rethwisch, D.G.: Materials Science and Engineering: An Introduction, 9th Ed., Wiley and Sons, 2014.
- [13] <https://sinowon2014.en.made-in-china.com/product/vbemgKkBVZXTJ/China-Sinowon-Digital-Vickers-Hardness-Tester.html>
- [14] Elsherbiny, Mahmoud, Hegazy, R.. (2012). The influence of geometrical tolerances of Vickers indenter on the accuracy of measured hardness. International Journal of Metrology and Quality Engineering. 3. 1-6. 10.1051/ijmqe/2012009.
- [15] Добројевић, М., Седмак, А., Аргоб, Е., Поповић, О., Анализа утицаја геометрије и хетерогености завареног споја на понашање Шарпи епрувете, Интегритет и век конструкција, Вол 3, Бр. 2 (2003), стр 73-83.
- [16] <https://www.gordonengland.co.uk/hardness/vickers.htm>
- [17] [https://aybu.edu.tr/muhendislik/makina/contents/files/HARDNESS%20TEST\(1\).pdf](https://aybu.edu.tr/muhendislik/makina/contents/files/HARDNESS%20TEST(1).pdf)
- [18] Ђорђевић, В., Вукићевић, М.: Машински материјали, практикум за вежбе – први део, Универзитет у Београду, Машински факултет, 1987.
- [19] <https://www.wikiwand.com/de/H%C3%A4rte>
- [20] <https://www.testhardness.com/product/digital-display-plastic-rockwell-hardness-tester-20100hrb/>
- [21] <https://rgf.bg.ac.rs/predmet/Tehnologija%20materijala/Vezbe/Metode%20ispitivanja%20vezbe.pdf>
- [22] Крстел, В., Ултразвучна контрола одабрана поглавља, Загреб, 2003.
- [23] <https://www.tec-science.com/material-science/material-testing/dye-liquid-penetrant->

inspection-dpi/

[24] https://en.wikipedia.org/wiki/Three-point_flexural_test

[25] Ђукић, В., Мајсторовић, А., Машински материјали – упутства за испитивања, Научна књига, Београд, 1980.

[26] Hayden, W., Moffatt, G.W., Wulff, J., Структуре и особине материјала – књига III механичке особине, превод са енглеског: Трифуновић, Д., Радоњић, Љ., Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет, Београд, 1982.

[27] Зрилић, Р. Г., Добраш, Д., Наука о материјалима – књига I, Машински факултету Бањој Луци, Бања Лука, 2018.

[28] Манојловић, Б., Машински материјали, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд, 1978.