



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА

Соња С. Костић

**РАЗВОЈ И ОПТИМИЗАЦИЈА
ЛАБОРАТОРИЈСКЕ КИДАЛИЦЕ
НАМЕЊЕНЕ ИСПИТИВАЊИМА
МАТЕРИЈАЛА СА АСПЕКТА
МИНИМИЗАЦИЈЕ ГРЕШАКА
МЕРЕЊА И ЦЕНЕ КОШТАЊА**

Докторска дисертација

Крагујевац, 2021.



UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC

FACULTY OF ENGINEERING

Sonja S. Kostić

**DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF
LABORATORY TENSILE TESTING
DEVICE FROM THE ASPECT OF
MINIMIZATION OF MEASUREMENT
ERRORS AND COST PRICE**

Doctoral Dissertation

Kragujevac, 2021

Аутор	
Име и презиме:	Соња Костић
Датум и место рођења:	25.08.1971, Крагујевац
Садашње запослење:	Академија струковних студија Шумадија, одсек Крагујевац
Докторска дисертација	
Наслов: РАЗВОЈ И ОПТИМИЗАЦИЈА ЛАБОРАТОРИЈСКЕ КИДАЛИЦЕ НАМЕЊЕНЕ ИСПИТИВАЊИМА МАТЕРИЈАЛА СА АСПЕКТА МИНИМИЗАЦИЈЕ ГРЕШАКА МЕРЕЊА И ЦЕНЕ КОШТАЊА	
Број страница:	218
Број слика:	164
Број библиографских података:	303
Установа и место где је рад израђен: Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука	
Научна област (УДК): Машинство. Машине и алати за испитивање. Одређивање експерименталних вредности и карактеристика материјала. 621:[620.1.05+620.172.2]	
Ментор: др Бранко Тадић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу	
Оцена и одбрана	
Датум пријаве теме:	13.05.2019.
Број одлуке и датум прихватања теме докторске дисертације:	IV-04-8061/10 од 09.10.2019.
Комисија за оцену научне заснованости теме и испуњености услова кандидата:	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Др Драган Адамовић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу. Уже научне области: производно машинство и индустријски инжењеринг 2. Др Ђорђе Вукелић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду. Ужа научна област: метрологија, квалитет, еколошко-инжењерски аспекти, алати и прибори 3. Др Петар Тодоровић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу. Ужа научна област: производно машинство 4. Др Милан Ерић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу. Ужа научна област: производно машинство 5. Др Бранко Тадић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу. Уже научне области: производно машинство и индустријски инжењеринг. 	
Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације:	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Др Петар Тодоровић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу. Ужа научна област: производно машинство 2. Др Драган Адамовић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу. Уже научне области: производно машинство и индустријски инжењеринг 3. Др Ђорђе Вукелић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду. Ужа научна област: метрологија, квалитет, еколошко-инжењерски аспекти, алати и прибори 	
Датум одбране докторске дисертације:	

*Мојим родитељима,
Славку и Марији*

Acta, non verba.

ЗАХВАЛНИЦА

Докторска дисертација је настала као резултат вишегодишњег рада.

Највећу захвалност дугујем свом ментору, професору др Бранку Тадићу, који је са мном несебично делио своје идеје и знање. Немерљива је његова помоћ у овом раду.

Огромну подршку сам добила од професора др Ђорђа Вукелића, који је веровао да је овај рад вредан међународне пажње.

Хвала мојим драгим колегама и „саборцима“, др Владимиру Кочовићу и Јасмини Миљојковић, на стручној и практичној помоћи у разним фазама настанка дисертације.

У мени никада неће избледети лик и дело моје професорке др Вере Николић-Станојевић, менторке моје магистарске тезе, која ме је и повела на пут науке. Постхумно јој се захваљујем, јер знам да је желела да никада не престанем да се бавим истраживањем.

Без мојих родитеља ја не бих била ово што јесам. Хвала вам што имате поверење у мене и хвала вам на подршци коју ми пружате. Желим са вама да делим тренутке још дуго.

Шта да кажем о свом старијем брату Стојану, осим да сам пресрећна што га имам. Волим све у вези њега, чак и вишесатне расправе око ствари око којих не делимо исто мишљење. Хвала ти што овај рад изгледа технички лепше од магистарског рада.

Моја породица је моје уточиште. Хвала Горану, Павлу и Нини на љубави и енергији коју сам све време добијала, много ми је значила. Са вама сам то што желим да будем.

*У Крагујевцу,
Август 2021.*

Аутор

РЕЗИМЕ

У дисертацији је представљен процес развоја мале, лабораторијске кидалице за испитивање различитих материјала на затезање при собним, повишеним и високим температурама. Преглед литературних извора показао је да постоји оправдана потреба за развојем уређаја који ће поуздано и са задовољавајућом тачношћу моћи да врше испитивања материјала чији су узорци нестандартних облика и димензија, малих попречних пресека. Затезање таквих узорака се врши при релативно малим силама затезања, до 2000 N, тако да је добрим техничко-технолошким приступом могао да настане уређај одговарајуће крутости, код кога је попустљивост подсклопова конструкције могла да буде сведена на минимум. У раду је посебна пажња посвећена попустљивости која се јавља у стезним чељустима, на делу где се врши прихват и позиционирање епрувете. Имајући у виду да је извор потенцијално највећих грешака мерења сила и издужења, у раду је представљен нов модел прихвата и стежања епрувете у стезне чељусту, како би се минимизирао његов утицај на грешке мерења. Верификација резултата експерименталних испитивања вршена је поређењем са резултатима добијеним испитивањем материјала на конвенционалној кидалици са екстензиометром, на основу претходно развијених аналитичких израза везаних за неизвесност одређивања модула еластичности, карактеристике материјала која је најосетљивија на грешке мерења јако малих вредности издужења у области еластичних деформација. Дефинисани су фактори који утичу на неизвесност мерења модула еластичности. Одређене су аналитичке границе неизвесности модула еластичности, односно границе „прихватљивих“ неизвесности. Средње вредности неизвесности модула еластичности су 1.97% на конвенционалном уређају за испитивање затезањем са екстензиометром и 1.56% на малом лабораторијском уређају за испитивање затезањем. У подручју мањих сила и малих издужења неизвесност мерења модула еластичности има веће вредности, што је првенствено узроковано несавршеностима мерних инструмената [S. Kostić, 2021]. Због свог облика и геометријских карактеристика, епрувета која се користи за испитивање материјала на малој, лабораторијској кидалици је посматрана као еластични систем, односно развијен је аналитички модел који као резултат даје величине издужења у свим зонама епрувете (зона радијуса и крајева епрувете за прихват). На тај начин је могуће извршити корекцију измереног издужења, које не представља издужење само мерног дела епрувете и утицати на минимизацију грешака мерења.

За потребе испитивања материјала на повишеним и високим температурама развијен је модул са комором, која је енергетски ефикасан систем, са одговарајућим опсегом и контролом задате температуре. Поређење добијених резултата испитивања са резултатима доступним у литератури је показало да је у питању поуздан и тачан систем.

Узевши све у обзир, мала лабораторијска кидалица могла би да се примени како у образовању студената, тако и у индустрији и истраживањима у области испитивања материјала.

Кључне речи: испитивање материјала затезањем, лабораторијска кидалица, крутост, попустљивост, механичке карактеристике материјала, модул еластичности, грешке мерења, неизвесност.

ABSTRACT

The dissertation presents a process of developing a small, laboratory device for tensile testing of various materials at room, elevated and high temperatures. A literature review has shown that there is a legitimate need to develop a device that will be able to reliably and with satisfactory accuracy perform tests of materials whose samples are of non-standard shapes and dimensions, with small cross-sections. Tensile testing of such specimens is performed at relatively low tensile forces, up to 2000 N, so that a proper technical-technological approach could create a device of appropriate stiffness, where the compliance of the subassemblies of the structure could be reduced to a minimum. The paper pays special attention to the compliance that occurs in the clamping jaws, in the part where the specimen is positioned and fixed. The clamping system causes potentially the largest errors of force and elongation measurements. To minimize the influence of this source of errors, a new model of clamping system was developed. The experimental results were verified by being compared to the results obtained on a conventional tensile testing device with an extensometer. The comparison was based on previously developed analytical expressions related to the uncertainty in the elastic modulus, as the characteristics of the material that is the most sensitive to the errors in measurement of very small elongations in the elastic region. Factors influencing the uncertainty of measuring the elastic modulus were defined. Analytical limits of the uncertainty in the elastic modulus, i.e. the limits of „acceptable“ uncertainties, were determined. The mean values of the uncertainties in the elastic modulus are 1.97% on a conventional tensile testing device with an extensometer and 1.56% on a small laboratory tensile testing device. In the region of lower forces and small elongations, the uncertainty in the elastic modulus measurement has higher values, which is primarily caused by the imperfections of measuring instrumentation [S. Kostić, 2021]. Due to its shape and geometric characteristics, the specimen used for testing the material on a small, laboratory tensile testing device was observed as an elastic system. An analytical model was developed, enabling the determination of elongation values in all test zones (radius zone and end of the test specimen). In that way, it is possible to correct the measured elongation, which comprises not only the initial gauge length of the test specimen, and to influence the minimization of measurement errors as well.

For testing materials at elevated and high temperatures, a module with a chamber was developed, an energy efficient system that has the appropriate range and control of the set temperature. After the obtained test results were compared to the results available in the literature, it proved to be a reliable and accurate system.

All things considered, a small laboratory tensile testing device could find a very significant application in education, industry, and scientific research in the field of material testing.

Keywords: tensile testing of materials, laboratory tensile testing device, stiffness, compliance, mechanical properties of materials, modulus of elasticity, measurement errors, uncertainty.

САДРЖАЈ

1	УВОДНА РАЗМАТРАЊА	1
1.1	ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА.....	2
1.2	ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ ИСТРАЖИВАЊА.....	2
1.3	ОСНОВНЕ ХИПОТЕЗЕ.....	3
1.4	МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА.....	3
1.5	ОЧЕКИВАНИ РЕЗУЛТАТИ.....	4
1.6	ОКВИРНИ САДРЖАЈ РАДА.....	4
2	ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ	6
2.1	УЗОЦИ (ЕПРУВЕТЕ) МАТЕРИЈАЛА ЗА ИСПИТИВАЊЕ ЗАТЕЗАЊЕМ НА НЕКОНВЕНЦИОНАЛНИМ КИДАЛИЦАМА	6
2.1.1	УТИЦАЈ ОБЛИКА И ДИМЕНЗИЈА УЗОРАКА НА РЕЗУЛТАТЕ ИСПИТИВАЊА.....	6
2.1.2	УТИЦАЈ НАЧИНА ОБРАДЕ УЗОРАКА НА РЕЗУЛТАТЕ ИСПИТИВАЊА.....	17
2.2	РАЗВОЈ НЕКОНВЕНЦИОНАЛНИХ КИДАЛИЦА	26
2.3	МЕХАНИЧКА КАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИЈАЛА ДОБИЈЕНА ИСПИТИВАЊЕМ МАТЕРИЈАЛА ЗАТЕЗАЊЕМ	38
2.4	СТЕЗНЕ ЧЕЉУСТИ ЗА ПРИХВАТ И ПОЗИЦИОНИРАЊЕ ЕПРУВЕТА КОД НЕКОНВЕНЦИОНАЛНИХ КИДАЛИЦА	46
2.5	ИСПИТИВАЊЕ ЗАТЕЗАЊЕМ НЕМЕТАЛНИХ МАТЕРИЈАЛА НА МАЛОЈ ЛАБОРАТОРИЈСКОЈ КИДАЛИЦИ	52
3	ОДРЕЂИВАЊЕ МЕХАНИЧКИХ КАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИЈАЛА НА ЗАТЕЗАЊЕ ПРИ СОБНИМ, ПОВИШЕНИМ И ВИСОКИМ ТЕМПЕРАТУРАМА	55
3.1	МЕХАНИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ МАТЕРИЈАЛА ПРИ СОБНИМ ТЕМПЕРАТУРАМА	56
3.1.1	КРИВА НАПОН - ДЕФОРМАЦИЈА	56
3.1.1.1	Линеарни сегмент криве - стадијум еластичне деформације (ОЕ).....	58
3.1.1.2	Нелинеарни сегмент криве до течења - стадијум развлачења (течења, попуштања) метала, $E_T(D)$	60
3.1.1.3	Нелинеарни сегмент хомогене деформације – стадијум пластичне деформације и ојачавања материјала $T(D)M$	63
3.1.1.4	Стадијум локализације деформације и лом епрувете (МК).....	65
3.1.2	СТВАРНИ НАПОНИ-ДЕФОРМАЦИЈЕ	66
3.1.3	КОРЕКЦИЈА КРИВЕ НАПОН - ДЕФОРМАЦИЈА	75

3.2	МЕХАНИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ МАТЕРИЈАЛА ПРИ ПОВИШЕНИМ И ВИСОКИМ ТЕМПЕРАТУРАМА	82
4	ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ ПРЕДЛОЖЕНЕ МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА.....	88
4.1	УТИЦАЈ ПОПУСТЉИВОСТИ УРЕЂАЈА - КИДАЛИЦЕ ЗА ИСПИТИВАЊЕ МАТЕРИЈАЛА ЗАТЕЗАЊЕМ НА ТАЧНОСТ РЕЗУЛТАТА МЕРЕЊА	90
4.2	УТИЦАЈ МЕРНЕ ИНСТРУМЕНТАЦИЈЕ УРЕЂАЈА - КИДАЛИЦЕ ЗА ИСПИТИВАЊЕ МАТЕРИЈАЛА ЗАТЕЗАЊЕМ И ГЕОМЕТРИЈЕ УЗОРКА (ЕПРУВЕТЕ) НА ТАЧНОСТ РЕЗУЛТАТА МЕРЕЊА	93
4.3	УТИЦАЈ ЕЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦИЈА УЗОРКА (ЕПРУВЕТЕ) НА ТАЧНОСТ РЕЗУЛТАТА МЕРЕЊА МЕХАНИЧКИХ КАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИЈАЛА ИСПИТИВАЊЕМ ЗАТЕЗАЊЕМ.....	102
4.3.1	ЕПРУВЕТА КРУЖНОГ ПОПРЕЧНОГ ПРЕСЕКА	103
4.3.2	ЕПРУВЕТА ПРАВОУГАОНОГ ПОПРЕЧНОГ ПРЕСЕКА	106
4.3.3	АЛГОРИТАМ ЗА РАЗВОЈ СОФТВЕРА.....	109
4.4	ИСПИТИВАЊЕ УЗОРАКА ОД ПОЛИПРОПИЛЕНА НА МАЛОЈ ЛАБОРАТОРИЈСКОЈ КИДАЛИЦИ.....	112
5	РАЗВОЈ И ОПТИМИЗАЦИЈА УРЕЂАЈА - КИДАЛИЦЕ НАМЕЊЕНЕ ЗА ЕДУКАТИВНЕ И ИСТРАЖИВАЧКЕ СВРХЕ	122
5.1	РАЗВОЈ НЕКОНВЕНЦИОНАЛНЕ КИДАЛИЦЕ.....	124
5.1.1	ПРВА ВАРИЈАНТА УРЕЂАЈА	124
5.1.2	ДРУГА ВАРИЈАНТА УРЕЂАЈА.....	126
5.1.3	ТРЕЋА ВАРИЈАНТА УРЕЂАЈА.....	129
5.1.4	ЧЕТВРТА ВАРИЈАНТА УРЕЂАЈА	134
5.2	ПРИМЕНА МЕТОДА ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ У ОЦЕНИ И ИЗБОРУ РАЗЛИЧИТИХ РЕШЕЊА КИДАЛИЦА.....	144
5.2.1	ДЕФИНИСАЊЕ СКУПА ДОНОСИОЦА ОДЛУКА	144
5.2.2	ИЗБОР КРИТЕРИЈУМА ПРЕМА КОЛИМА СЕ ОЦЕЊУЈУ РАЗЛИЧИТА РЕШЕЊА УРЕЂАЈА.....	145
5.2.3	ОДРЕЂИВАЊЕ РЕЛАТИВНЕ ВАЖНОСТИ КРИТЕРИЈУМА	146
5.2.4	ОПИС АЛТЕРНАТИВА	149
5.2.5	ПРЕДЛОЖЕНИ АЛГОРИТАМ	150
5.2.6	ДИСКУСИЈА ДОБИЈЕНИХ РЕШЕЊА	151
6	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА	155
6.1	ПЛАН ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСПИТИВАЊА	155
6.1.1	МАТЕРИЈАЛИ ЗА ИСПИТИВАЊЕ	155
6.1.2	УСЛОВИ ЗА ИСПИТИВАЊЕ МАТЕРИЈАЛА.....	158
6.1.3	РЕШЕЊЕ КОНСТРУКЦИЈЕ УРЕЂАЈА ЗА ИСПИТИВАЊЕ	158

6.1.4	РЕШЕЊЕ СИСТЕМА ЗА ПРЕНОС И АКВИЗИЦИЈУ ПОДАКА	158
6.1.5	РАЗВОЈ УРЕЂАЈА ЗА ИСПИТИВАЊЕ.....	159
6.2	РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЕРИМЕНАТА	161
6.2.1	ИСПИТИВАЊЕ МАТЕРИЈАЛА S355J2 ЗАТЕЗАЊЕМ НА СОБНОЈ ТЕМПЕРАТУРИ.....	162
6.2.2	ИСПИТИВАЊЕ МАТЕРИЈАЛА DC01 ЗАТЕЗАЊЕМ НА СОБНОЈ, ПОВИШЕНИМ И ВИСОКИМ ТЕМПЕРАТУРАМА	169
6.2.3	ИСПИТИВАЊЕ НЕМЕТАЛНИХ МАТЕРИЈАЛА НА ЗАТЕЗАЊЕ НА СОБНОЈ ТЕМПЕРАТУРИ	174
7	ДИСКУСИЈА ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА	178
8	ЗАКЉУЧЦИ	182
	ЛИТЕРАТУРА.....	186
	ПРИЛОГ 1	208

СПИСАК СЛИКА

1	Слика 2.1 Различити попречни пресеци узорака за испитивање и изрази за израчунавање површине попречног пресека на мерној дужини	7
2	Слика 2.2 Анализа узорка од челика SAE 1045: геометрија за а) кружни попречни пресек и б) правоугаони попречни пресек	8
3	Слика 2.3 Анализа узорка од челика SAE 1045: крива напон - деформација за а) кружни попречни пресек и б) правоугаони попречни пресек	8
4	Слика 2.4 Утицај геометрије епрувете кружног попречног пресека на криве сила - издужење	9
5	Слика 2.5 Криве напон - деформација у функцији односа L_0/D_0 , при чему однос L_0/D_0 расте од криве (а) до криве (д): (а) $L_0/D_0 = 0.71$, (б) $L_0/D_0 = 1.42$, (с) $L_0/D_0 = 2.14$, (д) $L_0/D_0 = 2.85$, а за пречнике $D_0 = 7.6 \text{ mm}$ (лево) и $D_0 = 17.8 \text{ mm}$ (десно)	10
6	Слика 2.6 Утицај мерне дужине епрувете на а) чврстоћу и дуктилност и б) Young-ов модул за лим Ti-6Al-4V	11
7	Слика 2.7 Зависност зоне формирања врата од дебљине епрувете представљеног модела	12
8	Слика 2.8 Крива напон - деформација за а) TWIP челик и б) чист бакар, са различитим дебљинама узорака	15
9	Слика 2.9 Експерименталне и FEM (испрекидано) криве стварних напона - деформација за узорке бакра, које показују утицај дебљине T за константну мерну дужину епрувете L од 1 mm	15
10	Слика 2.10 Експерименталне и FEM (испрекидано) криве стварних напона - деформација за узорке бакра, које показују утицај мерне дужине епрувете L за константну дебљину T	15
11	Слика 2.11 Контурна површина регије врата у зависности од дебљине а) 0.1 mm б) 0.2 mm в) 0.5 mm и г) 1 mm	16
12	Слика 2.12 Епрувета за испитивање материјала а) изглед узорка dogbon облика, б) мерење издужења са или без екстензиометра	16
13	Слика 2.13 Геометрија епрувете, где је B је ширина мерног дела, B_0 ширина зоне хватања, L_S мерна дужина, L_t дужина зоне	17

радијуса, L_0 дужина зоне хватања (лево) и положај и број
ломова за два дизајна епрувета (десно)

14	Слика 2.14 Шематски приказ узорка за испитивање затезањем и облик глодала који се користи за израду узорка	18
15	Слика 2.15 Очекивана предвиђања моделирања процеса обраде метала деформисањем и машинске обраде	18
16	Слика 2.16 Конфигурација система за ласерско сечење са техником контроле	21
17	Слика 2.17 Процес ласерског сечења метала	21
18	Слика 2.18 Процес електроерозивне обраде	22
19	Слика 2.19 Процес електроерозивне обраде жицом	22
20	Слика 2.20 3D штампач RepRap	23
21	Слика 2.21 Изглед одштампане епрувете од материјала PLA	23
22	Слика 2.22 Фотографије добијене скенирањем електронским микроскопом SEM за узорке QP980 машински обрађени а) глодањем, б) воденим млазом, в) жицом EDM и г) ласерским сечењем	24
23	Слика 2.23 Геометрија малог узорка за испитивање затезањем	25
24	Слика 2.24 Шематски приказ померања стезне чељусти и еластично угибање уређаја за испитивање затезањем	27
25	Слика 2.25 Основни принципи уређаја за испитивање микро-узорака затезањем	28
26	Слика 2.26 Узорак у зони хватања	29
27	Слика 2.27 Уређај за испитивање материјала затезањем	29
28	Слика 2.28 Систем за стезање епрувете	29
29	Слика 2.29 Уређај за испитивање материјала на затезање	30
30	Слика 2.30 Уређај за испитивање микро-жица на затезање	31
31	Слика 2.31 Уређај за испитивање	31
32	Слика 2.32 Позиционирање узорка	31
33	Слика 2.33 Шематски приказ уређаја за испитивање	32

34	Слика 2.34 Попречни пресек уређаја за испитивање материјала и изглед узорка	32
35	Слика 2.35 Саставни делови уређаја за испитивање затезањем узорака од тканине	33
36	Слика 2.36 Поступак за испитивање затезањем и ефекат силе отпора: а) систем за испитивање затезања састоји се од давача оптерећења, линеарног нивоа воде и DIC камере на антивибрационом столу, б) ултра танка Au превлака плута на равnoj површини воде и приближава се до зоне прихвата, поравнање је осигурано преко DIC камере, в) ултра танак узорак Au превлаке је снажно захваћен Van der Waals-овом адхезијом између PDMS превлаке и површине узорка, г) испитивање затезањем врши се на линеарном нивоу воде са брзином деформације од $0.06 \cdot 10^{-3}$ у секунди, а лом се јавља у средини мерне дужине узорка, д) мерење силе отпора извршено је причвршћивањем само једне стране узорка на давач силе.	34
37	Слика 2.37 Горња и доња стезна чељуст, монтиране на конвенционалну кидалицу, за прихват мањих или нестандарних узорака материјала	35
38	Слика 2.38 Уређај за испитивање малих узорака на затезање	35
39	Слика 2.39 Фотографија и шематски приказ новог ласерског мерног система деформације узорка, поглед одозго	36
40	Слика 2.40 Уређај за испитивање материјала затезањем/притискањем равних узорака на повишеној температури	36
41	Слика 2.41 Дизајнирани уређај (лево) са изгледом епрувете (десно)	37
42	Слика 2.42 Мини уређај за испитивање затезањем величине $330 \times 280 \times 155$ mm:	37
43	Слика 2.43 Премештање назначене тачке након примене оптерећења, фотографисано помоћу DIC	39
44	Слика 2.44 Методе одређивања модула еластичности када је граница пропорционалности ниска (нпр. код кртих материјала): а) Почетни модул тангенте: нагиб криве напона - деформација из координатног почетка (тј. нагиб ОМ на слици 2.44 а); б) Модул тангенте: нагиб криве напона - деформација при сваком датом напрезању (тј. нагиб ТРМ на слици 2.44 б); в) Модул секанте: нагиб секанте из координатног почетка на било коју одређену тачку на кривој напон - деформација (тј. нагиб ОР на слици 2.44 в); г) Модул тетиве: нагиб тетиве између било које две тачке	41

на кривој напон - деформација (тј. нагиб PQ на слици 2.44 г).

45	Слика 2.45 Шематски приказ података добијених софтвером и анализа процедуре	41
46	Слика 2.46 Крива напон - деформација код а) линеарно еластичних и б) нелинеарно еластичних материјала	43
47	Слика 2.47 Системи за прихват узорака. За узорке кружних попречних пресека: а) навојна веза, б) назубљени клинови, в) раздвојива чаура. За равне узорке г) чивија, д) назубљени клинови	46
48	Слика 2.48 Неправилно (лево - узорак није центриран у стезној чељусти; средина - оса узорка није паралелна правцу задавања оптерећења) и правилно постављање узорка у стезну чељуст уређаја за испитивање (десно)	47
49	Слика 2.49 Правилно постављање епрувете у стезну чељуст са клиновима (лево) и неправилно (десно)	47
50	Слика 2.50 Утицај ексцентричности узорка на грешке мерења при испитивању затезањем	48
51	Слика 2.51 Пнеуматски систем за прихватање равних узорака на уређају за испитивање затезањем	48
52	Слика 2.52 Утицај ексцентричности е узорка и правца силе на резултате мерења испитивањем затезања узорака од нискоугљеничних челика. Дијаграм десно приказује вредности границе течења	49
53	Слика 2.53 Утицај ексцентричности на механичка својства (затезна чврстоћа, горња и доња граница течења) за нискоугљеничне челике	50
54	Слика 2.54 Изглед новог система за прихват епрувете	50
55	Слика 2.55 Криве напон - деформација за легуре алуминијума 2026 добијене прихватом узорака у различитим положајима	51
56	Слика 2.56 Прихват узорака за испитивање затезањем	51
57	Слика 2.57 Експериментални дијаграм затезања делимично кристаличног полимера	54
58	Слика 3.1 Крива технички напон - деформације. Испрекидана линија представља криву стварних напона - деформација	56
59	Слика 3.2 Дијаграм напон - деформација за различите материјале	57

60	Слика 3.3 Дијаграм σ - ϵ за различите металне материјале	57
61	Слика 3.4 Поређење криве напон - деформација за високо-угљенични челик за опруге и конструкциони челик мање чврстоће	60
62	Слика 3.5 Идеализоване криве напон - деформација, (лево) стање непрекидног течења, (десно) прекидно течење, са горњом и доњом тачком течења	61
63	Слика 3.6 Типично понашање течења нискоугљеничног челика	62
64	Слика 3.7 Пластичност, еластичност (лево) и жилавост (десно) на основу дијаграма напон - деформација	65
65	Слика 3.8 Стање напона у епрувети приликом испитивања затезањем, пре локализације деформације (лево) и након локализације деформације (десно)	66
66	Слика 3.9 Поређење номиналне (техничке) и стварне криве напона - деформација (крива течења, ојачавања), са коригованим делом криве од тачке максималног напрезања	68
67	Слика 3.10 Логаритамски део криве стварног напона - деформације, n је експонент деформационог ојачавања; K је коефицијент чврстоће	71
68	Слика 3.11 Утицај различитих вредности експонента n_H на облик Hollomon-ове криве	71
69	Слика 3.12 Расподела напона на врату узорка оптерећеног на затезање, а) геометрија области врата. R је радијус кривине врата; a је минимални радијус на врату, б) напони који делују на елемент у тачки O . σ_x је напон у аксијалном смеру; σ_r је радијални напон; σ_t је тангентни напон	76
70	Слика 3.13 Шематски приказ расподеле напона у врату узорка кружног попречног пресека при испитивању затезањем	77
71	Слика 3.14 Троосно напонско стање у области врата узорка кружног попречног пресека при испитивању затезањем	77
72	Слика 3.15 Однос између Bridgman-овог корекционог фактора $\sigma/(\sigma_x)_{av}$ и стварне деформације при затезању	77
73	Слика 3.16 Формирање врата код равног узорка, пресек дуж врата епрувете	78
74	Слика 3.17 Разне приближне криве стварних напона - деформација за алуминијумску легуру AA6111-T4 добијене мерењем локализоване деформације помоћу дигиталне корелације слика	79

75	Слика 3.18 Два типа врата код епрувета са правоугаоним пресеком: дифузни и локализовани	79
76	Слика 3.19 Изглед дијаграма сила - издужење	79
77	Слика 3.20 Потешкоће у одређивању криве стварних напона - деформација код врло великих деформација приликом једноосног испитивања затезањем	81
78	Слика 3.21 Област Moiré шаблона а) формирање врата б) пре пуцања на површини (у средини узорка) и промена попречног пресека на месту лома добијеног Moiré техником	81
79	Слика 3.22 Танкозидни елементи на епрувети; почетна удаљеност између две тачке a_0 и крајња удаљеност између њих a_f	81
80	Слика 3.23 Упоредни приказ резултата; Некоригована крива напон - деформација. коригована крива напон - деформација из предложене методе и коригована крива по Bridgman-овој методи	81
81	Слика 3.24 Промена механичких карактеристика отпорности и деформабилности материјала при порасту температуре	82
82	Слика 3.25 Ефективни напон течења у функцији од температуре	85
83	Слика 3.26 Типични приказ (облика) криве напон - деформација челика на повишеним температурама	85
84	Слика 3.27 Зависност напона - деформација, модула еластичности, затезне чврстоће у функцији пораста температуре а) челик Q460 б) и в) челика Q460 и остали, респективно	86
85	Слика 3.28 Симулација формирања врата на епрувети на собној температури	86
86	Слика 3.29 Крива стварних напона - деформација на собној и повишеним температурама за челик 316L	87
87	Слика 4.1 Шематски приказ кидалице	91
88	Слика 4.2 Дијаграм вектора грешака померања	92
89	Слика 4.3 Кључни утицаји на неизвесност мерене величине	95
90	Слика 4.4 Ток и методе прорачуна мерне неизвесности	95
91	Слика 4.5 Неочекивано расипање измереног модула еластичности; горња и доња аналитичка крива	101

92	Слика 4.6 Димезије епрувете која се користи при испитивању затезањем	103
93	Слика 4.7 Зона радијуса епрувете кружног попречног пресека	104
94	Слика 4.8 Димезије епрувете правоугаоног попречног пресека која се користи при испитивању затезањем	106
95	Слика 4.9 а) Зона прихвата епрувете б) Апроксимативни приказ зоне прихвата епрувете	108
96	Слика 4.10 Главни алгоритам за развој софтвера	110
97	Слика 4.11 Помоћни алгоритам за прорачун константи код епрувета кружног попречног пресека	111
98	Слика 4.12 Помоћни алгоритам за прорачун константи код епрувета правоугаоног попречног пресека	112
99	Слика 4.13 Пропиленско везиво изложено затезању	116
100	Слика 4.14 Пресек А-А, расподела притиска у полипропиленском везиву изложеном затезању	117
101	Слика 4.15 Поглед N-N, расподела оптерећења дела n-тог влакна (правац N-N), дуж осе η	117
102	Слика 4.16 Пресек В-В и везе координата η и ξ са координатама ρ и α и ϕ .	118
103	Слика 4.17 Расподела притиска, напона и деформација n-те нити	119
104	Слика 5.1 Скраћени приказ садржаја процеса конструисања	123
105	Слика 5.2 Првобитна верзија уређаја	125
106	Слика 5.3 Дијаграм напон - деформација добијен испитивањем затезањем бакарне струне на првој верзији уређаја	125
107	Слика 5.4 Изглед узорка за испитивање материјала затезањем; а) кружни попречни пресек, б) правоугаони попречни пресек	126
108	Слика 5.5 Позиционирање узорака за испитивање: а) позиција пробног узорка, б) позиција једне опруге, в) позиција две паралелно везане опруге	127
109	Слика 5.6 Друга верзија уређаја	127

110	Слика 5.7 Дијаграми добијени испитивањем узорка од комерцијалног челика затезањем: а) дијаграми издужења и силе у току испитивања; б) дијаграм сила - издужење	128
111	Слика 5.8 Уређај са модулом за испитивање материјала на повишеним температурама; а) комплетна апаратура; б) детаљ из коморе након кидања епрувете	128
112	Слика 5.9 Преглед сила које утичу на грешку мерења (друга варијанта уређаја)	130
113	Слика 5.10 Преглед сила које утичу на грешку мерења (трећа варијанта уређаја)	131
114	Слика 5.11 3D модел оптимизиране треће варијанте уређаја	132
115	Слика 5.12 Оптимална решења улежиштења и естетске функције: а) конусни ваљкасти лежаји лево и десно од ременице; б) дизајн и позиција кутије за Arduino	133
116	Слика 5.13 Фотографија треће верзије уређаја	133
117	Слика 5.14 Дијаграм сила - издужење, добијен испитивањем челика на трећој верзији уређаја	134
118	Слика 5.15 Дијаграм напон - деформација, добијен испитивањем челика на трећој верзији уређаја	134
119	Слика 5.16 Попустљивост подскопа везе рама носеће конструкције уређаја и леве чељусти кидалице; а) постављање компаратера; б) мерење померања непокретне чељусти уређаја током испитивања; в) навојна веза између непокретне чељусти и рама конструкције	135
120	Слика 5.17 Систем позиционирања и прихвата епрувете: слободно ослоњена епрувета на уређају	137
121	Слика 5.18 Резултати ФЕА анализе за напонско стање епрувете (лево) и издужења епрувете по оси затезања (десно)	138
122	Слика 5.19 Систем позиционирања и стежања епрувете: а) шематски приказ, б) ФЕ померање, в) 3D модел и г) фотографски приказ	138
123	Слика 5.20 Облик и геометријске карактеристике епрувете за испитивање затезањем за конвенционалне кидалице	140
124	Слика 5.21 Облик и геометријске карактеристике епрувете за испитивање затезањем за мале, лабораторијске кидалице	140

125	Слика 5.22 Модул са комором: а) кретање коморе ради позиционирања и стезања епрувете пре почетка испитивања, б) епрувета у систему прихвата и стезања чаурама са вијком	140
126	Слика 5.23 Сензори положаја на уређају	141
127	Слика 5.24 Уређај за испитивање материјала затезањем	141
128	Слика 5.25 Почетни екран при покретању софтвера Кидалица	142
129	Слика 5.26 Дијаграм сила - издужење у реалном времену у току испитивања материјала	142
130	Слика 5.27 Креирање извештаја и дијаграма испитивања затезањем у софтверу Кидалица	143
131	Слика 5.28 Дијаграм сила - издужење, добијен испитивањем челика на четвртој верзији уређаја	143
132	Слика 5.29 Дијаграм напон - деформација, добијен испитивањем челика на четвртој верзији уређаја	143
133	Слика 5.30 Дијаграм контракција површине-стварни напон, добијен испитивањем челика на четвртој верзији уређаја	144
134	Слика 5.31 Дијаграм промена попречног пресека-стварни напон, добијен испитивањем челика на четвртој верзији уређаја	144
135	Слика 5.32 Приказ алтернатива, четири варијанте мале лабораторијске кидалице	149
136	Слика 6.1 План експерименталних испитивања	155
137	Слика 6.2 Облик епрувете од материјала челик S355J2	156
138	Слика 6.3 Димензије епрувете за испитивање затезањем на малој, лабораторијској кидалици: а) материјал челик S355J2, б) материјал челик DC01	156
139	Слика 6.4 Облик епрувете од материјала челик DC01	157
140	Слика 6.5 Полипропиленско везиво ТИП800	157
141	Слика 6.6 Уређај за испитивање материјала затезањем	159
142	Слика 6.7 Зависности неизвесности мерења модула еластичности од силе затезања и величине издужења за различите материјале и геометрије епрувета: а) КК (конвенционална кидалица са екстензиометром), б) МЛК (мала лабораторијска кидалица)	163

143	Слика 6.8 Дијаграмски приказ неизвесности модула еластичности, за материјале испитиване на конвенционалној кидалици КК и малој лабораторијској кидалици МЛК, у области малих издужења	164
144	Слика 6.9 Неизвесност мерења модула еластичности за два типа уређаја за испитивање затезањем	165
145	Слика 6.10 Релативне неизвесности одређивања модула еластичности које нису последица несавршености мерне инструментације	166
146	Слика 6.11 Дијаграм напон - деформација за материјал челик S355J2	167
147	Слика 6.12 Формирање врата на епрувети током испитивања	167
148	Слика 6.13 Дијаграм стварни напон - деформација за материјал челик S355J2	168
149	Слика 6.14 Дијаграм зависности стварне површине попречног пресека епрувете од напона - у току испитивања за материјал челик S355J2	168
150	Слика 6.15 Дијаграм зависности контракције површине попречног пресека епрувете од напона - у току испитивања за материјал челик S355J2	169
151	Слика 6.16 Испитивање епрувета на собним, повишеним и високим температурама: а) на собној температури; б) епрувете на собној температури 23 °С и након лома на температурама од 500 °С и 600 °С и в) уређај са комором за загревање узорака	169
152	Слика 6.17 Дијаграм напон - деформација за материјал DC01 на собним и повишеним температурама	170
153	Слика 6.18 Зависност затезне чврстоће од температуре испитивања за челик DC01	171
154	Слика 6.19 Дијаграм зависности површине попречног пресека од стварног напона челика DC01 на собној и повишеним температурама	171
155	Слика 6.20 Дијаграм зависности контракције површине попречног пресека од стварног напона челика DC01 на собној и повишеним температурама	172
156	Слика 6.21 Зависност површине попречног пресека у тренутку лома од температуре	173

157	Слика 6.22 Зависност контакције површине попречног пресека у тренутку лома од температуре	173
158	Слика 6.23 Дијаграми зависности издужења и деформација у тачки лома епрувете од температуре испитивања	174
159	Слика 6.24 Почетне вредности мерне дужине везива, средње вредности за обе серије: а) прва серија узорака; б) друга серија узорака	174
160	Слика 6.25 Пуцање спољашњих нити полипропиленског везива у току испитивања затезањем, по фазама а-ђ	175
161	Слика 6.26 Дијаграм напон - деформација серија узорака 1 и 2, средње вредности	176
162	Слика 6.27 Експериментални резултати напона - деформација за серије узорака 1 и 2	176
163	Слика 6.28 Стандардна девијација од аритметичке средине која обухвата 95.45% скупа добијених експерименталних резултата за: а) узорке серије 1 и б) узорке серије 2	177
164	Слика 7.1 3D дијаграм зависности $\left[\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{sr}} \right]$ од радијуса ρ на којем су распоређена влакна и издужења Δl	180

СПИСАК ТАБЕЛА

1	Табела 2.1 Преглед најчешће коришћених метода за одређивање модула еластичности	45
2	Табела 3.1 Индекс деформационог ојачавања	71
3	Табела 3.2 Преглед постојећих модела израза кривих течења, хронолошки	73
4	Табела 3.3 Вредности корективног фактора k у функцији параметра a/R	78
5	Табела 4.1 Сличности и разлике предива и челичног ужета	113
6	Табела 5.1 Скала мера	147
7	Табела 5.2 Вредности $R.I.$ у зависности од димензија матрице A	148
8	Табела 5.3 Вредности коефицијента приближења и ранг алтернатива	154
9	Табела 6.1 Подаци потребни за симулацију прорачуна неизвесности мерења модула еластичности за различите типове кидалица и геометрију узорака.	162
10	Табела 6.2 Прорачун неизвесности мерења модула еластичности	165
11	Табела 6.3 Вредности затезне чврстоће R_m (МПа) и стварне затезне чврстоће R_{mstv} (МПа) у функцији од температура испитивања	170
12	Табела 6.4 Вредности површине попречног пресека A_k и њене контракције ψ након лома епрувете на собној, повишеним и високим температурама	172
13	Табела 6.5 Вредности издужења и деформација након лома епрувете на собној, повишеним и високим температурама	173

ПРЕГЛЕД СКРАЋАНИЦА И СТРАНИХ РЕЧИ

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene	акрилонитрил бутадиен стирен
ADC	Abrasive Diamond Cutter	резање дијамантом
AHP	Analytic Hierarchical Process	аналитички хијерархијски процес
ANN	Artificial Neural Networks	вештачке неуронске мреже
ASABE	American Society of Agricultural and Biological Engineers	Америчко друштво инжењера пољопривреде и биологије
ASTM	American Society for Testing and Materials	Америчко друштво за испитивање и материјале
AWJ	Abrasive Water Jet	сечење воденим абразивним резним млазом
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer	полимер ојачан угљеничним влакнима
CNC	Computer Numerical Control	рачунарска нумеричка контрола
DAQ	Data Acquisition	систем за прикупљање података
DC	Direction of Current Flow	правац струјања
DIC	Digital Image Correlation	корелација дигиталне слике
EDM	Electrical Discharge Machining	сечење електро пражњењем жице
ELS	Equal Load Sharing	једнако дељење оптерећења
EN	European Standards	Европски стандарди
FEM	Finite Element Method	метода коначних елемената
FEA	Finite Element Analysis	анализа коначним елементима
GLS	Global Load Sharing	глобално дељење оптерећења
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement	Приручник за израчунавање неизвесности у мерењу
HL	Hollomon Linear	линеарна константа
HLC	Hollomon Linear Constant	Hollomon линеарна константа
ISO	International Organization for Standardization	Међународна организација за стандардизацију
LBC	Laser Beam Cutting	резање ласерским снопом
LLS	Local Load Sharing	локално дељење оптерећења

MC	Milling Cutting	Глодање
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems	микро електро механички системи
M-TT	Micro Tensile Tests	испитивање микро материјала на затезање
Nd:YAG	Neodymium Yttrium-Aluminum Garnet crystal	Nd:YAG кристал
NIS	Negative Ideal Solution	негативно идеално решење
OFC	Oxygen Flame Cutting	сечење кисеоником
OWA	Ordered Weighted Averaging (OWA) operators	уређени пондерисани оператор усредњавања
PBC	Plasma Beam Cutting	резање плазмом
PC	Polycarbonates	Поликарбонати
PDMS	Polydimethylsiloxane coated grips	полидиметилсилоксаном обложене чељусти
PIS	Positive Ideal Solution	позитивно идеално решење
PLA	Poly Lactic Acid	полилактична киселина
PZT	Piezoelectric Actuator	пиезоелектрични актуатор
RepRap	Replicating Rapid Prototiper	репликујући рапидни прототипер
SC	Saw Cutting	резање тестером
SCS	Single Crystalline Silicon	монокристални силикон
SEM	Scanning Electron Microscope	скенирајући електронски микроскоп
SLS	Selective Laser Sintering	селективно ласерско синтеровање
SSTT	Small Specimen Test Technique	техника испитивања малих узорака
TRIP	Transformation Induced Plasticity	пластичност индукована трансформацијом
TOPSIS	The Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution	техника за одређивање ранга перформанси помоћу сличности са идеалним решењем
TWIP	Twinning Induced Plasticity	пластичност изазвана twinning-ом
VFM	The Virtual Fields Method	метода виртуалних поља
WEDC	Wire Electrical Discharge Cutting	електро обрада жицом
WEDM	Wire Electro Discharge Machining	обрада електропражњењем жице

ПРЕГЛЕД ЗНАЧАЈНИХ ОЗНАКА

A_0	Почетна површина попречног пресека узорка
A_k	Попречни пресек узорка после прекида
$A_{\%}$	Процентуално издужење узорка при лому
b_0	Почетни пречник епрувете или почетна ширина мерног дела епрувете
b_3	Почетни пречник зоне прихвата епрувете у стезној чељусти кидалице
E	Модул еластичности или Young-ов модул
E_{EXP}	Експериментално одређена вредност модула еластичности
F	Сила затезања
F_k	Сила затезања у тачки лома
F_{max}, F_m	Максимална сила затезања
F_p	Сила на граници пропорционалности
h	Почетна дебљина епрувете
l	Мерна дужина епрувете
l_k	Коначна мерна дужина епрувете при лому
l_0	Почетна мерна дужина епрувете
l_3	Почетна дужина зоне прихвата епрувете у стезној чељусти кидалице
$\Delta l, \Delta l_1$	Издужење мерне дужине узорка
Δl_2	Издужење епрувете у зони радијуса
Δl_3	Издужење епрувете у зони прихвата епрувете
Δl_u	Укупно издужење епрувете
R	Радијус епрувете у зони прелаза
R_{eH}	Горњи напон течења
R_{eL}	Доњи напон течења

R_k	Напон у тачки лома
R_{kstv}	Стварни напон у тачки лома
R_m	Затезна чврстоћа
R_{mstv}	Стварна затезна чврстоћа
R_p	Напон на граници пропорционалности
$R_{p0.2}$	Конвенционални напон течења
U	Резилијентност
U_T	Модул еластичне енергије или модул резилијентности
W_{A_0}	Неизвесност почетне површине попречног пресека епрувете
W_E	Неизвесност модула еластичности
$W_E(\Delta l)$	Неизвесност модула еластичности у функцији од промене мерне дужине епрувете
W_F	Неизвесност силе
W_{l_0}	Неизвесност почетне дужине епрувете
$W_{\Delta l}$	Неизвесност промене мерне дужине епрувете
W_{R_m}	Неизвесности затезне чврстоће
α	Произвољни угао завојнице
α_{max}	Максимални угао завојнице
ε	Деформација, релативно јединично издужење у процентима
ε_{stv}	Стварна деформација
ε_{mstv}	Стварна деформација при максималном оптерећењу
ε_{kstv}	Стварна деформација у тачки лома
ε_{nstv}	Стварна локализована деформација
ε_1	Грешка мерења услед попустљивости рама кидалице
ε_2	Грешка мерења услед попустљивости подклопа везе рама носеће конструкције и леве чељусти кидалице

ε_3	Грешка мерења услед попустљивости конструкције леве чељусти
ε_4	Грешка мерења услед попустљивости испитиваног узорка (епрувете) у зони контакта епрувете и леве чељусти
ε_5	Грешка мерења услед попустљивости конструкције десне чељусти
ε_6	Грешка мерења услед попустљивости испитиваног узорка (епрувете) у зони контакта епрувете и десне чељусти
ε_7	Грешка мерења услед попустљивости елемента који повезује десну чељуст са динамометром и вучним системом кидалице
σ	Технички (номинални, нормални) напон
σ_{stv}	Стварни (нормални) напон
ψ	Контракција попречног пресека у процентима

1 УВОДНА РАЗМАТРАЊА

Основне карактеристике материјала, гледано из инжењерског угла, су механичке карактеристике: модул еластичности, напон течења, чврстоћа, жилавост, тврдоћа, динамичка издржљивост итд. Карактеристике (својства, особине) материјала су мерљиве величине и могу се бројчано одредити стандардним методама испитивања.

Механичке карактеристике се одређују испитивањем материјала затезним, притисним или комбинованим, вишесмерним напрезањима, при чему се мере издужења до лома материјала, односно успоставља се веза између сила (напона) које делују на материјал и отпора које то тело пружа настанку деформација и лома. Одређивање механичких карактеристика зависи од много фактора укључујући металуршке особине материјала (микроструктура и типови кристалних решетки), методе испитивања, као и природу примењених напрезања.

Најраширенија и најједноставнија метода која се користи за испитивање механичких особина материјала је испитивање материјала затезањем, где се узорак (спрувета) затеже дуж његове средишње најдуже осе до лома. Испитивања материјала затезањем најбоље описују понашање материјала под оптерећењем. Познавање карактеристика материјала добијених овом методом се највише користе при димензионисању и прорачунавању машинских елемената и конструкција. На основу њих се врши контрола технолошких процеса разних машинских система и карактеристика нових материјала. Подаци о својствима отпорности материјала омогућавају да се приближно одреде друге важне карактеристике материјала, попут тврдоће, динамичке издржљивости итд.

Конвенционални уређаји за испитивање материјала затезањем - кидалице, су најчешће великих габарита и масе и користе се у посебним, лабораторијским условима. Геометријске карактеристике и облик узорака материјала за испитивање (спрувета) су прописани стандардима. Данашња тенденција ка дигитализацији, аутоматизацији и имплементацији вештачке интелигенције у индустрији иде у корак са оптимизацијом процеса производње, набавке и пласмана производа на тржиште. Све је више захтева ка произвођачима уређаја за испитивање, за производима који су компактни, поуздани и једноставни за руковање, дизајнирани за мање и средње силе приликом испитивања различитих материјала, чија би инсталација могла бити, без посебних услова, директно у производном погону. Као резултат те тражње, реномирани произвођачи кидалица дизајнирају уређаје са рамовима за стону или подну монтажу, са прилагодљивим стезним чељустима за прихват различитих облика и величина спрувета металних и неметалних материјала.

Поред тога, развој науке и технологије показао је јасан тренд примене нових, скувих материјала у машинским системима, као и смањивања њихових габарита, како због трошкова, тако и због минимизације индустријских компоненти. Тако је настала потреба за производњом малих, неконвенционалних кидалица, које имају могућност да врше испитивање материјала на узорцима мањих попречних пресека, нестандартних облика и димензија, а да се добијени резултати механичких карактеристика материјала могу сматрати поузданим и тачним. То отвара могућност спровођења значајних истраживања у области испитивања материјала под дејством спољашњих сила. Такође, мале, лабораторијске кидалице се могу користити и у едукативне сврхе, како због својих

технолошко-ергономских предности у односу на конвенционалне кидалице, тако и са аспекта исплативости уложених средстава.

1.1 ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

Циљ истраживања ове докторске дисертације је развој и оптимизација мале, лабораторијске кидалице за испитивање металних и неметалних материјала затезањем на собним, повишеним и високим температурама, као поузданог и економичног уређаја, ниске цене коштања. Применом мале, лабораторијске кидалице за испитивање материјала очекује се да вредности добијених механичких карактеристика буду одговарајуће тачности, при чему су одступања у границама која су прописана стандардима. На основу прелиминарних извршених истраживања у вези са темом дисертације, може се закључити да би примена мале лабораторијске кидалице била значајна у различитим доменима, као на пример, у образовању студената техничких наука и како научним, тако и индустријским истраживањима. Треба нагласити да на нашим просторима нема произвођача таквих уређаја, што повећава значај развоја истог.

1.2 ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ ИСТРАЖИВАЊА

Анализом литературних извора закључено је да се проблеми добијања поузданих и тачних вредности карактеристика материјала (издужења, силе и напона, модула еластичности) на кидалицама јављају због великог броја утицајних фактора.

Неки од најутицајних фактора су попустљивости у одређеним зонама саме конструкције кидалице, односно попустљивости одређених подсклопова конструкције. У раду су анализирани попустљивости у свим критичним зонама конструкције, са посебним освртом на попустљивост која се јавља у стезним челоустима уређаја, што за последицу има грешке у мерењу издужења и силе затезања. Дакле, добијање поузданих и тачних резултата испитивања у директној је спрези са одговарајућом крутошћу уређаја, где су могуће попустљивости подсклопова сведене на минимум.

Мерна инструментација уређаја има јако велики утицај на тачност резултата мерења. Анализа овог утицаја је извршена мерењем и поређењем добијених резултата модула еластичности са резултатима добијеним на конвенционалној кидалици. Већина литературних навода, као и стандарди који прописују испитивање материјала затезањем, су става да се издужење епрувете у току испитивања може тачно измерити само уз помоћ екстензиометара, јер су издужења у области еластичних деформација јако мала, реда величине десетог дела милиметра. На основу Нооке-овог закона извршена је процена неизвесности мерења модула еластичности и аналитичким путем су одређене криве неизвесности мерења које се могу сматрати граничним вредностима очекиваних расипања експериментално одређених вредности модула еластичности. Свако одступање резултата од вредности унутар аналитичких кривих, представља неочекивано расипање које није настало услед геометрије испитиваних узорака или тачности мерне инструментације.

Код узорака малих димензија мерење деформације се врши на основу мерења померања стезне челоусти уређаја за испитивање затезањем, при чему је измерено издужење

укључило и издужење зоне радијуса епрувете и издужење прихватног дела епрувете у стезној чељусти уређаја, а не само њеног почетног мерног дела. Аналитичким прорачуном су добијени изрази на основу којих је могуће проценити удео издужења у свакој зони епрувете у укупном издужењу и на тај начин утицати на тачност добијених резултата, посматрањем издужења које се реално догодило на мерној дужини епрувете.

Део рада се односи на испитивање узорака од полипропилена на малој лабораторијској кидалици. Полипропиленско везиво се при оптерећењу на затезање понаша најприближније челичним ужадима. Када се у процесу испитивања затезањем једно влакно прекине, преостала влакна ће преузимати оптерећење и прерасподељивати га између себе, све док не пукне и последње влакно. Механизам понашања везива при оптерећењу је комплексан, због сложене геометрије и појаве сложеног напонског стања. Расподела оптерећења је посматрана кроз деформациони рад.

1.3 ОСНОВНЕ ХИПОТЕЗЕ

Механичке карактеристике материјала одговарајуће тачности могу се испитати на епруветама малог попречног пресека при релативно ниским вредностима сила затезања, што се може дефинисати као прва хипотеза докторске дисертације. На овај начин може се развити уређај одговарајуће крутости, обезбедити једноставан и поуздан модул уређаја за испитивање материјала на повишеним и високим температурама. Треба у обзир узети чињеницу да мали пресеци испитиваних узорака повлаче за собом грешку мерења везану за одступања димензија пресека. Теоријским разматрањем и оптимизацијом пресека узорака могуће је са занемарљивом грешком одредити карактеристике испитиваних материјала (модул еластичности, граница течења, затезна чврстоћа и др.). Испитивање материјала затезањем на узорцима малих попречних пресека има предности у односу на испитивање узорака стандардних димензија, гледано са економског аспекта.

Мала, лабораторијска кидалица за испитивање материјала затезањем на собним температурама, као и на повишеним и високим, омогућава ефективније и ефикасније управљање системом, уз истовремено смањивање трошкова. Ово представља другу хипотезу докторске дисертације.

На крају, може се поставити трећа хипотеза: на основу предложених аналитичких модела могуће је развити одговарајући софтвер, чијом применом се могу добити вредности стварних напона, сужења попречног пресека узорака материјала и визуелног приказа смањења попречног пресека испитиване епрувете.

1.4 МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА

Методе које ће се користити у испитивању карактеристика материјала на различитим температурама надаље су приказане:

- Теоријске анализе понашања материјала у области еластичних и пластичних деформација. Ове методе обухватају: а) испитивање понашања узорака применом теорије еластичности и пластичности, б) испитивање елемената

уређаја (подсистема за прихват узорака – стезне чељусти, подсистема вођења и носеће конструкције) са аспекта крутости и попустљивости елемената конструкције. Резултати који су добијени применом метода теоријских анализа представљају основ за развој софтвера, који омогућава добијање тачних и поузданих вредности механичких карактеристика материјала (модул еластичности, граница течења, затезна чврстоћа и др.).

- Експериментална истраживања, која се односе на развој мале, лабораторијске кидалице, уз непрекидно праћење крутости односно попустљивости подсистема конструкције при различитим нивоима оптерећења, као и развој модула за испитивање материјала на повишеним и високим температурама.

1.5 ОЧЕКИВАНИ РЕЗУЛТАТИ

Основни допринос ове докторске дисертације представља развој мале лабораторијске кидалице која има вишеструку намену.

Компоненте основног доприноса су:

- мала лабораторијска кидалица представља поуздан уређај на којој се испитивањем материјала могу добити вредности механичких карактеристика са веома малим грешкама;
- минимизирање вредности грешака мерења;
- добијање оптималне вредности цене коштања уређаја;
- мала лабораторијска кидалица може се користити: а) у процесу образовања на техничким високошколским установама и институтима, б) процесима научних и индустријских истраживања и в) практичној примени у индустријским процесима.

1.6 ОКВИРНИ САДРЖАЈ РАДА

Докторска дисертација се састоји из седам поглавља:

1. Уводна разматрања - У овом поглављу дефинисани су предмет и циљеви дисертације и дате теоријске основе истраживања. Представљене су полазне хипотезе и методе истраживања. Приказани су очекивани резултати и допринос рада. На крају је дат оквирни садржај докторске дисертације.
2. Преглед литературе - Друго поглавље рада садржи темељан преглед досадашњих решења неконвенционалних уређаја за испитивање материјала затезањем, као и опис процеса током којег је уложен велики напор истраживача да се узимањем у обзир многобројних утицајних фактора дође до оптималних димензија и облика малих и микро узорака за испитивање, а све у циљу добијања што тачнијих механичких карактеристика материјала. Обухваћен је и утицај израде и обраде узорака на тачност мерења, а досадашња истраживања и закључци из ове области су узете као смернице за израду узорака за експериментална истраживања у овом раду.

3. Одређивање механичких карактеристика материјала на затезање при собним, повишеним и високим температурама - У овом поглављу је дата комплетна анализа свих карактеристика материјала које се могу добити испитивањем затезањем, како на собним, тако и на повишеним температурама, респектујући и најновија истраживања у овој области.
4. Теоријске основе предложене методе истраживања - Четврто поглавље представља основу за развој мале лабораторијске кидалице и софтвера који ће бити имплементиран за аутоматску обраду добијених података. Сагледани су проблеми попустљивости подсистема конструкције кидалице, посебно попустљивост која се јавља у стезној чељусти уређаја и зони прихвата епрувете. Развијен је аналитички модел за процену неизвесности мерења модула еластичности, као и модел за прорачун издужења епрувета малих попречних пресека у свим зонама епрувете по дужини, односно оси затезања. Теоријска разматрања су имала јединствен циљ, а то је развој лабораторијске кидалице са што већом тачношћу добијених резултата испитивања.
5. Развој уређаја - кидалице намењене за едукативне и истраживачке сврхе - На основу теоријских разматрања из претходног поглавља рада, у овом поглављу је разматран развој четири узастопна решења мале, лабораторијске кидалице за испитивање материјала, који је на основу оптимизовања принципа рада и листе захтева резултирао креирањем оптималне варијанте. Применом методе вишекритеријумске оптимизације у оцени и избору различитих решења кидалица, на крају овог поглавља донет је закључак о најбољем решењу на основу респектованих задатих критеријума.
6. Експериментална испитивања - У складу са планом експерименталних испитивања прво је извршен одабир материјала за испитивање. Након тога дефинисани су услови испитивања, да би на основу идејног решења конструкције и система за пренос и аквизицију података био развијен одговарајући уређај за испитивање материјала. Након експерименталних испитивања металних и неметалних материјала на собним и повишеним температурама, дат је преглед резултата кроз дијаграме и табеле.
7. Дискусија добијених резултата - На основу резултата експерименталних испитивања извршена је дискусија.
8. Закључци - Приказан је допринос дисертације и представљени су правци будућих истраживања.

Након закључка, дат је списак коришћене литературе, при чему су референце наведене абecedним редом. На крају рада је Прилог 1, који представља извођење и решење аналитичког прорачуна укупних деформација епрувете кружног и правоугаоног попречног пресека.

2 ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

Од почетне идеје до развоја мале, лабораторијске кидалице било је потребно сагледати велики број фактора који су могли да утичу на функционалност уређаја, односно његову поузданост и тачност мерења. Морало се водити рачуна о њеним техничко-технолошким и ергономским својствима, са посебним освртом на економски аспект. Задовољавајућа крутост уређаја, односно елиминисање појаве попустљивости подсистема кидалице, посебно попустљивости која се јавља у стезним чељустима кидалица, предмет су истраживања великог броја аутора. Механичке карактеристике материјала које се добијају као резултат испитивања затезањем не могу бити релевантне уколико постоји неконтролисано померање у стезним чељустима кидалице. То се посебно односи на одређивање модула еластичности материјала, јер се та величина одређује у областима еластичних деформација, где су измерена издужења мања од милиметра.

Узорци материјала који се користе за испитивање на малој лабораторијској кидалици нису стандардизованих облика и димензија, па су се на основу прегледа истраживања у тој области издвојиле неке смернице. Израда и обрада узорка материјала за испитивање такође утиче на тачност испитивања, на шта упућују многобројни литературни извори.

2.1 УЗОРЦИ (ЕПРУВЕТЕ) МАТЕРИЈАЛА ЗА ИСПИТИВАЊЕ ЗАТЕЗАЊЕМ НА НЕКОНВЕНЦИОНАЛНИМ КИДАЛИЦАМА

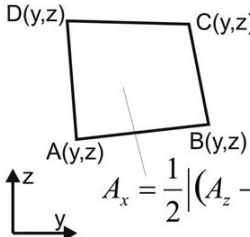
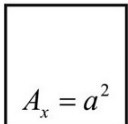
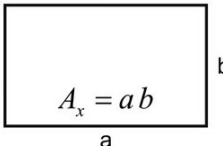
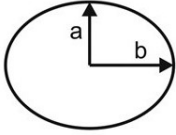
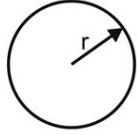
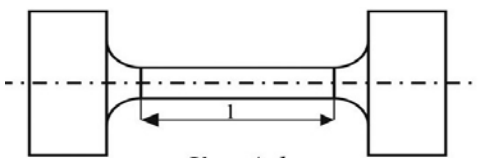
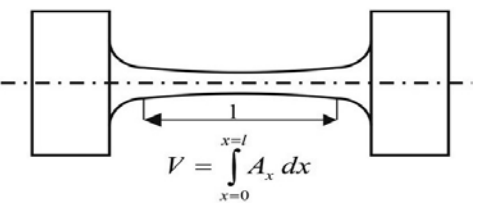
2.1.1 УТИЦАЈ ОБЛИКА И ДИМЕНЗИЈА УЗОРАКА НА РЕЗУЛТАТЕ ИСПИТИВАЊА

Изглед и геометрија узорка (епрувета) за испитивање материјала затезањем су стандардизовани и препоруке облика и димензија дате су у важећим стандардима. Међутим у последње време све се више јавља потреба за испитивањем материјала ван лабораторијских услова и без примене конвенционалних уређаја, у реалном процесу производње, где и узорци који се користе за испитивање немају стандардом предвиђене вредности. Већ је поменута тежња за смањењем димензија производа условљена убрзаним научно-технолошким развојем и применом нових материјала, па самим тим и узорка за испитивање. Други разлог за смањивање узорка и до микро величине је ограничена количина расположивог материјала, рецимо за радиоактивне и скупе материјале или нове материјале који се могу створити само у малим количинама.

У том смислу постоје разна истраживања модела испитивања материјала затезањем који би узели у обзир утицај величине узорка, нестандартних облика и димензија, кружног или правоугаоног попречног пресека.

Геометрија узорка за испитивање описана је обликом попречног пресека (правоугаони или кружни) и његовом мерном дужином узорка (константна или променљива) као што је приказано на слици 2.1 [G.V. Rathmayr, 2013].

Узорци правоугаоних попречних пресека су распрострањени из више разлога. Један од њих је што сечењем из табле одређене дебљине узорак задржава ту димензију, а прецизним сечењем се контролишу преостале две димензије. Али ако су потребне мале димензије узорка ($<1 \text{ mm}$), прилично је тешко довољно прецизно израдити узорке са правоугаоним попречним пресеком. Дешава се да угао између две бочне површине не буде 90° , а ивица не буде савршено оштра већ заобљена. Такве ивице могу имати зарезе или неравнине, што може утицати на испитивање затезањем код мање дуктилних материјала. Рад са узорцима који су $<1 \text{ mm}$, а имају правоугаони попречни пресек и нису идеалних димензија, може утицати на крајње резултате експерименталног испитивања затезањем. На пример, ако облик узорка није правоугаоног облика, треба користити формулу четвороугла за израчунавање стварне површине попречног пресека узорка како је приказано на слици 2.1.

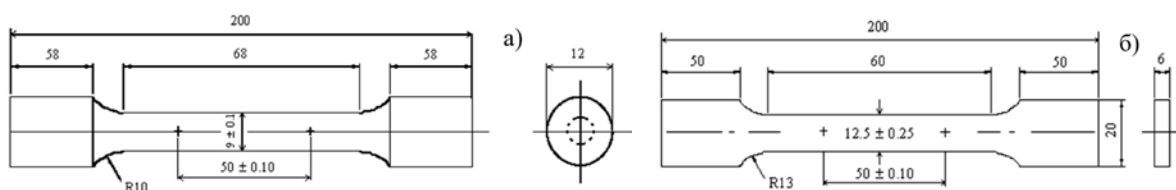
Различити облици попречног пресека узорка за испитивање				
правоугаони (четвороугаони)			кружни	
четвороугао	квадрат	правоугаоник	елипса	круг
 $A_x = \frac{1}{2} (A_z - C_z) \cdot (D_y - B_y) + (B_z - D_z) \cdot (A_y - C_y) $	 $A_x = a^2$	 $A_x = a b$	 $A_x = a b \pi$	 $A_x = r^2 \pi$
Промена попречног пресека дуж мерне дужине узорка (спрувете)				
константна површина		променљива површина		
 $V = A_x l$		 $V = \int_{x=0}^{x=l} A_x dx$		

Слика 2.1 Различити попречни пресеци узорака за испитивање и изрази за израчунавање површине попречног пресека на мерној дужини [G.B. Rathmaur, 2013]

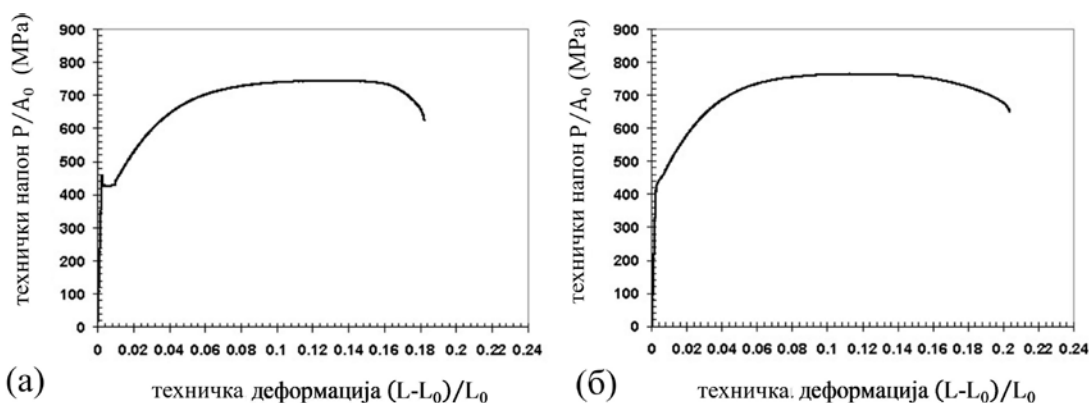
Побољшана тачност димензија узорака може се постићи коришћењем узорака кружних попречних пресека због обртне симетрије коју обезбеђује поступак израде. Одсуством оштрих ивица у геометрији узорка смањује се појава зареза или неравнина. Генерално, геометрија узорка са кружним пресеком може се описати као функција полупречника на мерној дужини узорка. Ако се претпостави да кружни попречни пресек не мења кружност читавим током испитивања затезањем, што је и испуњено код изотропних материјала, могу се одредити вредности стварних напона и деформација (радијус врата) једноставном анализом слика, снимљених управно на осу затезања током експеримента. Свака слика је пресек узорка по мерној дужини, па се самим тим радијуси могу директно мерити. Заједно са обликом попречног пресека, потребно је развијати подручје пресека дуж мерне дужине узорка како би се у потпуности описала геометрија узорка и

израчунали стварни напон и локализована деформација узорка као што је приказано на слици 2.1 [G.B. Rathmayr, 2013].

Експерименталне и нумеричке анализе рађене су на узорцима кружног и правоугаоног попречног пресека од нелегираног челика SAE 1045 (C45 по EN 10277-2-2008), како би се одредиле њихове механичке карактеристике и упоредили добијени резултати, слике 2.2 и 2.3. Закључено је да се могу добити задовољавајући резултати коришћењем оба облика узорака [E.E. Cabezas, D.J. Celentano, 2004]. На основу анализе дијаграма са слике 2.3, може се закључити да се на почетку процеса деформације материјал понаша еластично. Након достизања напона течења, почиње деформационо ојачавање материјала и оптерећење расте до максималне вредности за одређено издужење. Тада се оптерећење смањује, јер је ефекат смањења попречног пресека у зони врата јачи од ефекта механизма ојачања. Дифузно формирање врата карактеристично је за обе врсте узорака. Треба, међутим, напоменути да су карактеристике отпорности материјала (напон течења, затезна чврстоћа) код узорака са кружним попречним пресеком незнатно мањих вредности него код узорака са правоугаоним попречним пресеком, као и издужење узорка до лома. Изглед дијаграма затезања зависи од материјала. Међутим, приметно је са дијаграма да нема карактеристичног течења материјала код узорака са правоугаоним попречним пресеком, што аутори објашњавају ефектима обрадних процеса коришћеним за израду узорака.



Слика 2.2 Анализа узорка од челика SAE 1045: геометрија за а) кружни попречни пресек и б) правоугаони попречни пресек [E.E. Cabezas, D.J. Celentano, 2004]



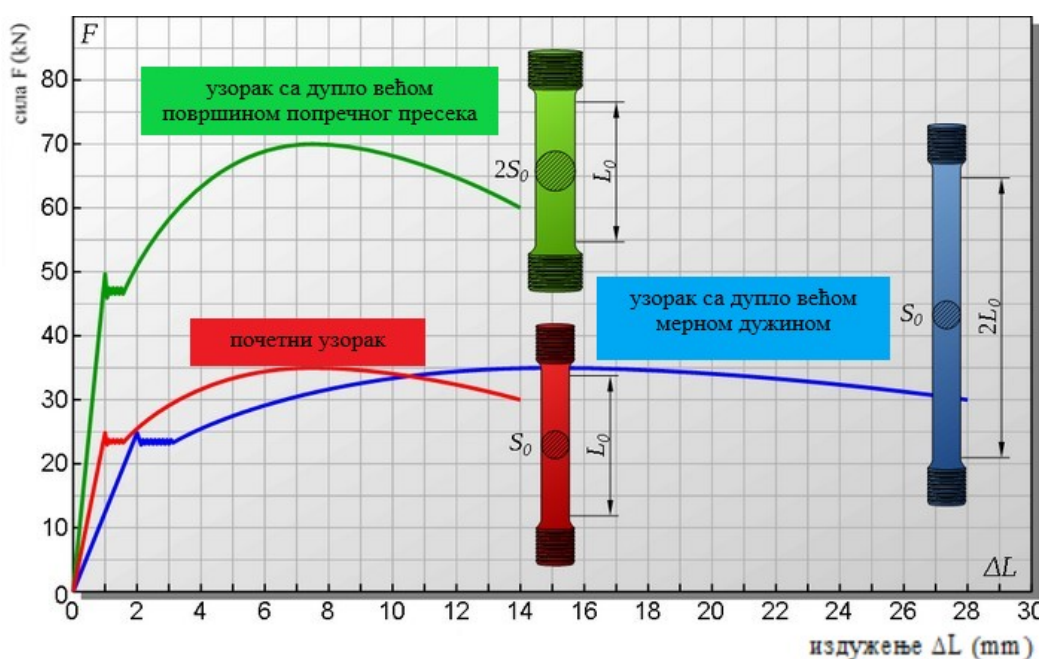
Слика 2.3 Анализа узорка од челика SAE 1045: крива напон - деформација за а) кружни попречни пресек и б) правоугаони попречни пресек [E.E. Cabezas, D.J. Celentano, 2004]

Облик и геометријске величине узорка са кружним попречним пресеком се могу израђивати у складу са стандардима [ASTM E8/E8M-09, 2009], који наводе да однос мерне дужине епрувете и пречника треба да буде четири или пет. Уколико се овај однос не испоштује, вредности издужења можда неће бити упоредиве са вредностима добијеним испитивањем конвенционалних узорака. Међутим, у већини случајева, димензије узорака нису по стандардима: на пример, када су узорци исечени директно из радног дела и када је однос мерне дужине и пречника мањи или већи од вредности (четири или пет) специфицираних у стандардима. То одступање доводи до питања како

се резултати добијени различитим испитивањима могу упоредити ако нису коришћене исте величине узорка и како се резултати добијени испитивањем узорка различитих величина могу међусобно поредити [W.J. Yuan, 2013].

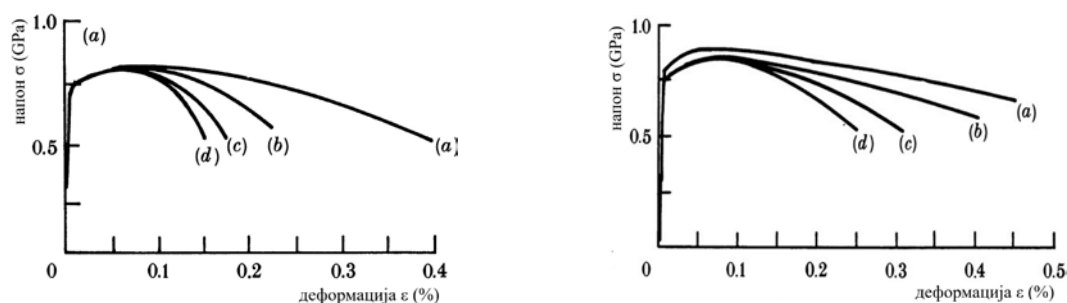
Утицај геометрије узорка са кружним попречним пресеком на податке који се бележе током испитивања цртањем криве сила - издужење се може уопштити следећим закључцима [www.tec-science.com]:

- Са порастом мерне дужине епрувете, при истом попречном пресеку, карактеристичне вредности сила се не мењају, али се мењају вредности издужења које су веће у свим карактеристичним тачкама дијаграма до лома.
- Са повећањем величине попречног пресека епрувете, а за исту мерну дужину, карактеристичне вредности сила се повећавају, док су вредности издужења епрувете до лома идентичне, слика 2.4.



Слика 2.4 Утицај геометрије епрувете кружног попречног пресека на криве сила - издужење [www.tec-science.com]

Истраживан је утицај пречника узорка кружног попречног пресека на његова затезна својства [N.K. Gupta, 1982, P. Matic, 1988]. P. Matic са сарадницима (1988) проучава утицај односа L_0/D_0 (где су L_0 и D_0 мерна дужина и пречник пресека респективно) на криву техничког напона - деформација код нисколегираних челичних узорка НУ-100 различитих пречника и мерних дужина. Резултати су показали да криве техничког напона - деформација зависе од геометрије узорка, односно да се релативно јединично издужење у процентима узорка смањује како се однос L_0/D_0 повећава, док је напон у тачки кидања незнатно мањи, слика 2.5. Напон течења и затезна чврстоћа су најмање осетљиве величине на промену ових односа, осим за максимални однос L_0/D_0 у овом експерименту (слика 2.5, десно, крива (а), где се види да долази до раста како однос расте. Аутор је такође дошао до закључка да се са порастом односа L_0/D_0 код узорка повећава дуктилност материјала ако се до таквог односа долази смањивањем попречног пресека D_0 и ако се изузму резултати за најмањи испитивани пречник D_0 .



Слика 2.5 Криве напон - деформација у функцији односа L_0/D_0 , при чему однос L_0/D_0 расте од криве (a) до криве (d): (a) $L_0/D_0 = 0.71$, (b) $L_0/D_0 = 1.42$, (c) $L_0/D_0 = 2.14$, (d) $L_0/D_0 = 2.85$, а за пречнике $D_0 = 7.6$ mm (лево) и $D_0 = 17.8$ mm (десно) [P. Matic, 1988]

Применом методе коначних елемената FEM (*енг.* Finite Element Method), P. Matic са сарадницима (1988) је такође утврдио да је дужина формираног врата на деформисаном узорку приближно једнака пречнику узорка, односно да би дошло до прекида епрувете, тј. да би се потпуно формирао врат након постизања максималне силе однос L_0/D_0 мора да буде најмање једнак јединици.

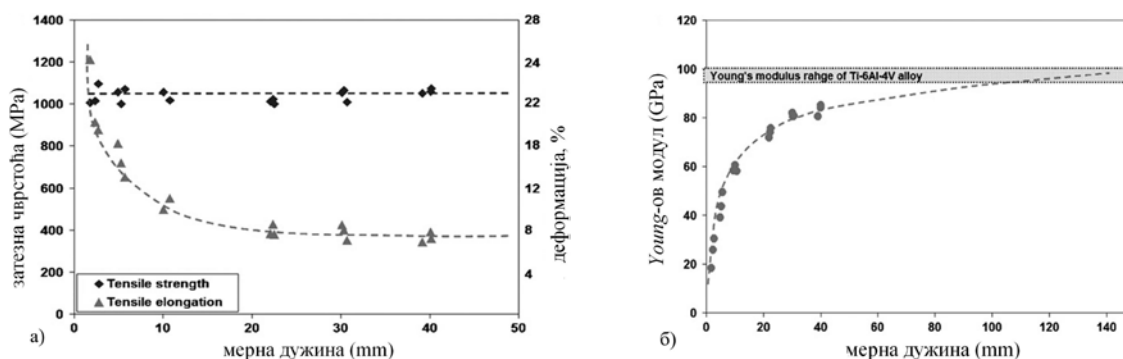
N.K. Gupta са сарадницима (1982) је истраживао понашање узорака алуминијума и бакра различитих дужина и пречника оптерећених на затезање. Њихове студије су показале да када оптерећење достигне свој максимум, почетак формирања врата зависи од дужине и пречника узорка, а дужина деформације након формирања врата се линеарно повећава са пречником и не зависи од мерне дужине епрувете.

Захваљујући методи коначних елемената могуће је показати да својства материјала оптерећених на затезање зависе од геометрије узорака. W.J. Yuan са сарадницима (2012) испитује узорке правоугаоног попречног пресека, једнаких мерних дужина, једнаких ширина, а различитих дебљина. Аутори су извели закључак да напон течења и затезна чврстоћа челика не зависе од дебљине узорка. Међутим, укупно издужење до лома и издужење након формирања врата епрувете повећавају се са повећањем дебљине узорка, док равномерно издужење (издужење до појаве врата на епрувети у тачки постизања максималне силе) не зависи од промене дебљине узорка. Како би се приликом анализе методом коначних елемената симулирало издужење узорка, аутори предлажу примену критеријума лома, по коме се претпоставља да је стварни напон у тачки лома једнак за узорке правоугаоног пресека различите дебљине. Међутим, због ограничења правоугаоног попречног пресека, критеријум лома предложен за FEM није експериментално проверен. Годину дана касније, исти аутори приказују експерименталну верификацију својстава материјала оптерећених затезањем по критеријуму лома симулираног FEM-ом, како би се одредила издужења узорака у функцији различитих геометријских величина. Овог пута испитују се утицаји димензија узорка са кружним пресеком на својства чистог бакра изложеног затезању, где су епрувете једнаке мерне дужине, а варирају се пречници [W.J. Yuan, 2013]. Утврђено је да затезна чврстоћа, контракција попречног пресека и равномерно издужење до тачке постизања максималне силе, не зависе од пречника узорка. Међутим, утврђено је да се укупно издужење до лома и издужење након формирања врата епрувете повећавају са пречником узорка, односно да се утицај пречника огледа у повећању издужења епрувете само у зони након формирања врата, тј. постизања максималне силе. Резултати FEM симулације показали су да се након формирања врата на епрувети, величина области, у којој је напон већи од напона течења потребног за пластично деформисање дуж правца оптерећења, повећавала са пречником епрувете. Деформације након формирања врата повећавају се са пречником узорка и не зависе од мерне дужине узорка, што значи да је

издужење епрувете након постизања максималне силе зависно од величине њеног пречника. Међутим, утицај пречника узорка на укупно издужење епрувете до лома и издужења након формирања врата се може занемарити када је L_0/D_0 веће од 10 [W.J. Yuan, 2013]. Приказани резултати указују на то да је равномерно издужење можда бољи показатељ дуктилности металних материјала од укупног издужења при поређењу са експерименталним резултатима.

Димензије равних узорака за испитивање затезањем су стандардизоване у многим земљама. За узорке дебљине мање од 4 mm, задржавају се стандардне вредности за ширину узорака док се њихова дебљина смањује, иако је добро познато да облик узорка утиче на добијена механичка својства. Интересантно је истраживање утицаја облика пресека равног узорка на криву течења, што је најпотпунија карактеристика механичких својстава метала [V.G. Osipov, E.I. Lyafer, 1971]. Код равних узорака од аустенитног нерђајућег челика Kh18N10T (X6CrNiTi18-10 по EN стандарду), месинга L-62 и молибдена TsM-2A, криве течења не зависе од односа ширине и дебљине узорка. Пластичност свих испитиваних метала и легура опада са повећањем односа ширина/дебљина узорка, до неке одређене вредности, која је различита за различите метале, након чега се више не мења. Када је однос ширина/дебљина узорка већи од 20, пластичност свих испитиваних материјала остаје практично непромењена. Због тога треба да постоји препорука да за испитивања затезањем узорака добијених из лимова, однос ширина/дебљина узорка не буде мањи од 20. За односе ширина/дебљина узорка 10 или више, пластичност челика и месинга се нагло повећава због појава додатних линија клизања. Пластичност се мења услед промене напонског стања (из једноосног у троосно напонско стање). Са променом односа ширина/дебљина узорка, стање напона зависи од полупречника формираног врата на узорку и деформација у тој области [V.G. Osipov, E.I. Lyafer, 1971].

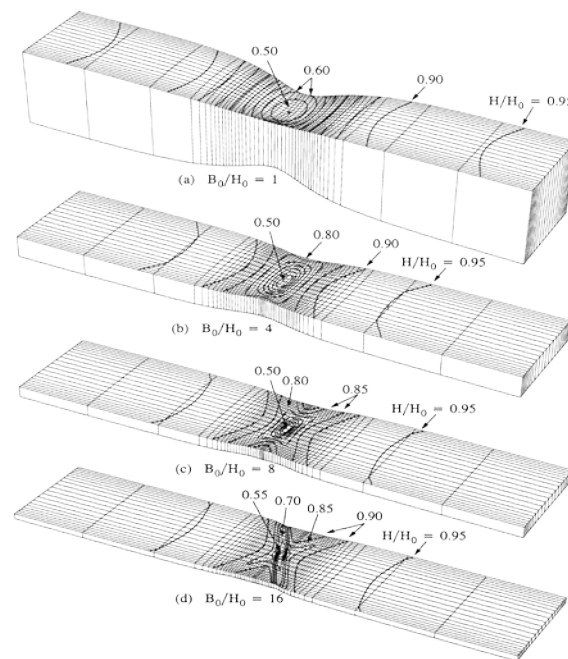
Испитивање материјала затезањем јасно показује да резултати испитивања не зависе само од својстава самог материјала и услова испитивања (брзина деформације, температура итд.), већ и од величине узорка и његове геометрије. За узорак од танког лима легуре Ti-6Al-4V евидентан је значајан пад равномерног издужења са повећањем односа мерна дужина/ширина епрувете, при чему је за све узорке ширина епрувете непромењена и износи 1 mm, док се мерна дужина мења од 2 до 40 mm. Пораст измереног укупног издужења је примећен за мерне дужине мање од 10 mm, слика 2.6 (а). Вредности модула еластичности постепено се повећавају са повећањем мерне дужине и приближавају се стварној вредности код већих мерних дужина што би се могло одредити екстраполацијом експерименталних података, слика 2.6 (б). Затезна чврстоћа и напон течења се не мењају са променом мерне дужине епрувете [A.V. Sergueeva, 2009].



Слика 2.6 Утицај мерне дужине епрувете на а) чврстоћу и дуктилност и б) Young-ов модул за лим Ti-6Al-4V [A.V. Sergueeva, 2009]

У литератури је доступно неколико публикација које се баве одређивањем својстава материјала испитивањем узорка мањих од конвенционалних. Када су у питању узорци са правоугаоним попречним пресеком величина узорка утиче на његова затезна својства, укључујући чврстоћу [С.К. Mukhopadhyay, 1998; Y. Kohno, 2000; L.V. Raulea, 2001; A. Molotnikov, 2008; K.S. Raghavan, 2010], дуктилност [L.P. Mikkelsen, 1999; Z.L. Zhang, 1999; C.H. Suh, 2010; M. Rund, 2015] итд.

L.P. Mikkelsen (1999) представља модел који даје реално предвиђање развоја зоне формирања врата у равном узорку оптерећеном на затезање у зависности од његове дебљине. Са смањењем дебљине квадратног попречног пресека дефинисаног односом $B_0/H_0 = 1$, дошло се до пресека код кога је $B_0/H_0 = 16$, при минималној дебљини узорка, где је B_0 ширина узорка, а H_0 дебљина узорка, слика 2.7. Добијени резултати показују да се дуктилност смањује са смањењем дебљине узорка.



Слика 2.7 Зависност зоне формирања врата од дебљине епрувете представљеног модела [L.P. Mikkelsen, 1999]

L.V. Raulea са коауторима (2001) закључује да испитивањем на затезање код меког алуминијума смањење дебљине узорка утиче на смањење измереног напона течења. С.Н. Suh са сарадницима (2010) истиче у раду утицај дебљине узорка од алуминијума на дуктилност, односно вредност деформације, приказујући зависност као:

$$\bar{\epsilon}_f = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{h_0}{h_f} + \frac{2n}{\sqrt{3}} (\sqrt{3} - 1) \quad (2.1)$$

где је $\bar{\epsilon}_f$ деформација лома добијена испитивањем, h_0 почетна дебљина узорка, h_f дебљина узорка након лома епрувете, n експонент деформационог ојачања. На основу израза је јасно да дуктилност расте са порастом дељине епрувете.

Често су равни узорци облика псеће кости (*енг. dogbone*), са површином попречног пресека између 0.05 и 1 mm^2 [E. Lucson, 2014]. Резултати добијени испитивањем малих узорка показали су коефицијент варијације (однос стандардног одступања и средње вредности) реда 5% за напон течења и затезну чврстоћу, док су њихове вредности биле

за приближно 5% ниже од вредности добијених конвенционалним испитивањем узорака на затезање. Произашла је важност следећих аспеката:

- важност технике израде узорка, која мора бити одговарајућа материјалу који се испитује и која може утицати на измерена својства материјала, посебно на напон течења,
- висок квалитет уређаја за испитивање и
- добра контрола и тачност димензија узорка, које се директно односе на поузданост и поновљивост података добијених испитивањем.

Када се ови проблеми у вези са производњом узорака, руковањем и процедурама ефикасно контролишу, подаци који се добијају испитивањем ванстандардних узорака на затезање у складу су са вредностима измереним на узорцима конвенционалне величине, под условом да димензије узорака нису испод минималног прага, што зависи од самог материјала. Генерално се наводи да вредности издужења и сужења попречног пресека узорка у већој мери зависе од величине и геометрије узорка него вредности затезне чврстоће [А. Kohyama, 1991]. Група америчких и јапанских истраживача почетком овог века објављује детаљну анализу ограничења величине минијатурних узорака, примењених на неколико аустенитних и феритно/мартензитних челика [Y. Kohno, 2000]. Показано је да вредности напона течења нису независне од величине узорка и да се могу добити за дебљине узорка веће од 0.2 mm за испитиване челике. Са друге стране, вредности затезне чврстоће, које не зависе од геометрије, захтевале су да однос дебљине и ширине узорка буде већи од 0.2.

Нове технике испитивања материјала су индиректне методе које се користе за добијање података о материјалима коришћењем корелације, међутим, ове корелације нису универзалне за све материјале и добијени подаци се разликују од оних добијених испитивањем затезањем. Поред тога, нове технике испитивања не могу пружити информације о деформационом понашању или пластичности метала, тј. процентуалном издужењу и смањењу површине који су веома важни параметри у процени дуктилности материјала [K. Kumar, 2016]. Комплетно понашање материјала могло би се адекватно и поуздано приказати само кривом напон - деформација, што се индиректним техникама не може добити. Индиректне методе за испитивање материјала дају својства површине, а не запремине материјала, тако да се механичка својства површинског слоја значајно разликују од својстава материјала по запремини. Стога је директно испитивање својстава материјала затезањем једини поуздан извор података и не може се заменити ниједном алтернативном техником испитивања.

На основу ограничења нових техника испитивања, истраживачи развијају технике испитивања затезањем узорака малих попречних пресека нестандардних облика и величина. Разноврсни минијатурни узорци за испитивање затезањем развијени су за мерење механичких својстава материјала SSTT (*енг.* Small Specimen Test Technique) за читав низ примена; за различите танке метале, који примену налазе у микро-електро механичким системима MEMS (*енг.* Micro Electro Mechanical Systems) [T. Fülöp, 2006], за танке металне лимове [T.N. Goh, 1982; L.V. Raulea, 2001; O.N. Pierron, 2003; H. Hoffmann, S. Hong, 2006; C.H. Suh, 2010] и танке металне фолије [M. Klein, 2001; G. Simons, 2006], за развој нових легура и студија радиоактивних метала [R.L. Klueh, 1985; Y. Kohno, 2000; E.M. Rabenberg, 2014], одређивање преосталог радног века индустријских компоненти у раду [E. Lucson, 2014; C.C. Dyson, 2016], итд. У таквим ситуацијама, за испитивање су доступни врло ограничени узорци материјала и захтева

се минимум оштећења компонената у раду узорковањем. Израђују се различите величине малих испитних узорака, а њихове димензије нису унапред дефинисане и стандардизоване, већ варирају у зависности од потреба и доступности материјала. Минијатуризација узорка изазива такозвани „ефекат величине“ или „ефекат скалирања“, што доводи до различитог понашања материјала у микро-скали у поређењу са мезо-скалом и макро-скалом [A.V. Sergueeva, 2009]. У механици, овај ефекат је ограничен на зависност чврстоће од површине попречног пресека, међутим, генерално је много шири и може се односити не само на величину и геометрију узорка, већ и на друге факторе, као што су микроструктурална ограничења (дебљина, величина зрна, анизотропија структуре и нехомогеност), стање површине [R.M. Molak, 2016], постојање заосталих напона итд.

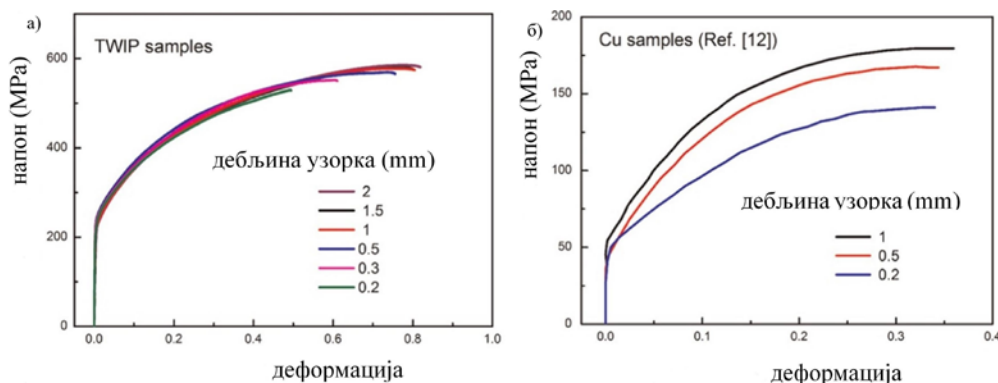
Друго питање употребе ванстандардних малих узорка је поузданост и поновљивост резултата испитивања, за које је потребна потврда резултата. То је довело до низа истраживања у погледу мерне дужине епрувете, попречног пресека, дебљине, величине зрна, броја зрна у пресеку, методе израде, оквира оптерећења које се задаје током испитивања, параметара испитивања итд. [S.X. Li, 2007; J.D. Lord, 2010 а, б; K. Kumar, 2014; S. Nag, 2014]. Почетком осамдесетих објављено је [N.F. Panayotou, 1981] да су подаци о напону течења и затезној чврстоћи добијени испитивањем минијатурних узорака упоредиви са резултатима добијеним радом са стандардним узорцима, али подаци о дуктилности материјала захтевају извесна побољшања.

Утицаји геометрије узорка и брзине задавања оптерећења на дуктилност TRIP челика (*енг.* Transformation Induced Plasticity) проучавани су квази-статичким и динамичким испитивањем затезањем узорака различитих димензија, али исте дебљине од 1.2 mm. Једна група узорака је била стандардних димензија, а друга са димензијама мањим од стандардних (смањена дужина и ширина епрувете). Утврђено је да под квази-статичким оптерећењем и један и други дизајн узорка дају исти ниво напона течења и вредности равномерног издужења до постизања максималне силе. Међутим, издужења након формирања врата се разликују, минијатурни узорак има већу пластичност, односно више се издужује [X. Sun, 2012].

На деформационо понашање материјала металних равних узорака снажно утиче степен минимизације димензија узорка (величине узорка и величине зрна). Утицај дебљине и величине зрна на напон течења веома танких лимова од месинга истражен је извођењем микроструктурних испитивања и испитивања затезањем на жареним узорцима дебљине од 50 μm - 200 μm . Са повећањем вредности односа дебљина узорка/величина зрна у распону од 6 до 18, напон течења и деформационо ојачавање материјала расту. Али напон течења опада са повећањем односа дебљина узорка/величина зрна када су те вредности мање од 6 [D. Anand, D.R. Kumar, 2014].

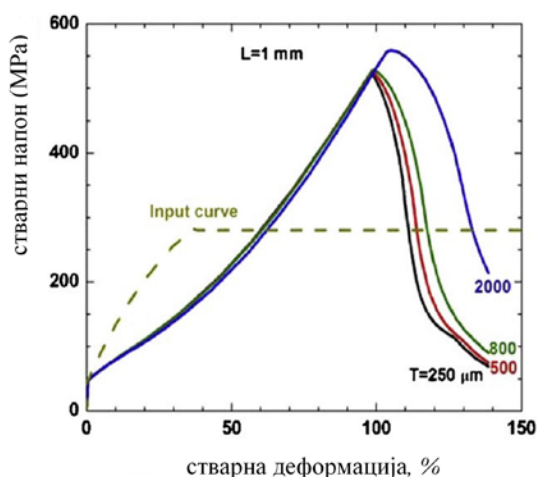
Резултати испитивања традиционалних металних материјала као што су чисти бакар [T.N. Goh, 1982; L. Yang, 2013] и алуминијум [P.J.M. Janssen, 2006; R.D. Sulamet-Agiobimo, 2016] показују да се затезна чврстоћа, издужење и напон течења смањују са смањењем дебљине узорка. Иако затезна чврстоћа и издужење TWIP челика (*енг.* Twinning-Induced Plasticity), класа аустенитних челика високе чврстоће и дуктилности, показују исте трендове, неочекивано, криве течења TWIP челика Fe-30Mn-3Si-3Al пре лома готово се преклапају за различите дебљине узорака, слика 2.8. То је закључак који се знатно разликује од резултата добијених испитивањем традиционалних металних материјала. Разлог је кретање дислокација и побољшање кристалне структуре TWIP челика. Затезна својства TWIP челика се погоршавају са смањењем дебљине узорка брже

када је однос дебљине узорка и величине зрна испод критичне вредности од 7.5. Издужење узорка се смањује са смањењем дебљине узорка. [K. Wang, 2015].

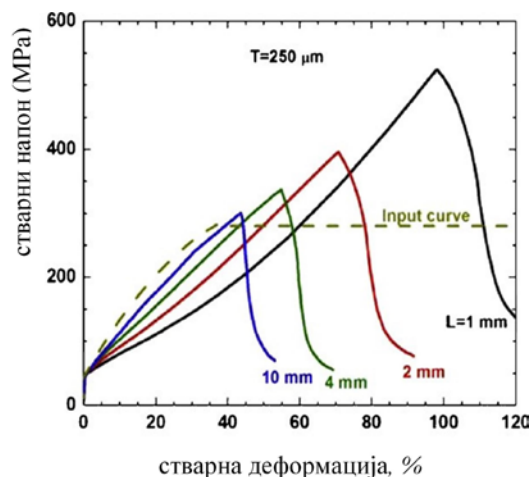


Слика 2.8 Крива напон - деформација за а) TWIP челик и б) чист бакар, са различитим дебљинама узорка [K. Wang, 2015]

Димензије узорка могу имати велики утицај на резултате о којима је расправљано [Y.H. Zhao, 2008 и 2009]. На пример, равномерно издужење до тачке формирања врата на епрувети и издужење након формирања врата повећавају се са повећањем дебљине узорка T , слика 2.9 и смањењем мерне дужине епрувете L , слика 2.10.



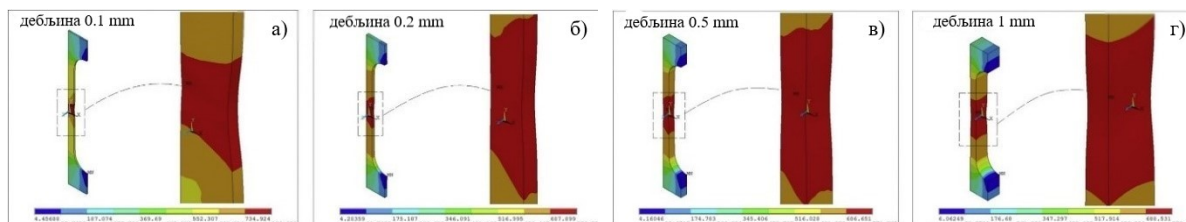
Слика 2.9 Експерименталне и FEM (испрекидано) криве стварних напона - деформација за узорке бакура, које показују утицај дебљине T за константну мерну дужину епрувете L од 1 mm [Y.H. Zhao, 2009]



Слика 2.10 Експерименталне и FEM (испрекидано) криве стварних напона - деформација за узорке бакура, које показују утицај мерне дужине епрувете L за константну дебљину T [Y.H. Zhao, 2009]

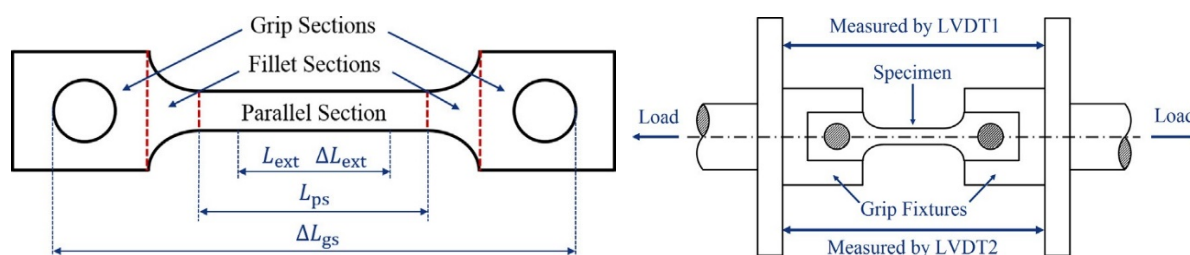
Да би подаци о механичким својствима материјала добијеним испитивањем затезањем нестандардних узорка били упоредиви са онима добијеним испитивањем стандардних узорка, мора се извршити оптимизација узорка. Тачност резултата експеримента је потврђена и нумеричком и металуршком анализом. Да би се генерализовали резултати, за истраживање су одабрани челици који имају различите механичке особине, 20MnMoNi55, CrMoV и SS304LN. Коришћени су минијатурни испитни узорци, једнаке ширине од 1 mm и различите дебљине од 0.15 до 0.4 mm. Утврђено је да су подаци о равномерном издужењу, напону течења и затезној чврстоћи били поредиви са онима из литературе за све материјале, али укупно издужење се разликовало. Укупно издужење је расло са порастом дебљине узорка. Разлог непрекидног повећања укупног издужења за узорке веће дебљине је присутност веће количине материје у области мерне дужине

узорка, што омогућава да се узорак издужи све док је запремина материјала на формираном врату узорка у стању да одржи раст и отпорност на лом. Код тањих узорка овај отпор престаје брже у поређењу са дељим примерцима. Резултати су потврђени методом коначних елемента, слика 2.11. Ови резултати указују на могућност прецизних и поузданих испитивања материјала коришћењем узорка малих пресека, али и на постојање потребе за стандардизацијом технике за механичку процену својстава материјала на основу малих узорка [К. Kumar, 2016].



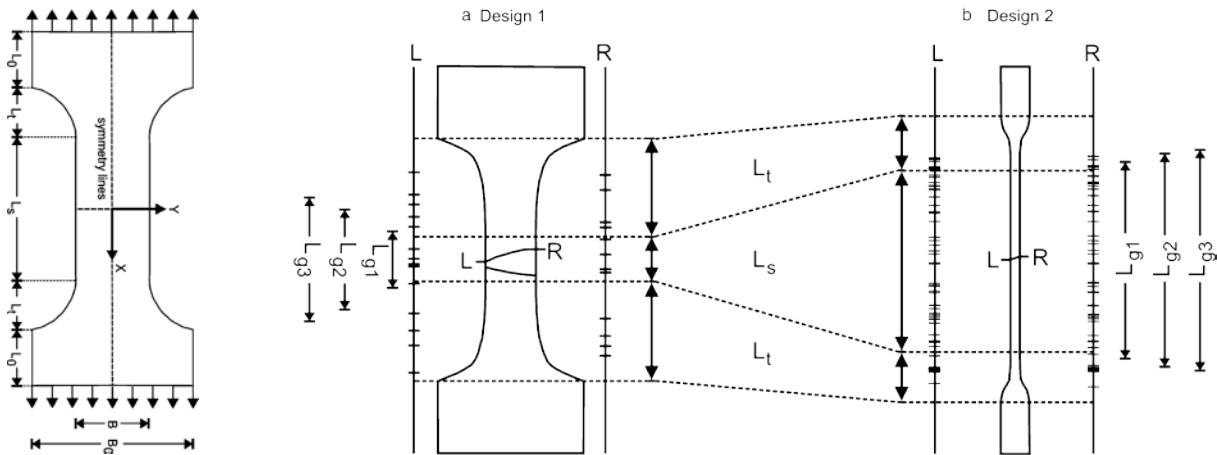
Слика 2.11 Контурна површина регије врата у зависности од дебљине а) 0.1 mm б) 0.2 mm в) 0.5 mm и г) 1 mm [К. Kumar, 2016]

Оптимизација малих узорка облика псеће кости, слика 2.12 (а), је вршена у погледу дебљине узорка, где је изабрана доња граница из литературе, као и ширине мерне дужине епрувете. Узорак димензија мерне дужине 2 mm, дебљине 0.2 mm и ширине 1 mm, показао је најбоље перформансе и сматра се прелиминарним оптималним решењем облика и димензија узорка за испитивање радиоактивних материјала. На слици 2.12 (б) је приказан прихват епрувете, у случају када се деформације мере екстензиометром или сензорима. Када се користи екстензиометар, равномерна техничка деформација се рачуна као $\Delta L_{ext}/L_{ext}$, где L_{ext} и ΔL_{ext} представљају мерну дужину епрувете и њено издужење, респективно. Без коришћења екстензиометра, деформација (неравномерна номинална деформација) се може изразити само као $\Delta L_{gs}/L_{ps}$ где је ΔL_{gs} промена издужења између зона хватања епрувете мерена помичним детекторима и L_{ps} мерна дужина епрувете [Н. Liu, 2017].



Слика 2.12 Епрувета за испитивање материјала а) изглед узорка dog-bon облика, б) мерење издужења са или без екстензиометра [Н. Liu, 2017]

За методу испитивања затезањем развијен је оптимални облик танког, равног узорка. Сврха је била смањење концентрације напона у прелазним зонама преношења оптерећења између мерне дужине узорка и зоне хватања узорка. Између два предложена модела, једног, са мерном дужином епрувете једнаком двострукој ширини епрувете $L_S = 2B$ и другог, са мерном дужином која износи четрнаест ширина епрувете $L_S = 14B$, изабран је други модел, са дужом паралелном зоном епрувете, слика 2.13, јер је код њега број ломова унутар мерног дела епрувете био већи [Т. Klemensø, 2007].



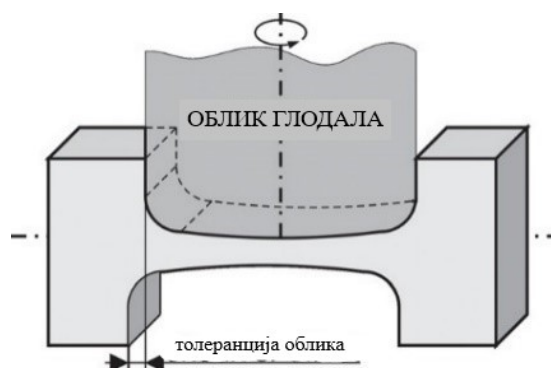
Слика 2.13 Геометрија епрувете, где је B ширина мерног дела, B_0 ширина зоне хватања, L_S мерна дужина, L_t дужина зоне радијуса, L_0 дужина зоне хватања (лево) и положај и број ломова за два дизајна епрувета (десно) [Т. Klemensø, 2007]

2.1.2 УТИЦАЈ НАЧИНА ОБРАДЕ УЗОРАКА НА РЕЗУЛТАТЕ ИСПИТИВАЊА

Узорци (епрувете) материјала за испитивање затезањем углавном се праве сечењем и обрадом скидањем струготине (стругањем, глодањем, рендисањем, брушењем и сл.). Наведени поступци обраде су и даље најзаступљенији у индустрији. Ако се узорци припремају поступцима обраде који изазивају структурне промене (нпр. гасно сечење и сл.) њихове димензије морају бити за $10\div 15$ mm веће од потребних, да би се накнадном обрадом скидања струготине одстранили делови који су претрпели структурне промене при сечењу. Обрада се мора изводити тако да не настану нове промене у структури материјала, при чему се нарочита пажња поклања скидању последњих слојева да не би дошло до загревања материјала. Епрувете од лима израђују се просецањем [М.А. Kobliska, 1979; ASTM E8/E8M-09; SRPS EN ISO 6892-1:2020].

Примена глодања као стандардне методе за добијање равних узорка има доста ограничења, истичу D.M. Krahmer и коаутори (2002):

- захтева конструкцију посебног алата за држање узорка различитих облика и димензија, при чему стезање танких лимова није лако приликом глодања;
- захтева употребу алата за глодање истог пречника као радијус заобљења узорка, слика 2.14 [G.V. Rathmayr, 2013];
- узорци се морају неколико пута обрађивати да би се добио жељени облик;
- ако се обрађује више узорка одједном (неколико слојева), да би се скратило време обраде, максимална дебљина слојева је одређена корисном дужином зуба глодала, дакле, фактор који треба узети у обзир је еластична деформација алата. Тешко је постићи толеранцију облика јер се услед сила резања јавља деформација алата [L.N. López de Lacalle, 2004].



Слика 2.14 Шематски приказ узорка за испитивање затезањем и облик глодала који се користи за израду узорка [G.B. Rathmayr, 2013]

Моделирање производних процеса добија на значају са растом глобалне потребе за производњом на оптималан начин. Деформисање и обрада метала (стандардна и алтернативна) су опсежно анализирани помоћу нумеричких техника. Три основна корака моделирања производних процеса су аналитички приказ принципа рада процеса, моделирање понашања материјала и метода решавања, слика 2.15. Моделирање понашања материјала има велики утицај на дизајн процеса, алата и финалног производа, односно на физичку природу процеса [U.S. Dixit, 2011]. Моделирање процеса је корисно у дизајну производа, машине, алата и поступка. Дизајн производа захтева информације о тачности димензија, квалитету завршне обраде, механичким својствима, недостацима и заосталим напонима. За пројектовање машина и алата потребне су информације о силама, хабању алата и температури. Дизајн самог процеса захтева све наведене податке у сврху оптимизације.



Слика 2.15 Очекивана предвиђања моделирања процеса обраде метала деформисањем и машинске обраде [U.S. Dixit, 2011]

D.G. Morris и коаутори (2002) показали су да постоји ограничена осетљивост дуктилности при затезању на стање узорка припремљеног полирањем, брушењем или глодањем, те да је могуће задржати високу чврстоћу и добру жилавост материјала уз одређене услове обраде. Пад напона течења и жилавости при затезању може зависити од дубине продирања алата приликом израде радног комада али не и од брзине обраде. Чињеница да је хрпавост површине независна од брзине којом се обрада врши, подразумева и оштећења испод површине обраде - пукотине и деформационо ојачање материјала. Таква површина са микропукотинама и деформационо ојачање материјала доводе до лакше иницијације пластичне деформације и до лакше локализације деформације, односно до појаве иницијане пукотине.

Узорци за испитивање затезањем произведени коришћењем кружног процеса брушења, који се хладе водом, гарантују геометрију узорака високе тачности, тако што се промене материјала током обраде свде на минимум. Брусни алат је опремљен механичком јединицом за полирање како би се добила добро исполирана површина узорка. Метода обраде је успешно демонстрирана за различите типове метала, у распону од дуктилног никла до веома кртог волфрама [G.B. Rathmaуr, 2013]. Процес брушења има низак утицај на материјал приликом обликовања [B. Bousfield, 1992]. Кружно брушење, на пример, гарантује веома високу тачност геометрије узорка за испитивање затезањем. Током кружног брушења, и узорак и брусни точак се ротирају.

Процес обраде материјала утиче на карактеристике материјала након обраде, па и на затезну чврстоћу. T. Yang и коаутори (2015) су проучавали како процес заваривања алуминијумских легура 2219 утиче на максималну затезну чврстоћу завареног споја. A.Vaz-Romeго и коаутори (2015) су показали да се радом са одређеним низом узорака може одредити локализација пластичне деформације при динамичком испитивању материјала на затезање. M. Grzenda и A. Bustillo (2013) сматрају да је хрпавост параметар за откривање површинских дефеката материјала.

Данас су у индустрији широко распрострањени и други процеси обраде метала као што су ласерско сечење, сечење воденим абразивним резним млазом AWJ (*енг.* Abrasive Water Jet), пробијање рачунарско-нумеричком контролом CNC (*енг.* Computer Numerical Control). Постоји извесна сличност између поменутих процеса производње узорака које су уочили С.М.А. Silva и коаутори (2014). Ове технике производње узорака за испитивање, којима се могу смањити време производње и сложеност поступака израде, могле би бити алтернативне технологије обрадама скидањем струготине.

На примеру конструктивног нискоугљеничног челика ENS355J0, вршено је поређење обрада резањем, са циљем одређивања промена својстава коришћеног материјала на површини реза (добијеног ласером, плазмом или гасним резањем) као показатеља квалитета процеса резања. У том смислу, на површини реза топлота је имала најмањи утицај при обради ласером [M. Harničárová, 2010]. Сличну анализу за хладно ваљане челике спровели су M.T. Göğüş и коаутори (2014) и дошли до закључка да је најповољнији метод резања WEDM (*енг.* Wire Electro-Discharge Machining), односно обрада електропражњењем жице. Недостатак наведеног метода је у томе што он захтева много времена за израду узорака. Када је ласерско резање у питању, мора се узети у обзир да ласерско резање са кисеоником може бити пожељно због тога што је мало јефтиније од ласерског резања са азотом.

Генерално, процеси топлотног резања челичних лимова имају утицај на микроструктуру и појаву заосталих напона, и одређују механичка својства и перформансе сечених ивица.

Они такође утичу на квалитет површинских резних ивица, што даље компликује проблем, јер је у већини случајева површина изложена највећим напрезањима. Утицај процеса резања плазмом на механичко понашање резаних ивица челика показује промене у хомогености структуре у сасвим уском слоју дуж резне ивице, реда 700 μm . Напон течења и затезна чврстоћа се мењају са растојањем од ивице реза, тако да су у областима које су најближе резној ивици оне веће за 100% од оних које се мере на основном материјалу. Што је већа механичка чврстоћа, нижа је дуктилност и еластичност. Резање плазмом ствара велике заостале напоне, до дубине од око 700 μm . Закључци су изведени за узорке дебљине 15 mm [J. Aldazabal, 2018].

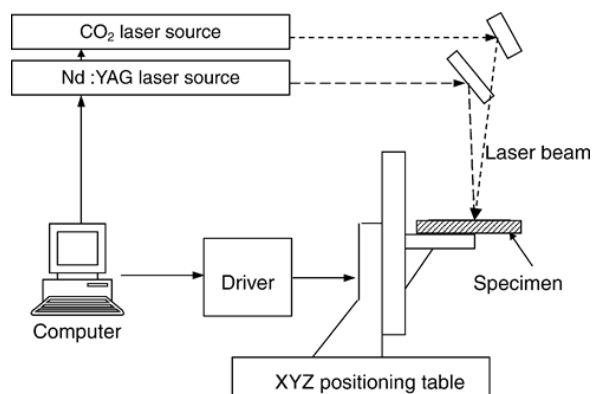
Код неких индустрија, као што је производња танких лимова, узорци за испитивање материјала се узимају из лимених плоча, тако да се просецање и резање обично изводи ласером, жицом WEDM, пробијањем или сечењем AWJ [B. Strnadel, 2013]. Код неметалних материјала, односно пластичних материјала или композита, за резање, примера ради, полимера ојачаних угљеничним влакнима CFRP (*енг.* Carbon Fiber Reinforced Polymer), који су јако заступљен у авио-индустрији, уобичајена техника обраде је глодање или резање дијамантом ADC (*енг.* Abrasive Diamond Cutter) [L.N. López de Lacalle, 2009; M. Haddad, 2014], једнако као и технологије обраде абразивним воденим млазом. И конвенционалне и алтернативне технике обраде имају своје предности и мане, па одабир технике обраде зависи од намене узорака. L.N. López de Lacalle и коаутори (2009) наглашавају да се ограничење у примени AWJ дешава када се воденим млазом пробије једна страна вишеслојног композита, јер млаз оштећује незаштићену површину са друге стране композита.

Већина алтернативних метода не захтева конструисање и израду помоћних алата за држање радног комада, јер користе универзалне алате за сечење (светлосни сноп у случају ласера, водени млаз високог притиска код AWJ и месингана жица код WEDM). У већини случајева контура узорка се производи у само једном пролазу, тако да се време подешавања процеса обраде и резања смањује, осим код WEDM процеса који је дуготрајан, али где може бити успешно обрађено више узорака по слојевима истовремено. Коначно, било која од ових метода да се примењује може се лако постићи толеранција облика, са изузетком CNC пробијања [J.A. Soares, 2013; P. Kadarno, 2014].

Ласерско сечење је процес у којем се материјал загрева, концентрисањем енергије у веома малој тачки, до постизања његове температуре топљења или температуре испаравања. Карактеристике ове методе омогућавају резање различитих материјала, дебљине до 20 mm у случају челичних лимова. Најчешће коришћени ласер је CO₂ ласер. Користи се у индустрији за резање многих материјала: меког челика, нерђајућег челика, алуминијума, титанијума, папира, воска, дрвета и тканине. CO₂ ласери обично за ласерску пумпу користе пролаз електричне струје кроз мешавину гаса (једносмерна струја) или користе радио фреквентне енергије, што спада у новије методе. Будући да побуда са једносмерном струјом захтева да се електроде налазе унутар оптичког резонатора, може доћи до трошења електрода и до стварања наслага материјала са електрода на стаклу и огледалима. Зато се и почело са коришћењем радио фреквенције, да се избегли ти проблеми.

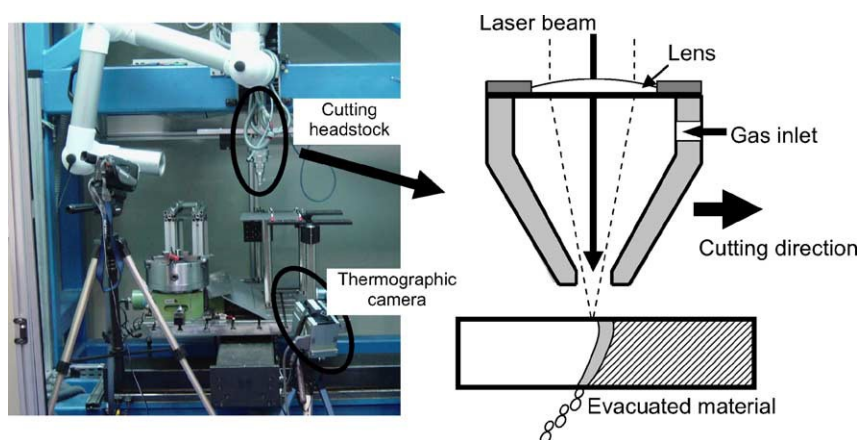
Процес резања ласером се доста примењује у аутомобилској индустрији, како би се лимови скратили на жељене димензије пре обликовања. Ласерско сечење постаје све више заступљено код сечења других материјала, као што су композити или челици високе чврстоће [B.S. Yilbas, 1997 и 2001], полимери и керамички материјали, слика 2.16 [C.H. Tsai, H.W. Chen, 2003]. Поред CO₂ ласера, користе се и Nd:YAG (*енг.* Neodymium

yttrium-aluminum-garnet crystal) ласери, које одликује велика снага са великим бројем понављања, код операција бушења и гравирања.



Слика 2.16 Конфигурација система за ласерско сечење са техником контроле [С.Н. Tsai, Н.В. Chen, 2003]

А. Lamikiz и коатори (2005) су користили CO_2 ласер, кога карактеришу таласне дужине $10.6 \mu\text{m}$, слика 2.17. Објаснили су да се једном генерисан ласерски сноп уз помоћ система сочива фокусира на малу тачку пречника око 0.2 mm . Фокусирање ласерског зрака омогућава постизање енергије високе густине, са типичном вредношћу од око $1.4 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$. Помоћни гас за резање челика је кисеоник. Овај ток гаса ствара егзотермне реакције које повећавају температуру у области сечења, а уједно помаже да се растопљени одсечени материјал одстрани.

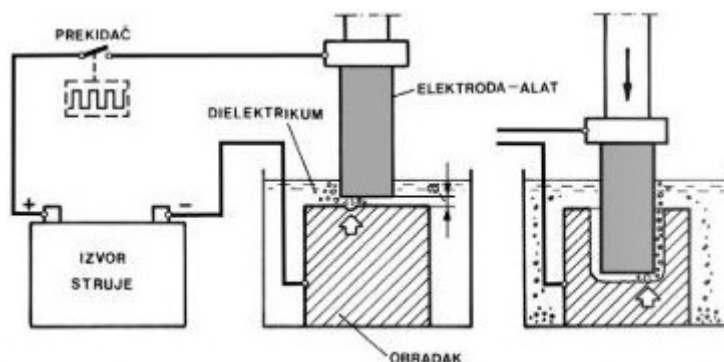


Слика 2.17 Процес ласерског сечења метала [А. Lamikiz, 2005]

Средином прошлог века први пут је приказана једноставна електролитичка метода, која уклања површинска оштећења, јамице и неравнине материјала, а може да се користи за резање и обликовање различитих металуршких испитних узорак [А. Fourdeux, А. Wronski, 1963.]

Процес електроерозивне обраде се може најлакше објаснити коришћењем једноставне шеме приказане на слици 2.18. Обрадак и електрода (алат) доводе се у радни положај тако да се међусобно не додирују. Између њих је зазор који је испуњен диелектрикумом. Због тога се ова обрада обавља у затвореној посуди (кади). Обрадак и алат су кабловима прикључени на извор једносмерне струје. На једном од тих проводника налази се прекидач. Ако је прекидач затворен, између алата и обратка се јавља електрични напон.

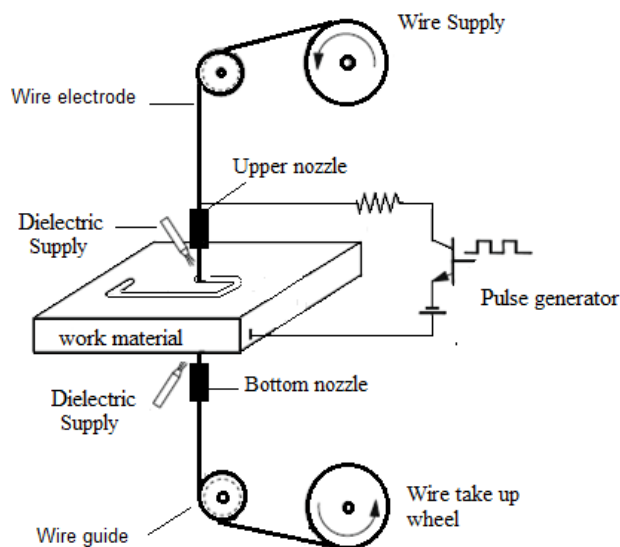
У почетку не тече електрична струја, јер су обрадак и алат изоловани диелектрикумом. Уколико се, међутим, растојање између њих постепено смањује, при неком малом растојању a доћи ће до пробоја електричне струје кроз диелектрикум и појаве искре. Ово растојање се назива критичним и креће се у границама $0.005 \div 0.5 \text{ mm}$, зависно од услова који се остварују при обради. Тако отпочиње процес електричног пражњења кроз уски канал између обратка и алата у коме долази до претварања електричне енергије у топлоту и до интензивног загревања површине обратка и алата.



Слика 2.18 Процес електроерозивне обраде [D. Milikić, 2002]

Када се помоћу прекидача прекине ток струје, нестаје веома брзо и канал за пражњење. Долази до наглог хлађења растопљеног метала и до његовог експлозивног избацивања из површине обратка и алата. Овим се у подручју канала за пражњење образује мало удубљење звано кратер. Поступак се понавља, а увођењем електронског прекидача може се постићи врло велика фреквенција ових пражњења и настајање кратера поред кратера, односно интензивно одношење материјала са површине обратка. Осим са површине обратка овим поступком се остварује и скидање материјала са електроде, које се означава као „трошење” електроде. Правилним избором и подешавањем радних параметара процеса може се постићи скидање материјала обратка у износу од 99.5% и трошење на електроди од свега око 0.5% [D. Milikić, 2002; К.Н. Но, S.T. Newman, 2003].

Једна од највише коришћених електроерозивних обрада је електроерозивна обрада жицом, слика 2.19 [А.В. Puri, В. Bhattacharyya, 2003; А. Shivade, 2017].



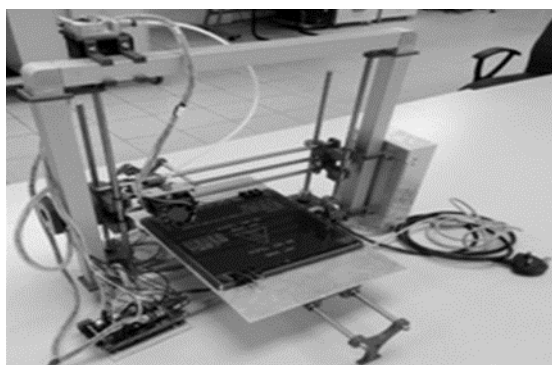
Слика 2.19 Процес електроерозивне обраде жицом [А. Shivade, 2017]

С друге стране, примена технологије обраде абразивним воденим млазом AWJ има уочљив раст од прве индустријске примене крајем прошлог века.

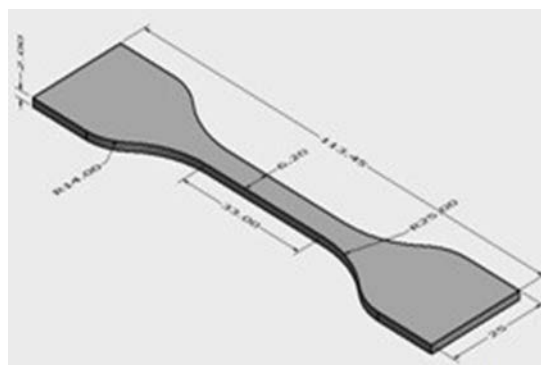
Утицај параметара обраде абразивним млазом воде (као што су радни притисак млаза, брзина скидања, концентрација абразивног слоја по ширини алата и др.) на стање површина различитих материјала предмет су бројних истраживања [А. Akkurt, 2004; В. Strnadel, 2013; D. Doreswamy, 2015; P. Löschner, 2016].

Полимерни производи данас су све присутнији на тржишту. Имајући у виду да имају широку примену, од разних производа широке потрошње до медицине и аутомобилске индустрије, полимерни производи морају имати задовољавајућа механичка својства. Могу се производити селективним ласерским синтеровањем SLS (*енг.* Selective Laser Sintering), где се објекат производи сукцесивним додавањем танких хоризонталних слојева. Сваки од слојева се производи тако што се на део објекта који је претходно изграђен нанесе танак слој праха који се ласерским снопом истопа у облику следећег слоја. Истопљени прах се при хлађењу повезује хоризонтално (формирајући нови слој) и вертикално (спајајући се са остатком дела). Назив „селективно ласерско синтеровање“ представља скраћени опис описаног поступка у коме се процесом синтеровања спаја само онај део праха који је ласером истопљен. Густина енергије као параметар обраде утиче на својства материјала оптерећеног на затезање. Густина енергије зависи од брзине ласерског зрака, снаге ласера и растојања отвора. Параметри обраде (брзина ласерског снопа, снага ласера и густина енергије) зависе од производне стратегије и дебљине слојева при изради [А. Pilipović, 2018].

RepRap (*енг.* Replicating Rapid Prototyper) је 3D штампач, слика 2.20, који користи PLA (*енг.* Poly Lactic Acid) филамент пречника 1.75 mm. Ниски трошкови и флексибилност 3D штампача постају алтернатива за израду тродимензионалних делова, тако да се могу штампати узорци за испитивање PLA материјала на затезање, слика 2.21. Предност ове технологије је у томе што корисник има потпуну слободу у контроли процесних параметара производа.



Слика 2.20 3D штампач RepRap [N.A. Bin Sukindar, 2017]

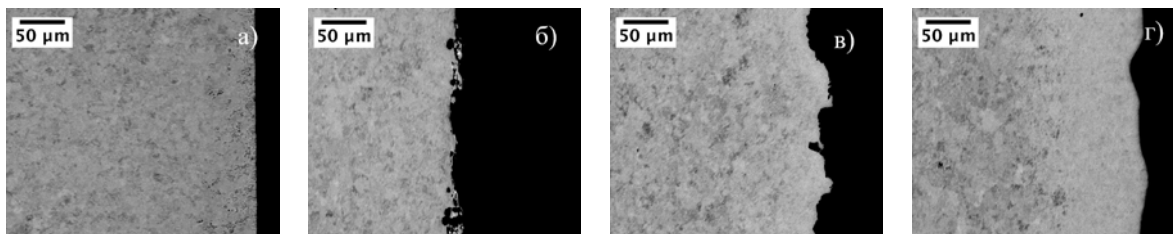


Слика 2.21 Изглед одштампане епрувете од материјала PLA [N.A. Bin Sukindar, 2017]

Испитивање затезањем је изведено на конвенционалној кидалици, коришћењем девет штампаних узорака од PLA материјала и узимањем у обзир три параметра који могу да утичу на тачност добијених резултата. То су дебљина слоја (mm), дебљина љуске (mm) и брзина штампања узорка за испитивање (mm/s). Испитивање је показало да дебљина љуске (број слојева на спољној страни штампаног отиска) највише утиче на затезну чврстоћу. Брзина штампања и дебљина слоја су имали незнатан утицај. Може се закључити да се затезна чврстоћа штампаних делова повећава са повећањем дебљине

љуске, док брзина штампања и дебљина слоја треба да буду што нижих вредности, јер такође утичу на квалитет везивања између слојева при формирању узорка [N.A. Bin Sukindar, 2017].

Својства челика високе чврстоће QP980 испитивана су затезањем на узорцима припремљеним применом четири различите методе обраде: сечењем електропражњењем жице EDM (*енг.* Electrical Discharge Machining); механичким глодањем; ласерским сечењем и резањем воденим млазом, слика 2.22.



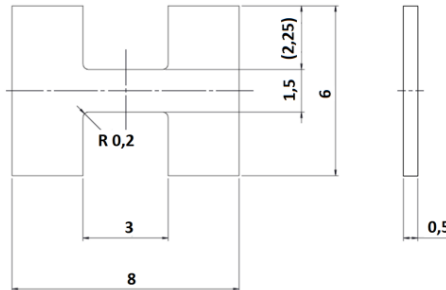
Слика 2.22 Фотографије добијене скенирањем електронским микроскопом SEM (*енг.* Scanning Electron Microscope) за узорке QP980 машински обрађени а) глодањем, б) воденим млазом, в) жицом EDM и г) ласерским сечењем. Микроструктура је измењена на узорцима сеченим ласером и жицом EDM [B. Goshert, 2018]

Сличне вредности за границу развлачења (течења), максималну затезну чврстоћу, издужење и деформацију имају узорци обрађени EDM и глодањем, дакле својства су им еквивалентна. Вредности границе течења и затезне чврстоће код узорка припремљених ласерским сечењем биле су више него код EDM и глодања. Резање воденим млазом дало је статистички различите вредности за скоро сва четири својства у поређењу са EDM и узорцима обрађеним глодањем, јер није дошло до деформационог ојачања резних ивица [B. Goshert, 2018].

Око 50% производње и потрошње нерђајућег челика у свету припада нерђајућем челику AISI304 (X5CrNi18-10 по EN 10028-7:2000), који се широко користи у готово свим индустријским гранама. Због својих карактеристика и отпорности на корозију и хемикалије, постао је најпожељнији материјал. Постоји неколико метода за обраду AISI нерђајућег челика 304: сечење воденим млазом AWJ, резање ласерским снопом LBC (*енг.* Laser Beam Cutting), резање плазмом PBC (*енг.* Plasma Beam Cutting), електро-обрада жицом WEDC (*енг.* Wire Electrical Discharge Cutting), сечење кисеоником OFC (*енг.* Oxygen Flame Cutting), резање тестером SC (*енг.* Saw Cutting) и глодање MC (*енг.* Milling Cutting). Унутар обрађених зона, већина ових метода обраде доводи до губитка својстава, по којима се овај материјал издваја и чини да се понаша као сваки други „обичан“ материјал. Резултати показују да резање абразивним воденим млазом даје најповољнији резултат док резање кисеоником даје најгоре карактеристике материјала након обраде [A. Akkurt, 2009].

Микро узорци који се испитују затезањем М-ТТ (*енг.* Micro-Tensile Tests), према слици 2.23, обрађени су комбинацијом неколико процеса као што су глодање, резање, електро-обрада EDM и брушење. Контуре узорка се постижу глодањем. Равни део (лице) узорка се добија електро-обработом EDM, резањем металографском тестером са дијамантским алатом и брушењем на металографским машинама. У случају електро-обработе EDM, број резова може значајно утицати на квалитет површине, па је вршено 1, 3 и 5 пролаза. Храпавост R_z је мерена профилним мерачем SURTRONIC 25 за све машинске обраде. Храпавост која се постиже примењеним поступцима је код глодања - 1.6 μm , 1 пролаз EDM - 16 μm , 3 пролаза EDM - 4.6 μm , 5 пролаза EDM - 1.6 μm , за тестеру - 1.8 μm и код

брушења - 0.8 m. Генерално, може се закључити да обрада има значајан утицај на добијене вредности мерења. Најбоље слагање између свих разматраних референтних вредности и вредности измерених на М-ТТ је код узорака обрађених комбинацијом електро-обrade EDM у 3 пролаза и обрадом лица металографском тестером [J. Dzigan, 2016].



Слика 2.23 Геометрија малог узорка за испитивање затезањем [J. Dzigan, 2016]

Утицаји производног поступка на стање површине узорака од нискоугљеничног челика и легура никла и хрома Inconel 718 испитивани су затезањем. Резултати показују да су се појавиле промене на површини обрађених узорака, али да је утицај на затезну чврстоћу био мањи од 5% у односу на резултате добијене на конвенционалним узорцима. Употреба алтернативних процеса за добијање узорака за испитивање затезањем има две предности у односу на обраду глодањем: скраћује време потребно за производњу узорака и представља исту технологију која се примењује у завршном кораку производње узорака.

После извођења испитивања на неколико узорака добијених различитим производним процесима, истакнути су следећи закључци [D.M. Kraemer, 2016]:

- WEDM, AWJ или ласерско сечење могу бити алтернативни процеси процесу глодања у производњи узорака за испитивање затезањем. Ови процеси имају предност због тога што се интензивно користе у индустрији прераде лима.
- Када се AWJ изводи са фиксном млазницом ствара се угловна грешка по обиму сечења. Овај ефекат ограничава могућност сечења лимова веће дебљине, али испуњава све захтеве у вези толеранције узорака. Тај проблем се може решити на два начина: употребом фиксне млазнице са притиском воде од 6000 bar или пак укључивањем млазнице под нагибом.
- WEDM је валидна алтернатива процесу глодања за производњу узорака, али њене слабости, као што су врло мала брзина сечења и дуже време припреме у односу на остале процесе (почетна рупа и уметање жице), чине је сличном глодању. Неке од њених главних предности су могућност производње узорака изузетне тачности геометријских димензија, одсуство утицаја на дуктилност ивица, и коначно, то што њеном применом не долази до било каквих значајних промена механичких својстава материјала.
- Ласерско сечење треба користити опрезно. Мада је у питању најбржи производни процес, средње цене коштања, при коме се лако производе узорци који задовољавају геометријске и димензионалне захтеве и без значајних промена у механичким својствима, његовом применом настаје смањење дуктилности по обиму ивица због повећане тврдоће, што може да изазове проблеме и смањи тачност мерених резултата при испитивању затезањем.

- CNC пробијање мора бити одбачено као процес за припрему узорка, због хладног деформационог ојачања по обиму резања и ивичних неравнина, које резултира великим губитком дуктилности и значајно утиче на механичка својства, углавном на процентуално издужење након прелома ($A\%$). Овај ефекат се повећава са смањењем дебљине лима. Такође, при овом процесу се јављају нехомогене границе и постаје веома тешко испунити геометријско-димензионе захтеве, при чему су нарочито изражене грешке облика.
- Није било очигледне везе између дубине жлебова насталих било којим процесом резања и добијених механичких својстава. Иако је вероватно да зависност постоји, остаје маскирана разним изворима грешака који утичу на резултате испитивања затезањем.

Укратко, AWJ, WEDM и ласер су се показале као изводљиве технике за припрему обичних узорака за испитивање затезањем и оне се могу широко примењивати за интерна испитивања. Добијени резултати су очекивани и потпуно компатибилни са узорцима за испитивање произведеним стандардним глодањем [D.M. Kraemer, 2016].

2.2 РАЗВОЈ НЕКОНВЕНЦИОНАЛНИХ КИДАЛИЦА

Данас се посебна пажња посвећује развоју и изради неконвенционалних кидалица, добрих техничко-технолошких карактеристика, задовољавајућих ергономских својстава, малих цена коштања, али пре свега поузданих и мултифункционалних уређаја, који се истовремено могу користити у индустрији за добијање основних механичких карактеристика материјала, као и у едукативне и истраживачке сврхе.

Била кидалица конвенционална или не, при развоју и конструисању мора се водити рачуна о великом броју фактора који утичу на тачност и поузданост процеса испитивања као основним циљевима.

Конструкција кидалице новијег доба треба да има следеће карактеристике:

- да је једноставна за руковање и што лакша, а при том довољно чврста и крута како би се избегле нежељене деформације уређаја задавањем оптерећења у току испитивања;
- да стезне чељусти за причвршћивање узорка (спрувете) буду једноставне, лаке за руковање, а да при томе онемогуће проклизавање крајева узорка у току испитивања;
- да се оптерећење на правилан начин преноси на узорак и да се вредност силе може очитати са задовољавајућом тачношћу у сваком тренутку у току испитивања;
- да се оптерећење задаје мирно, без удара, и да се по потреби одржава константним дужи време.

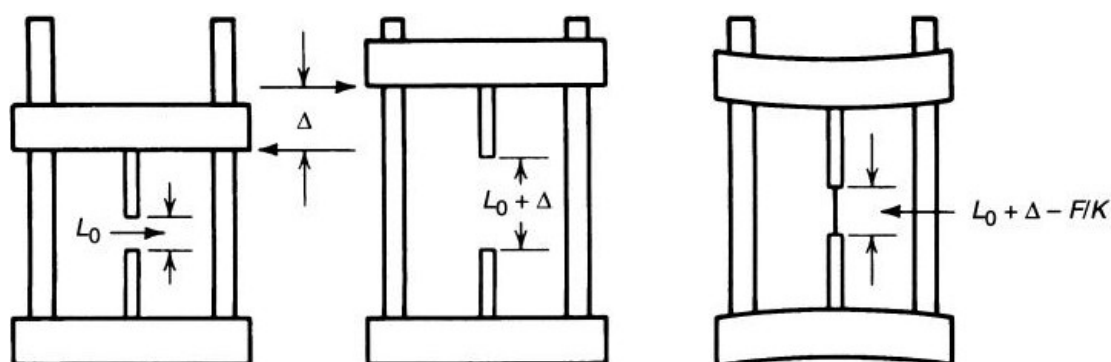
Кидалице се састоје од следећих делова:

- оквир (рам, постоље),
- механизам за задавање оптерећења,
- уређај за мерење силе,
- уређај за мерење издужења (деформације).

Опште је познато да крутост уређаја за испитивање, систем стезања узорка у зони прихвата, облик узорака, услови експерименталних истраживања (брзина задавања оптерећења итд.) и својства испитиваних материјала могу утицати на тачност мерења [G.E. Dieter, 1986]

Оквир кидалице састоји се од вођица, стезних или прихватних чељусти (покретних и непокретних) за позиционирање узорака и постоља. Ту је монтиран погонски механизам. Рам уређаја мора подносити оптерећења усклађена с погонским системом. Крутост оквира кидалице може се разматрати као аксијална, попречна и торзиона, зависно од модела испитивања. Код већине кидалица, аксијална крутост је најважнији параметар. Висока крутост постоља минимизира појаву деформација, односно угиба уређаја, а самим тим и еластичну енергију која се у њему акумулира у току испитивања. Угиб уређаја у току испитивања, приликом задавања оптерећења, неповољно утиче на тачност мерења.

Механизам за задавање оптерећења може бити механички, хидраулички, пнеуматски, електрични или комбинација наведених типова. То зависи од конструкцијских захтева и потребне максималне силе. Код конвенционалних уређаја за оптерећења до 10 kN механизам за задавање оптерећења је углавном механички.



Слика 2.24 Шематски приказ померања стезне чељусти и еластично угибање уређаја за испитивање затезањем [M.A. Hamstad, P.P. Gillis, 1966]

Шематски приказ померања стезне чељусти и еластични угиб уређаја за испитивање затезањем је дат на слици 2.24, где је Δ померање горње стезне чељусти у односу на нулто оптерећење; L_0 је почетна мерна дужина узорка; K је комбинована крутост стезне чељусти, дела уређаја за стварање и преношење силе, зоне хватања узорака итд.; F је сила која делује на узорак. Као што је приказано на слици 2.24, ако је померање стезне чељусти дефинисано као релативно померање Δ у односу на нулто оптерећење, а затим се узорак ухваћен у стезну чељуст уређаја за испитивање затеже, тада ће померање стезне чељусти бити једнако збиру деформација мерне дужине узорка и еластичног угиба компоненти попут рама уређаја, давача силе, стезних чељусти и зона хватања узорка. У области еластичности, деформација мерне дужине узорка представља мали део померања стезне чељусти [J.R. Davis, 2004].

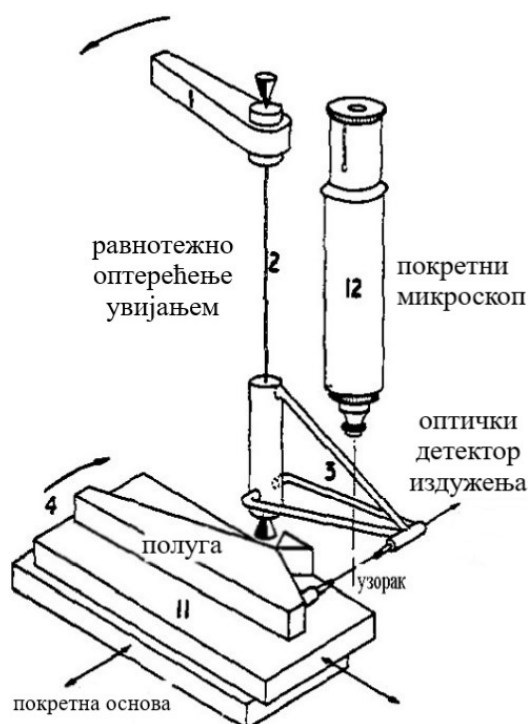
Након почетка пластичног течења материјала узорка, услови се мењају. Током ове фазе деформације, оптерећење лагано варира како материјал деформационо ојачава. Дакле, еластични угиб у уређају се полако мења и највећи део релативног померања стезне чељусти ствара пластичну деформацију у узорку. Квалитативно (логички), ако узмемо у обзир да се испитивање изводи приближно константном брзином, почетна брзина еластичних деформација у узорку ће бити мала, али ће се повећавати са појавом

пластичног течења материјала. Квантитативно (статистички) се овај ефекат може оценити као у наставку. Разматран је узорак који има почетну површину попречног пресека A_0 , модул еластичности E и почетну мерну дужину L_0 , оптерећен на затезање стезним чељустима уређаја за испитивање. Сматра се да је брзина испитивања константна, те је оптерећење равномерно по целој мерној дужини узорка. Крутост уређаја, стезних чељусти итд. је K , а степен померања стезне чељусти (називна брзина стезне чељусти) је S . Однос S/L_0 понекад се назива номинална брзина деформације, али зато што се често битно разликује од брзине деформације у узорку, назива се специфична брзина стезне чељусти [P.P. Gillis, J.J. Gilman, 1965 а и 1965 б].

Оптерећење се задаје у времену $t = 0$. У сваком тренутку након тога, померање стезне чељусти уређаја мора бити једнако збиру еластичног угиба уређаја и еластичног и пластичног издужења узорка. Крутост уређаја представља његову отпорност на деформацију, што математички представља однос силе F која узрокује деформацију и саме деформације x , односно угиба, па је $K = F/x$. Ако са $\sigma = F/A_0$ означимо технички (номинални) напон у узорку, угиб уређаја је тада $x = \sigma A_0/K$. Претпоставља се да Нооке-ов закон адекватно описује еластичну деформацију узорка на уобичајеним нивоима напона. Дакле, еластична деформација је $\varepsilon_e = \sigma/E$ [J.R. Davis, 2004].

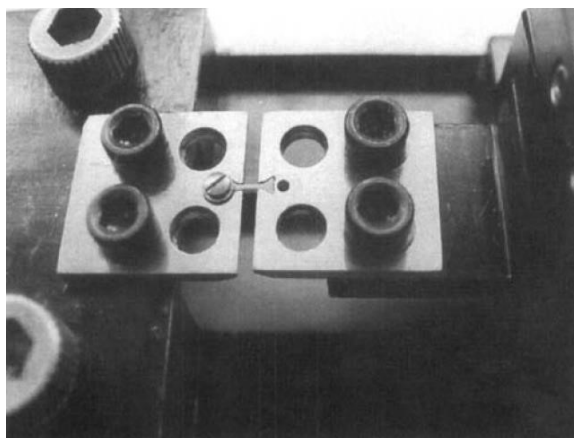
Развоју неконвенционалних кидалица, односно техникама испитивања материјала за добијање механичких својстава материјала на узорцима малих попречних пресека, посвећује се све више пажње.

Средином прошлог века D.M. Marsh (1961) је представио уређај за испитивање материјала затезањем, уз аутоматско снимање података, слика 2.25. Испитиване су танке превлаке и влакна. Уређај се базира на равнотежи примењеног торзионог оптерећења и телескопског система за мерење издужења. Пошто у потпуности зависи од механичких и оптичких принципа практичан је при сталној температури.



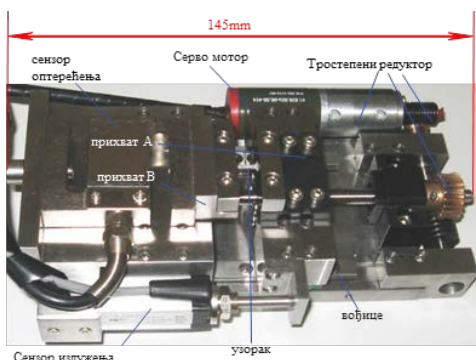
Слика 2.25 Основни принципи уређаја за испитивање микро-узорака затезањем [D.M. Marsh, 1961]

D.A. LaVan (1999) је приказао уређај за испитивање материјала затезањем на малим узорцима почетног попречног пресека 0.2 mm^2 и дужине 3.1 mm , слика 2.26. Испитиване су механичке особине металних материјала са завареним спојевима на 45 челичних узорака, узимајући у обзир и правце сечења узорака из исте табле. Деформације су мерене ласерским системом. Испитивање малих узорака овом методом даје добре резултате својстава материјала за узорке сечене у било ком правцу. Механичка својства на неким локацијама унутар вара могу значајно варирати у односу на правац сечења. Док су затезна чврстоћа, напон течења и издужење по правилу у корелацији са микротврдоћом, тешко ће се ова својства материјала у зависности од правца сечења предвидети на основу података о микротврдоћи.

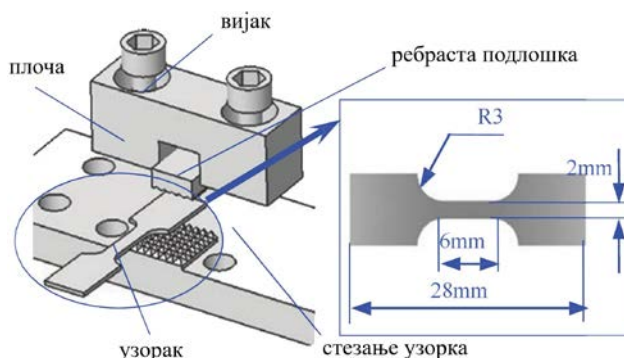


Слика 2.26 Узорак у зони хватања. Завртањ са десне стране је уклоњен како би се видело место стезања узорка, а у циљу спречавања проклизавања. Покретна стезна чељуст, на десној страни [D.A. LaVan, 1999]

Z. Ма и коаутори (2015) су развили уређај за испитивање материјала затезањем уз скенирање електронским микроскопом. Интегрисањем серво-мотора и тростепеног редуктора у уређај постигнуто је квазистатичко задавање оптерећења током испитивања брзином од 10 nm/s , слика 2.27. Померање покретне стезне чељусту уређаја А бележи се бесконтактним ласерским сензором (тип LK-G10) са брзим одзивом и резолуцијом 10 nm . Како би се избегла попустљивост и како узорак не би проклизавао у зони хватања епрувете, за стезање узорка су користили округли вијак са прецизним левим и десним навојем, слика 2.28. Добијени резултати за узорке материјала од конструктивног челика Q235 (S235J2 по EN10025:2004) и бабра су поређени са резултатима из литературе и показали су одлична поклапања.

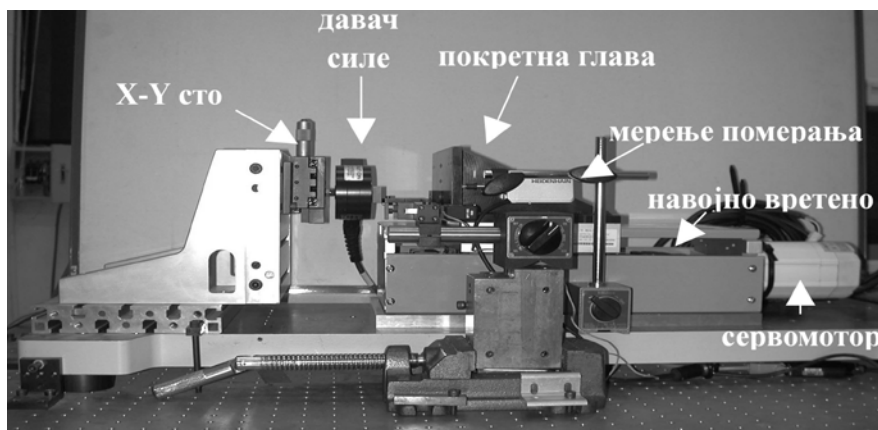


Слика 2.27 Уређај за испитивање материјала затезањем [Z. Ма, 2015]



Слика 2.28 Систем за стезање епрувете [Z. Ма, 2015]

Y.C Chao и D.S Liu (2003) су пројектовали уређај за испитивање златне жице при малим оптерећењима, која се задају DC-сервомотором са кружним навојним вретеном, слика 2.29. DC мотор (*енг.* Direction of Current Flow) је било која класа електричних обртних мотора која претвара електричну енергију једносмерне струје у механичку енергију. Готово сви типови једносмерних мотора имају неки интерни механизам, било електромеханички или електронски, који повремено мења смер струје. Максимално могуће растојање при затезању је 100 mm, а максимална примењена сила 1000 N. Тачност дигиталног система за мерење померања је 1 микрометар. Испитиване су две врсте златних жица са адитивима калцијума, жица GL-2 са више калцијума и SR жица обрађена са мање калцијума. Подаци о напону и деформацији указују на то да виши ниво адитива генерално даје већу чврстоћу, већи модул еластичности и више температуре рекристализације.



Слика 2.29 Уређај за испитивање материјала на затезање [Y.C. Chao; D.S. Liu, 2003]

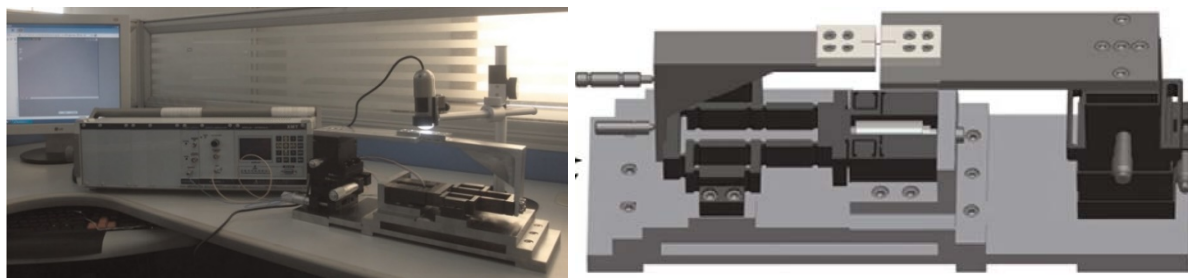
G. Partheeran и коаутори (2005) су за испитивање механичких особина материјала на затезање користили једноставан минијатурни челични узорак облика диска. Узорак је причвршћен помоћу крутих чивија у специјално дизајниране стезне чељусти. Добијене резултате верификовали су методом коначних елемената FEM.

Систем на коме се базира уређај за испитивање материјала затезањем који су дизајнирали P.H. Hou и T.Y. Chen (2005) чине пиезоелектрични актуатор PZT (*енг.* Piezoelectric actuator), који електричну енергију претвара у механичко кретање, давач силе и две стезне чељусти за држање узорка. Развијен је аутоматски мерни систем за мерење модула еластичности минијатурних узорака. Поузданост и тачност развијеног уређаја и система за мерење верификоване су поређењем резултата добијених конвенционалним уређајима и применом методе дигиталне корелације слике за узорке од бакра. Грешке у мерењу модула еластичности су се кретале до 10%.

Код уређаја за испитивање затезањем са пиезоелектричним актуатором PZT за различите врсте материјала укључујући металне, полимерне и силиконске SCS (*енг.* Single Crystalline Silicon) материјале, нелинеарност PZT покретача се може компензовати развојем одговарајуће методе на бази инверзне функције [S.S. Kim, 2005].

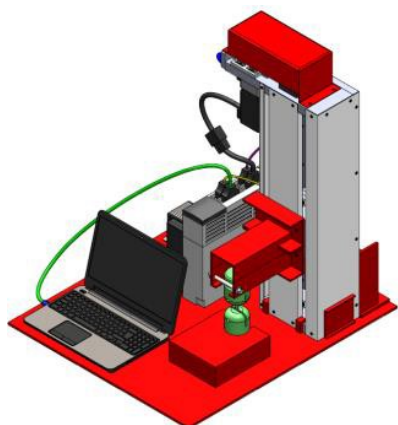
Уређај за испитивање затезањем, заснован на пиезоелектричном актуатору, дизајнирали су Q.S. Bai и коаутори (2012). Након пажљиве анализе и одређивања кључних карактеристика конструкције анализираних методом коначних елемената (флексибилни део конструкције), уређај за испитивање затезањем је подешен и тестиран тако да се добије жељена тачност, слика 2.30. Испитивања су вршена на бакарним микро жицама

пречника $\varnothing 50 \mu\text{m}$. Резултати експеримената и FEM анализа су показали да је развијени уређај за испитивање затезања ефикасан и поуздан.

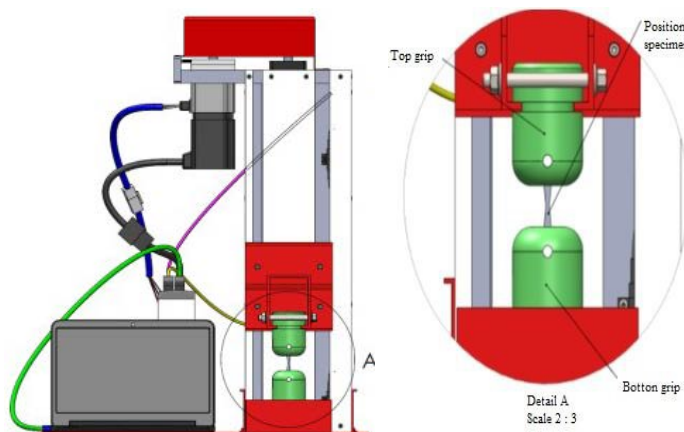


Слика 2.30 Уређај за испитивање микро-жица на затезање [Q.S. Vai, 2012]

Два узорка исте величине, различитих материјала, алуминијум 6061 и бакар, испитивани су на затезање на уређају приказаном на слици 2.31. Узорак у зони хватања има отвор кроз који пролази чивија која га повезује са стезном чељусти уређаја, слика 2.32. Поред узорака, методом коначних елемената, испитивани су и витални делови конструкције, као што су зоне хватања узорка клиновима у стезним чељустима како би се избегло проклизавање, као и стезне чељусти. Добијени резултати су дати кривом напон - деформација [S. Baharuddin, I.Yani, 2018].

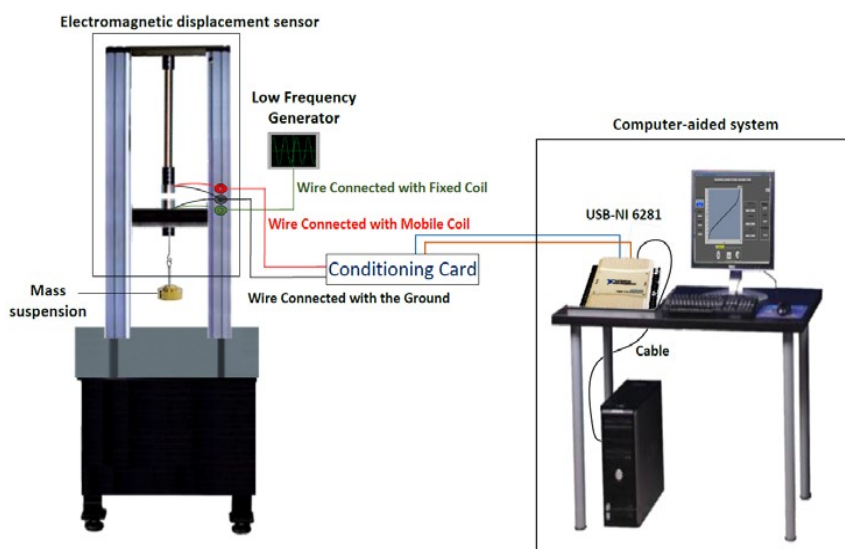


Слика 2.31 Уређај за испитивање [S. Baharuddin, I.Yani, 2018]



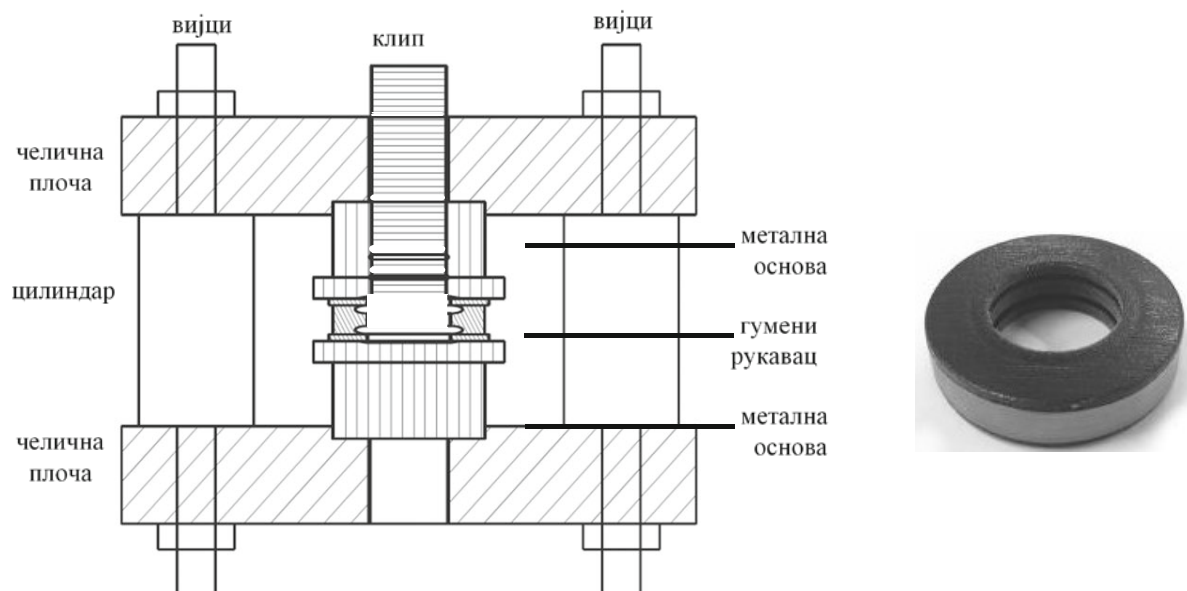
Слика 2.32 Позиционирање узорка [S. Baharuddin, I.Yani, 2018]

Z. Ezzouine и A. Nakheli (2016) су користили сопствени уређај за испитивање узорка затезањем - металне бакарне жице уз примену софтвера LabVIEW и електромагнетног сензора за мерење издужења тачности $10^{-3} \mu\text{m/mv}$, слика 2.33. LabVIEW омогућава кориснику да брзо истражи и прикупи податке. Добијени резултати модула еластичности и затезне чврстоће бакарне жице су били задовољавајући, при чему су аутори нагласили да ће у будућности развијати уређај са побољшаном тачношћу.



Слика 2.33 Шематски приказ уређаја за испитивање [Z. Ezzouine, A. Nakheli, 2016]

J. Zhou и коаутори (2018) су развили уређај за испитивање материјала на затезање и приказали технику испитивања за мерење карактеристика материјала, слика 2.34. Узорци за испитивање могу бити у облику прстена, влакана и трака произвољне дужине. Испитивање се може изводити при различитим брзинама деформације и у различитим окружењима. Техника испитивања је приказана при малим брзинама деформације на неколико узорака различитих материјала, укључујући угљенична влакна, метале, полимере и керамику; добијени резултати су поређени с мерењима на конвенционалним кидалицама и утврђена је добра сагласност, са грешкама мањим од 5%.

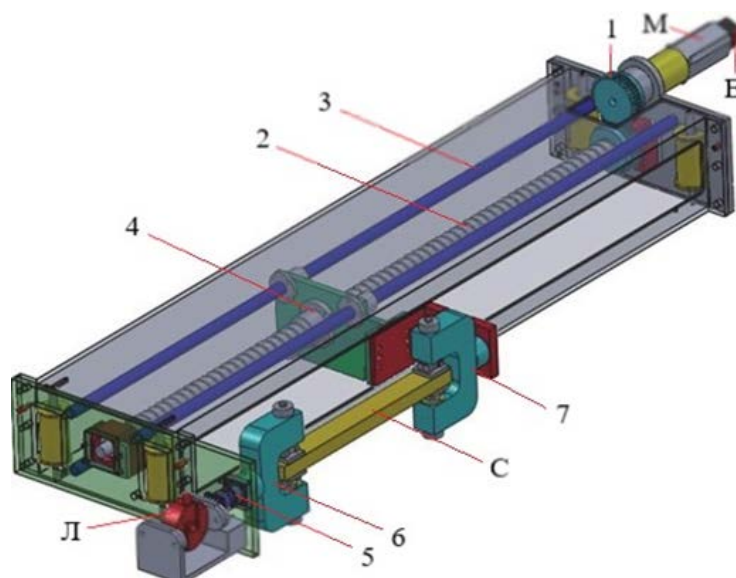


Слика 2.34 Попречни пресек уређаја за испитивање материјала и изглед узорка [J. Zhou, 2018]

Код узорака кружних попречних пресека који се испитују затезањем, чија величина пречника износи 0.1-1 mm и који нису у складу са ASTM и ISO стандардима, постоје многи фактори који доводе до нетачности резултата при утврђивању механичких особина материјала. G.B. Rathmayr и коаутори (2013) приказују нов уређај и

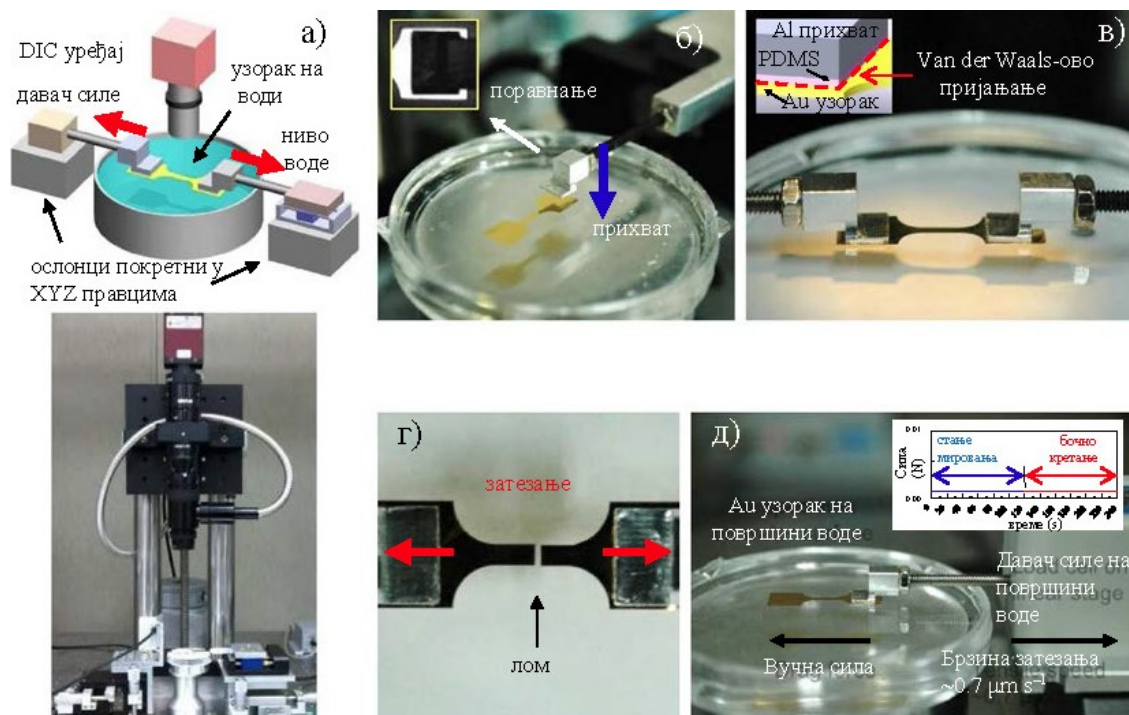
експерименталну методу за испитивање затезањем узорака малих пречника. Узорци се израђују техником кружног брушења и полирања.

В. Haşcelik и R. Eren (2016) дизајнирали су хоризонтални уређај за испитивање затезањем узорака од текстила, слика 2.35. Добијене резултате поредили су са онима добијеним испитивањем на конвенционалној кидалици Instron 4301. Први добијени резултати криве сила - издужење показали су прилична одступања, што се објашњавало проклизавањем између узорака тканине и стезне чељуст, као и савијањем покретне стезне чељуст и механичким несавршеностима конструкције уређаја. Након оптимизације уређаја, постављањем меког материјала са високим коефицијентом трења на површине стезних чељуст како би се спречило клизање између узорака тканине и стезних површина, као и укрупњавањем покретне стезне чељуст, добијени резултати су се приближили резултатима испитивања на конвенционалним кидалицама. Кретање се преноси из серво мотора (М) на навојно вретено са кугличним лежајем (2) преко зупчастог механизма (1) са преносним односом 1:25. Навртка (4) је монтирана на навојно вретено са кугличним лежајем. Навојно вретено има могућност ротације у оба смера. Покретна чељуст (7) је причвршћена навртком и креће се заједно са њом. Фиксна чељуст (6) се закреће аксијално у односу на рам уређаја. Десни крај фиксне чељуст је повезан са давачем силе (Л).



Слика 2.35 Саставни делови уређаја за испитивање затезањем узорака од тканине [В. Haşcelik и R. Eren, 2016]

Површина воде пружа одличан амбијент за кретање, како у природи, тако и у модерној технологији. Високи површински напон воде одржава објекте у контакту на површини, а њен низак вискозитет омогућава клизање по површини скоро без трења. Коришћењем површине воде као скоро идеалне подлоге за ослањање ултра танке превлаке развијена је нова метода испитивања затезањем за прецизно мерење механичких карактеристика превлака, слика 2.36 [J.H. Kim, 2013].

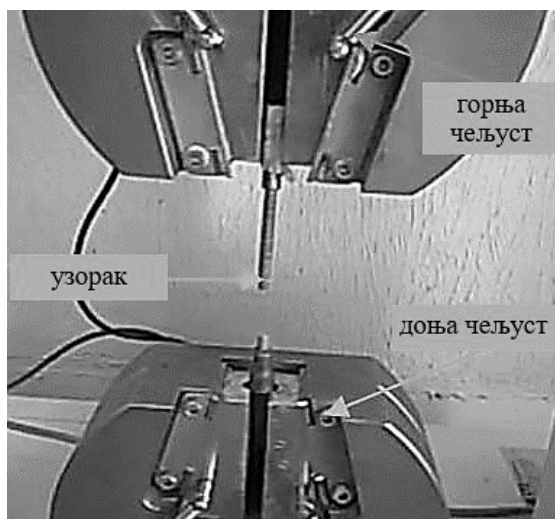


Слика 2.36 Поступак за испитивање затезањем и ефекат силе отпора [J.H. Kim, 2013]: а) систем за испитивање затезања састоји се од давача оптерећења, линеарног нивоа воде и DIC камере на антивибрационом столу. б) ултра танка Au превлака плута на равnoj површини воде и приближава се до зоне прихвата, поравнање је осигурано преко DIC камере. в) ултра танак узорак Au превлаке је снажно захваћен Van der Waals-овом адхезијом између PDMS превлаке и површине узорка. г) испитивање затезањем врши се на линеарном нивоу воде са брзином деформације од $0.06 \cdot 10^{-3}$ у секунди, а лом се јавља у средини мерне дужине узорка. д) мерење силе отпора извршено је причвршћивањем само једне стране узорка на давач силе.

Међутим, ови системи су компликовани и/или много скупљи од конвенционалних метода испитивања затезањем.

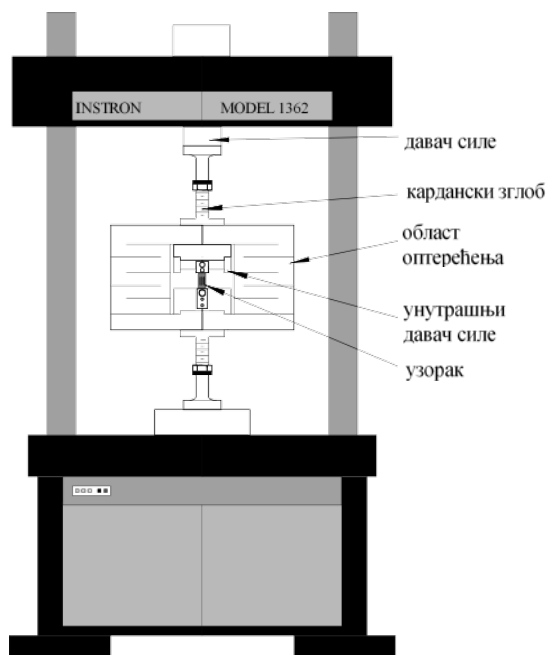
Конструисање нових конвенционалних лабораторијских уређаја и припрема узорка за испитивање представља изазов због поузданости и тачности мерења карактеристика материјала, као и економских ограничења. Поред тога, неопходне су савремене вештине за управљање машинама за испитивање, посебно серво-хидрауличком машином за тестирање. Због тога је неопходан нови приступ за креирање економски исплативијег система за испитивања затезањем, као и ергономски и технолошки прихватљивог уређаја, који се може користити како у едукативне тако и у истраживачке сврхе.

Како би се смањили трошкови а користила стандардна лабораторијска опрема за испитивање затезањем, дају се предлози решења за конструкцију нових чељусти од аустенитног нерђајућег челика за прихват епрувета мањих димензија од стандардних, слика 2.37. Нове чељусти су додатна опрема и могу се користити по потреби [O.J. Akinribide, 2013].



Слика 2.37 Горња и доња стезна чељуст, монтиране на конвенционалну кидалицу, за прихват мањих или нестандарних узорка материјала [О.Ј. Akinribide, 2013]

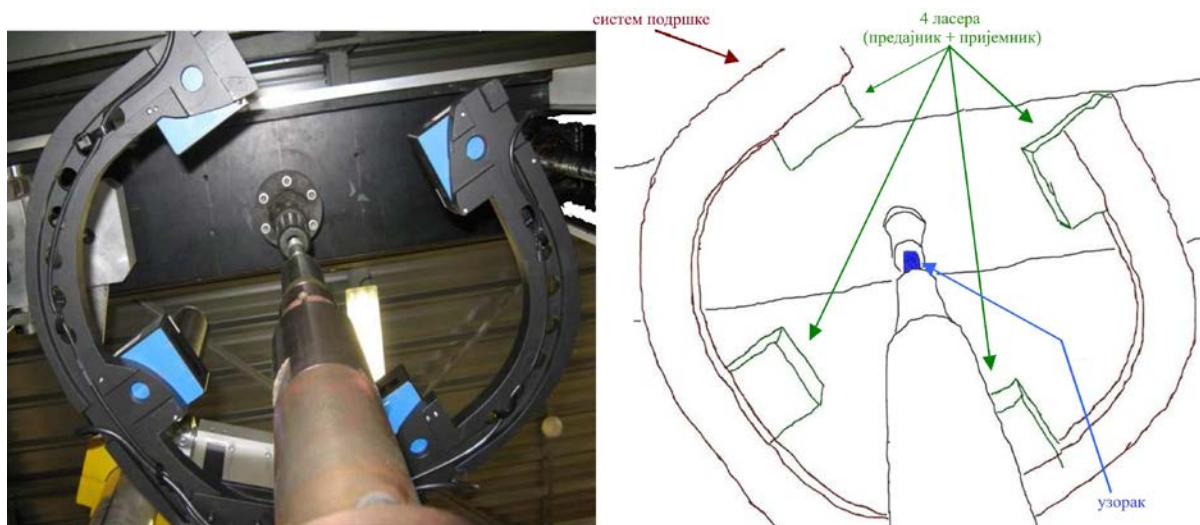
Примењујући концепт „област (рам) оптерећења“, А. Pzhöfer (1997) предлаже решење за осигуравање аксијалног оптерећења узорка на бази паралелних опруга, које се инсталирају у конвенционалну машину за испитивање затезањем. Две паралелне опруге осигуравају аксијално оптерећење узорка, чак иако стезне чељусту уређаја за испитивање нису потпуно аксијалне, слика 2.38. Први експериментални резултати за челичне узорке, показују да овај надограђени систем може бити успешно примењиван за одређивање механичких својстава малих узорка [А. Pzhöfer, 1997].



Слика 2.38 Уређај за испитивање малих узорка на затезање [А. Pzhöfer, 1997]

Конвенционални систем за мерење издужења (обично механички екстензиометар), може пратити локално понашање материјала (рецимо алуминијумских легура) само током стабилног тока испитивања, до тренутка постизања максималне силе. Након формирања врата на епрувети понашање материјала је непознато. О. Ancelet (2010) предлаже нов систем мерења заснован на употреби ласера високе прецизности, који омогућавају

мерење минималног пречника узорка и полупречника закривљености током фазе формирања врата, слика 2.39. Захваљујући Bridgman-овој формули, може се проценити локално понашање материјала до лома узорка. Добијени резултати су верификовани методом коначних елемената [O. Ancelet, 2010].



Слика 2.39 Фотографија и шематски приказ новог ласерског мерног система деформације узорка, поглед одозго [O. Ancelet, 2010]

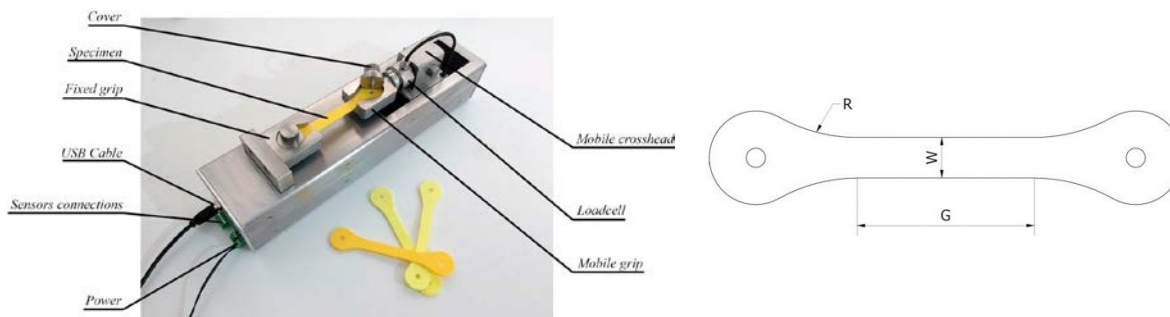
Уређај за континуирано, циклично испитивање материјала затезањем/притискањем великим напрезањем равних узорака на повишеној температури приказан је на слици 2.40. Приказани резултати за узорке од магнезијума AZ31B на температурама до 250 °C са брзином деформације од 0.001 s^{-1} показали су добро слагање са резултатима из литературе [K. Piao, 2012].



Слика 2.40 Уређај за испитивање материјала затезањем/притискањем равних узорака на повишеној температури [K. Piao, 2012]

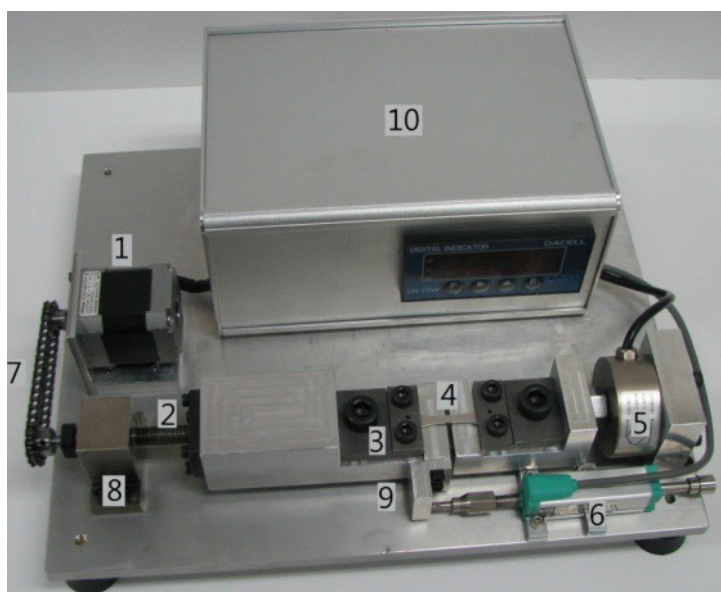
Испитивање материјала се мора вршити како би се одредила његова механичка својства и сертификовао квалитет производа. Имајући у виду да четврта индустријска револуција доноси нове концепте, попут паметних фабрика (*енг.* Smart Factories), код којих је изражено учешће дигитализације, аутоматизације и вештачке интелигенције, у

процесима оптимизације набавке, производње и пласирања производа који би требало да су квалитетнији него раније, све су чешћи захтеви да се испитивања и мерења врше ван лабораторија, односно директно у производном погону. MaCh 3D је минијатурни уређај за испитивање пластичних материјала затезањем, развијен за сертификавање производа и материјала директно на месту производње. Узорци су неконвенционални, са таквом геометријом да се лако причвршћују на уређај, слика 2.41. Добијени резултати су поређени са резултатима добијеним на конвенционалним уређајима и показали су задовољавајућу тачност [L. Bergonzi, 2018].



Слика 2.41 Дизајнирани уређај (лево) са изгледом епрувете (десно) [L. Bergonzi, 2018]

L. Woong и K. Ho-Kyung (2013) су представили мали уређај за испитивање материјала затезањем, који укључује употребу специјално дизајнираног минијатурног узорка. Уређај је развијен тако да претвори обртно кретање кружног навојног вретена у линеарно кретање стезне чељусту узорка, која на тај начин затеже узорак. Уређај за испитивање затезањем састоји се од корачног мотора који покреће стезну чељуст узорка брзинама од 0.001~1 mm/s, давача оптерећења, појачавача оптерећења, система за прикупљање података и рама уређаја. Контролна кутија се састоји од система за прикупљање података DAQ (енг. Data Acquisition) и LabVIEW софтвера, слика 2.42. Приказани су резултати механичких карактеристика на узорцима од легура алуминијума са задовољавајућом тачношћу.



Слика 2.42 Мини уређај за испитивање затезањем величине 330×280×155 mm:

- 1) корачни мотор; 2) навојно вретено са кугличним лежајем; 3) стезне чељусту узорка; 4) узорак; 5) давач оптерећења; 6) мерач померања; 7) ланчани преносник; 8) кућиште лежаја; 9) вођица за линеарно кретање; 10) контролна кутија [L. Woong, K. Ho-Kyung, 2013]

Уређај се може користити у едукативне сврхе, како би студентима олакшао извођење испитивања материјала на затезање помоћу минијатурног узорка. Уређај се може користити и у индустрији где има потребе за вансеријским испитивањем материјала, јер уређај не захтева специјално окружење ни услове испитивања.

На резултате испитивања узорака значајно утиче крутост уређаја за испитивање. У литератури се предлаже да се његова вредност стандардизује. Није увек могуће аналитички проценити крутост машина са потребном прецизношћу, јер то зависи од низа фактора чије је ефекте тешко проценити. Крутост машине, строго говорећи, није линеарна функција његовог оптерећења. Међутим, експерименти су показали, почевши од вредности 0.25 максималног оптерећења, крутост варира линеарно са оптерећењем. Директна метода процене крутости заснива се на директном мерењу деформација узорка и ефективног померања стезних чељусту уређаја [G.Z. Lomaev, 1965].

Крутост машине је збир угиба који настају у раму уређаја и стезним чељустима за сваку јединицу оптерећења затезањем на узорку. Угиб уређаја не обухвата само еластични угиб рама уређаја услед оптерећења, већ укључује свако померање у механизму за хватање, или на било ком делу уређаја (навоји и сл.) у систему. Ови угиби су значајни током почетног оптерећења узорка, тј. у еластичној области деформација. То значи да почетна брзина стезне чељусту (одређује је оператор) није тачна мера издужења узорка (деформације). Ако деформације у области еластичности нису тачно познате, онда се могу добити изузетно велике грешке модула еластичности.

2.3 МЕХАНИЧКА КАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИЈАЛА ДОБИЈЕНА ИСПИТИВАЊЕМ МАТЕРИЈАЛА ЗАТЕЗАЊЕМ

Модул еластичности (E) је важна карактеристика материјала, чије познавање представља један од основних предуслова за пројектовање конструкција и контролу квалитета материјала. Модул еластичности или Young-ов модул је својство материјала које се односи на његову крутост и које описује понашање материјала под дејством оптерећења. Са променом оптерећења пропорционално ће се мењати и релативна деформација материјала, а константа пропорционалности напона и релативне деформације дефинише се као Young-ов модул. Способност материјала да се опире дејству оптерећења или да преноси оптерећење је важна карактеристика материјала, која се често користи да би се утврдила погодност примене материјала за одређену сврху.

Вредност модула еластичности се може експериментално одредити применом различитих метода, које се деле на директне и индиректне. Применом директних метода модул еластичности се одређује на основу уздужних и попречних деформација, као и ефеката који директно зависе од њих. Индиректне методе се базирају на одређивању других еластичних константи као што су модул смицања и модул стишљивости.

Широку примену у одређивању еластичних константи имају статичке и динамичке методе. Код статичких метода, еластичне константе се одређују на основу насталих деформација у току испитивања, при чему се полако задаје и повећава сила, док динамичке методе често укључују анализу вибрација [A. Wolfenden, 1995; N. Parveen, 2011], ултразвучне методе [M. Haseli, 2019], ултразвучне пулс-ехо методе [S.S. Lee, 1998], резонантне методе [K.E. Petersen, 1979; G.S. Radley, 1981; Q.M. Wang, 1998; L. Kiesewetter, 1992; G. Straffellini, 1999]. Неки аутори су такође успешно користили не-

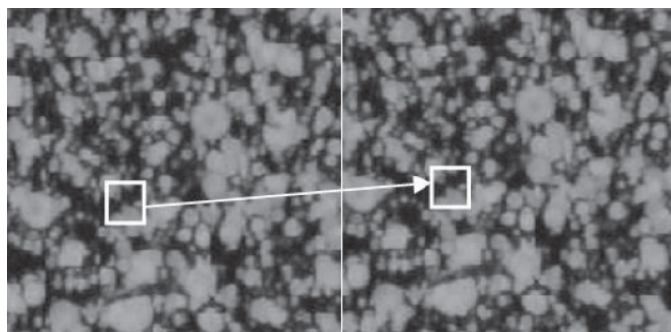
деструктивну технику вртложне струје (*енг.* Eddy Current) за процену Young-овог модула материјала. Young-ов модул узорка малог попречног пресека може се одредити помоћу деформација које су настале вртложним струјама у магнетном пољу [Т. Kwaaitaal, 1979].

Поред динамичких метода, примењују се и статичке методе за одређивање модула еластичности, као што су: наноиндентација (нано-утискивање) [G.M. Pharr, 1992; J. Gubicza, 1997; A.C. Fisher-Crips, 2002; C.S. Oh, 2005; H. Li, 2009], испитивање тврдоће по Vickers-у [J.M. Antunes, 2007], модификована испитивања тврдоће [W.C. Oliver, 2004], испитивања савијањем у три тачке [I. Petrescu, 2013], мерење угиба греде савијањем [J. Milojković, 2017] и једноосна испитивања на затезање [SRPS EN ISO 6892-1, 2020].

Young-ов модул танког филма силицијум нитрида (Si_3N_4) може се проценити коришћењем ултразвучно резонантног сензора који бележи померање на нивоу тачности нанометра. Добијени резултати су потврђени испитивањем наноиндентацијом [Y.Y. Kim, 2017].

Тешкоће које се јављају при мерењу модула еластичности експерименталним испитивањима углавном се односе на тачно мерење деформација у еластичној области, посебно у случајевима када употреба екстензиометра или мерних трака није примењива.

M.Z. Siddiqui и коаутори (2012) су се бавили одређивањем модула еластичности металних и композитних материјала и указивали на проблеме који се јављају при употреби екстензиометара или мерних трака. У случају влакнастих узорка, проблем је већи, због мале величине и мале крутости узорка. Представили су алтернативни приступ одређивању Young-овог модула површина помоћу дигиталне корелације слике DIC (*енг.* Digital Image Correlation). Када дође до деформације узорка при испитивању затезањем задавањем одређеног оптерећења, свака тачка на површини узорка се помера заједно са њеним окружењем. DIC функционише тако што прати сличност између слика површине узорка снимљених пре и након деформације, слика 2.43.



Слика 2.43 Премештање назначене тачке након примене оптерећења, утврђено помоћу DIC [M.Z. Siddiqui, 2012]

Аутори су показали добро слагање добијених резултата са подацима из литературе, за легуре алуминијума и композитне узорке, тако да предложена техника нуди брзу, економичну и веома прилагодљиву алтернативу традиционалним методама за одређивање модула еластичности, како код хомогених тако и код хетерогених материјала.

DIC методу за мерење деформација при испитивању затезањем акронитрил бутадиен стирена ABS (*енг.* Acrylonitrile Butadiene Styrene) и поликарбонатних узорка PC (*енг.* Polycarbonates) користили су J.T. Cantrell и коаутори (2017).

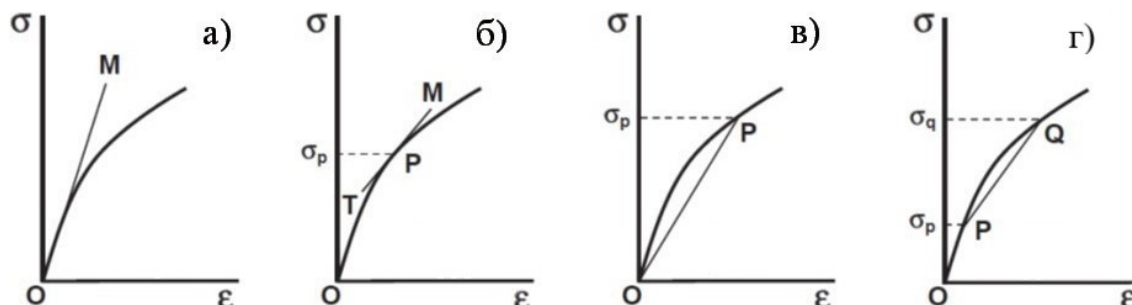
Уобичајене оптичке методе нису погодне за тачно мерење модула еластичности узорака са почетним савијањем, јер је прилично тешко одвојити деформацију насталу аксијалним оптерећењем од деформације површине која се састоји од деформација у аксијалном правцу и деформација насталих савојним оптерећењем услед постојећег момента савијања. Средње вредности деформација насталих аксијалним и савојним оптерећењем, које се мере на супротним површинама узорка коришћењем двоструких рефлектора, камера и дигиталне корелације слике (2D-DIC), могу елиминисати деформације настале почетним савијањем узорка. На тај начин се модул еластичности може одредити са великом тачношћу, а релативна грешка између добијених експерименталних резултата и резултата добијених мерењем мерним тракама је мања од 0.5% [F. Zhu, 2018].

Да би испитали утицај примењене методе на резултате испитивања, Р. Trubitz и коаутори (2004) су упоредили резултате примене статичких и динамичких метода за одређивање модула еластичности различитих материјала сивог лива. Истраживање је показало мало неслагање резултата одређивања механичких карактеристика материјала (модула еластичности) између ултразвучне методе и испитивања затезањем. Одређене вредности модула еластичности добијене ултразвучном методом су биле незнатно више од резултата добијених испитивањем затезањем. Слично томе, Z. Chen и коаутори (2016) су упоредили резултате одређивања модула еластичности за различите челичне лимове добијене применом ултразвучне пулс-ехо методе и резонантне анализе са резултатима добијеним испитивањем затезањем. Ултразвучно измерени модул еластичности био је најприближнији теоријским вредностима.

Као што је већ наглашено, модул еластичности се врло често одређује испитивањем материјала на затезање. Тада се захтевају тачни подаци о вредностима деформације. Штавише, иако теорија претпоставља савршено линеарно понашање, техничке несавршености, као што су ефекти стежања узорка у уређају и исправљања благо савијених узорака на почетку испитивања, резултирају нелинеарним деформационим понашањем у еластичном подручју. Следљивост резултата испитивања може бити значајно побољшана применом рачунарских метода за обраду експерименталних података добијених испитивањем [S. Münstermann, 2014]. Динамичке методе су генерално свестраније и могу се лакше применити за мерење, са добром тачношћу, и код високих температура и за крте материјале. У оба случаја, следећи препоручене процедуре, могу се добити приближно тачне вредности модула, са неизвесношћу у измереним вредностима од само 1-2% [J.D. Lord, 2002, 2006].

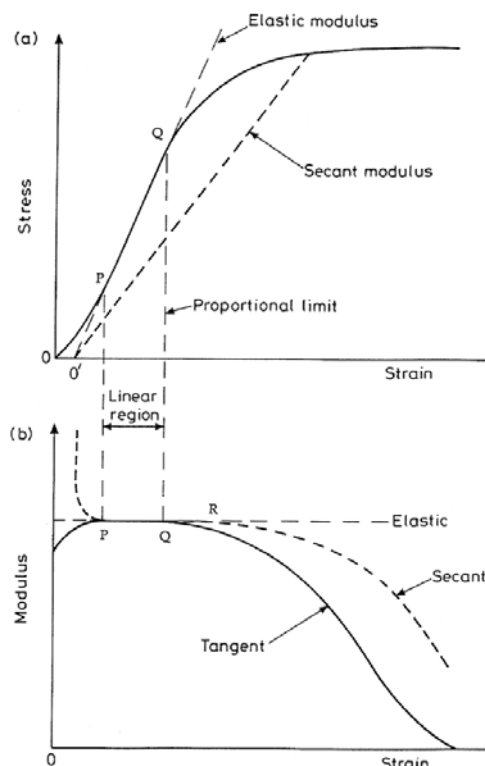
Актуелни стандарди за испитивање метала затезањем су EN 10002-1, ASTM E8/E8M-09 и EN ISO 6892-1 (за Србију индентичан стандард је SRPS EN ISO 6892-1). Поменути стандарди су претежно фокусирани на дефинисање криве напон - деформација, при чему зона еластичних деформација често чини само мали део комплетне криве. До недавно, ниједан стандард није прописивао формалну дефиницију за модул еластичности, а ипак је неопходно тачно мерење нагиба криве напон - деформација или криве сила - издужење, како би се добили поуздани подаци о напонима течења. ASTM E111-04 је једно време био једини стандард који је покривао мерење модула еластичности на основу испитивања затезањем, модул тангенте и модул тетиве (методе које се користе код нелинеарних материјала), поред интерних процедура корисника које мере ову величину алтернативним методама. Од свих механичких карактеристика које се добијају овим испитивањем, грешке су највеће код одређивања модула еластичности [J.D. Lord, 2005 а и 2005 б, 2006]. EN ISO 6892-1 (2019) је пре две године додао део о одређивању модула еластичности и прописао како се израчунава вредност неизвесности ове величине.

Иако је концепт уклапања равне линије на линеарни део криве напон - деформација једноставан, у стварности велики број фактора утиче на израчунату вредност модула укључујући квалитет података, линеарност саме криве напон - деформација и избор процедуре за анализу података. У неким случајевима се и даље користе графичке технике, али већина система данас користи компјутерске анализе. Неке од анализа које се користе за израчунавање нагиба или модула, илустроване су на слици 2.44:



Слика 2.44 Методе одређивања модула еластичности када је граница пропорционалности ниска (нпр. код кртих материјала) [J.D. Lord, 2006]: а) Почетни модул тангенте: нагиб криве напона - деформација из координатног почетка (тј. нагиб OM на слици 2.44 а); б) Модул тангенте: нагиб криве напона - деформација при сваком датом напрезању (тј. нагиб TPM на слици 2.44 б); в) Модул секанте: нагиб секанте из координатног почетка на било коју одређену тачку на кривој напон - деформација (тј. нагиб OP на слици 2.44 в); г) Модул тетиве: нагиб тетиве између било које две тачке на кривој напон - деформација (тј. нагиб PQ на слици 2.44 г).

J.D. Lord и R.M. Morrell (2010 а) су развили софтвер за анализу података напон - деформација, при чему се модул тангенте и секанте израчунавају у свакој тачки и користе за дефинисање праве линије која се уклапа у рани део криве напон - деформација, слика 2.45.



Слика 2.45 Шематски приказ података добијених софтвером и анализа процедуре [J.D. Lord, R.M. Morrell, 2010 а]

Анализа функционише тако што се квадратни полином серијски уклапа у податке о напону-деформацији, тачку по тачку дуж криве, помоћу регресионе анализе најмањих квадрата. Уређени полином се затим диференцира у свакој тачки да би се добила вредност за модул тангенте, који се затим уцртава у односу на деформацију. Затим се добија најбоље уклапање у криву модула тангенте - деформација и ова вредност модула се користи за дефинисање новог координатног почетка података за криву напон - деформација. Подаци су тада премаркирани новим координатним почетком и дефинише се крива модула секанте - деформација. За добро уклапање у линеарни део криве, модули тангенте и секанте треба да се подударaju и ово се узима као права вредност модула еластичности добијеног испитивањем. Анализа података модула тангенте и секанте је веома осетљива метода за проверу да ли је изабрана вредност добро уклопљена у криву напон – деформације [J.D. Lord, R.M. Morrell, 2010 a].

Одређивање модула еластичности E једноосним испитивањем затезањем врши се испитивањем еластичног понашања материјала помоћу Хooke-овог закона, а представља однос напона (σ) и деформације (ϵ).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.2)$$

У DIN EN ISO 6892 изведена је корекција Hooke-овог закона, израз (2.3), који уводи offset-напон b , ако се почетна сила разликује од нуле.

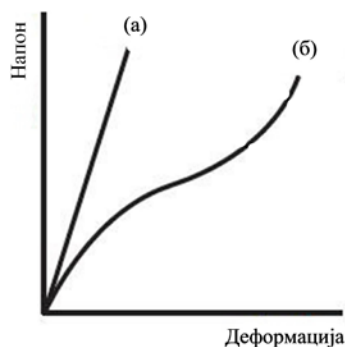
$$R = E \cdot \epsilon + b \quad (2.3)$$

У изразу (2.3), R је напон, а ϵ је еластична деформација. Крива је добијена линеарном регресијом и предложен је коефицијент корелације r^2 већи од 0.9995. У складу са стандардом DIN EN ISO 6892 уведено је линеарно регресионо подешавање, па се модул еластичности E добија према изразу (2.4).

$$E = \frac{(\sum XY) - K \bar{X}\bar{Y}}{(\sum X^2 - K \bar{X}^2)} \quad (2.4)$$

У изразу (2.4), X представља одговарајућу деформацију, Y примењени напон, а \bar{X} и \bar{Y} вредности просечне деформације и просечног напона. K је број одређених тачака. Тачност линеарне регресије описана је коефицијентом корелације r^2 , а коефицијент корелације узорка је између 0.90000 и 0.99999.

Тренутно, у стандардима нису наведене доње и горње границе понашања материјала у еластичној области. Имајући у виду да карактеристике криве напон - деформација нису исте код линеарно еластичних материјала (највећи број материјала има линеарну зависност између напона и деформација у еластичној области, према Hooke-овом закону) и код нелинеарно еластичних материјала (код неких материјала, као што је гума, у еластичној области не постоји линеарна зависност између напона и деформација), недостатак доње и горње границе значајно утиче на резултате испитивања, слика 2.46 [S. Ledworuski, 2000].



Слика 2.46 Крива напон - деформација код (а) линеарно еластичних и (б) нелинеарно еластичних материјала [S. Ledworuski, 2000]

У раду Н.М. Sonne (1999) предложене су четири варијанте за одређивање доње и горње границе еластичне области. Најједноставнија и најчешће коришћена варијанта дефинише константну доњу границу σ_{\min} и константну горњу границу σ_{\max} , која зависи од затезне чврстоће материјала TS , при чему је $\sigma_{\min} = 0.05 \cdot TS$, а $\sigma_{\max} = 0.18 \cdot TS$.

Теоријско стандардно одступање модула еластичности је $\pm 5\%$. Одступања могу бити и већа, што зависи од утицаја уређаја за испитивање, субјективне процене корисника и детекције учесталости измерених вредности. Дакле, тачност при испитивању је један од основних услова за одређивање поузданих резултата модула еластичности [S. Suttner; M. Merklein, 2017].

S. Suttner и M. Merklein (2017) су испитивањем узорака различитих материјала на затезање приказали нови приступ одређивању линеарног модула еластичности на основу криве напон - деформација. Испитиване су алуминијумске легуре, челични лимови и легуре магнезијума. Приступ се заснива на Хooke-овом закону и постојању скоро линеарне зависности у области еластичног понашања испитиваних материјала. Методологија је ограничена на линеарно еластично подручје и не може обухватити квази-пластично-еластичну област између линеарне еластичности и пластичности као што су описали L. Sun и R.H. Wagoner (2011). Тачност добијених резултата модула еластичности је верификована поређењем са две различите методе за линеарно еластично понашање материјала, стандардом ASTM E111 и Sonne-овим приступом.

Поред мерења задатог оптерећења (силе) при испитивању затезањем, мерење деформације материјала игра важну улогу у одређивању механичких карактеристика материјала. Тачност и поузданост мерења издужења су често проблем код испитивања, посебно у области еластичних деформација где су величине издужења мале. Технике мерења издужења код испитивања затезањем могу се базирати на мерењу померања стезне чељусти уређаја за испитивање, мерењу издужења мерне дужине узорка (спрувете) мерним тракама и мерењу издужења екстензиометрима.

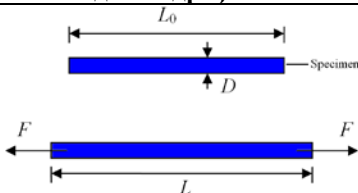
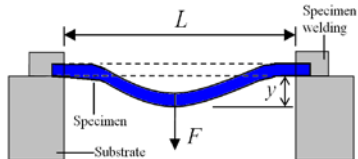
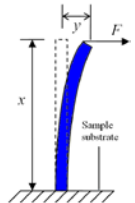
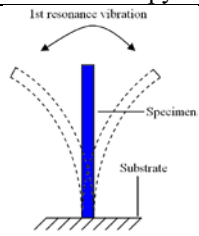
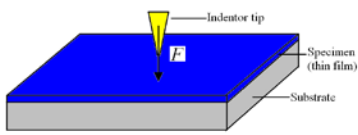
На мерење издужења узорка мерењем померања покретне стезне чељусти уређаја значајно утиче крутост уређаја за мерење, тако да податак о деформацији узорка представља збир свих померања дуж правца дејства силе затезања, што је врло тешко експериментално одредити. Уобичајено мерење издужења узорка код конвенционалних уређаја врши се коришћењем мерних трака, јер су јефтине, одговарајуће тачности и лаке за коришћење, али највећи проблем је њихово везивање за узорак, посебно ако је узорак малог попречног пресека. Поред тога, грешке мерења се јављају услед неизвесности мерног система узроковане низом извора грешака, о којима детаљно говоре у раду W.

Montero и коаутори (2010). Најпоузданије мерење издужења узорка постиже се екстензиометрима различитих класа тачности, где се за мерење модула еластичности користе екстензиометри високе резолуције класе 0.2, калибрисани према стандарду EN ISO 9513 (2012) [Н.В. Motra, 2014]. У раду J. Tabin и М. Pęcik (2014) приказују динамичку анализу структуре slip-on механички контакт екстензиометар-узорак, који је подвргнут једноосном испитивању затезањем. На динамичко понашање такве структуре утичу вибрације које могу бити узроковане спољашњим факторима, попут вибрација које се јављају на уређају за испитивање и ефекта „хладног заваривања“ (обично на ултра-ниским температурама) или унутрашњим факторима који проистичу из пластичне нестабилности материјала за испитивање.

Данас је све присутнији развој нових технологија израде минијатурних производа који ограничавају димензије узорка потребних за испитивање механичких својстава материјала. То за собом повлачи повећану потребу за пројектовањем уређаја за испитивање механичких својстава материјала који користе узорке малих попречних пресека. Код узорака малих димензија, напон у пољу еластичних деформација се може тачно израчунати на основу силе која се снима на уређају при испитивању затезањем, док прецизно мерење еластичне деформације представља изазов [Н.В. Motra, 2014]. Еластична деформација стандардних узорака може бити тачно одређена помоћу екстензиометара, али код узорака малих маса и запремина примена екстензиометра је отежана и то није опција која се примењује. Постоје бесконтактни мерни системи за мерење деформација, као што су ласерски и видео екстензиометри [С.В. Hurchill, 2009], али висока цена и сложена поставка ограничавају њихову примену. За одређивање еластичне деформације узорака малих димензија уместо екстензиометара могу се користити две алтернативне методе. Једна се своди на примену корелације дигиталне слике DIC, а друга на мерење деформације на основу мерења померања стезне чељусту уређаја за испитивање затезањем. DIC метода за мерење деформације узорка током тестирања се своди на поређење слика узорка пре и после издужења, пиксел по пиксел. Ова техника захтева употребу камере високе резолуције, након чега следи обрада података коришћењем одговарајућег софтвера. С друге стране, мерење еластичне деформације епрувета малих димензија померањем стезне чељусту не захтева додатну опрему и обраду података. Међутим, ова метода има један недостатак. При мерењу померања стезне чељусту како би се добила еластична деформација испитиваног узорка, мора се знати да је измерено издужење епрувете укључило и издужење зона радијуса епрувете и издужење дела епрувете који се поставља у зону прихвата уређаја [Z.C. Ma, 2013; F.H. Akbary, 2014; S. Kostić, 2019].

Ради прегледности досад изложеног, у табели 2.1 је дат шематски преглед најчешће коришћених метода за одређивање модула еластичности, обрасци по којима се он одређује и кратак опис методе.

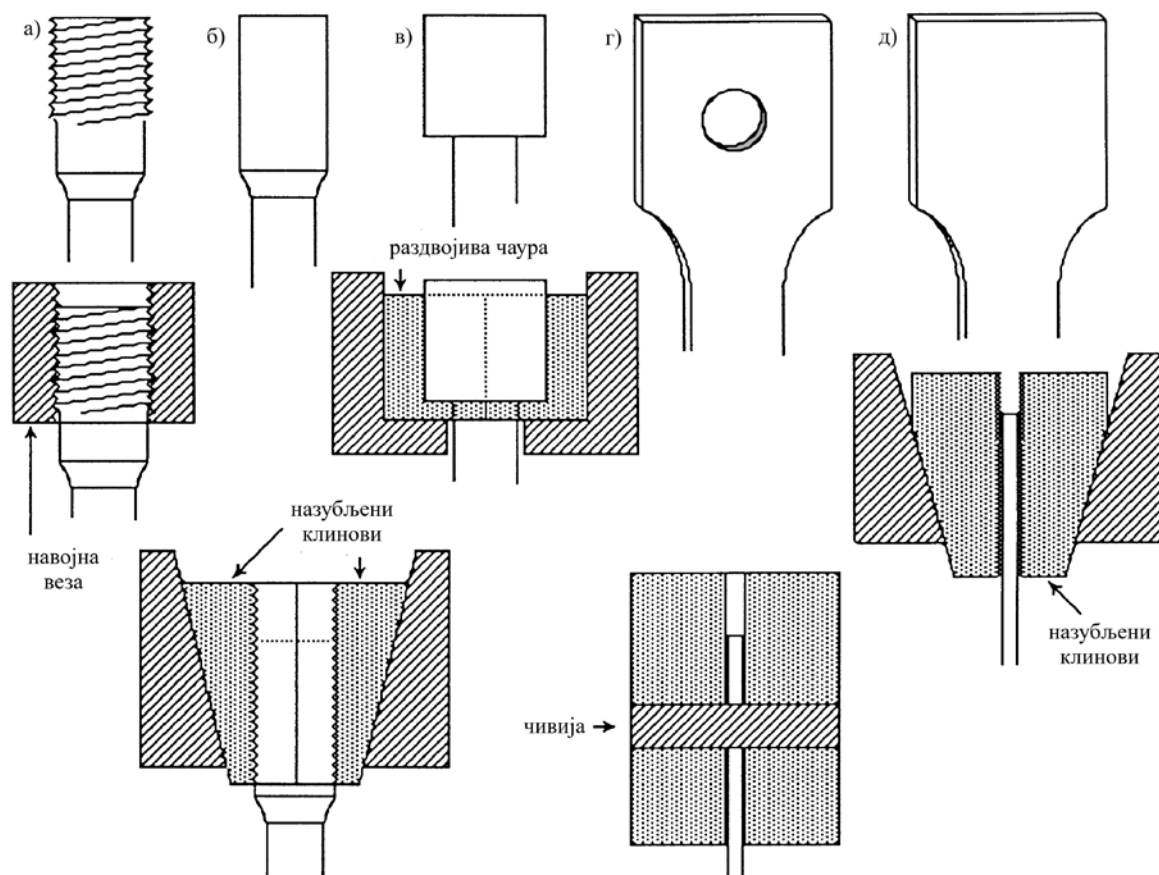
Табела 2.1 Преглед најчешће коришћених метода за одређивање модула еластичности [D. Zhang, 2010]

Метода за одређивање E	Израз за одређивање модула E
	$E = \frac{4F}{\pi D^2} \frac{L_0}{L - L_0}$ <p>F - примењена сила затезања L_0 - почетна мерна дужина узорка D - почетни пречник узорка L - издужење мерне дужине узорка</p>
<p>Испитивање затезањем - из криве напон - деформација добијене испитивањем одређује се Young-ов модул, затезана чврстоћа, коефицијент деформационог ојачавања и напон при лому епрувете.</p>	
	$E = \frac{L^3}{y} \frac{F}{3\pi D^4}$ <p>F - примењена сила савијања на средини узорка L - почетна дужина узорка D - почетни пречник узорка y - угиб у правцу деловања силе</p>
	$E = \frac{x^3}{y} \frac{64F}{3\pi D^4}$ <p>x - растојање тачке дејства оптерећења F од ослоњаца y - угиб у правцу деловања силе</p>
<p>Испитивање савијањем (са једним или два ослоњаца) је много лакше извести него затезањем. Деформација настала савијањем је обично довољно велика па се лакше мери. Главна ограничења испитивања савијањем су строжије праћење силе него код затезања јер је крутост савијања много мања од његове затезне крутости; више је осетљиво на несигурности у односу на попр. пресек (пречник D).</p>	
	$f = \frac{1.875^2}{8\pi} \frac{D}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ <p>f - прва резонантна фреквенција D - почетни пречник узорка L - почетна дужина узорка ρ - густина материјала узорка</p>
<p>Механичко испитивање резонанције, је неразорна и динамична метода. Узорак се побуђује у резонанцу електричним или механичким методама. Основна фреквенција узорка се може лако одредити оптичким уређајима. Под претпоставком да узорак вибрира са малом амплитудом, однос између прве резонантне фреквенције и модула савијања може се извести из Euler-Bernoulli-јевог израза.</p>	
	$H = \frac{F_{\max}}{A}$ <p>H - тврдоћа узорка F_{\max} - максимална сила утискивања A - површина отиска утискивача</p> $K_u = 2\beta \sqrt{\frac{A}{\pi}} E_r = \frac{dF}{dh}$ <p>K_u - крутост при растерећењу</p> <p>E_r - редуковани модул еластичности β - константа која зависи од геометрије утискивача h - дубина утискивања $\frac{1}{E_r} = \frac{1-v^2}{E} + \frac{1-v_i^2}{E_i}$ E_i - модул еласт. утискивача v_i - Poisson-ов коеф. утискивача v - Poisson-ов коеф. узорка</p>
<p>Испитивање наноутискивањем - наноутискивач се утискује у површину танког филма и бележи се дубина утискивања у функцији примењене силе приликом оптерећења и растерећења узорка. Из криве сила - померање одређује се тврдоћа материјала H и модул еластичности E_r. Крутост K_u се може одредити из нагиба почетног дела криве растерећења. Редуковани модул еластичности E_r представља збир еластичних деформација узорка и утискивача. Резултати испитивања зависе од структуре материјала у тачки испитивања. Главни недостатак је велики градијент напона и деформација који се формира испод врха утискивача у току испитивања, што тумачење података чини проблематичним.</p>	

2.4 СТЕЗНЕ ЧЕЉУСТИ ЗА ПРИХВАТ И ПОЗИЦИОНИРАЊЕ ЕПРУВЕТА КОД НЕКОНВЕНЦИОНАЛНИХ КИДАЛИЦА

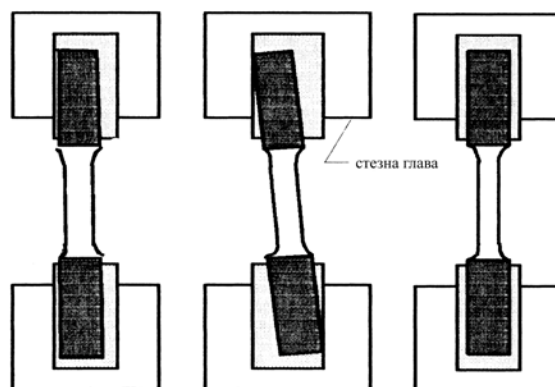
Као што је већ наглашено, грешке мерења приликом испитивања материјала затезањем могу настати уколико узорак није добро позициониран у зонама прихвата уређаја (стезне чељусти).

Стезне чељусти могу бити механичке, хидрауличне и пнеуматске, а сам систем стезања активан или пасиван. Постоје различити начини прихвата узорака у стезне чељусти конвенционалних уређаја за испитивање затезањем, од којих су неки приказани на слици 2.47. Епрувете кружног попречног пресека које на својим крајевима имају навој, монтирају се у стезну чељуст завијањем, или се могу ослањати у чаури или хватати на зубљеним клиновима. Најважније код избора методе хватања је потреба да се узорак осигура од проклизавања при испитивању и задавању максималног оптерећења или приликом лома у зони хватања. Савијање треба да буде сведено на минимум [J.R. Davis, 2004]. Дакле, стезне чељусти морају да одговарају узорцима (или обрнуто) и морају бити добро пројектоване да се током испитивања не би оштетиле.



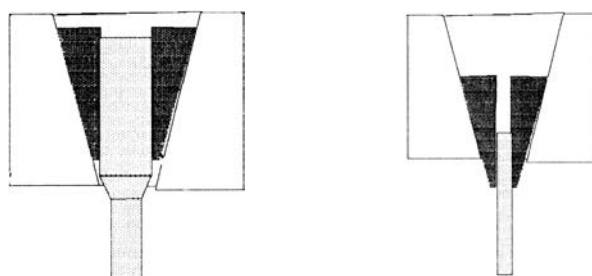
Слика 2.47 Системи за прихват узорака. За узорке кружних попречних пресека: а) навојна веза, б) на зубљени клинови, в) раздвојива чаура. За равне узорке г) чивија, д) на зубљени клинови [J.R. Davis, 2004]

Постоји неколико техника за позиционирање узорака у зоне прихвата уређаја, слика 2.48. У идеалном случају, зона за прихват узорка у стезној чељусти би требало да буде исте ширине као и крајеви узорка; у супротном, бочна поравнања зависе само од вештине руковаоца.



Слика 2.48 Неправилно (лево - узорак није центриран у стезној чељусти; средина - оса узорка није паралелна правцу задавања оптерећења) и правилно постављање узорка у стезну чељуст уређаја за испитивање (десно) [J.R. Davis, 2004]

Када се узорак уграђује у стезну чељуст са назубљеним клиновима могу се јавити проблеми. Уметнути назубљени клинови за прихват епрувете морају да се налазе у телу стезне чељусти, тако да крајеви узорка буду целом својом дужином у контакту са клиновима, слика 2.49. На слици (десно) се види неправилно постављање епрувете, при чему може доћи до оштећења стезне чељусти и нежељене повреде руковаоца.

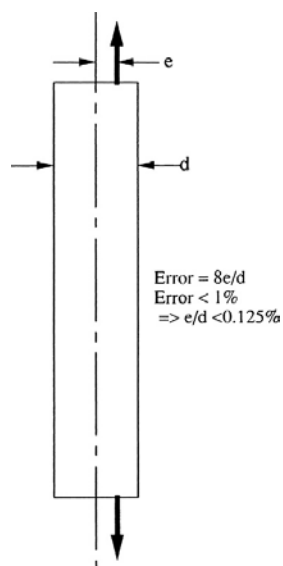


Слика 2.49 Правилно постављање епрувете у стезну чељуст са клиновима (лево) и неправилно (десно) [J.R. Davis, 2004]

На центрираност узорка може утицати рам уређаја за испитивање, стезне чељусти и модел прихвата узорка, као и сам узорак. Центрираност узорка је битна због обезбеђења чистог затезања. Ексцентричност узорка може изазвати грешке у мерењу оптерећења услед појаве сила савијања.

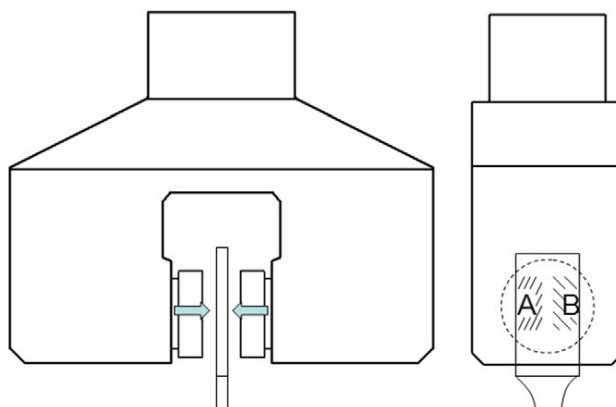
Остале врсте хватања су мање проблематичне за неискусног техничара. Оно што је свакако битно је да се изврши правилно позиционирање и поравнање епрувете, како би се избегао ексцентрицитет осе узорка и правца задавања оптерећења, односно појава савојног оптерећења узорка, јер ће узорак тада бити подвргнут комбинацији аксијалног оптерећења и савијања. Напон који делује у различитим попречним пресецима узорка се мења, од збира аксијалног и савојног напрезања са једне стране, до разлике између два напрезања са друге стране. Очигледно је да ће течење материјала почети на страни где напони делују збирно и при нижој вредности напона него што би то био случај да је присутно само аксијално затезање. Из тог разлога, напон течења може бити ниже вредности од реалне и горња граница течења неће бити јасно уочљива у области која је очекивана за узорак одређеног материјала. Код дуктилних материјала ефекат савијања је минималан и односи се пре свега на смањење вредности тачке горње границе течења на дијаграму напон - деформација. Међутим, код кртих материјала, појачано напрезање услед савијања може изазвати лом при мањем напону него када савијања нема [J.R. Davis, 2004].

J.R. Davis (2004) је приказао метод за процену грешке измерене границе еластичности. Према овом концепту, ако је узорак кружног попречног пресека пречника d позициониран у зони прихвата тако да постоји нека ексцентричност e , слика 2.50, грешка ће бити око $8 \cdot (e/d)$. Ако желимо да грешка буде испод 1% тада однос e/d мора бити мањи од 0.00125 (0.125%). То значи да за пречник узорка од 10 mm, ексцентричност између правца задатог оптерећења и осе узорка не сме бити већа од 0.0125 mm [A. Mucsi, 2013 a].



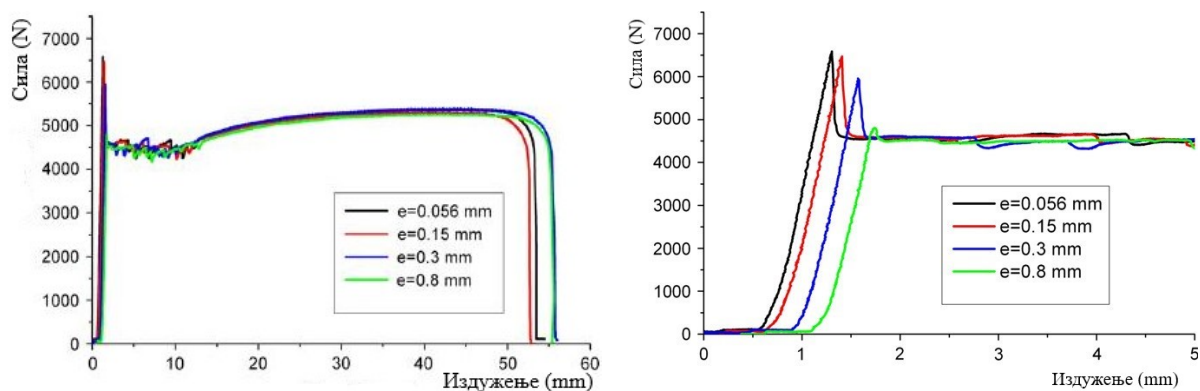
Слика 2.50 Утицај ексцентричности узорка на грешке мерења при испитивању затезањем [J.R. Davis, 2004]

Када су у питању узорци (епрувете) са правоугаоним попречним пресеком и равни узорци, прихват у стезним чељустима се обично врши назубљеним клиновима или чивијама кроз отвор на проширеном делу узорка за прихват (слика 2.47 г, д и 2.49). Зоне прихвата узорка на уређају су дизајниране тако да могу да позиционирају различите дебљине равних узорка. Прихват узорка може бити регулисан и пнеуматским системом, као на слици 2.51. Два помична цилиндра учвршћују узорак у прихватном систему помоћу пнеуматских хватаљки. Пренос оптерећења се изводи трењем, односно притиском на проширени део узорка који мора бити довољно велик да се избегне клизање узорка у прихвату.



Слика 2.51 Пнеуматски систем за прихватање равних узорка на уређају за испитивање затезањем [A. Mucsi, 2013 б]

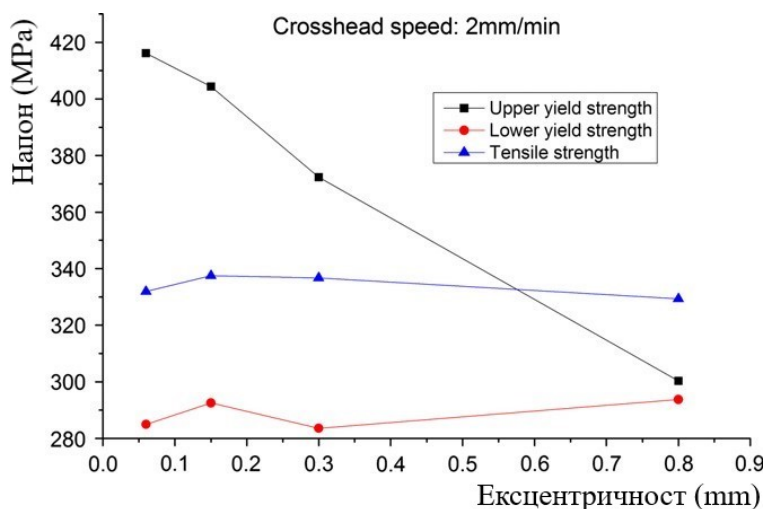
Као и код узорака са кружним пресеком, систем хватања који се користи за стезање равних узорака одређује расподелу напрезања унутар узорка. Генерално, неизвесности мерења карактеристика испитиваних материјала долазе од почетног поравнања и несаосности осе узорка и правца задатог оптерећења током испитивања. То је посебно видљиво у појасу еластичног подручја испитивања, тако да су грешке углавном узроковане хватаљкама коришћеним за испитивање затезањем. Према досадашњим запажањима, у већини случајева конструкција система за прихват узорка код уређаја и лоше позиционирање узорка у зони прихвата су можда и првенствено одговорни за неочекивано велику неизвесност измерених података приликом испитивања [A. Mucsi, 2013 б]. За нискоугљеничне челике посебно је проблематично тачно одређивање горње границе течења. Познато је да меки челици са ниским садржајем угљеника имају високу горњу границу течења [H.V. Sun, 2006]. У пракси, за нискоугљеничне меке челике, могуће је добити скоро дупло веће вредности напона течења у горњој тачки него у доњој тачки, слика 2.52. Кључни проблем за појаву великог расипања података за горњу тачку течења није разјашњен до краја. Велики раст напона течења у горњој тачки приписује се ефекту концентрације напона и пластичном преднапрезању које се јавља на спрегнутим површинама између прихватних зона и самог узорка, као и чињеници да је његова измерена вредност изузетно осетљива на могућу несаосност између правца задавања оптерећења и осе узорка.



Слика 2.52 Утицај ексцентричности (e) узорка и правца силе на резултате мерења при испитивању затезањем узорака од нискоугљеничних челика. Дијаграм десно приказује вредности границе течења [A. Mucsi, 2013 б]

T.G.F. Gray и A. McCombe (1992) користили су специјалне узорке за испитивање материјала како би проценили расподелу напона при затезању. Открили су да је напон савијања, који се јавио као последица различитих начина прихвата узорка, значајан и променљив током испитивања посебно у еластичној области оптерећења узорка.

Ако је систем за прихват узорка код уређаја беспрекоран, током испитивања се неће појавити напон савијања, а на узорак ће деловати само аксијално напрезање, тако да ће теоријски, добијени резултати бити независни од система за прихват узорка. Ако постоји мала ексцентричност између правца задавања силе и осе симетрије узорка, напон савијања ће се појавити унутар испитиваног узорка. У тренутку појаве напона савијања повећаће се напони унутар узорка, па ће течење материјала почети при мањим вредностима силе. На дијаграму са слике 2.53, јасно се види утицај ексцентричности осе узорка и правца задавања силе на механичке карактеристике добијене испитивањем затезањем.

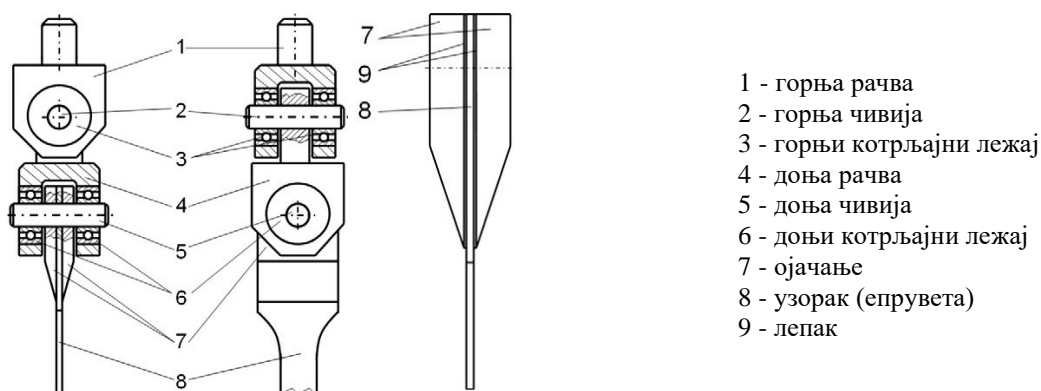


Слика 2.53 Утицај ексцентричности на механичка својства (затезна чврстоћа, горња и доња граница течења) за нискоугљеничне челике [А. Mucsi, 2013 б]

У случају система за прихват узорка који оптерећење преноси трећем, јако је битно да коефицијент трења у зони прихвата уређаја и узорка буде једнак по целој спрегнутој површини, јер у супротном може бити разлог за настајање ексцентричности узорка и правца силе, односно за поменуте проблеме који су последица наведене ексцентричности.

Доста се у литератури говори о систему хватања узорака малих попречних пресека, који се користе за испитивање карактеристика материјала затезањем на неконвенционалним уређајима - кидалицама.

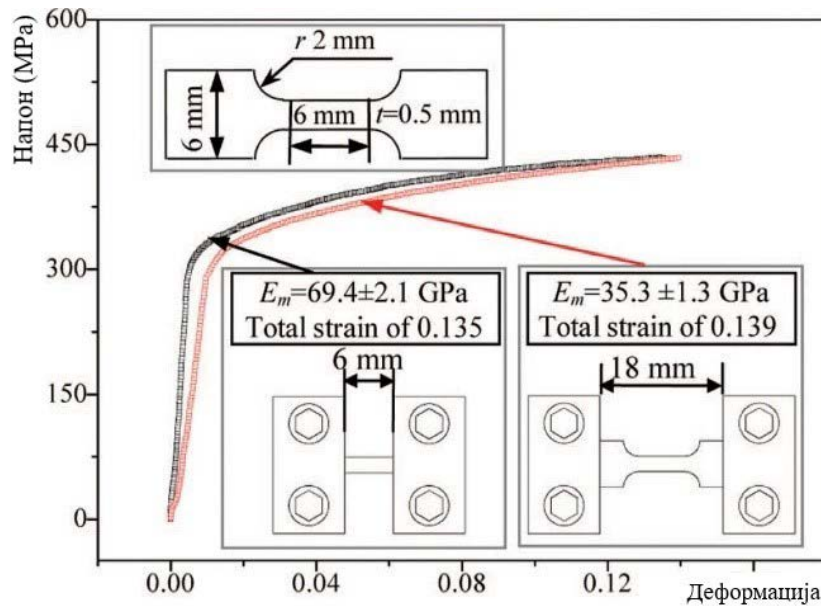
А. Mucsi (2013 б) презентује нови систем за прихват равних узорака, користећи јак лепак у слоју од 0.02 mm за везу узорка и ојачања, како би елиминисао утицај коефицијента трења, као и чивију уметнуту кроз отвор проширеног дела епрувете који се везује у део система за прихват са котрљајним лежајевима, чија је улога постизање центричности осе епрувете и правца задавања силе, слика 2.54.



Слика 2.54 Изглед новог система за прихват епрувете [А. Mucsi, 2013 б]

Врло често решење за прихват узорка (епрувете) код неконвенционалних кидалица заснива се на притезању узорка између две плоче уз помоћ вијака [Q.S Bai, 2012; L. Woong, K. Ho-Kyung, 2013; Z. Ma, 2015]. Утицајем система за прихват узорка на карактеристике материјала приликом испитивања затезањем бавио се и Z. Ma са сарадницима (2013). Они су равне узорке од легуре алуминијума прихватили у

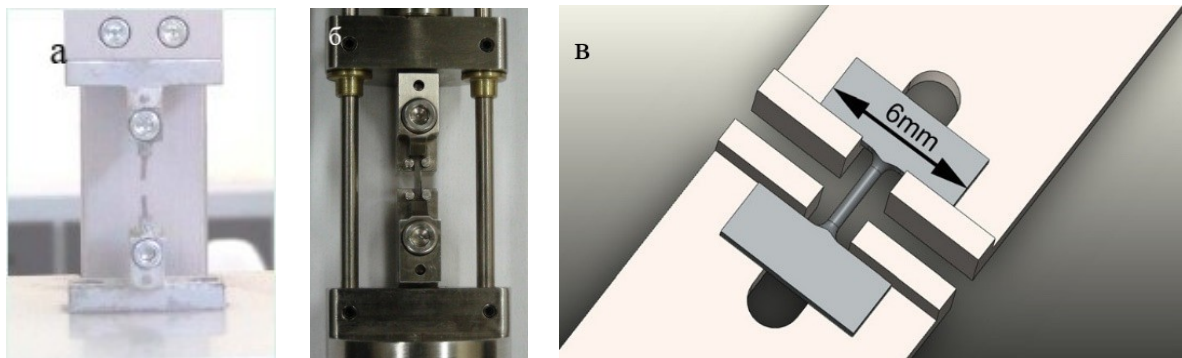
различитим положајима и бележили промене измерених величина, са посебним освртом на модул еластичности ових легура, слика 2.55.



Слика 2.55 Криве напон - деформација за легура алуминијума 2026 добијене прихватом узорака у различитим положајима [Z.C. Ma, 2013]

Експеримент је показао да су вредности модула еластичности скоро два пута мање када је прихват вршен на проширеном делу епрувете, него када је прихват епрувете једним делом био и преко мерне дужине епрувете. Када су у питању укупне деформације узорака, резултати су били супротни, дакле, веће вредности издужења измерене су са системом за прихват позиционираним на проширеном делу епрувете, јер се граница еластичне деформације и пластичне деформације појавила на радијусу узорка [Z.C. Ma, 2013].

Код узорака малих попречних пресека прихват у чељустима уређаја може бити и ослањањем „рамена“ узорака или везом вијцима кроз отвор на проширеном делу епрувете, слика 2.56 [G.V. Rathmayr, 2013; K. Kumar, 2014].



Слика 2.56 Прихват узорака за испитивање затезањем а) вијцима и ослањањем „рамена“ узорка б) [K. Kumar, 2014] в) [G.V. Rathmayr, 2013]

2.5 ИСПИТИВАЊЕ ЗАТЕЗАЊЕМ НЕМЕТАЛНИХ МАТЕРИЈАЛА НА МАЛОЈ ЛАБОРАТОРИЈСКОЈ КИДАЛИЦИ

Као и код конвенционалних кидалица, код неконвенционалних, малих, лабораторијских кидалица узорак који се испитује на затезање може бити израђен од различитих неметалних материјала, попут тканина, пластике, дрвета и других. У овом раду ће посебна пажња бити посвећена испитивању узорака од полипропилена, са једне стране због његове све веће употребе у производњи пластике, а са друге стране, због могућности рециклаже.

Полипропилен (PP) је линеарни угљоводонични полимер, који спада у групу засићених полимера и представља тврди термопластични полимер. То значи да код полипропилена при загревању долази до његовог размекшавања (на температури од 160 °C), а затим и топљења на вишим температурама, при чему овај материјал након хлађења поново очвршћава, задржавајући своја основна (почетна) својства.

Полипропилен има широку примену захваљујући добрим физичко-хемијским особинама које се могу подешавати додавањем различитих врста адитива. Особине које га одликују су: умерена еластичност, добра тврдоћа, добра отпорност на замор материјала, отпорност на хемикалије и на топлоту. Адитиви који се користе приликом производње свих комерцијалних врста полипропилена имају задатак да заштите полимер приликом производње и побољшају особине коначног производа. Адитивима се може решити и проблем деградације и уништавања макромолекула приликом излагања полипропилена UV зрачењу.

Производња полипропилена може да се одвија на неколико различитих начина, чија је заједничка карактеристика да се мономер пропилен излаже топлоти и притиску уз присуство катализатора. Полимеризација се одвија при релативно ниским температурама, при чему се добија безбојан или благо обојен полипропилен. У зависности од употребљеног катализатора и услова приликом полимеризације могу се добити различита својства добијеног полипропилена. Као резултат полимеризације формирају се макромолекули полипропилена који представљају ланце међусобно повезаних основних молекула - мономера. Због своје карактеристичне структуре овакав тип полимера се назива линеарним или неумреженим полимерима.

Животни пут полипропилена се не завршава производњом готовог производа због тога што је овај материјал могуће рециклирати и поново употребити [J.G. Poulakis, 1997; R. Dias, 2019]. Механичке карактеристике рециклираног полипропилена изложеног затезању (граница еластичности и модул еластичности) су сличне провидном, изворном полупропилену (*енг. virgin polypropylene*), тако да може имати једнако широку примену као и нерциклирани материјал, уз предности попут ниже цене и очувања животне средине [M.M. Raj, 2013; L.G. Barbosa 2017; S.K. Satya, 2020].

Из свега наведеног, а пре свега захваљујући изузетној прилагодљивости, може се закључити да овај материјал има разноврсну примену и да ће број производа у којима се користи и даље имати тренд раста, који је започет још 1957. године, када је забележена његова прва комерцијална примена. Полипропилен је један од најзаступљенијих материјала у производњи предмета од пластике. Има широку примену у индустрији

паковања и аутомобилској индустрији, као и у производњи производа широке потрошње и производа за индустрију. Синтетичка влакна од полипропилена јефтинија су од влакана од других материјала, због чега се често користе у текстилној индустрији.

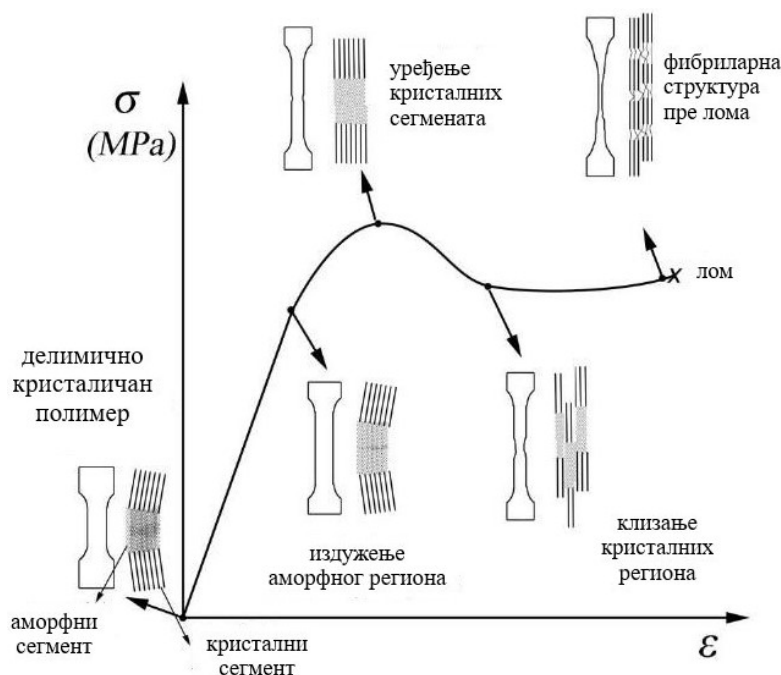
Разликују се три подтипа полипропилена: хомополимери (основна врста полимера - чисти полипропилен, намењен за производњу широке лепезе производа), блок кополимери (које одликује боља савитљивост и тврдоћа) и рандом кополимери.

Постоји значајан број радова који се баве испитивањем фактора који утичу на механичке карактеристике полипропилена [Y. Zhou, 2002; S. Sahin, 2005; M. Zrida, 2010; H.S. Wacharawichanant, 2013; H. Kansal, 2016]. Један број истраживача се бави испитивањем механичких својстава танких композита полипропилена и стаклених влакана [E. Mäder, 2007; J.E. Rocher, 2012]. У литератури се може наћи мало резултата у вези са испитивањима затезањем на везивима за балирање од 100% полипропилена.

Везива за балирање направљена су од 100% полипропилена. Не смета им влага, неће трулити или буђати, отпорни су на већину хемикалија и киселина.

До недавно, везива за балирање нису била укључена у стандарде, па су потрошачи морали да верују произвођачима „на реч“ да ће добити производ одговарајућих карактеристика. Америчко друштво инжењера пољопривреде и биологије ASABE (*енг.* American Society of Agricultural and Biological Engineers) усвојило је стандарде за квалитет, испитивање, обележавање, перформансе и земљу порекла везива за балирање у пољопривреди. Стандарди укључују спецификацију стварне дужине везива, стварну затезну чврстоћу везива, захтевају да везиво мора бити једноличног пресека, да има стабилне карактеристике по питању отпорности на временске услове и UV заштиту, као и да су лабораторије за контролу квалитета стандардизоване.

Приликом испитивања полимера на затезање, у почетном стадијуму примене напона, долази до еластичне деформације полимера. Делимично кристалични полимери се састоје од кристалних сегмената (ламела), око којих се налази аморфни сегмент облика увијених неправилних ланаца. На слици 2.39 аморфни регион полимера представља средишњи део узорка, док је кристални сегмент на крајевима. Почетак еластичне деформације делимично кристаличних полимера настаје издужењем средишњег, аморфног региона полимерних ланаца у смеру примењеног напона. Континуираним задавањем оптерећења, аморфни регион наставља да се издужује, али промене се дешавају и у кристалном сегменту, где долази до повећања дебљине ламеларног кристалита услед савијања и истезања ланаца у кристалитним регионима. То доводи до појаве клизања делова ламела кристалита полимерних ланаца и одвајања кристалних сегмената. Завршна фаза пластичне деформације пре кидања представља оријентацију одвојених кристалних сегмената, са танким, истегнутим ланцима аморфног сегмента између, у правцу осе затезања. Померање ланаца у овој фази зависи од слабих Van der Waals-ових сила привлачења [W.D. Callister Jr., 2010].



Слика 2.57 Експериментални дијаграм затезања делимично кристаличног полимера [W.D. Callister Jr., 2010]

Затезна чврстоћа полимерних материјала је далеко мања од чврстоћа метала или керамике. Лом код умрежених полимера је углавном крт, док термопластични полимери показују и жилав и крт лом, а чест случај је и прелаз из кртог у жилав лом. Фактори који утичу на начин лома су температура, брзина оптерећења, модификације полимера, итд.

Феномен код термопластичних полимера који се најчешће јавља пре појаве лома је стварање великог броја пукотина у виду региона са локализованим пластичним деформацијама које прерастају у повезане микропукотине. Фибрилари мостови оријентисаних полимерних молекула се при дејству оптерећења истежу и пуцају, омогућавајући микропукотинама да расту, да се шире и спајају формирајући лом у полимерном материјалу. Овај начин стварања пукотина у великој мери апсорбује енергију лома ефективно повећавајући жилавост лома.

3 ОДРЕЂИВАЊЕ МЕХАНИЧКИХ КАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИЈАЛА НА ЗАТЕЗАЊЕ ПРИ СОБНИМ, ПОВИШЕНИМ И ВИСОКИМ ТЕМПЕРАТУРАМА

Испитивањем материјала затезањем добијају се следећа механичка својства материјала:

- својства отпорности материјала: модул еластичности, напон течења, затезна чврстоћа,
- својства деформисања: издужење, сужење (контракција) попречног пресека итд, која указују на дуктилност (пластичност) материјала.

Све индустријски развијене земље света, а међу њима и Србија, имају своје стандарде за испитивање механичких карактеристика материјала. Српски стандарди познати су под именом SRPS стандарди, а преузети су од важећих европских стандарда EN (*енг.* European standards) и ISO (*енг.* International Organization for Standardization). Сам поступак испитивања затезањем обухваћен је стандардима [М.В. Zeković, 1987]:

- SRPS EN ISO 6892-1:2020, Метални материјали - Испитивање затезањем - Део 1: Метода испитивања на собној температури,
- SRPS EN ISO 6892-2:2018 Метални материјали - Испитивање затезањем - Део 2: Метода испитивања на повишеној температури,
- SRPS EN ISO 6892-3:2016, Метални материјали - Испитивање затезањем - Део 3: Метода испитивања на ниским температурама.

Колика је важност испитивања материјала затезањем, поред тога што је једноставна за извођење, закључује се на основу следећих чињеница:

- Под дејством спољашњег оптерећења долази до напрезања материјала, односно до промене стања у материјалу. Напрезање се испољава променом облика и димензија материјала - деформацијама, односно унутрашњим отпором којим се материјал супротставља деформисању - напоном. Понашање материјала под оптерећењем се може добро описати овом методом, добијањем карактеристичне криве која представља везу напона и деформација.
- Резултати испитивања су карактеристике материјала које служе за прорачун и димензионисање елемената машина и конструкција.
- Резултати испитивања су карактеристике материјала помоћу којих се врши контрола материјала производа у производним технолошким процесима, као и испитивање карактеристика нових материјала.

3.1 МЕХАНИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ МАТЕРИЈАЛА ПРИ СОБНИМ ТЕМПЕРАТУРАМА

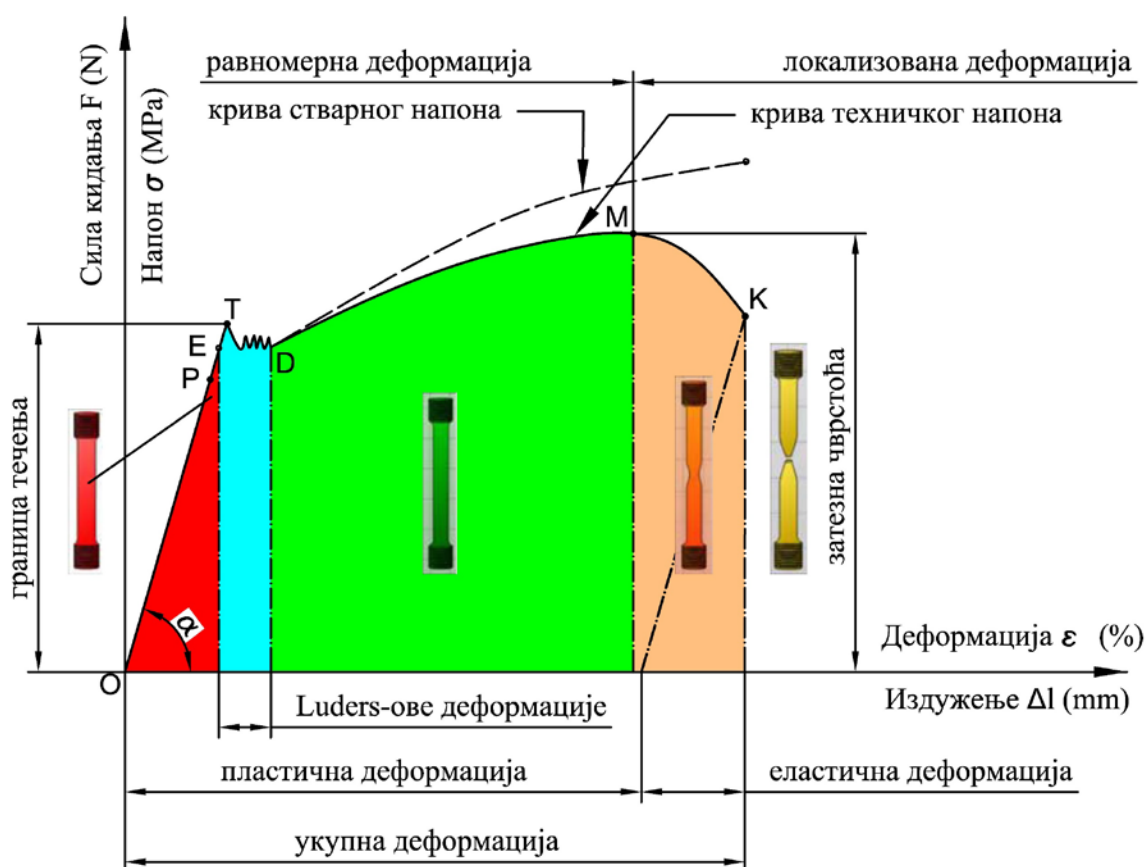
3.1.1 КРИВА НАПОН - ДЕФОРМАЦИЈА

Крива напон - деформација се добија на основу криве сила - издужење, чије се вредности мере током испитивања затезањем, а представља приказ механичких карактеристика узорка материјала током испитивања, односно од почетка испитивања до лома.

Крива напон - деформација се може приказати као:

- крива техничких напона - деформација, где се за њено добијање користе почетне димензије узорака,
- крива стварних напона - деформација, код које се за прорачун користе тренутне димензије узорка у свакој тачки током испитивања. Крива стварних напона - деформација је изнад криве техничких напона - деформација, јер су тренутне димензије узорака мање од почетних у току испитивања.

На слици 3.1 приказана је крива сила - издужење која се црта у току испитивања на основу мерених података, као и крива технички напон - деформације која се прорачунава из добијених података.



Слика 3.1 Крива технички напон - деформације. Испрекидана линија представља криву стварних напона - деформација

Технички (номинални, нормални) напон σ представља однос тренутне силе F и почетне површине попречног пресека узорка A_0 :

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3.1)$$

Издужење или апсолутна деформација узорка представља тренутно издужење мерне дужине узорка Δl :

$$\Delta l = l - l_0 \quad (3.2)$$

где је l - мерна дужина епрувете, а l_0 - почетна мерна дужина епрувете.

Деформација ε је просечна линеарна деформација или релативно јединично издужење у процентима и представља количник издужења мерне дужине узорка Δl и његове почетне дужине l_0 :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (3.3)$$

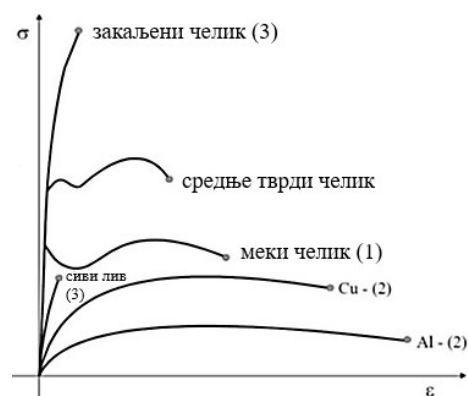
Како се напон и деформација добијају дељењем са константним (почетним) вредностима пресека и мерне дужине узорка, крива сила - издужење има исти облик као крива технички напон - деформација, само што је друга погоднија за употребу јер не зависи од димензија узорка који се испитује, већ искључиво од његових особина.

Како ће изгледати крива напон - деформација метала зависи од великог броја фактора као што су: структура узорка, термичка обрада и стање узорка, претходна историја пластичних деформација узорка, брзина деформације током испитивања, температура, оријентација примењеног напона у односу на структуру узорка, величина и облик узорка, итд [ASM Atlas, 2002; J.R. Davis, 2004].

Веза између напона и деформација при испитивању затезањем дата је на слици 3.2, за различите материјале (крте и дуктилне металне материјале, неке органске материјале), а на слици 3.3 за различите металне материјале [К.В. Ronai, 1990].



Слика 3.2 Дијаграм напон-деформација за различите материјале [К.В. Ronai, 1990]



Слика 3.3 Дијаграм σ - ε за различите металне материјале [К.В. Ronai, 1990]

Са слике 3.2 се види да различити материјали имају четири основна облика дијаграма и то [Д. Drobniak, 1990]:

- Дуктилни материјали (крива 1 и 2) имају велике пластичне деформације пре лома. Крива код неких дуктилних материјала (1) има изражену горњу и доњу границу течења, нпр. меки челици (до 0.3% С) и нелегирани челици у нормализованом стању, док код неких дуктилних материјала (2) има континуиран прелаз из еластичног у еластично/пластично подручје деформација, нпр. бакар, алуминијум, нерђајући аустенитни челици.
- Код кртих материјала крива (3) је без подручја еластично/пластичних деформација. То су материјали који се ломе готово без пластичне деформације, као нпр. сиви лив или каљени челик.
- Крива (4) неких органских материјала са ентропијском еластичном деформацијом, нпр. еластомери.

Анализом дијаграма криве напон - деформација са слике 3.1, могу се уочити четири стадијума деформисања [М. Plančak, 1997]:

- стадијум еластичне деформације ОЕ,
- стадијум развлачења (течења) метала ЕТ(D),
- стадијум пластичне деформације и ојачавања метала Т(D)М,
- стадијум локализације деформације и лом епрувете МК.

3.1.1.1 Линеарни сегмент криве - стадијум еластичне деформације (ОЕ)

Почетни праволинијски део криве је у еластичној области, где је напон линеарно пропорционалан деформацији. Крива креће из координатног почетка, тачка О, слика 3.1. Када се престане са деловањем оптерећења на узорак, деформација нестаје и узорак се враћа у првобитни положај, процес истезања је реверзибилан, односно деформација је еластична. Пре тачке Е, која представља границу еластичности, налази се тачка **Р, граница пропорционалности**, до које важи линеарна зависност напона и деформација, односно Нооке-ов закон. Највећи напон до кога је издужење пропорционално напрезању је граница пропорционалности, израз (3.4). При порасту напона изнад ове границе издужење креће брже да расте и престаје пропорционалност између напона и деформације.

$$R_p = \frac{F_p}{A_0} \quad (3.4)$$

где је R_p - напон на граници пропорционалности, F_p - сила на граници пропорционалности.

Границу пропорционалности није могуће прецизно одредити, зато јер је потребна висока тачност мерења. По правилу се одређује графичком интерполацијом из дијаграма напон - деформација добијеног испитивањем материјала на затезање.

Модул еластичности E , или Young-ов модул, заправо представља нагиб почетног линијског дела криве напон - деформација, па се може написати:

$$\sigma = \varepsilon \cdot \tan \alpha = \varepsilon \cdot E \rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.5)$$

где је σ технички номинални напон, а ϵ техничка номинална деформација. Што је стрмији нагиб криве почетног дела дијаграма, то је мања еластична деформација настала применом датог оптерећења, односно већи је модул еластичности. Модул еластичности је одређен међуатомским везама. Везе се не могу променити без промене природе материјала, тако да је модул еластичности једна од механичких особина која је најмање зависна од структуре материјала. Модул еластичности је мера крутости материјала и представља важну карактеристику отпорности материјала потребну при пројектовању конструкција, прорачуну угиба греда и других конструкцијских елемената и анализи стања код нормалних оптерећења (она која делују нормално на површину пресека, као нпр. оптерећење на затезање) [ASM Atlas, 2002; J.R. Davis, 2004].

Референтне вредности модула еластичности за материјале који се најчешће користе у инжењерској пракси доступне су у литератури [ASM Atlas, 2002; J.R. Davis, 2004]. Његове вредности се не мењају са променом јачине челика (нпр. због легирања, хладног ојачања, термичке обраде). Стална је величина за групу легура (има одређену вредност за челике, другу за легуре алуминијума, трећу за легуре бакра итд.). На собној температури има константну вредност, која пада са повећањем температуре. На повишеним температурама, модул еластичности се често мери динамичким методама [M. Yasunaga, 1983; W. Lins, 1999; H. Seo, 2016].

Граница еластичности E , на слици 3.1, може се поклопити са границом пропорционалности R_p , или се може јавити при неком већем напону. Граница еластичности је максимално напрезање које се може применити без трајне деформације узорка. Неке криве показују јасно одређену тачку границе течења односно почетка трајне деформације, док друге не. Када напон пређе вредност која одговара граници еластичности, узорак се пластично деформише. Ако се узорак накнадно растерети, остаће трајно деформисан.

Једна од мање познатих механичких карактеристика је **резилијентност** (еластична енергија). То је способност материјала да апсорбује енергију када се еластично деформише и враћа исту када се растерећује (престаје деловање спољашњег оптерећења). Резилијентност је одређена енергијом по јединици запремине коју материјал може да прими пре него што почне пластично да се деформише. Представља површину испод праволинијског дела криве $\sigma = f(\epsilon)$ која је карактеристична за еластичне деформације. Резилијентност се једноставно може израчунати према изразу (3.6), слика 3.4 [ASM Atlas, 2002; J.R. Davis, 2004; D. Roylance, 2001 и 2008]:

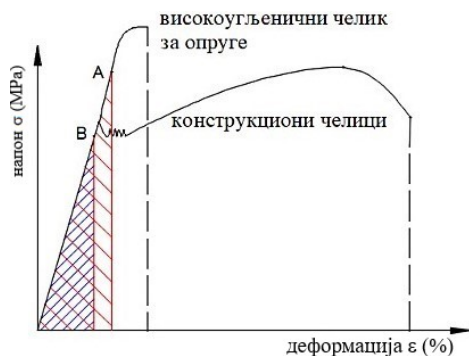
$$U = \frac{1}{2} \sigma \cdot \epsilon \quad (3.6)$$

где је $\sigma = R_p$ напон на граници пропорционалности, а ϵ деформација на граници пропорционалности.

Из израза (3.5) за модул еластичности и израза (3.6) за резилијентност, долази се до величине која се назива модул еластичне енергије или модул резилијентности U_r у тачки границе еластичности где се јавља максимална еластичност:

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma \cdot \epsilon = \frac{1}{2} \sigma \frac{\sigma}{E} = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (3.7)$$

Материјал који би се могао назвати идеалним са аспекта највећег модула резилијентности је онај који има велики напон на граници еластичности σ и низак модул еластичности E , као што је случај код механичких опруга.



На слици 3.4, тачка А је граница еластичности за челик за опруге; тачка В је граница еластичности конструкционог челика. Шрафирани троуглови су модули резилијентности U_r . Ове две области представљају рад који се врши над материјалом приликом њиховог издужења у области еластичности [ASM Atlas, 2002; J.R. Davis, 2004].

Слика 3.4 Поређење криве напон - деформација за високо-угљенични челик за опруге и конструкциони челик мање чврстоће

3.1.1.2 Нелинеарни сегмент криве до течења - стадијум развлачења (течења, попуштања) метала, $E_T(D)$

Пројектовање и технолошке процесе обраде метала пластичним деформисањем није могуће извести без познавања одређених карактеристика материјала, као што су напон течења или специфични деформациони отпор, параметара пластичности, итд. [М. Plančak, 1997].

Течење материјала. Код већине материјала долази до постепеног преласка са еластичног на пластично понашање. Међутим, тачку у којој почиње пластична деформација тешко је прецизно дефинисати. Код испитивања материјала затезањем користе се три критеријума за дефинисање појаве пластичног понашања материјала: граница еластичности, граница пропорционалности и граница течења [ASM Atlas, 2002; J.R. Davis, 2004].

Граница еластичности, приказана у тачки Е на слици 3.1, представља највећи напон који материјал може да издржи без икакве мерљиве трајне деформације након потпуног растерећења. Одређивање границе еластичности захтева примену процедуре постепеног оптерећења-растерећења, што је јако напорно. Због тога се често замењује границом пропорционалности.

Граница течења (развлачења), приказана у тачки Т на слици 3.1, представља напон који доводи до мале одређене количине пластичне деформације материјала. Код већине метала тачка Т се тешко може уочити. Тада се за границу развлачења узима напон који одговара трајној деформацији од 0.2% или 0.1% ($\epsilon = 0.002$ или 0.001) као што је дато у стандардима Сједињених Америчких Држава [ASM Atlas, 2002; J.R. Davis, 2004].

$$R_T = R_{p0.2} = \frac{F_{p0.2}}{A_0} \quad \text{за} \quad \epsilon_{0.2} = 0.2\% = 0.002 \quad (3.8)$$

Напон при пластичном издужењу мереном екстензиометром се у ISO стандарду наводи као *конвенционални напон течења* ($R_{p0.1}$ или $R_{p0.2}$). У EN стандардима за материјале који

немају феномен течења, дефинише се конвенционални напон течења 0.2% ($R_{p0.2}$) или 0.5% ($R_{p0.5}$). Граница течења се обично добија повлачењем паралелне линије линеарном делу криве напон - деформација на растојању 0.1%, 0.2% или 0.5% трајне деформације, јер се избегавају практичне потешкоће мерења границе еластичности или границе пропорционалности. Код неких материјала, на пример, меког бакра или сивог лива, на кривој напон - деформација нема линеарног дела, тако да је метода повлачења линија паралелних линеарном делу непримењива. У том случају се граница течења дефинише као напон који производи неку укупну деформацију, на пример, $e = 0.005$.

Материјали са феноменом тачке течења. Многи метали на кривој напон - деформација показују локализовани, хетерогени тип преласка са еластичне на пластичну деформацију која даје карактеристично течење (на пример жарени нискоугљенични челик). Уместо да крива течења има постепени прелаз из еластичног у пластично понашање, слика 3.5 (лево), метали са израженом тачком течења имају криву течења сличну као на слици 3.5 (десно).

Главна карактеристика стадијума течења материјала је попуштање (течење, развлачење) метала, односно пораст деформације без раста силе. Сила која се стално повећава са еластичном деформацијом, нагло пада, варира око приближно константне вредности оптерећења, а затим расте са даљим порастом деформације [М. Планџак, 1997].

У стандардима EN и ISO дефинишу се горња и доња граница течења R_{eH} и R_{eL} .



Слика 3.5 Идеализоване криве напон - деформација, (лево) стање непрекидног течења, (десно) прекидно течење, са горњом и доњом тачком течења

Горњи напон течења, тачка Т, је највећи напон при којем долази до наглог прелаз из еластичног у подручје пластичне деформације, а запажа се по значајном порасту издужења уз исту силу (први застој казаљке на скали динамометра). Иза ње долази до првог опадања силе уз даљи пораст издужења.

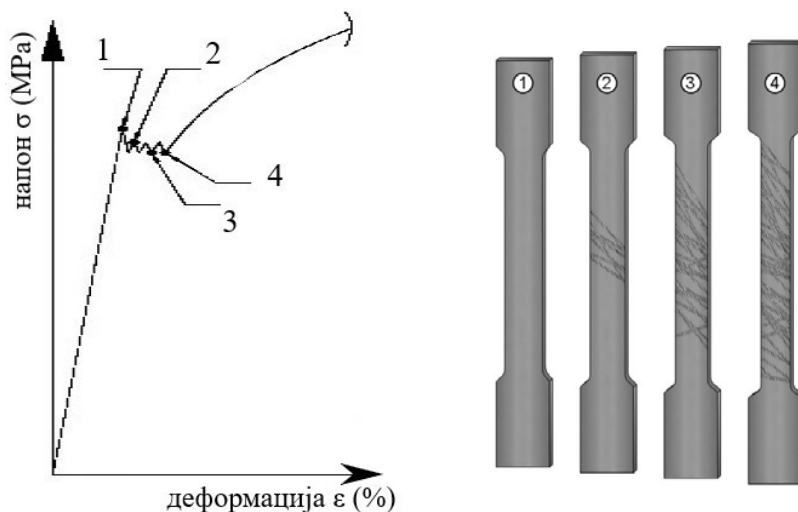
$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{A_0} \quad (3.9)$$

Доњи напон течења је најмање напрезање у подручју течења, које се устали након раста издужења (чак од 1% до 4%) без пораста силе, односно напрезање при коме се локализована деформација проширује на недеформисани део епрувете:

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{A_0} \quad (3.10)$$

Вредности напона течења које су прописане у техничким условима материјала односе се на горњи напон течења R_{eH} или на конвенционални напон течења $R_{p0.2}$. Напони течења, у односу на друге карактеристике материјала, су највише зависни од услова испитивања, нарочито од брзине задавања оптерећења. Врло су важна својства отпорности материјала, јер се управо на њима и затезној чврстоћи темеље прорачуни отпорности и димензионисања конструкција у машинству.

Карактеристично течење нискоугљеничног челика приказано је на слици 3.6.



Слика 3.6 Типично понашање течења нискоугљеничног челика [www.tec-science.com]

На кривој напон - деформација нагиб почетног линијског дела криве је модул еластичности. Оптерећење при којем долази до видљивог пада напона назива се горња граница течења. Константно оптерећење се назива доња граница течења, а издужење које се дешава при константном оптерећењу назива се издужење приликом течења материјала. Деформација која се јавља током издужења приликом течења материјала је хетерогена. На горњој граници течења, појављује се карактеристична линија деформације метала, често лако уочљива због свог таласастог изгледа. Након појаве линије деформације метала, континуираним задавањем оптерећења током испитивања материјала, напон пада на доњу границу течења. Линија се шири по дужини узорка, узрокујући издужење узорка услед течења материјала [ASM Atlas, 2002; J.R. Davis, 2004].

Почетак течења метала, објашњава се следећим хипотезама [S. Rešković, 2014]:

- Хипотеза највећег тангенцијалног напона, по којој до деформације долази када вредност смицајних, тангенцијалних напона достигну максималну вредност.
- Хипотеза највеће деформацијске енергије, по којој до деформације долази када је акумулирана енергија, у условима сложеног напонског стања, једнака енергији промене облика чија последица су трајне деформације.

Приликом испитивања материјала који имају карактеристично течење, вредност тангенцијалног напона постиже свој максимум приближно под углом од 45° у односу на осу деловања затезног оптерећења, чиме бива испуњен услов за почетак пластичног течења. На површини узорка одређеног материјала формира се неколико линија у смеру максималних тангенцијалних напона. Оне се називају Luders-ове линије, Hartman-ове линије или носиоци деформације, а овај тип деформације се понекад назива Piobert-ов

ефекат. Линије су уочљиве на материјалу и голим оком. Када се формира неколико Luders-ових линија, крива течења материјала је неправилна, сваки пик одговара формирању нових Luders-ових линија, односно свако даље повећање силе током испитивања изазива све гушћу мрежу Luders-ових линија. Након ширења линија и покривања целе дужине узорка који се испитује, напон течења ће почети да расте са оптерећењем. Ово означава крај издужења у области течења материјала [ASM Atlas, 2002; J.R. Davis, 2004]. Дакле, Luders-ово издужење је издужење које се постиже у току нехомогене деформације при напрезању које је једнако доњој граници попуштања (течења).

При високим температурама овај ефекат течења нестаје и напон се стално повећава. Може се јавити ефекат Portevin-Le-Chatelier, који представља дисконтинуирано повећање напона у области Luders-ових деформација на повишеним температурама [J.R. Davis, 2004].

3.1.1.3 Нелинеарни сегмент хомогене деформације – стадијум пластичне деформације и ојачавања материјала T(D)M

Трећи стадијум дијаграма са слике 3.1, карактерише интензивна пластична деформација узорка. Укупна дужина епрувете се стално повећава, уз истовремено смањење почетног пресека, при чему је расподела деформација равномерна. Издужење епрувете праћено је равномерном контракцијом попречног пресека дуж целог мерног дела епрувете, тако да је деформација хомогена у оквиру назначеног стадијума [М. Plančak, 1997].

У оквиру овог стадијума долази до **деформационог ојачавања** метала услед пораста деформација. Напон течења који је потребан за производњу пластичне деформације се повећава са повећањем пластичне деформације односно услед промена унутар структуре материјала и метал деформационо ојачава. У случају да се процес оптерећења материјала на затезање заустави и узорак растерети након достизања неког степена пластичне деформације, при поновном оптерећењу истог, граница течења (напон течења) се повећава, одговара оном напону који је постојао у материјалу непосредно пре растерећења. Напон течења у области пластичности је променљива величина у функцији степена деформације и у сваком тренутку одговара некој критичној вредности која се назива специфични деформациони отпор материјала [М. Plančak, 1997].

За овај стадијум се могу дефинисати две криве напон - деформација, односно два напона. Први напон је номинални нормални технички напон σ у правцу задавања оптерећења, тј. затезања, дат изразом (3.1).

Запремина узорка (површина \times дужина) остаје константа током пластичне деформације, $A \cdot L = A_0 \cdot L_0$, и како се узорак издужује, површина попречног пресека се равномерно смањује дуж мерне дужине узорка. Дефинисани номинални (технички) напон σ није стварна величина напона присутна у материјалу, те се уводи појам стварног нормалног напона σ_{stv} :

$$\sigma_{stv} = \frac{F}{A} \quad (3.11)$$

где је F тренутна сила затезања, а A тренутна површина попречног пресека.

У почетку, деформационо ојачавање је више него компензовало смањење попречног пресека и технички напон (пропорционално сили F) наставља да расте заједно са растом оптерећења. На крају се постиже тачка где је смањење попречног пресека узорка веће од раста деформације током деформационог ојачавања. То се дешава у делу узорка који је незнатно слабији од осталих. Пластична деформација се од тог тренутка концентрише у ту област и код узорка почиње да се ствара врат или локално смањење попречног пресека (тачка M на слици 3.1). До овог тренутка напон је био хомоген, као што је приказано на слици 3.1. У тачки M је достигнута максимална затезна сила F_{\max} , номинални напон се назива затезна чврстоћа материјала R_m , а деформација која одговара овом напону је максимална равномерна деформација. Због тога што се површина попречног пресека сада брзо смањује, материјал губи способност да се одупре деформацији, стварно оптерећење потребно за деформацију узорка се смањује (тај део је праћен падом силе), деформација постаје неравномерна и технички напон дефинисан у изразу 3.1 наставља да се смањује док се не појави лом, тачка K [ASM Atlas, 2002; J.R. Davis, 2004].

Затезна чврстоћа R_m , је максимално оптерећење подељено са почетном површином попречног пресека узорка:

$$R_m = \frac{F_{\max}}{A_0} \quad (3.12)$$

Вредност затезне чврстоће се најчешће наводи у резултатима испитивања затезањем. За дуктилне (жилаве) метале, затезна чврстоћа је максимално оптерећење које метал може да издржи а да не дође до лома при једноосном оптерећењу затезањем.

Карактеристике дуктилности (пластичности, деформисања). Дуктилност представља квалитативно својство материјала, јер одређује пластичну деформацију при лому. Својства дуктилности материјала се испитују јер [А.С. Ugural, 2003]:

- означавају степен деформисања материјала без лома у операцијама обраде метала (као што су ваљање и извлачење),
- могу да служе за процену квалитета материјала, иако нема директне везе између мерења дуктилности и карактеристика материјала у радним условима.

Приликом испитивања затезањем обично се одређују две карактеристике пластичности. Једна је процентуално издужење узорка при лому $A\%$, а друга смањење површине попречног пресека при лому ψ (контракција попречног пресека у процентима). Обе величине се израчунавају тако што се након лома епрувете, састављањем делова поломљеног узорка, измере коначна дужине епрувете при лому l_k и попречни пресек узорка после прекида A_k :

$$A\% = \frac{l_k - l_0}{l_0} \quad (3.13)$$

$$\psi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} = \frac{\Delta A}{A_0} = 1 - \frac{A_k}{A_0} \quad (3.14)$$

Значајан део пластичне деформације ће бити концентрисан у региону врата узорка испитиваног на затезање, па ће вредност $A\%$ зависити од почетне мерне дужине l_0 . Из израза (3.13) се може закључити да што је мања почетна мерна дужина l_0 , већи је удео

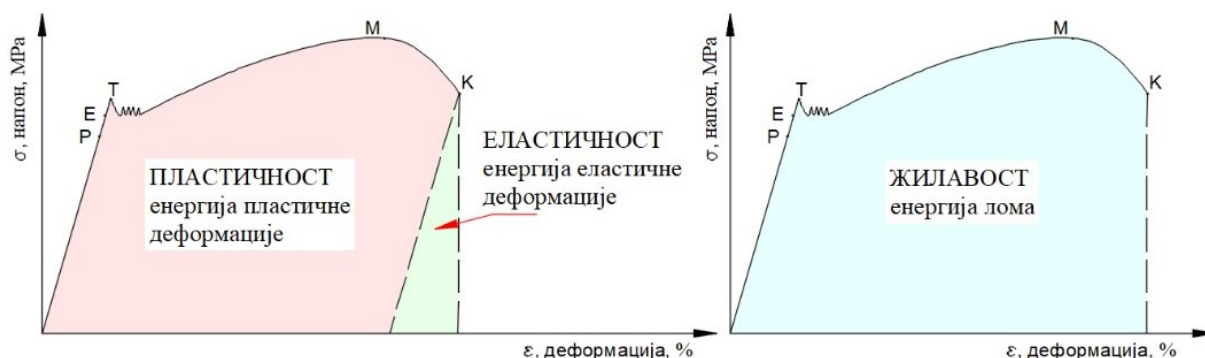
укупног издужења након формирања врата и већа је вредност $A\%$. Према томе, при приказивању вредности издужења у процентима $A\%$, увек треба дати почетну мерну дужину узорка (епрувете) l_0 [ASM Atlas, 2002; J.R. Davis, 2004].

Смањење попречног пресека ψ у тренутку формирања врата односно достизања максималне силе при испитивању, може се изразити преко еквивалентног релативног издужења мерне дужине епрувете ε . У области хомогене (равномерне) пластичне деформације при испитивању затезањем важи став о константној запреми епрувете ($Al = A_0l_0 = \text{const.}$) па следи:

$$\frac{1}{l_0} = \frac{A_0}{A} = \frac{1}{1 - \psi}$$

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{A_0}{A} - 1 = \frac{1}{1 - \psi} - 1 \quad \rightarrow \quad \varepsilon + 1 = \frac{1}{1 - \psi} \quad (3.15)$$

Укупна површина испод криве напон - деформација до тачке лома представља **жилавост материјала**, слика 3.7 десно. То је способност материјала да апсорбује енергију до тачке лома.



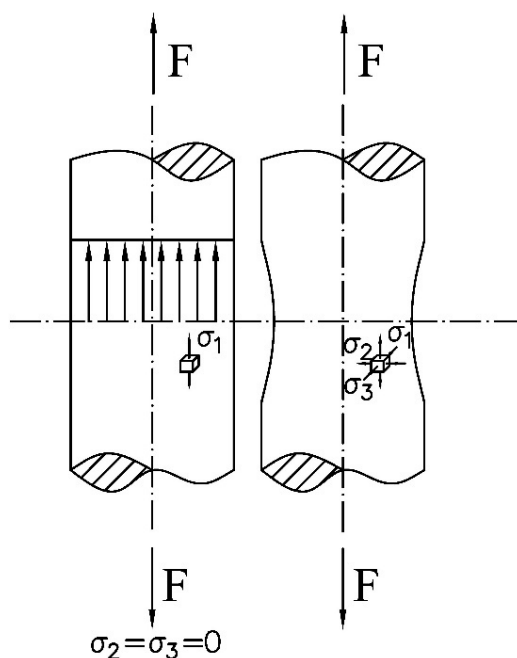
Слика 3.7 Пластичност, еластичност (лево) и жилавост (десно) на основу дијаграма напон - деформација

Криве на слици 3.4 приказују материјале који имају високу и ниску жилавост. Код високоугљеничних опружних челика вредности напона течења и затезне чврстоће су веће од вредности код средњеугљеничног конструкционог челика. Међутим, конструкциони челик је дуктилнији и има веће укупно издужење, па је укупна површина испод криве напон - деформација већа за конструкцијски челик. Дакле, он је жилавиви материјал. Наведено указује на то да је жилавост параметар који обухвата и чврстоћу и дуктилност [ASM Atlas, 2002; J.R. Davis, 2004].

3.1.1.4 Стадијум локализације деформације и лом епрувете (МК)

Четврти стадијум настаје са локализацијом деформације и појавом врата на узорку (епрувети), када долази до промене напонског стања у материјалу. Након једноосног затезања и равномерне деформације епрувете, јавља се троосно затезно напонско стање и деформација постаје неравномерна, слика 3.8. То доводи до појаве врата на епрувети, до наглог пада пластичности материјала и до лома епрувете, тачка К, слика 3.1. На дијаграму напон - деформација, након тачке М, долази до пада криве нормалних напона,

док стварни напони у локализованој зони деформација и даље расту и то брже и више него раније [М. Plančak, 1997].



Слика 3.8 Стање напона у епрувети приликом испитивања затезањем, пре локализације деформације (лево) и након локализације деформације (десно)

Напон у тачки лома R_k се дешава при коначном или прекидном напрезању (сили) F_k :

$$R_k = \frac{F_k}{A_0} \quad (3.16)$$

Напон у тачки лома нема велико техничко значење као напон на граници течења или затезна чврстоћа, изузев код дијаграма стварних напона - деформација. Код конвенционалног дијаграма сви напони се израчунавају дељењем постигнутих сила при оптерећавању са почетном површином попречног пресека A_0 . У стварности се с порастом оптерећења и издужењем епрувете врши и постепено смањивање попречног пресека (нарочито у подручју изнад напона течења све до лома).

3.1.2 СТВАРНИ НАПОНИ-ДЕФОРМАЦИЈЕ

Крива техничког напона - деформација настаје на основу прорачуна података добијених кривом сила - издужење на основу почетних димензија узорка. Како се димензије током испитивања непрестано мењају, долази се до закључка да крива техничког напона - деформација не даје праву слику деформационих карактеристика метала. У току испитивања материјал постаје нестабилан, јавља се троосно напонско стање и неравномерне деформације у области формирања врата, после тачке максималног оптерећења. Површина попречног пресека узорка се након тога брзо смањује, као и оптерећење потребно за наставак деформације.

У суштини, након достизања максималног оптерећења и почетка формирања врата на узорку (епрувети), метал наставља деформационо да ојачава до лома, тако да и напон

који је потребан за даље деформације такође треба да се повећа. Ако се користи стварни напон, заснован на стварној површини попречног пресека узорка, крива напон - деформација континуирано расте до лома. Ако се мерење деформације такође заснива на тренутном мерењу, добијена крива је позната као крива стварних напона - деформација [ASM Atlas, 2002; J.R. Davis, 2004].

Крива течења. Крива стварних напона - деформација је такође позната као крива течења, јер представља основне карактеристике пластичног течења материјала. То је графичка функционална зависност између напона течења (специфичног деформационог отпора) и величине одговарајуће деформације у подручју пластичности. Услед деформационог ојачавања материјала напон материјала (специфични деформациони отпор) се може одређивати на основу криве течења само до момента достизања максималне силе у тачки М са слике 3.1, тј. до почетка локализације деформације. Док у материјалу влада једноосно напонско стање стварни напон се може изразити преко номиналног (техничког) напона.

Стварни напон σ_{stv} , изражен преко техничког напона σ , узевши у обзир израз (3.1) и хомогену расподелу деформације дуж мерне дужине узорка ϵ , може се изразити као:

$$\sigma_{stv} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{A_0}{A} = \frac{F}{A_0} \cdot (\epsilon + 1) = \sigma(\epsilon + 1) = \frac{\sigma}{1 - \psi} = \sigma \cdot e^{\epsilon_{stv}} \quad (3.17)$$

где је e - основа природног логаритма.

Према томе, израз (3.17) треба да се користи само до појаве врата на епрувети, а стварни напон при једноосном затезању до почетка локализације деформације у сваком тренутку је једнак специфичном деформационом отпору материјала, односно напону који при једноосном напонском стању доводи до пластичног течења или одржава процес пластичног деформисања који је већ у току. После максималног оптерећења, стварни напон треба одредити из мерења стварних оптерећења и стварних површина попречног пресека [ASM Atlas, 2002, J.R. Davis, 2004]:

$$\sigma_{stv} = \frac{F}{A} \quad (3.18)$$

Стварна деформација ϵ_{stv} , може се одредити из техничке или конвенционалне деформације ϵ . Из израза (3.3) следи:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \quad (3.19)$$

Прираштај стварне деформације $d\epsilon_{stv}$ добија се односом бескрајно мале промене дужине dl и тренутне мерне дужине l [J.R. Davis, 2004]:

$$d\epsilon_{stv} = \frac{dl}{l} \quad (3.20)$$

Стварна деформација узима у обзир сталну промену димензија епрувете при затезном оптерећењу. Зато је стварна линеарна деформација једнака:

$$\varepsilon_{\text{stv}} = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (3.21)$$

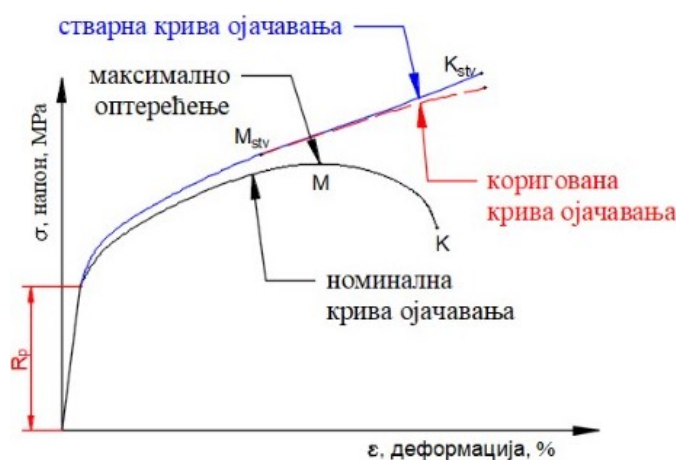
Ако се израз (3.15) замени у израз (3.21), добија се израз за стварну деформацију у области равномерних деформација, до појаве локализоване деформације, тј. врата епрувете:

$$\varepsilon_{\text{stv}} = \ln(\varepsilon + 1) \quad (3.22)$$

Овај израз је применљив само до тренутка формирања врата на епрувети из горе наведених разлога. Након максималног оптерећења, права деформација треба да се заснива на измереној стварној површини или пречнику D , ако је епрувета кружно попречног пресека:

$$\varepsilon_{\text{stv}} = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) = \ln\left(\frac{\frac{\pi D_0^2}{4}}{\frac{\pi D^2}{4}}\right) = 2 \ln \frac{D_0}{D} \quad (3.23)$$

Слика 3.9 приказује поређење криве номиналног (техничког) напона - деформација са одговарајућом кривом стварних напона - деформација (крива течења или деформационог ојачавања). На слици је приказан и део кориговане криве ојачавања, од тачке максималног оптерећења M_{stv} до лома епрувете [J.R. Davis, 2004].



Слика 3.9 Поређење номиналне (техничке) и стварне криве напона - деформација (крива течења, ојачавања), са коригованим делом криве од тачке максималног напрезања

Формирање врата. Врат на узорку настаје након примењеног максималног оптерећења, и у тој области се јављају високе, локализоване деформације које се могу одредити из израза (3.22). Оне превазилазе вредности техничке деформације израчунате изразом (3.3). Често је крива течења од максималног оптерећења, тачка M_{stv} , до лома, тачка K_{stv} , линеарна, док у другим случајевима непрекидно пада до лома. Формирање врата на епрувети доводи до појаве троосног напонског стања које отежава прецизно одређивање понашања материјала до појаве лома. Због тога се врши корекција криве напон - деформација од појаве врата до лома епрувете, слика 3.9 [ASM Atlas, 2002; J.R. Davis, 2004].

Стварни напон при максималном оптерећењу одговара **стварној затезној чврстоћи**. За већину материјала, формирање врата почиње при максималном оптерећењу и при вредности деформације при којој је стварни напон једнак нагибу криве течања. Нека R_{mstv} и ε_{mstv} означавају стварни напон и стварну деформацију при максималном оптерећењу када је површина попречног пресека узорка A_m . Ако се техничка затезна чврстоћа може дефинисати по изразу (3.12), стварна затезна чврстоћа је:

$$R_{mstv} = \frac{F_{max}}{A_m} \quad (3.24)$$

Заменом величине F_{max} из израза (3.12) у израз (3.24) добија се:

$$R_{mstv} = R_m \frac{A_0}{A_m} \quad (3.25)$$

Ако из израза (3.23) представимо однос као:

$$\frac{A_0}{A} = e^{\varepsilon_{stv}} \quad (3.26)$$

где је e основа природног логаритма, заменом израза (3.26) у израз (3.25) добија се:

$$R_{mstv} = R_m e^{\varepsilon_{mstv}} \quad (3.27)$$

Стварна деформација при максималном оптерећењу, ε_{mstv} се може израчунати или из попречног пресека узорка A_m или мерне дужине l_m при максималном оптерећењу у тачки М. Израз (3.23) се може користити да се конвенционална равномерна деформација конвертује у стварну деформацију при максималном оптерећењу. Стварна деформација при максималном оптерећењу је корисна при процењивању обрадивости метала [J.R. Davis, 2004]:

$$\varepsilon_{mstv} = \ln \frac{A_0}{A_m} \quad (3.28)$$

Стварни напон у тачки лома је однос оптерећења у тачки лома и површине попречног пресека у тренутку лома. Овај напон је потребно кориговати због постојања троосног стања напрезања које се јавља у узорку при формирању врата. Пошто подаци који су потребни за ову корекцију често нису доступни, праве вредности напона у тачки лома су често погрешне [J.R. Davis, 2004].

$$R_{kstv} = \frac{F_k}{A_k} \quad (3.29)$$

Стварне деформације у тачки лома, ε_{kstv} су стварне деформације засноване на почетном попречном пресеку узорка A_0 и попречном пресеку епрувете након лома A_k .

$$\varepsilon_{kstv} = \ln \frac{A_0}{A_k} \quad (3.30)$$

Овај параметар представља максималну стварну деформацију коју материјал може да издржи до лома и аналоган је укупној техничкој деформацији до лома са криве напон -

деформација. Пошто се израз (3.22) за израчунавање стварне деформације до области формирања врата епрувете не може применити и после формирања врата, није могуће израчунати ϵ_{kstv} из измерених вредности деформација при лому епрувете ϵ_k . Међутим, за узорке кружног попречног пресека, смањење површине попречног пресека ψ се може заменити у израз (3.30) тако да стварна деформација при лому постаје [J.R. Davis, 2004]:

$$\epsilon_{kstv} = \ln \frac{1}{1 - \psi} \quad (3.31)$$

Стварна локализована деформација, ϵ_{nstv} је деформација који је потребна да се узорак деформише од максималног оптерећења до лома:

$$\epsilon_{nstv} = \ln \frac{A_m}{A_k} \quad (3.32)$$

Математички израз криве течења. Између деформација и напона (специфичног деформационог отпора) нема једнозначног аналитичког изрази, па је криве течења могуће добити искључиво експериментално. Често се јавља потреба да се при решавању теоријских и практичних проблема у оквиру технологије пластичности решења прикажу у аналитичком облику, па се врши апроксимација стварне криве течења неком кривом у облику одређене функционалне зависности.

За што бољу апроксимацију стварне криве течења бира се аналитичка функција тако да се постигне што већа подударност између те две криве, а да истовремено математички израз који дефинише дату аналитичку функцију буде што једноставнији. У пракси се показало да је могуће дефинисати велики број функција, с тим да њихов облик највише зависи од форме података којима се располаже [М. Plančak, 1997].

Криве течења многих метала (нелегираних и нисколегираних челика) у области равномерне пластичне деформације, од појаве течења до постизања максималног напона, могу бити изражене параболичном функцијом стварног напона и стварне деформације у облику Hollomon-овог изрази [J.H. Hollomon, 1945]:

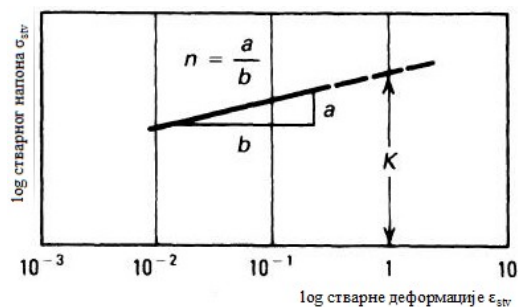
$$\sigma_{stv} = K_H \cdot \epsilon_{stv}^{n_H} \quad (3.33)$$

где n_H експонент (индекс) деформационог ојачавања и K_H коефицијент чврстоће (фактор пропорционалности) зависе од врсте материјала. Коефицијент чврстоће се најчешће израчунава при $\epsilon_{stv} = 1$ узимајући у обзир услов да апроксимативна крива мора пролазити кроз тачку М где је стварни напон максималан. Експонент деформационог ојачавања се одређује графички са дијаграма $\log \sigma_{stv} - \log \epsilon_{stv}$.

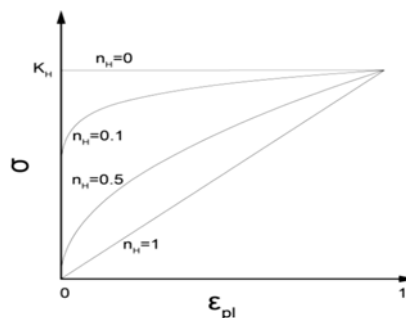
Логаритмовањем изрази (3.33) добија се израз праве линије ($y = ax + b$) у дупло-логаритамском координатном систему, слика 3.10:

$$\log \sigma_{stv} = \log K_H + n_H \log \epsilon_{stv} \quad (3.34)$$

где је n_H коефицијент правца, линеарни нагиб криве, а K_H је стварни напон при $\epsilon_{stv} = 1$ (одговара $\psi = 0.63$).



Слика 3.10 Логаритамски део криве стварног напона - деформације, n је експонент деформационог ојачавања; K је коефицијент чврстоће [J.R. Davis, 2004; ASM Atlas, 2002]



Слика 3.11 Утицај различитих вредности експонента n_H на облик Hollomon-ове криве [J. Olofsson, 2012]

Као што је приказано на слици 3.11, експонент деформационог ојачања може имати вредности од $n = 0$ (идеално пластично тело) до $n = 1$ (еластично тело). За већину метала, n има вредности између 0.1 и 0.5 [Ђ. Drobњак, 1990; ASM Atlas, 2002; J.R. Davis, 2004; А.Е. Matusevich, 2012]. У табели 3.1 дате су вредности индекса деформационог ојачавања за неке метале.

Табела 3.1 Индекс деформационог ојачавања [Ђ. Drobњак, 1990]

материјал	вредност индекса n
чисто гвожђе	0.05 - 0.15
нискоугљенични челик	0.14 - 0.32
нерђајући челик	0.45 - 0.55
бакар	0.30 - 0.35
алуминијум у његове легуре	0.15 - 0.25

Hollomon-ов израз (3.33) има одступања при малим деформацијама ($\epsilon = 10^{-3}$) или великим деформацијама ($\epsilon = 1$).

Први аналитички модел за криву течења дао је Ludwik давне 1909. године. Он је предложио израз која узима у обзир одступање стварног напона од вредности напона течења $R_{p0.2}$ при малим деформацијама [P. Ludwik, 1909]:

$$\sigma_{stv} = R_{p0.2} + K_L \cdot \epsilon_{stv}^{n_L} \quad (3.35)$$

где је n_L експонент деформационог ојачавања, а K_L је коефицијент чврстоће. Израз (3.35) може бити прихватљивији од израза (3.33), јер не подразумева када је стварна деформација једнака нули да је и стварни напон једнак нули.

Слично томе, Swift [H.W. Swift, 1952] је предложио однос стварног напона и стварне деформације додавањем у израз величине ϵ_0 као:

$$\sigma_{stv} = K_S \cdot (\epsilon_0 + \epsilon_{stv})^{n_S} \quad (3.36)$$

где се за ϵ_0 може сматрати да је количина деформационог ојачања коју је материјал добио пре испитивања затезањем, а n_S и K_S су експонент деформационог ојачавања и коефицијент чврстоће, распективно.

За неке материјале двоструки логаритамски дијаграм напона - деформација приказује понашање материјала са два нагиба, један нагиб за мале пластичне деформације и један за веће деформације. Тада се проширује Hollomon-ов израз увођењем експоненцијалног дела. Крива стварног напона - деформација метала као што је аустенитни нерђајући челик, која значајно одступа од Hollomon-овог израза (3.33) при малим деформацијама, може се изразити као [D.C. Ludwигson, 1971]:

$$\sigma_{stv} = K_H \varepsilon_{stv}^{n_H} + \exp(K_2 + n_2 \varepsilon_{stv}) \quad (3.37)$$

где члан $\exp(K_2 + n_2 \varepsilon_{stv})$ представља управо то одступање. Константе K_H и n_H су исте као у изразу (3.33), а K_2 и n_2 су додатне константе.

Однос између напона и деформација дао је и Voce [E. Voce, 1948 и 1955] у облику следећег израза:

$$\sigma_{stv} = \sigma_s - (\sigma_s - \sigma_1) \exp\left(\frac{-(\varepsilon_{stv} - \varepsilon_1)}{\varepsilon_c}\right) \quad (3.38)$$

где је σ_s асимптотски напон постигнут након велике деформације, σ_1 и ε_1 су стварни напон и стварна пластична деформација на почетку настанка пластичне деформације, а ε_c је константа. При почетној пластичној деформацији $\varepsilon_1 = 0$, израз (3.38) се своди на следећи облик:

$$\sigma_{stv} = \sigma_s - (\sigma_s - \sigma_1) \exp(n_V \varepsilon_{stv}) \quad (3.39)$$

где је $n_V = -1/\varepsilon_c$ константа.

Осим стварне деформације ε_{stv} , за потребе дефинисања материјалног модела важан је износ пластичне деформације ε_{pl} , који се може израчунати као разлика укупне стварне деформације ε_{stv} и њеног еластичног дела ε_E који прати Нооке-ов закон:

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{stv} - \varepsilon_E = \varepsilon_{stv} - \frac{\sigma_E}{E} \quad (3.40)$$

где је σ_E напон на граници еластичности, E модул еластичности.

Овај израз је представљен графички на кривој технички напон - деформације, слика 3.1, где се види да је укупно издужење збир области еластичног издужења и области пластичног издужења.

На основу овог сазнања Ramberg и Osgood у пракси примењују израз [W. Ramberg; W.R. Osgood, 1943] који повезује напоне и деформације. Израз је примењиван за алуминијум, нерђајући челик и угљенични челични лим за мале пластичне деформације (тзв. малу област течења):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{pl} \left(\frac{\sigma}{R_{p0,2}}\right)^{n_{RO}} \quad (3.41)$$

где су σ и ε номиналне (техничке) вредности напона и деформација респективно, а $R_{p0,2}$ је напон на граници течења материјала који одговара појави пластичне деформације ε_{pl} .

Ramberg-Osgood би се могао сматрати еластично-пластичном верзијом Hollomon-овог израза који се примењује на величине техничких напона и деформација. Експонент очвршћавања n_{RO} треба посматрати као инверзну константу n_H у Hollomon-овом изразу, пошто Ramberg-Osgood изражава деформацију у функцији напона. Његове вредности се крећу од 2 до 40 [ASM Atlas, 2002; J.R. Davis, 2004]. Израз не може описати максимум који се постиже на кривој техничког напона - деформација при највећем затезном напрезању.

У табели 3.2 су дати модели који описују криве течења које се највише примењују у литератури, поређани хронолошки.

Табела 3.2 Преглед постојећих модела израза кривих течења, хронолошки

Аутор, година објављивања	Модел израза криве течења
P. Ludwik, 1909.	$\sigma_{stv} = R_{p0.2} + K_L \cdot \varepsilon_{stv}^{n_L}$
W. Ramberg; W.R. Osgood, 1943.	$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{pl} \left(\frac{\sigma}{R_{p0.2}} \right)^{n_{RO}}$
J.H. Hollomon, 1945.	$\sigma_{stv} = K_H \cdot \varepsilon_{stv}^{n_H}$
E. Voce, 1948.	$\sigma_{stv} = \sigma_s - (\sigma_s - \sigma_1) \exp(n_V \varepsilon_{stv})$
H.W. Swift, 1952.	$\sigma_{stv} = K_S \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon_{stv})^{n_S}$
D.C. Ludwigson, 1971.	$\sigma_{stv} = K_H \varepsilon_{stv}^{n_H} + \exp(K_2 + n_2 \varepsilon_{stv})$

Применом горепомнутих модела и њиховом тачношћу за различите материјале и у различитим условима испитивања, на собним, повишеним или високим температурама, бави се велики број истраживача.

Резултати испитивања затезањем алуминијума и челика на собној температури показују да се крива течења може описати коришћењем Hollomon-овог модела. Процент грешке у предвиђању понашања деформационог ојачавања помоћу Hollomon-овог модела код челика је већи него код алуминијума [R.K. Nuttor, 2017].

Аустенитни нерђајући челик типа 316LN (X2CrNiMoN17-11-2 по EN 10222-5:1999) испитиван је на затезање при номиналној брзини деформације у опсегу $3 \cdot 10^{-5} \div 3 \cdot 10^{-3} s^{-1}$ и температурама од 300 до 1123 К. Подаци стварног напона - деформација анализирани су према аналитичким изразима криве течења које су предложили Hollomon, Ludvik, Swift, Voce и Ludvigson. Ludvigson-ов израз пратио је криву напон - деформација најближе при температури од 300 К, док је у температурном опсегу 523-773 К понашање течења једнако добро описано и Ludvigson-овим и Voce-овим изразом. У температурном опсегу 823÷1023 К, Voce-ов израз је најтачније описао понашање течења при свим брзинама деформације. При високим температурама 1073 и 1123 К, Ludvigson-ов израз се своди на Hollomon-ов израз [B.K. Choudhary, 2001]. Одређивање стварног напона - деформације комбиновањем поменутих метода код челика 9Cr-1Mo (X10CrMoVNb9-1 по EN 10028-2:2003) при испитивању на повишеним и високим температурама у распону од 300 до 873 К, довело је до резултата који су сугерисали да се Voce-ов израз користи са најмањом

грешком [D.P.R. Palaparti, 2012]. Детаљна анализа података о стварним напонима-деформацијама за феритни челик P92 (X10CrWMoVNb 9-2 по EN) може се адекватно описати Voce-овим изразом са брзином деформације у границама $3.16 \cdot 10^{-5} \div 1.26 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ у температурном опсегу од 300 до 900 K [G. Sainath, 2015]. Методом виртуалних поља VFM (*енг.* The Virtual Fields Method) испитивани су меки челици и добијени резултати дали су поклапање са Swift-овом и Voce-овом методом [J.H Kim, 2013]. Примена израза криве течења из литературе Hollomon, Swift и Voce на понашање металних легура SKH51, STS316L, Ti-6Al-4V, Al6061 и Inconel600 описана је у раду J. Сао и сарадника [J. Cao, 2017].

Постоји читав низ легура нерђајућих челика, које карактерише крива напон - деформација без јасно дефинисане тачке течења. Ово понашање се може аналитички представити различитим моделима, од којих су најпопуларнији засновани на Ramberg-Osgood-овом изразу [K.J.R Rasmussen, 2003]. Анализом преко 600 мерних крива напон - деформација прикупљених из литературе добијени су кључни параметри материјала кроз процес уклапања криве заснован на техникама методе најмањих квадрата [I. Agrayo, 2015].

Упркос великом броју развијених израза који описују однос напона и деформација, ниједан успешно не описује понашање деформационог ојачавања материјала у два различита степена, тзв. двоструко n понашање, што многи метални материјали показују. Развијен је нови модел напон - деформација, заснован на добро познатом Ramberg-Osgood-овом изразу, који се фокусира на двостепено деформационо ојачавање, које се може јавити код различитих врста челика, титанијума, бакра, никла и других метала и легура [S. Hertelé, 2011]. Однос напона и деформација код хладно обрађеног аустенитног нерђајућег челика типа 316 на собној температури може се адекватно описати моделом Ludvigson-а и Swift-а [K.G. Samuel, 2005].

Вредности карактеристика материјала добијених испитивањем затезањем коришћени су за одређивање криве стварних напона - деформација нисколегираних челика. Пре формирања врата на епрувети, добијени подаци о напону-деформацији директно се претварају у податке стварних напона - деформација помоћу два израза, који повезују техничке и стварне вредности напона - деформација. Након формирања врата на епрувети приликом испитивања, подаци о стварним вредностима напона - деформација добијају се коришћењем модела деформационог ојачања помоћу информација о максималном оптерећењу и тачки лома, које се добијају из испитивања затезањем и Bridgman-ове корекције у тачки лома. Ако је потребно смањити разлику између резултата добијених анализом коначним елементима и резултата добијених испитивањем, стварни напон у тачки лома се коригује према резултатима анализа: линеарне, Swift, Ludwick-ове, Hollomon линеарне HL (*енг.* Hollomon Linear) и Hollomon линеарне константе HLC анализе (*енг.* Hollomon Linear Constant). Стварне вредности напона - деформација након формирања врата се поново израчунавају. Показано је да су модели HL и HLC најпогоднији међу пет модела за накнадну корекцију стварних вредности напона - деформација и приказ понашања пластичности нисколегираних челика SA-508 (20MnMoNi5-5 по EN) кроз анализу коначних елемената [H.D. Kweon, 2018].

3.1.3 КОРЕКЦИЈА КРИВЕ НАПОН - ДЕФОРМАЦИЈА

Расподела напона на врату. Формирање врата на узорку при затезању праћено је појавом комплексног троосног стања напона у тој области. Област са формираним вратом се може посматрати као зарез на месту локализације деформације. Зарез под затезним оптерећењем производи радијални напон, σ_r и попречни тангентни напон, σ_t који повећава вредност уздужног напона (напон дуж осе затезања) σ_x потребног за изазивање пластичног течења. Дакле, просечан стварни напон на врату $(\sigma_x)_{av}$, који је одређен односом аксијалне затезне силе и минималне површине попречног пресека узорка на врату, је већи од напона који би био потребан да изазове течење при једноосном затезању [J.R. Davis, 2004].

$$(\sigma_x)_{av} = \frac{F}{A} \quad (3.42)$$

Критеријум максималне промене енергије који доводи до појаве течења материјала настаје када ефективни von Mises-ов напон постане једнак или већи од напона течења.

$$\sigma_e \geq R_{p0.2} \quad (3.43)$$

Израз за von Mises-ов ефективни напон ефикасно редукује сложено напонско стање, мењајући деловање више напона једним - еквивалентним, којим се могу вршити потребни прорачуни:

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (3.44)$$

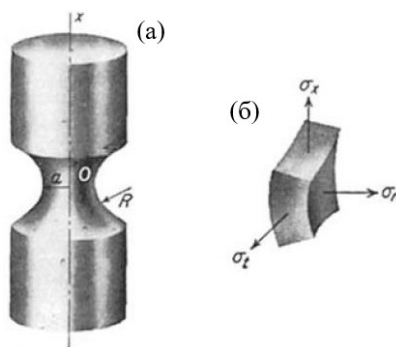
Ефективна деформација се дефинише на сличан начин као ефективни напон:

$$d\varepsilon_e = \frac{\sqrt{2}}{3} [(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2)^2 + (d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)^2 + (d\varepsilon_3 - d\varepsilon_1)^2]^{1/2} \quad (3.45)$$

где ознаке 1, 2 и 3 представљају ознаке главних равни у којима делују главни нормални напони. У случају једноосног затезања ефективна деформација је једнака максималној главној деформацији. То значи да се познавањем само главне (максималне) деформације у пракси може дати оцена о извршеном степену деформисања у ширем смислу [М. Plančak, 1997].

Из облика врата разни истраживачи су добили фактор корекције који се може користити за кориговање вредности средњег напона познатог као von Mises-ов напон. Може се осмислити метод мерења, повезан са рачунарским програмом, који ће једноставно и брзо дати вредности von Mises-овог напона у функцији од деформација [Н. Galenkamp, 1985].

На слици 3.12 је приказана геометрија узорка у пределу врата, као и напони који се развијају појавом локализоване деформације [J.R. Davis, 2004].



Слика 3.12 Распореда напона на врату узорка оптерећеног на затезање, (а) геометрија области врата. R је радијус кривине врата; a је минимални радијус на врату, (б) напони који делују на елемент у тачки O . σ_x је напон у аксијалном смеру; σ_r је радијални напон; σ_t је тангентни напон [J.R. Davis, 2004]

Вредност средњег аксијалног напона који компензује појаву попречних напона у тренутку настанка врата на епрувети приликом испитивања затезањем кориговао је Bridgman направивши детаљну математичку анализу која се заснива на следећим претпоставкама [P.W. Bridgman, 1964]:

- Контура врата се апроксимира кружним луком.
- Попречни пресек области врата остаје кружни током испитивања затезањем.
- Код течења метала примењује се критеријум von Mises-а.
- Деформације су константне у попречном пресеку врата.

Тако једноосни еквивалентни напон течења одговара оном напону који би постојао при испитивању затезањем, у случају да формирање врата није последица појаве троосног напонског стања:

$$\sigma_e = \frac{(\sigma_x)_{av}}{\left(1 + \frac{2R}{a}\right) \ln\left(1 + \frac{a}{2R}\right)} = k(\sigma_x)_{av} \quad (3.46)$$

где је $(\sigma_x)_{av}$ измерени просечни напон у аксијалном правцу (однос силе по минималном пресеку, израз (3.42)).

Уколико се уведе фактор корекције k као по изразу [P.W. Bridgman, 1964]:

$$k = \left[\left(1 + \frac{2R}{a}\right) \ln\left(1 + \frac{a}{2R}\right) \right]^{-1} \quad (3.47)$$

добиће се израз за еквивалентни једноосни напон који се може сматрати једнаким номиналном напону $(\sigma_x)_{av}$ коригованом са фактором k . На слици 3.9 се види коригована крива течења добијена применом Bridgman-овог израза корекције стварног напона - деформације.

Вредности a/R које су потребне за анализу корекције криве могу се добити директно мерењем a и R , тако што се епрувета након формирања врата растерети и затим се приступа мерењу или мерењем ових параметара непрекидно током испитивања материјала затезањем након формирања врата, уз помоћ фотографије или конусног мерног прстена [ASM Atlas, 2002; J.R. Davis, 2004]. Да би се избегла ова мерења,

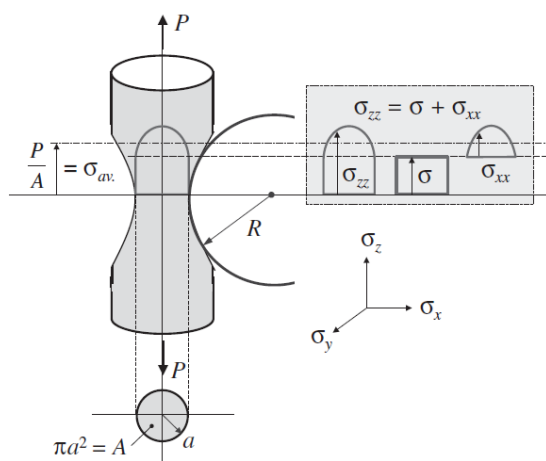
Bridgman је представио емпиријски израз који дефинише однос између фактора корекције k и стварне деформације у врату ϵ_{stv} [N.E. Dowling, 2013]:

$$k = 0,83 - 0,186 \log_{10} \epsilon_{stv} \quad (0,15 \leq \epsilon_{stv} \leq 3) \quad (3.48)$$

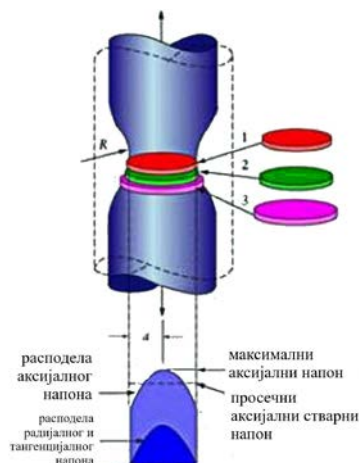
Или односа a/R и стварне деформације у врату ϵ_{stv} , израз (2.49) [B.H. Fuentes, 2013]:

$$\frac{a}{R} = \sqrt{\epsilon_{stv} - 0,1} \quad (\epsilon_{stv} > 0,1) \quad (3.49)$$

Коришћењем Bridgman-овог корективног фактора [J. Nunes, 1963; P.W. Bridgman, 1964; A.A. Ostsemin, 2009], анализу сложеног напонског стања од тренутка формирања врата до лома епрувете приказао је и Tsuchida, слика 3.13 [N. Tsuchida, 2012]. На узорцима од челика разних врста показано је добро поклапање експерименталне криве и криве добијене Hollomon-овим изразом и корекцијом у области лома. Сличну анализу спровео је и Choung са сарадницима, који је своја испитивања радио на узорцима правоугаоног попречног пресека, користећи модификацију геометрије добијене на основу узорака кружног попречног пресека, слика 3.14, користећи доступне моделе кривих течења и методу коначних елемената за верификацију експерименталних решења испитивања челика DH32 [J.M. Choung, 2008].

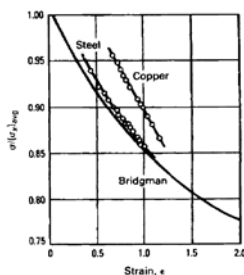


Слика 3.13 Шематски приказ расподеле напона у врату узорка кружног попречног пресека при испитивању затезањем [N. Tsuchida, 2012]



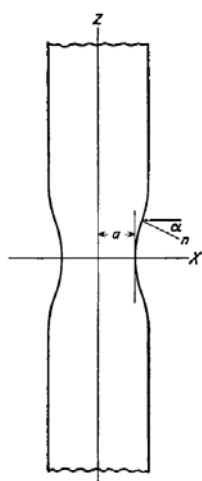
Слика 3.14 Троосно напонско стање у области врата узорка кружног попречног пресека при испитивању затезањем [J.M. Choung, 2008]

Bridgman-ова корекција криве течења показала је добру сагласност за узорке од челика, али не и за друге метале, слика 3.15.



Слика 3.15 Однос између Bridgman-овог корекционог фактора $\sigma/(\sigma_x)_{av}$ и стварне деформације при затезању [ASM Atlas, 2002; J.R. Davis, 2004]

Израз корекције криве течења од тренутка формирања троосног напонског стања у врату епрувете са кружним попречним пресеком не може се применити за равне танке епрувете. Bridgman је представио две анализе напона код равних епрувета: анализу напона у равни близу ивица епрувета и анализу напона у равни за средишњи део епрувете, слика 3.16 [P.W. Bridgman, 1964]. Оптерећење (затезање) узорка врши се дуж z -осе. Уведене претпоставке су да је равна епрувета бесконачно широка у правцу y -осе (која је управна на папир) и да су ефекти ивица занемарени; ни напон ни деформација нису у функцији y .



Еквивалентни једноосни напон σ_e се може сматрати једнаким номиналном напону $(\sigma_z)_{av}$ коригованим са фактором k .

$$\sigma_e = \frac{(\sigma_z)_{av}}{\left(1 + \frac{2R}{a}\right)^{\frac{1}{2}} \log \left[1 + \frac{a}{R} + \left(\frac{2a}{R}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{a}{2R}\right)^{\frac{1}{2}} \right] - 1} = k(\sigma_z)_{av} \quad (3.50)$$

где је k корективни фактор који се може добити из израза:

$$k = \left\{ \left(1 + \frac{2R}{a}\right)^{\frac{1}{2}} \log \left[1 + \frac{a}{R} + \left(\frac{2a}{R}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{a}{2R}\right)^{\frac{1}{2}} \right] - 1 \right\}^{-1} \quad (3.51)$$

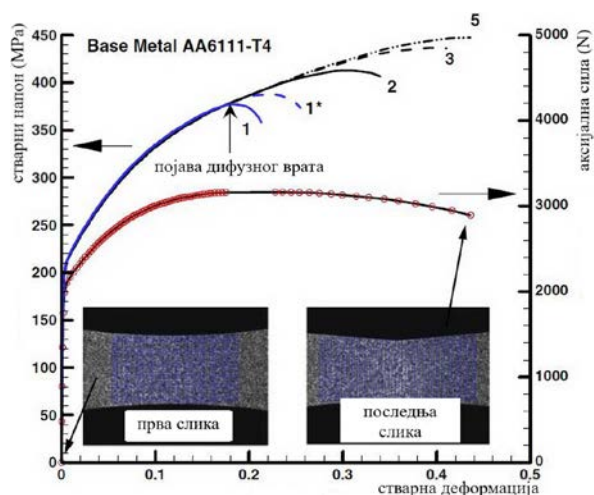
Слика 3.16 Формирање врата код равног узорка, пресек дуж врата епрувете [P.W. Bridgman, 1964]

Формални израз за k корективни фактор је сложенији него код епрувета са кружним попречним пресеком, израз (3.47). Корективни фактор зависи само од параметра a/R , тако да радијус закривљености спољне контуре на врату мора да се утврди. У табели 3.3, дат је фактор k у функцији параметра a/R , како за кружни тако и за правоугаони попречни пресек епрувете. Како су вредности фактора k мање за правоугаоне узорке, тим пре се морају узети у обзир [P.W. Bridgman, 1964].

Табела 3.3 Вредности корективног фактора k у функцији параметра a/R [P.W. Bridgman, 1964]

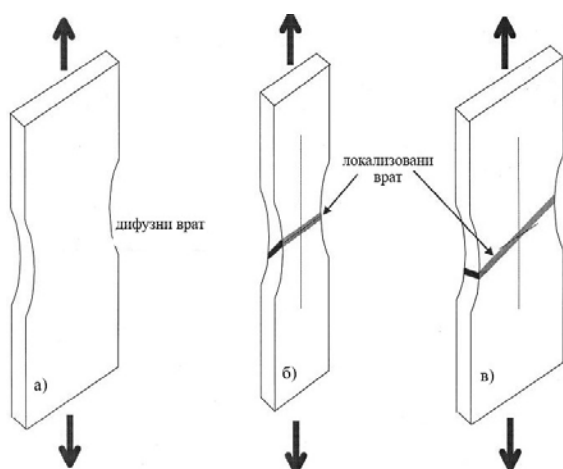
a/R	корективни фактор k	
	епрувете са правоугаоним попречним пресеком	епрувете са кружним попречним пресеком
0.1	0.965	0.976
0.2	0.941	0.956
0.3	0.915	0.931
0.5	0.875	0.896
0.7	0.828	0.864
1.0	0.782	0.823
1.5	0.717	0.768
2.0	0.669	0.723

Велики број истраживача ради на побољшању израза за израчунавање стварних напона - деформација у области формирања врата код равних узорака са правоугаоним попречним пресеком [S.E. Jones, 1984; Y. Ling, 1996; Z.L. Zhang, 2001 a; H. Tian, 2003; H. Тао, 2008]. Понашање материјала на равном узорку испитивао је Yang са сарадницима. Тренутак локализације деформације и појаве троосног напонског стања у врату узорка прорачунавао је методом коначних елемената, ослањајући се на мерење деформације помоћу дигиталне корелације слика, слика 3.17 [S.Y. Yang, 2009].



Слика 3.17 Разне приближне криве стварних напона - деформација за легуру алуминијума AA6111-T4 добијене мерењем локализоване деформације помоћу дигиталне корелације слика [S.Y. Yang, 2009]

На основу Bridgman-ове формулације анализу сложеног напонског стања и деформација у области формирања врата проучавао је и Zhang са сарадницима. Представио је два типа врата епрувете: дифузни и локализовани, слика 3.18. На слици 3.18 приказана је појава врата: а) формирање области врата облика пешчаног сата, слично као и код узорака кружног пресека, а затим даљом пластичном деформацијом долази до локализације врата у облику уске линије која се пружа по ширини узорка. 3.18 б) за мали однос димензија епрувете и јако деформационо ојачавање материјала и 3.18 в) за велики однос димензија и слабо ојачавање. Појава врата у оба случаја доводи до лома епрувете. Изглед дијаграма сила - издужење се аутоматски црта приликом испитивања као на слици 3.19 [Z.L. Zhang, 1999].



Слика 3.18 Два типа врата код епрувета са правоугаоним пресеком: дифузни и локализовани [Z.L. Zhang, 1999]



Слика 3.19 Изглед дијаграма сила - издужење [Z.L. Zhang, 1999]

Zhang и сарадници су показали да се резултати испитивања затезањем епрувета правоугаоних попречних пресека поклапају са кривама напон - деформација добијеним из литературе са епруветама кружних попречних пресека, како за изотропне (челик) тако и за анизотропне материјале [Z.L. Zhang, 2001 б].

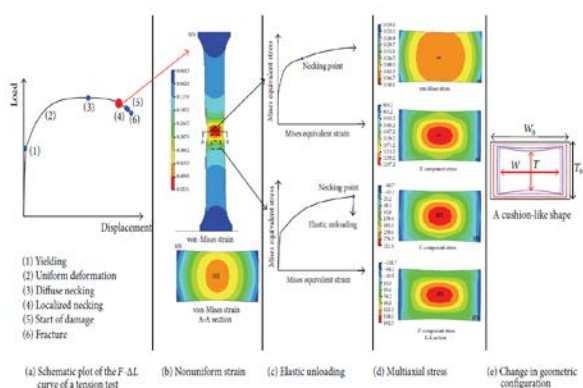
Узорци кружних попречних пресека од чистог бакра испитивани су затезањем, при чему је Bridgman-ова корекција напона и деформација у области врата показала извесна одступања од криве стварних напона - деформација добијених експерименталним путем, па је предложен нови корективни фактор [D.J. Celentano, 2005].

После Bridgman-а анализе расподеле напона у врату оносиметричних узорака испитиваних затезањем представили су бројни аутори: Davidenkov-Spiridonova [N.N. Davidenkov, N.I. Spiridonova, 1947], Siebel-Schwaigerer [E. Siebel, S. Schwaigerer, 1948], а потом и Szczepinski [W. Szczepinski, 1978 и 1984], као и Malinin и Petrosyan [Z.L. Petrosyan, 1967; N.N. Malinin, 1981]. Одличан преглед и анализу ових израза дала је у свом раду М. Gromada са сарадницима, где поред осталог истиче велику сличност између израза Siebel и Davidenkov-Spiridonov-е, те их у каснијим радовима сматра за јединствен израз при одређеним условима [M. Gromada, 2010].

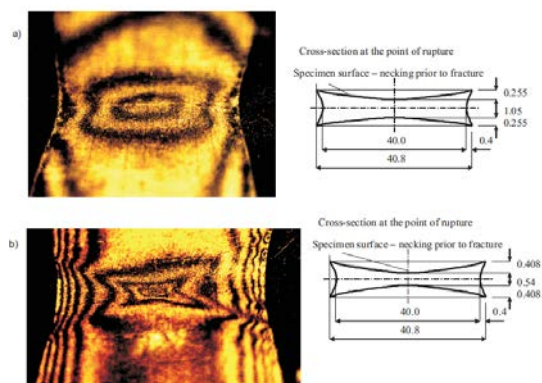
М. Gromada са сарадницима долази до следећих закључака у вези са употребом формула за реконструкцију својстава еластопластичних материјала [M. Gromada, 2007 и 2011]:

- Bridgman-ов израз за утврђивање криве течења материјала, од тренутка формирања врата до лома епрувете, даје најмање тачне резултате међу свим поменутих изразима, али је и даље најчешће коришћен, нарочито у енглеској литератури.
- Изразе Malinin-Petrosyan-а, Siebel-Davidenkov-Spiridonov-е и Szczepinsk-ог карактерише већа тачност у односу на Bridgman-а. Истиче се да се најмања грешка генерише применом Malinin-Petrosyan-овог израза. Код малих деформација може се добро применити Szczepinski израз, док код већих деформација треба користити Siebel-Davidenkov-Spiridon-ов израз.
- Највише је оправдана примена новог израза којег су дефинисали М. Gromada и сарадници, јер зависи од два параметра и показује већу тачност у поређењу са осталим изразима.
- У случају процене криве течења материјала при малим деформацијама након формирања врата, нема смисла разматрати све понуђене изразе, јер су разлике при малим деформацијама занемарљиве.

Постоји много истраживачких радова на тему корекције Bridgman-ове методе од краја прошлог века до данас, у којима је коришћена метода коначних елемената, као метода уз помоћ које се праве најмање грешке у поређењу са експерименталним методама, а која олакшава сложен аналитичких приступ решењу односа напон – деформација (слика 3.20) [M. Saje, 1979; V. Tvergaard, 1993; K.S. Zhang, 1995; L.P. Mikkelsen, 1999; G. La Rosa, 2003; G. Mirone, 2004; M. Joun, 2008; G.H. Majzoobi, 2014 а; M. Khadyko, 2014; H.C. Hyun, 2014; Y.Y. Deryugin, 2015; L. Wang, 2015; Y. Wang, 2016; G. Mirone, 2018], где се мерење деформација врши методом дигиталне корелације слика DIC [I. Scheider, 2004; M. Kamaya, 2011; P. Bogusz, 2012; F. Zhu, 2015; M. Kamaya, 2014 и 2015; J.H. Yu, 2016; S.K. Paul, 2018], или методом Moiré, слика 3.21 [R. Srinivasan, 1982; M. Jaroniek, 2016].

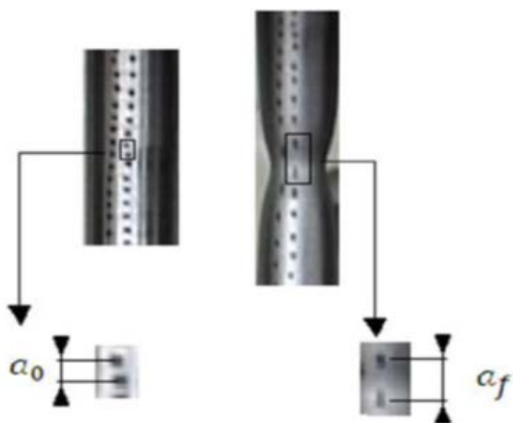


Слика 3.20 Потешкоће у одређивању криве стварних напона - деформација код врло великих деформација приликом једноосног испитивања затезањем [Y. Wang, 2016]

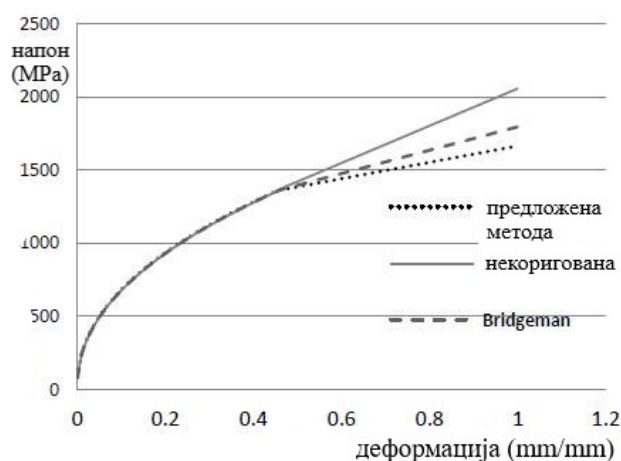


Слика 3.21 Област Moiré шаблона а) формирање врата б) пре пуцања на површини (у средини узорка) и промена попречног пресека на месту лома добијеног Moiré техником [M. Jaroniek, 2016]

Нова нумеричка метода танкозидних елемената (*енг.* Thin-Walled Elements) омогућава корекцију криве напона - деформација на основу података о обради. У овој новој методи зона врата се дели на низ танкозидних елемената, слика 3.22. Однос растојања са слике 3.22 представља величину стварне пластичне деформације након формирања врата на епрувети. Нумеричка техника се користи за израчунавање коригованог напона и деформација на делу врата. Резултати су упоређени са Bridgman-овом методом и резултатима добијеним методом коначних елемената, слика 3.23 [F. Fariba, 2010]. Исти аутори долазе до односа напона - деформација на основу енергије деформације. Претпоставља се да је енергија деформације једнака спољашњем раду који се врши при испитивању затезањем. Енергетска метода се упоређује са различитим приступима као што су Bridgman-ов, Davidenko-в, Siebel-ов, као и са нумеричком методом коначних елемената. Резултати показују да је предвиђање енергетске методе врло близу нумеричкој симулацији, али истовремено и помнутим моделима [G.H. Majzoobi, 2014 б].



Слика 3.22 Танкозидни елементи на епрувети; почетна удаљеност између две тачке a_0 и крајња удаљеност између њих a_f [F. Fariba, 2010]



Слика 3.23 Упоредни приказ резултата; некоригована крива напон - деформација, коригована крива напон - деформација из предложене методе и коригована крива по Bridgman-овој методи [F. Fariba, 2010]

3.2 МЕХАНИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ МАТЕРИЈАЛА ПРИ ПОВИШЕНИМ И ВИСОКИМ ТЕМПЕРАТУРАМА

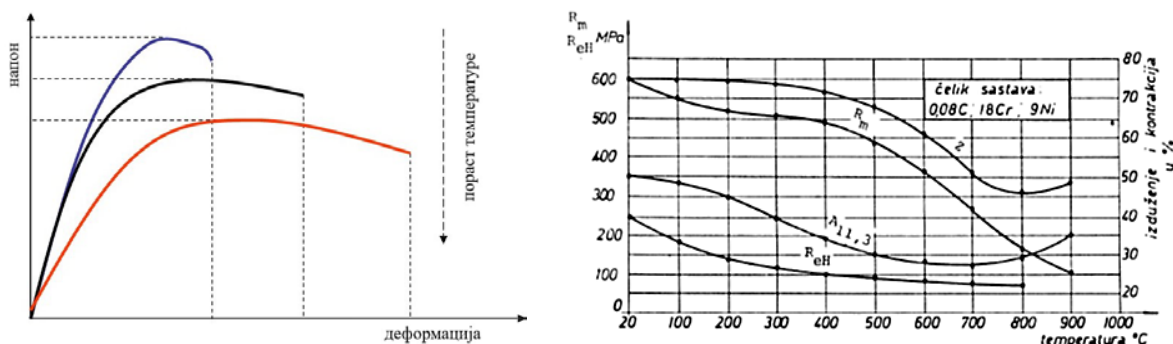
Неки машински делови и конструкције (парни котлови и турбине, мотори са унутрашњим сагоревањем, итд.) су током употребе у реалном радном окружењу изложени дејству повишених и високих температура. У зависности од температуре мењају се и механичке карактеристике метала, тако да је јасна потреба да се проучава њен утицај при статичким и динамичким оптерећењима. Раде се испитивања на повишеним температурама, као што су испитивање затезањем, испитивање на пузање (задавањем трајног константног оптерећења), испитивање материјала замарањем.

Карактеристика материјала, као што је затезна чврстоћа, добија се испитивањем на затезање на собној температури, при чему трајање оптерећења при испитивању нема велики утицај на њену вредност. Када су у питању испитивања на повишеним температурама трајање оптерећења знатно утиче на резултате. Карактеристике материјала на повишеним температурама морају се одредити у функцији трајања оптерећења и висине температуре [J.R. Davis, 2004].

Испитивање затезањем на повишеним температурама се не разликује од начина извођења испитивања затезањем на собној температури, осим у постојању потребе да епрувета буде загрејана и у току испитивања држана на одређеној температури у изолованој комори која се монтира на кидалицу. Сам процес испитивања је описан стандардом Института за стандардизацију Србије, који је преузет и индентичан са европским EN и ISO [SRPS EN ISO 6892-2:2018] стандардом.

Механичке карактеристике метала и легура на повишеним температурама се мењају. Са порастом температуре долази до:

- пада својстава отпорности - падају вредности модула еластичности, границе течења и затезне чврстоће,
- слабије изражености праволинијског дела и границе течења на дијаграму напон – деформација и
- раста својстава пластичности и жилавости - расте деформација (процентуално издужење), слика 3.34 [A. Majstorović, 1988].



Слика 3.24 Промена механичких карактеристика отпорности и деформабилности материјала при порасту температуре, десно [A. Majstorović, 1988]

Модул еластичности линеарно опада са порастом температуре.

Граница течења (развлачења) при повишеним температурама је, као и при собној температури, напон при којем настаје приметно веће истезање материјала. Ако граница течења није јасно изражена, одређује се напон при којем настаје трајно издужење у износу од 0.2% од почетне мерне дужине епрувете. Граница течења опада са порастом температуре.

Затезна чврстоћа при повишеним температурама је, као и при собној температури, однос максималне силе затезања и почетне површине попречног пресека епрувете, односно максимални напон који материјал може да издржи на одређеној температури пре лома. Затезна чврстоћа опада са порастом температуре.

Велики број истраживача ради на развоју кривих стварних напона - деформација материјала при испитивању затезањем на повишеним или високим температурама. Принцип обраде података је исти као и код испитивања на собним температурама. Криве стварних напона - деформација подељене су на два главна дела: део пре формирања врата (смањења попречног пресека) и део након почетка формирања врата до лома епрувете.

За приказ кривих стварних напона - деформација од нерђајућег челика на повишеним температурама, применљив је двостепени модел Ramberg-Osgood [L. Gardner, 2010 и 2016; J. Chen, 2004 и 2006].

$$\varepsilon_T = \begin{cases} \frac{f_T}{E_T} + 0.002 \left(\frac{f_T}{f_{y,T}} \right)^{n_T} & \text{за } f_T \leq f_{y,T} \\ \frac{f_T - f_{y,T}}{E_{y,T}} + \varepsilon_{u,T} \left(\frac{f_T - f_{y,T}}{f_{u,T} - f_{y,T}} \right)^{m_T} & \text{за } f_T > f_{y,T} \end{cases} \quad (3.52)$$

где је ε_T деформација на температури T , f_T напон на температури T , E_T модул еластичности на температури T , $f_{y,T}$ напон течења на температури T , $E_{y,T}$ модул еластичности у тачки течења на температури T , $\varepsilon_{u,T}$ деформација која одговара затезној чврстоћи на температури T , $f_{u,T}$ затезна чврстоћа на температури T добијена експериментално.

Модул еластичности у тачки течења на температури T може се изразити као [J. Chen, 2006]:

$$E_{y,T} = \frac{E_T}{1 + 0.002 n_T E_T / f_{y,T}} \quad (3.53)$$

Коефицијенти n_T и m_T се могу изразити у зависности од температуре:

$$n_T = 6 + 0.2\sqrt{T}$$

$$m_T = \begin{cases} 5.6 - \frac{T}{200} & \text{за нерђајући челик типа EN 1.4462} \\ 2.3 - \frac{T}{1000} & \text{за нерђајући челик типа EN 1.4301} \end{cases} \quad (3.54)$$

Такође, приказани су изрази зависности карактеристика материјала на повишеним и нормалним температурама [J. Chen, 2006]:

$$\frac{E_T}{E_{\text{normal}}} = a - \frac{(T - b)^n}{c}$$

$$\frac{f_{0.2,T}}{f_{0.2,\text{normal}}} = a - \frac{(T - b)^n}{c} \quad (3.55)$$

$$\frac{f_{u,T}}{f_{u,\text{normal}}} = a - \frac{(T - b)^n}{c}$$

где је E_{normal} модул еластичности на собној температури, $f_{0.2,T}$ технички напон течења на температури T , $f_{0.2,\text{normal}}$ технички напон течења на собној температури, $f_{u,\text{normal}}$ затезна чврстоћа на собној температури добијена експериментално. Коефицијенти a , b , c и n су дати табеларно у литератури за одговарајуће изразе и интервале температуре [J. Chen, 2006].

Механичка својства имају важну улогу у дизајну хладно обликованих челичних конструкција у безбедносном смислу, због брзог смањења механичких својстава као што су напон течења и модул еластичности, а са њима и смањења носивости конструкције у условима пожара. Отуда постоји потреба да се у потпуности разумеју промене карактеристика материјала, напон течења и модул еластичности хладно обликованих челика при повишеним температурама у распону 20-700 °С. Резултати испитивања упоређени су са резултатима тренутно доступним у литератури. Приказани су побољшани изрази развијени да прогнозирају напон течења и факторе смањења модула еластичности и криве напон - деформација за низ хладно обликованих челика који се користе у Аустралији. Испитујући хладно обликоване челике у условима пожара, неколико истраживача је развило израз за факторе редуције модула еластичности. Постоје две главне области у којима се фактори редуције модула еластичности линеарно разликују: 20÷200 °С и 200÷800 °С. Резултати су показали да је утицај класе челика и дебљине узорка занемарљив на факторе редуције модула еластичности [N.D. Kankanamge; M. Mahendran, 2011].

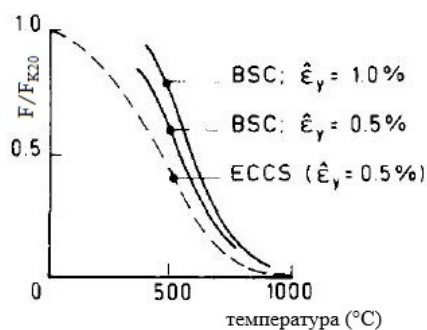
За челике ниске и високе чврстоће [N.D. Kankanamge; M. Mahendran, 2011]:

$$\frac{E_T}{E_{\text{normal}}} = -0.000835T + 1.0167 \quad \text{за } 20 \leq T \leq 200^\circ\text{C}$$

$$\frac{E_T}{E_{\text{normal}}} = -0.00135T + 1.1201 \quad \text{за } 200 \leq T \leq 800^\circ\text{C} \quad (3.56)$$

где је E_T - модул еластичности на температури T , а E_{normal} - модул еластичности на собној температури.

Уколико се примене основе теорије пластичности и ако се претпостави да постоји равномерност температуре по пресеку материјала, може се поставити законитост у смислу критичне температуре челика по изразу (2.57) [L. Twilt, 1988]:

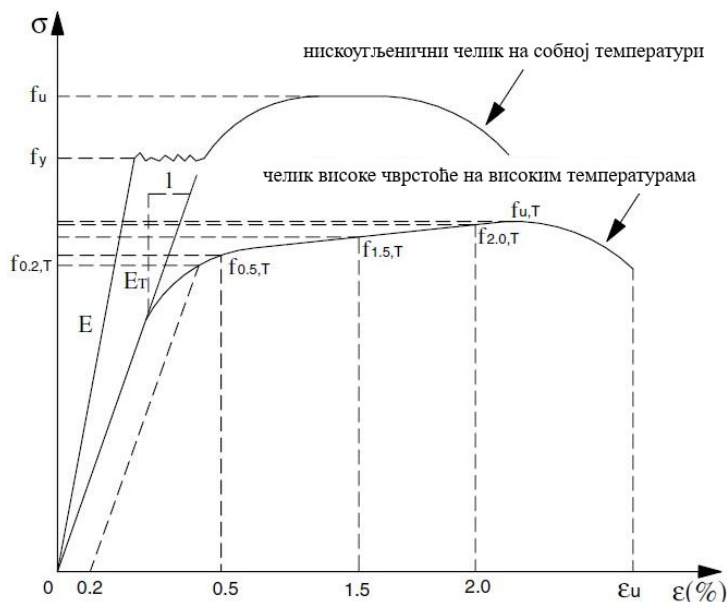


$$\frac{F}{F_{K20}} = \frac{R_{pT}}{R_{p20}} \quad (3.57)$$

Слика 3.25 Ефективни напон течења у функцији од температуре [L. Twilt, 1988].

где је F тренутно оптерећење (сила), F_{K20} сила кидања на собној температури, R_{pT} ефективни напон течења на температури T , R_{p20} напон течења на собној температури. За одређене вредности односа F/F_{K20} критичне температуре се могу очитати директно са дијаграма, слика 3.25, или из табеле дате у литератури [L. Twilt, 1988].

Преглед литературе указује на то да многи спроведени експерименти процењују утицај температуре на својства (чврстоћу) конвенционалног нискоугљеничног, меког челика [B.R. Kirby, 1988; L. Twilt, 1988; J. Chen, 2004; N.D. Kankanamge, 2011]. Већина ових истраживања спроведена су ради процене вредности својстава чврстоће и крутости конструкционог челика са напонам течења у опсегу од 250 до 350 МПа. Веома мало се у литератури наводе истраживања о температурним утицајима на својства чврстоће и крутости конструкције од челика високе чврстоће [W. Wang, 2013; M. Mirmomeni, 2015]. Утицај температуре на механичка својства материјала је евидентан, слика 3.26.



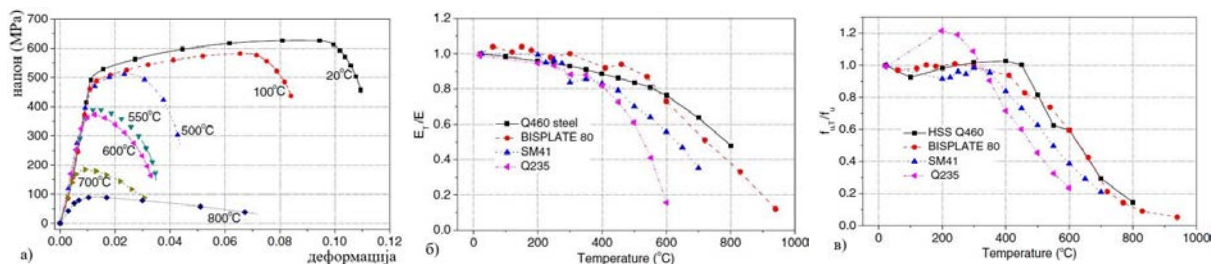
Слика 3.26 Типични приказ (облика) криве напон - деформација челика на повишеним температурама [W. Wang, 2013]

Утицај температуре на механичка својства легираног челика високе чврстоће Q460 испитан је мерењем модула еластичности и затезне чврстоће на различитим температурама у опсегу од 20 до 800 °C. Поређење измерених података указује да челик високе чврстоће има спорији губитак чврстоће и крутости услед повећања температуре

него класични челик, слика 3.27. У раду су представљени и изрази за одређивање фактора редукције модула еластичности E и напона течења f_y [W. Wang, 2013]:

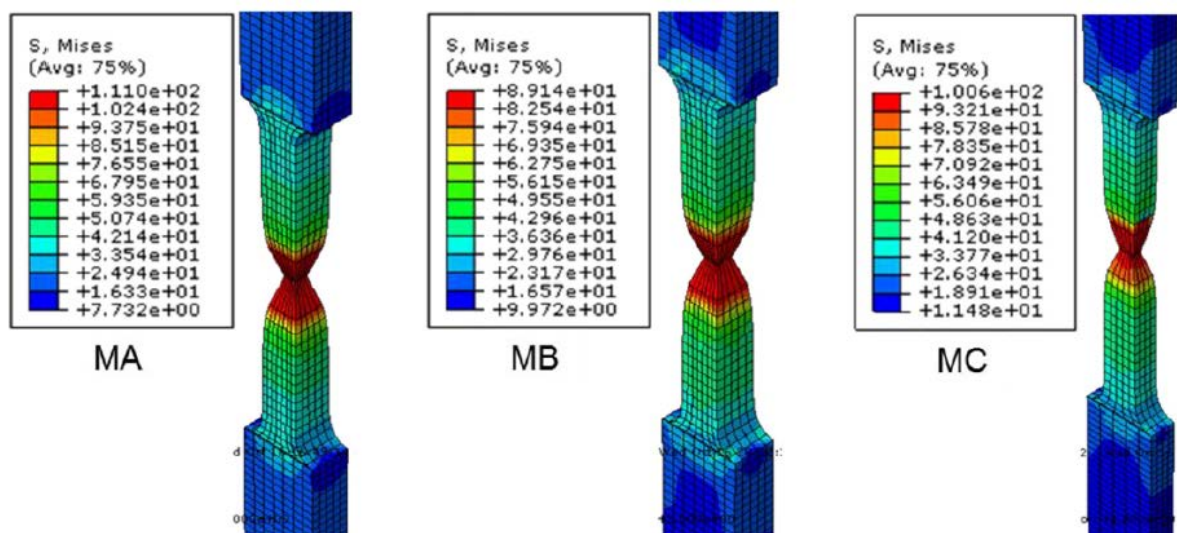
$$\frac{E_T}{E_{20}} = 1.02 - 0.035e^{\frac{T}{280}} \quad \text{за} \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C}$$

$$\frac{f_{yT}}{f_{y20}} = \begin{cases} \frac{1}{T} & \text{за} \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 450^\circ\text{C} \\ 4.32e^{-\frac{T}{880}} - 1.6 & \text{за} \quad 450^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3.58)$$



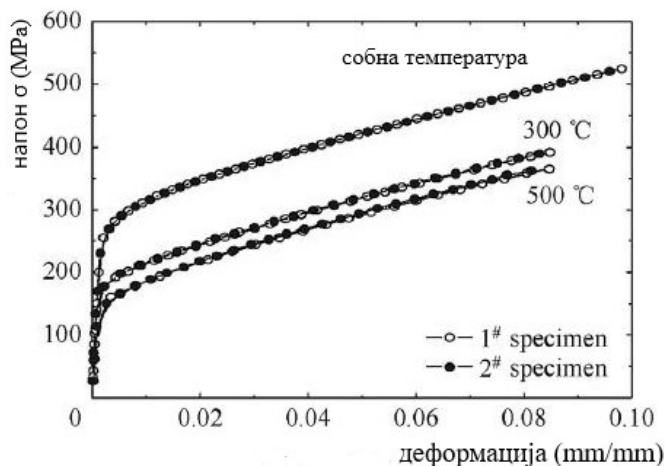
Слика 3.27 Зависност напона - деформација, модула еластичности, затезне чврстоће у функцији пораста температуре а) челик Q460 б) и в) челик Q460 и остали, респективно [W. Wang, 2013].

Испитивањем конструктивних челика ASTM A992 на повишеним и високим температурама до 1000°C , као симулација лома челичних делова и спојева подвргнутих загревању у пожарима, бавили су се W. Cai и сарадници. Пре формирања врата, криве стварних напона - деформација директно су изведене из криве техничких напона - деформација челика ASTM A992 утврђеног испитивањем затезањем узорака на високим температурама. Након појаве врата, криве стварних напона - деформација добијене су експериментално на основу кривих техничких напона - деформација, а грешка је анализирана методом коначних елемената, слика 3.28 [W. Cai, 2017].



Слика 3.28 Симулација формирања врата на спрувети на собној температури [W. Cai, 2017]

Резултати испитивања затезањем на собним и различитим повишеним температурама у интервалу од 300 до 500°C за нерђајући челик 316L, A508-III и легуре титанијума TA17 верификовани су уз помоћ FEM методе, којом се кориговала крива стварних напона - деформација, добијена експерименталним путем, слика 3.29 [D. Yao, 2016].



Слика 3.29 Крива стварних напона - деформација на собној и повишеним температурама за челик 316L [D. Yao, 2016]

Преглед техника испитивања затезањем узорка малих димензија од волфрама на високим температурама уз узимање у обзир утицаја геометрије узорка на својства материјала, уз верификацију резултата испитивања методом коначних елемената приказани су у раду D.N. Makwana и сарадника. Експериментална крива стварних напона и деформација је показала одлично поклапање са кривом добијеном FEM анализом [D.N. Makwana, 2016].

Аустенитни нерђајући челици 304L и 316L веома су важне легуре које се често користе при високим температурама, због чега је важно проучити њихове механичке карактеристике на повишеним температурама. Механичка својства као што су затезна чврстоћа, напон течења, процентуално издужење, експонент деформационог ојачања и коефицијент чврстоће процењују се на основу експерименталних података добијених испитивањем затезањем на повишеним температурама у интервалу од 50 °C до 650 °C, при три различите брзине деформације (0.0001, 0.001 и 0.01 s⁻¹). Коришћене су вештачке неуронске мреже ANN (енг. Artificial Neural Networks) да предвиде механичке особине. Грешке приказаних резултата су значајно ниске, што представља високу тачност примењеног модела [R.K. Desu, 2016].

Три комерцијална аустенитна нерђајућа челика (Sanicro 25, AISI 310 и AISI 316L) и две комерцијалне легуре на бази никла (легура 617 и легура 800HT) испитивани су затезањем при повишеним и високим температурама од 400 °C до 700 °C. Материјали су показали различиту дуктилност на повишеним температурама која се повећава са повећањем садржаја никла [M. Calmunger, 2017].

Експериментално истраживање својстава материјала хладно обликованих челика високе чврстоће на повишеним температурама у распону од собне температуре до 1000 °C представљен је у раду Н.Т. Li-а и В. Young-а. Испитано је укупно 83 узорка. Својства материјала која су добијена овим истраживањем су термичко издужење, модул еластичности, напон течења, затезна чврстоћа и напон кидања. Резултати испитивања поменутих својстава хладно обликованих челика високе чврстоће поређени су са постојећим европским, америчким, аустралијским и британским стандардима. Добијене вредности термичких издужења су биле у складу са европским стандардом [Н.Т. Li, В. Young, 2017].

4 ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ ПРЕДЛОЖЕНЕ МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА

Развој неконвенционалних, малих, лабораторијских кидалица мора водити ка конструисању уређаја уз помоћ кога се испитивањем затезањем могу добити поуздане и тачне вредности механичких карактеристика материјала на узорцима (спруветама) малог попречног пресека, оптерећеним релативно ниским вредностима сила затезања. Унутар ових претпоставки, крутост конструкције уређаја се лакше постиже. Истовремено, коришћењем модула уређаја са комором за загревање узорака, једноставније је одржавање одређених температура, као и краћи период загревања. Теоријским разматрањем и оптимизацијом пресека узорка, узимајући у обзир тешкоће везане за израду спрувета малих пресека, као и грешке мерења услед одступања димензија, могуће је одредити механичке карактеристике материјала са малом грешком.

На тачност и поузданост процеса испитивања утиче велики број фактора. Неки од њих се односе на уређај на којем се испитивање врши (захтеван висок квалитет уређаја у погледу крутости и попустљивости функционалних елемената), док се други везују за сам испитивани узорак (облик и димензије узорка, метода израде, итд.). Иако се процес испитивања врши по препорукама актуелних стандарда, неконвенционални уређаји и узорци (спрувете) обично одступају од тих препорука. Многобројни истраживачи се баве развојем и оптимизацијом новонасталих захтева за испитивањем материјала чији узорци не могу бити одговарајућих димензија и облика прописаних стандардима, као и њиховим утицајем на ток и тачност испитивања.

На основу литературних прегледа могу се извући основни закључци о правцима развоја неконвенционалних кидалица и одговарајућих узорака материјала који се испитују:

- Узорци малих попречних пресека могу бити кружног и правоугаоног попречног пресека.
- Вредности карактеристика отпорности материјала (напон течења, затезна чврстоћа) и издужење узорка до лома код узорака са кружним попречним пресеком могу бити незнатно мање од вредности које се добијају испитивањем узорака са правоугаоним попречним пресеком. На дијаграму напон - деформација меких челика може изостати карактеристично течење материјала код узорака са правоугаоним попречним пресеком.
- Повећање односа мерне дужине и пречника спрувете не утиче много на карактеристике отпорности материјала, али се јединично издужење у процентима узорка смањује.
- Затезна чврстоћа, контракција попречног пресека и равномерно издужење до тачке постизања максималне силе не зависе од пречника узорка. Међутим, укупно издужење до лома и издужење након формирања врата спрувете се повећавају са пречником узорка, односно утицај пречника се огледа у повећању издужења спрувете само у зони након формирања врата.
- Утицај пречника узорка на укупно издужење спрувете до лома и издужење након формирања врата се може занемарити када је L_0/D_0 веће од 10.
- Узорци правоугаоних попречних пресека су распрострањенији. Један од разлога је лакша контрола жељених димензија, јер се прецизним сечењем из табле одређене дебљине контролишу преостале две димензије узорка.

- Напон течења и затезна чврстоћа челика не зависе од дебљине и мерне дужине узорка правоугаоних попречних пресека. Међутим, укупно издужење до лома и издужење након формирања врата епрувете повећавају се са повећањем дебљине узорка, док равномерно издужење (издужење до појаве врата на епрувети у тачки постизања максималне силе) не зависи од промене дебљине узорка. Односно, са смањењем дебљине епрувете смањује се и дуктилност материјала. Са повећањем мерне дужине епрувете долази до смањења равномерног издужења, али и до пораста вредности модула еластичности до стварних вредности.
- Потребно је изабрати одговарајућу методу за израду узорака (епрувета) малих попречних пресека. У већем броју случајева није могуће користити обраду скидањем струготине, па се, посебно код равних узорака, користе сечење ласером, воденим абразивним резним млазом, обрада електропражњењем жице или процес електроерозивне обраде. Примена методе сечења воденим млазом је показала најмање промена у структури равних узорка малих пресека, које могу довести до грешака измерених карактеристика материјала.
- Потребно је да неконвенционална кидалица буде одговарајуће крутости како би могла да обезбеди добијање поузданих и тачних карактеристика испитиваних материјала, односно да не постоји попустљивост у функционалним елементима конструкције, која би могла да доведе до грешке у мерењу издужења. То се посебно односи на одређивање модула еластичности материјала, где грешке у мерењу јако малих издужења у пољу еластичности материјала могу утицати на велике грешке у процени ове величине.
- Посебно битан сегмент у процесу испитивања је правилно постављање узорка и начин прихвата у уређају. Када су у питању узорци (епрувете) са правоугаоним попречним пресеком и равни узорци, прихват се у стезним чељустима обично врши назубљеним клиновима или чивијама кроз отвор на проширеном делу узорка за прихват, вијчаним везама или ослањањем рамена епрувете на стезне чељусту уређаја. Лепљење узорка јаким и квалитетним лепковима се избегава, услед могућих оштећења делова за прихват и самог узорка након завршеног испитивања.
- Несаосност правца задавања силе затезања и осе узорка може утицати на тачност резултата, посебно на вредност горње границе течења код меких челика.

На основу наведених закључака, јасна је потреба за развојем и пројектовањем неконвенционалне, лабораторијске кидалице за испитивање материјала на затезање и оптимизацијом узорака малих пресека, како би подаци о механичким својствима материјала добијени испитивањем затезањем били упоредиви са онима добијеним испитивањем стандардних узорака.

- Мале неконвенционалне лабораторијске кидалице имају низ евидентних предности у односу на конвенционалне кидалице са теоријског, техничког, технолошког и посебно економског аспекта.
- Могу се веома ефикасно применити у области едукације и истраживања.
- Испитивања се врше задавањем релативно малих сила затезања, па се може обезбедити задовољавајућа крутост система и онемогућити попустљивост у виталним деловима система.

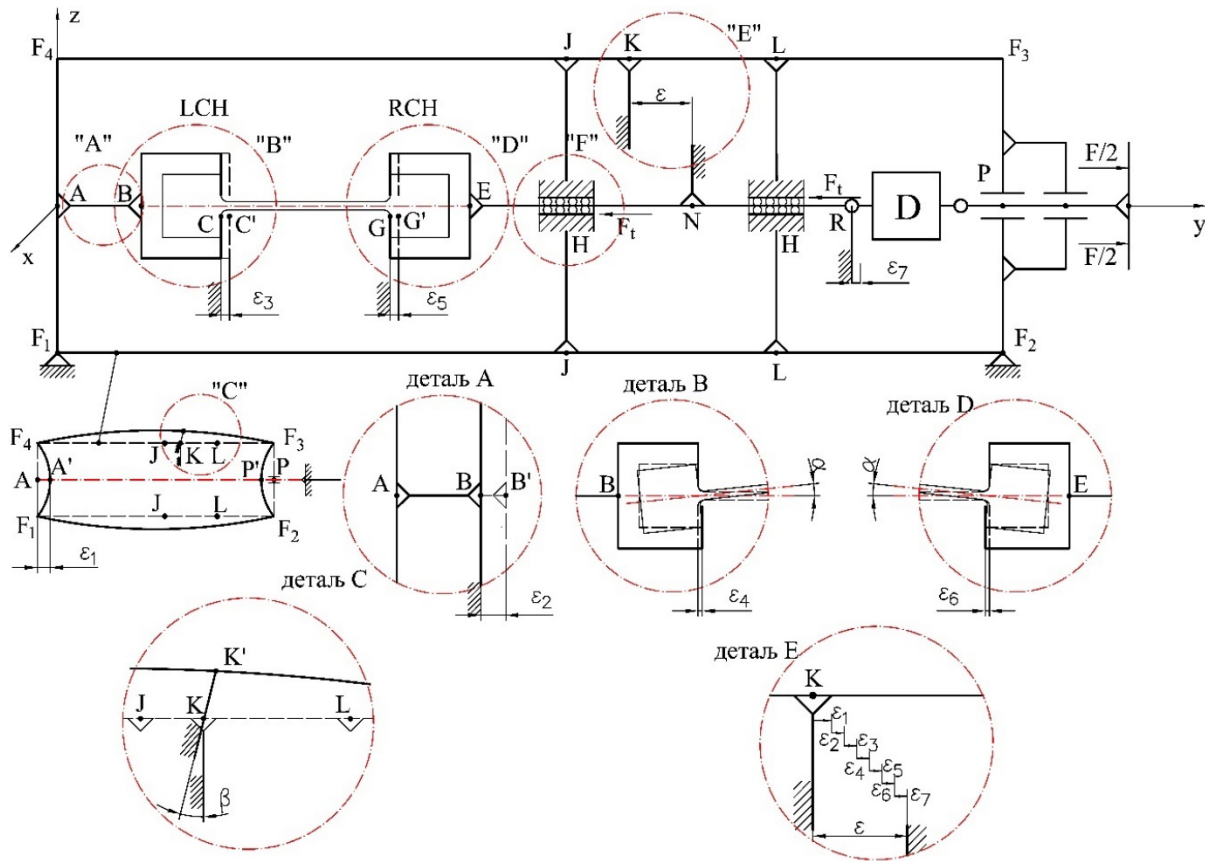
- Развој кидалице за испитивање материјала обухвата модул за испитивање на собним температурама, као и модул за испитивање на повишеним и високим температурама. Управљачки систем мале, лабораторијске кидалице, код оба модула, је једноставан за коришћење, а са друге стране цена оваквог система је релативно ниска.
- Уређаји су лагани, преносиви, лаки за употребу без посебне обуке руковоаца, као и транспарентни у процесу едукације.
- Грешке одређивања модула еластичности и осталих механичких карактеристика материјала, које се могу добити испитивањем на затезање, су последица нивоа тачности мерне инструментације и нивоа попустљивости конструкције кидалице тј. попустљивости одређених подсклопова кидалице, посебно попустљивости у зонама базирања и стежања узорака – епрувета за испитивање.
- Одређивање механичких карактеристика материјала на лабораторијским кидалицама врши се на узорцима малих попречних пресека посебно дефинисане геометрије, при чему се избор геометријских параметара епрувета може оптимизовати у циљу минимизације грешака мерења.
- Испитивање великог броја узорака малих пресека и димензија не захтева високе трошкове. Применом метода математичке статистике може се потврдити тачност резултата добијених испитивањем великог броја епрувета.
- Развој софтвера који представља део уређаја омогућава лако одређивање вредности стварних напона, сужења попречног пресека узорака и јасан визуелни приказ промене почетног попречног пресека испитиване епрувете до лома.

На основу анализе литературних извора може се закључити да се проблеми добијања тачних и поузданих вредности неопходних величина (издужења, силе, модула еластичности) на кидалицама овог типа јављају због великог броја фактора који утичу на тачност и поузданост резултата мерења.

4.1 УТИЦАЈ ПОПУСТЉИВОСТИ УРЕЂАЈА - КИДАЛИЦЕ ЗА ИСПИТИВАЊЕ МАТЕРИЈАЛА ЗАТЕЗАЊЕМ НА ТАЧНОСТ РЕЗУЛТАТА МЕРЕЊА

Неки од најутицајних фактора се у суштини односе на попустљивости у одређеним зонама саме конструкције кидалице, односно на попустљивост одређених подсклопова конструкције. Попустљивости подсклопова и елемената конструкције кидалице битно ће утицати на резултате мерења издужења и силе затезања, односно на грешке мерења (грешке мерења померања и грешке мерења силе). Попустљивост подсклопова конструкције уређаја се односи на зоне попустљивости које имају највећи утицај на грешке мерења померања и зоне у којима се јављају паразитне, некорисне силе (трење) које стварају грешку мерења силе затезања.

Разматра се теоријски модел кидалице који је шематски приказан на слици 4.1.



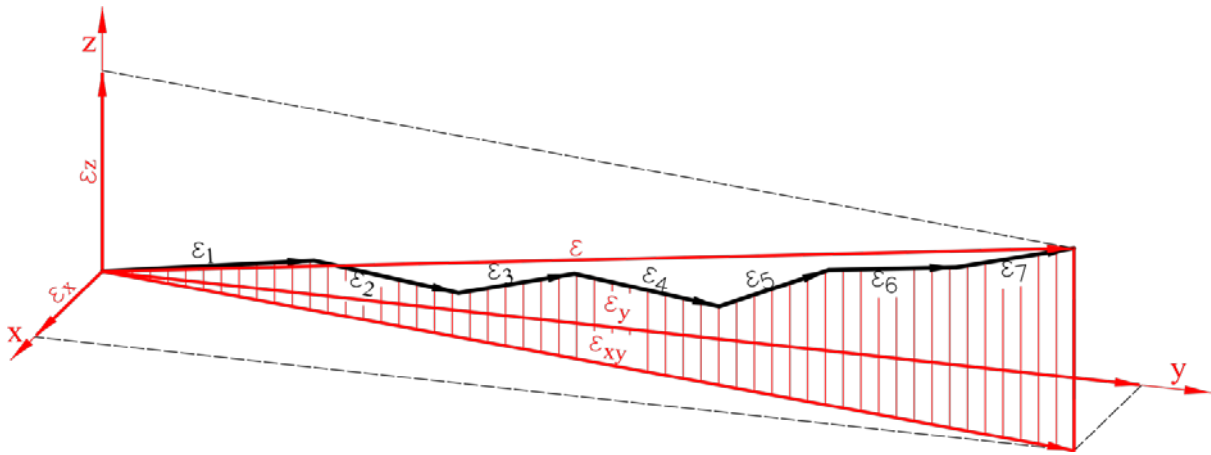
Слика 4.1 Шематски приказ кидалице

Попустљивости у одређеним зонама конструкције кидалице у директној су вези са грешкама мерења померања и сврставају се у грешке услед:

- попустљивости носеће конструкције кидалице (тачке F_1 F_2 F_3 F_4), носећег рама кидалице,
- попустљивости подскопа везе рама носеће конструкције и леве чељусти кидалице (AB),
- попустљивости саме конструкције леве чељусти (CC'),
- попустљивости испитиваног узорка у зони контакта леве чељусти и узорка (епрувете) за испитивање (LCH),
- попустљивости десног подскопа за прихватање епрувете (GG'),
- попустљивости испитиваног узорка у зони контакта десне чељусти и узорка (епрувете) за испитивање (RCH),
- попустљивости елемента који повезује леву чељуст са динамометром и вучним системом кидалице (ER).

Носећа конструкција кидалице (F_1 F_2 F_3 F_4), рам, при дејству силе затезања имаће еластичну линију облика приказаног на детаљу са слике 4.1. Настале еластичне деформације рама довешће до померања рама, што ће проузроковати грешку ε_1 . Грешку ε_1 експериментално није могуће одредити (измерити). Теоријски посматрано ова грешка би се могла експериментално одредити само у случају када би попустљивости у свим осталим зонама конструкције биле бесконачно мале, па би у том случају укупна грешка мерења била једнака измереној грешки, односно разлици измерене вредности померања и теоријске вредности. Наиме, познате су зоне попустљивости (наведене зоне) али није

могуће експериментално одредити било коју вредност парцијалне грешке везане за зону у којој је настало померање, већ само укупну грешку мерења као разлику између измерене вредности померања и теоријске вредности померања испитиваног материјала на затезање. Реално, грешка померања носеће конструкције кидалице (рама) постоји и износи ε_1 (детал С слика 4.1), што је приказано и на дијаграму, слика 4.2.



Слика 4.2 Дијаграм вектора грешака померања

Попустљивост подскопа везе рама носеће конструкције и леве чељусти кидалице (AB), изазваће грешку мерења ε_2 , као што се види на слици 4.1, детаљ А и дијаграму на слици 4.2. Грешка ε_2 је везана за крутост елемента везе носеће конструкције рама и начина везивања носећ е конструкције са левом чељусти, односно настаје услед померања елемента везе из тачке В у тачку В' при дејству оптерећења и реалног постојања напона у вези.

Попустљивост конструкције леве чељусти (CC') настаје услед померања леве чељусти у зонама контакта леве чељусти са епруветом из тачке С у тачку С', што узрокује грешку мерења ε_3 , слика 4.1 и слика 4.2.

Попустљивост испитиваног узорка (епрувете) у зони контакта епрувете и леве чељусти, настаје због деформација прихватног дела епрувете у зонама контакта, што узрокује грешку ε_4 , слика 4.1, детаљ В, и слика 4.2.

Аналогно са претходно реченим, грешке се јављају и у зонама десне чељусти (грешка ε_5) померањем тачке G у тачку G' и у зонама контакта епрувете и десне чељусти (грешка ε_6), померањем означеним на детаљу D са слике 4.1. Попустљивост елемента који повезује десну чељуст са динамометром и вучним системом кидалице проузроковаће грешку мерења ε_7 , која настаје као последица померања тачке R за неко ε_7 , слика 4.1.

Уопштено теоријски посматрано, померања и грешке мерења померања настају по свим осама, па у циљу минимизације тих грешака треба тежити да оне имају линеарни карактер и да се јављају највећим делом у правцу у-осе, која представља осу задавања оптерећења, што је у реалним конструкцијама веома тешко изводљиво.

Настала померања по осама x и z ће преко паразитних сила (сила трења) и могућих ексцентричних сила и сличних утицаја проузроковати грешку мерења силе затезања, што ће се директно одразити на укупне грешке мерења, тј. одступање експериментално добијених резултата у односу на референтне вредности које треба добити при испитивању материјала затезањем (модул еластичности, издужење, деформација).

Тачност резултата мерења зависи од грешака при мерењу. Грешка мерења је разлика измерене и стварне или истините вредности мерене величине. Грешка мерења може бити систематска и случајна. Чак и у најбољим експериментима, коначни резултати садрже обе врсте грешака. Систематске грешке представљају систематско одступање, тј. одступање чија величина и знак остају исти у свим мерењима. Њихов утицај на крајњи резултат мерења се може смањити одређеном корекцијом. Када су систематске грешке сведене на минимум или отклоњене, остају, код скоро свих мерења, грешке које се не могу избећи ни на који начин. То су случајне грешке. Њихова величина и знак се мењају од мерења до мерења. На смањење случајних грешака се може утицати повећавањем броја поновљених мерења и затим израчунавањем аритметичке средине низа резултата.

У овом раду посебна пажња ће бити посвећена случајним грешкама и то оним које су настале услед несавршености мерне инструментације и уређаја, под условом да не постоји променљивост околине при испитивању и да је поступак испитивања исти при сваком испитивању, односно да су систематске грешке мерења сведене на минимум.

4.2 УТИЦАЈ МЕРНЕ ИНСТРУМЕНТАЦИЈЕ УРЕЂАЈА - КИДАЛИЦЕ ЗА ИСПИТИВАЊЕ МАТЕРИЈАЛА ЗАТЕЗАЊЕМ И ГЕОМЕТРИЈЕ УЗОРКА (ЕПРУВЕТЕ) НА ТАЧНОСТ РЕЗУЛТАТА МЕРЕЊА

Једна од јако важних карактеристика материјала која се може добити испитивањем затезањем на кидалици је и модул еластичности. Са аспекта грешака мерења то је једна од најосетљивијих величина. Код узорака малих димензија, напон у пољу еластичних деформација се може израчунати на основу силе која се снима на уређају при испитивању затезањем, док је тачно мерење еластичне деформације изазов [Н.В. Motra, 2014; J. Kazakeviciute, 2019]. Еластична деформација стандардних узорака може се тачније одредити помоћу екстензиометара, али код узорака малих маса и запремина примена екстензиометра је отежана и то није опција која се примењује. За одређивање еластичне деформације узорака малих димензија уместо екстензиометара могу се користити две алтернативне методе. Једна се своди на примену корелације дигиталне слике DIC (*енг.* Digital Image Correlation) [J.T. Cantrell, 2017; F. Zhu, 2018], а друга на мерење деформације на основу мерења померања стезне чељусту уређаја за испитивање затезањем, што не захтева додатну опрему и обраду података [S. Kostić, 2019 и 2021].

Данас није могуће квантитативно изразити било који резултат мерења без одређене сумње у његову тачну вредност. Непоптуно познавање фактора који утичу на мерење (случајни и систематски фактори) довело је до увођења појма мерна неизвесност. Свако мерење је изложено различитим утицајима и сметњама, било да они произилазе из случајних или систематских ефеката, обично из оба.

Одређивање неизвесности мерења модула еластичности испитивањем затезањем је јасно дефинисано стандардом SRPS EN ISO 6892-1:2020 и може се одредити према CWA 15261-2:2005 или према Анексу К. Неизвесност мерења дата је изразом:

$$u_c(E) = \sqrt{\left(\frac{L_e}{S_0}\right)^2 \cdot u^2(S_E) + \left(\frac{S_E}{S_0}\right)^2 \cdot u^2(L_e) + \left(-\frac{S_E \cdot L_e}{S_0}\right)^2 \cdot u^2(S_0)} \quad (4.1)$$

где су L_e мерна дужина епрувете мерена екстензиометром, S_0 почетна површина попречног пресека мерне дужине епрувете, S_E нагиб криве сила - издужење мерено екстензиометром, $u(L_e)$ несигурност мерне дужине мерене екстензиометром, $u(S_0)$ несигурност почетне површине попречног пресека мерне дужине епрувете, $u(S_E)$ несигурност нагиба криве сила - издужење мерено екстензиометром,

или се, према Анексу К, стандардна неизвесност u може проценити на два начина. Први је тип А - понављањем мерења:

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.2)$$

где је s стандардно одступање мерења, n број упросечених опажања за пријаву резултата мерења под нормалним околностима.

Други је тип Б - из неког другог извора, нпр. калибрациони сертификати или толеранције:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (4.3)$$

где је a половина ширине интервала у коме се претпоставља да ће се наћи вредност мерене величине.

Често процена вредности величина y , подразумева мерење других величина. Процена неизвесности величине y мора да узима у обзир утицај неизвесности у свим мерењима. То је познато као комбинована неизвесност. Ако процена једноставно обухвата додавање или одузимање низа мерења, x_1, x_2, \dots, x_n , онда је комбинована неизвесност $u(y)$, дата формулом:

$$u(y) = \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_2)^2 + \dots + u(x_n)^2} \quad (4.4)$$

где је $u(x_1)$ неизвесност у параметру x_1 , итд.

Према GUM приручнику (*енг.* Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement), који је први пут изашао 1993, а поново са изменама 2008 [BIPM 1993; JCGM, 2008], сумња у резултат мерења је неизвесност. Основне компоненте мерне неизвесности су:

- Стандардна неизвесност типа А - компонента неизвесности која се одређује из статистичке расподеле резултата мерења. Представља стандардну девијацију расипања резултата мерења и у основи одговара случајним грешкама мерења.
- Стандардна неизвесност типа Б - компонента неизвесности настала због очекиваних догађаја (очекиване вероватноће расипања). Одређује се појединачном анализом мерења и не зависи од броја мерења. Одговара систематским грешкама мерења.

Поред основних компоненти мерне неизвесности дефинишу се и комбинована стандардна неизвесност и проширена мерна неизвесност (која може имати различите нивое поверења, поузданости резултата мерења).

Извори велике неизвесности код одређивања модула еластичности E код испитивања затезањем металног материјала су: систем уређаја за испитивање (уређај за мерење димензија, систем мерних тарка, тип екстензиометра, систем саосности, крутост кидалице, тачност мерења силе, тачност екстензиометра) и процедура испитивања (брзине напона и деформације, систем прикупљања података, брзина прикупљања података, софтвер за тестирање) [S. Tarafder, 2004]. Познавање квантитативних ефеката појединачних величина на резултат испитивања побољшава поузданост поступка испитивања, као што је дато на слици 4.3.



Слика 4.3 Кључни утицаји на неизвесност мерене величине

На слици 4.4 приказани су ток и методе прорачуна мерне неизвесности [M. Lazić, 2011]



Слика 4.4 Ток и методе прорачуна мерне неизвесности [M. Lazić, 2011]

Да би се поједноставили прорачуни неизвесности, пожељно је груписати значајне изворе који утичу на резултате испитивања затезањем у следеће категорије: неизвесност због грешака у мерењу површине попречног пресека, неизвесност због грешака у мерењу силе, неизвесност због грешака у мерењу померања и неизвесност због процењених величина (нпр. модул еластичности) [W. Gabauer, 2000]. Извори неизвесности су углавном типа Б, с обзиром на то да се они могу квантификовати на основу података доступних а priori. М. Soy и М. Luş (2018) врше поређење неизвесности мерења типа А и Б у испитивању затезањем металних материјала на собној температури, где предност дају методи типа А јер даје тачније резултате од неизвесности типа Б. Неизвесност резултата добијена методом типа Б била је већа за све групе узорака.

Проблеми добијања тачних вредности модула еластичности на кидалицама јављају се због великог броја фактора. Поред тачности мерне инструментације, значајан утицај имају фактори везани за попустљивост која се јавља у одређеним зонама саме конструкције кидалице, односно за попустљивост одређених подсклопова конструкције, који ће утицати на тачност мерења вредности силе и издужења [S. Kostić, 2021].

На основу Нооке-овог закона, који важи у пољу еластичних деформација, модул еластичности се може одредити на основу израза (4.5):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F \cdot l_0}{A_0 \cdot \Delta l} \quad (4.5)$$

где је E - модул еластичности, σ - напон, ε - деформација, F - сила затезања током испитивања, l_0 - почетна мерна дужина епрувете, A_0 - почетна површина попречног пресека епрувете, $\Delta l = (l - l_0)$ - промена мерне дужине епрувете, l - тренутна мерна дужина епрувете.

На основу израза (4.5) може се написати да је модул еластичности E функција наведених величина, тј. да важи:

$$E = f(F, l_0, A_0, \Delta l) \quad (4.6)$$

Процена неизвесности израчунаог резултата E може се одредити на основу неизвесности у примарним мерењима. Неизвесност резултата модула еластичности може се представити датим неизвесностима независних променљивих из израза (4.6), [R.J. Moffat, 1988; J.P. Holman, 2011; GUM]:

$$W_E = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial E}{\partial F} \right)^2 \cdot W_F^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial l_0} \right)^2 \cdot W_{l_0}^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial A_0} \right)^2 \cdot W_{A_0}^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial \Delta l} \right)^2 \cdot W_{\Delta l}^2 \right]} \quad (4.7)$$

где је W_E неизвесност модула еластичности, W_F неизвесност силе, W_{l_0} неизвесност почетне дужине епрувете, W_{A_0} неизвесност почетне површине попречног пресека епрувете и $W_{\Delta l}$ неизвесност промене мерне дужине епрувете, док парцијални изводи представљају коефицијенте осетљивости $c_{\Delta F}$, c_{l_0} , c_{A_0} , $c_{\Delta l}$ респективно.

Укупна неизвесност модула еластичности из израза (4.7) се након диференцирања функције f своди на облик (4.8):

$$W_E = \sqrt{\left[\left(\frac{l_0}{A_0 \cdot \Delta l} \right)^2 \cdot W_F^2 + \left(\frac{F}{A_0 \cdot \Delta l} \right)^2 \cdot W_{l_0}^2 + \left(\frac{-F \cdot l_0}{A_0^2 \cdot \Delta l} \right)^2 \cdot W_{A_0}^2 + \left(\frac{-F \cdot l_0}{A_0 \cdot \Delta l^2} \right)^2 \cdot W_{\Delta l}^2 \right]} \quad (4.8)$$

Коришћењем израза (4.5), тј. везе модула еластичности, силе затезања, геометријских параметара епрувете и издужења Δl , односно заменом израза у загради датих у претходном обрасцу:

$$\frac{l_0}{A_0 \cdot \Delta l} = \frac{E}{F}; \quad \frac{F}{A_0 \cdot \Delta l} = \frac{E}{l_0}; \quad \frac{F \cdot l_0}{A_0^2 \cdot \Delta l} = \frac{E}{A_0}; \quad \frac{F \cdot l_0}{A_0 \cdot \Delta l^2} = \frac{E}{\Delta l}$$

долази се до коначног израза за прорачун неизвесности мерења модула еластичности (4.9):

$$W_E = E \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{F} \right)^2 \cdot W_F^2 + \left(\frac{1}{l_0} \right)^2 \cdot W_{l_0}^2 + \left(\frac{-1}{A_0} \right)^2 \cdot W_{A_0}^2 + \left(\frac{-1}{\Delta l} \right)^2 \cdot W_{\Delta l}^2} \quad (4.9)$$

Из претходног израза се може закључити да неизвесност модула еластичности у еластичној области зависи од величине силе затезања, геометријских параметара епрувете и вредности издужења мерне дужине епрувете Δl . С обзиром на то да се наведене величине мењају у току самог процеса мерења (сила расте, издужење расте) произилази да је и неизвесност саме величине модула еластичности променљива током процеса мерења.

Израз (4.9) се може написати у облику:

$$W_E = E \cdot \delta \quad (4.10)$$

где је δ укупна неизвесност као функција величина које се мере током испитивања:

$$\delta = \sqrt{\left(\frac{1}{F} \right)^2 \cdot W_F^2 + \left(\frac{1}{l_0} \right)^2 \cdot W_{l_0}^2 + \left(\frac{-1}{A_0} \right)^2 \cdot W_{A_0}^2 + \left(\frac{-1}{\Delta l} \right)^2 \cdot W_{\Delta l}^2} \quad (4.11)$$

или

$$\delta = \sqrt{\delta(F)^2 + \delta(l_0)^2 + \delta(A_0)^2 + \delta(\Delta l)^2} \quad (4.12)$$

где су $\delta(F)$ - неизвесност у функцији силе F , $\delta(l_0)$ - неизвесност у функцији почетне мерне дужине епрувете l_0 , $\delta(A_0)$ - неизвесност у функцији почетне површине попречног пресека A_0 и $\delta(\Delta l)$ - неизвесност у функцији издужења Δl . На неизвесности мерења у функцији мерних величина $\delta(F)$, $\delta(l_0)$, $\delta(A_0)$ и $\delta(\Delta l)$, утичу нивои вредности величина l_0 , A_0 и нивои вредности F и Δl , које се мењају у самом току испитивања.

Из израза (4.11) и (4.12) може се закључити да неизвесност δ тежи нули када величине F , l_0 , A_0 и Δl теже бесконачности, а неизвесност величина W_F , W_{l_0} , W_{A_0} и $W_{\Delta l}$ имају коначне, мале вредности [S. Kostić, 2021]:

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \delta = \lim_{\substack{F \rightarrow \infty \\ l_0 \rightarrow \infty \\ A_0 \rightarrow \infty \\ \Delta l \rightarrow \infty}} \sqrt{\delta(F)^2 + \delta(l_0)^2 + \delta(A_0)^2 + \delta(\Delta l)^2} \quad (4.13)$$

Претходна констатација јасно указује на могућност минимизације укупне неизвесности δ преко избора погодних геометријских величина епрувете за испитивање. Међутим, постоје ограничења теоријских могућности минимизације укупне неизвесности δ због попустљивости одређених подсклопова и елемената самог уређаја. Овај проблем везан је за вредност максималне силе затезања која се са епрувете преноси на зоне прихвата и стезања епрувете (стезне чељусти) и читаву конструкцију кидалице.

За изражавање неизвесности у мерењу посебно важан извор је ISO Guide [BIPM, 1995], који може бити мало компликован, па се препоручују друге публикације [S. Bell, 1999; W. Gabauer, 2000; F.A. Kandil, 2000; S. Kłysz, 2008]. При одређивању неизвесности модула еластичности експерименталним путем, поред методе типа Б користи се и статистичка метода типа А, која узима у обзир аритметичке средине серије мерења, или комбинована неизвесност добијена на основу неизвесности обе поменуте методе.

Посматраће се неизвесности $\delta(F)$, $\delta(l_0)$, $\delta(A_0)$ и $\delta(\Delta l)$ из израза (4.13), на конкретном примеру епрувете од челика чији је модул еластичности $E = 210 \text{ GPa}$. Епрувета је правоугаоног попречног пресека површине $A_0 = 2 \text{ mm}^2$ (ширина епрувете $w = 2 \text{ mm}$, а дебљина епрувете $t = 1 \text{ mm}$). Почетна мерна дужина епрувете је $l_0 = 180 \text{ mm}$. Максимална сила затезања у еластичној области деформација износи $F = 300 \text{ N}$. Остварено издужење према изразу (4.5) износи $\Delta l = 0.1285 \text{ mm}$.

Извори несигурности су углавном типа Б, јер се они могу квантификовати на основу података доступних а priori, попут тачности динамометра из сертификата о калибрацији [BIPM, 1995; J.D. Lord, 2010]. Из сертификата о калибрацији претварача силе, несигурност је 0.22%, односно $W_F = 0.6 \text{ N}$ за мерни опсег динамометра од 0 до 300 N, уз примену правоугаоне расподеле. Неизвесност у функцији силе $\delta(F)$ износи:

$$\delta(F) = \frac{1}{F} \cdot W_F = \frac{1}{300} \cdot 0.6 = 2.0 \cdot 10^{-3} \quad (4.14)$$

Постоји и други начин. Главни фактори који утичу на укупну неизвесност мерења силе укључују неизвесност, која се може приписати динамометру уређаја за испитивање затезањем, подешавање нуле у делу за мерење силе, могућу несаосоност силе која се примењује, температуру околине током испитивања и брзину примене оптерећења. Неизвесност мерења силе за опсег еластичних деформација би се могла добити из израза [S. Kłysz, 2008]:

$$W_F = \sqrt{W^2(F_{\max}) + W^2(F_{\min})} \quad (4.15)$$

где је $W(F_{\max})$ и $W(F_{\min})$ неизвесност мерења сила које су по вредности најближе највећој и најмањој вредности силе у опсегу еластичних деформација, а могу се израчунати по формули:

$$W(F_{\max}) = \frac{u_{lc} \cdot F_{\max}}{\sqrt{3}} \quad \text{и} \quad W(F_{\min}) = \frac{u_{lc} \cdot F_{\min}}{\sqrt{3}} \quad (4.16)$$

где је u_c неизвесност мерења силе, која се приписује претварачу силе уређаја за испитивање. Већа вредност неизвесности добијена на основу израза (4.14) и (4.16) се усваја за даљи прорачун.

Величина почетне дужине епрувете l_0 , са аспекта мерења и утицаја W_{l_0} на неизвесност модула еластичности W_E , је такође мање утицајна величина. Нека се почетна дужина епрувете мери са помичним кљунастим мерилом са тачношћу 0.2 mm. Користећи правоугаону расподелу [BIPM, 1995; W. Gabauer, 2000], неизвесност износи $W_{l_0} = 0.1$ mm, па ће неизвесност $\delta(l_0)$ бити:

$$\delta(l_0) = \frac{1}{l_0} \cdot W_{l_0} = \frac{1}{180} \cdot 0.1 = 5.5 \cdot 10^{-4} \quad (4.17)$$

Величина попречног пресека епрувете A_0 је утицајна величина, посебно када је реч о епруветама малог попречног пресека. За испитни узорак правоугаоног пресека, почетна површина дата је у функцији његове ширине и дебљине са $A_0 = w \cdot t$. Димензије су мерене дигиталним кљунастим мерилом. Неизвесности мерних инструмената преузете су из њихових калибрационих сертификата. Проширена неизвесност дигиталног мерила је износила 0.02 mm, тако да је његова стандардна неизвесност била 0.01 mm. Неизвесност W_{A_0} се може написати као израз комбиноване неизвесности [BIPM, 1995; F.A. Kandil, 2000]:

$$W_{A_0} = \sqrt{\left(\frac{\partial A_0}{\partial w}\right)^2 W_w^2 + \left(\frac{\partial A_0}{\partial t}\right)^2 W_t^2} = \sqrt{t^2 W_w^2 + w^2 W_t^2} \quad (4.18)$$

где су W_w и W_t неизвесности ширине и дебљине и износе $W_w = W_t = 0.01$ mm. У посматраном случају неизвесност површине попречног пресека епрувете, на основу израза (4.18), износи $W_{A_0} = 0.03$ mm², па неизвесност $\delta(A_0)$ износи:

$$\delta(A_0) = \frac{1}{A_0} \cdot W_{A_0} = \frac{1}{2} \cdot 0.03 = 1.5 \cdot 10^{-2} \quad (4.19)$$

Како би се одредила неизвесност мерења дебљине и ширине епрувете, могу се користити методе типа А и Б, а у даљем прорачуну усвојена је већа вредност добијених неизвесности, као што је дато у изразу (4.16) [S. Kłysz, 2008]:

$$W_w = 1.11 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2}{n(n-1)}} \quad (4.20)$$

где је \bar{w} средња вредност ширине епрувете добијена на основу n мерења, коришћењем t -Student-ове расподеле за ниво поузданости од 68.27%.

Неизвесност мерења горње Δ_{\max} и доње Δ_{\min} вредности издужења у еластичној области, која је утврђена на основу класе тачности екстензиометра или неких других техника мерења издужења, уз употребу методе типа Б (правоугаона расподела) може се написати као:

$$W_{\Delta l} = \sqrt{W^2(\Delta l_{\max}) + W^2(\Delta l_{\min})} \quad (4.21)$$

$$W(\Delta l_{\max}) = \frac{u_{\text{elon}} \cdot \Delta l_{\max}}{\sqrt{3}} \quad \text{и} \quad W(\Delta l_{\min}) = \frac{u_{\text{elon}} \cdot \Delta l_{\min}}{\sqrt{3}} \quad (4.22)$$

где је u_{elon} неизвесност услед одговарајуће класе тачности примењеног екстензиометра или других инструмената за мерење издужења.

За конкретни случај, на основу класе тачности инструмента за мерење издужења, неизвесност издужења је $W_{\Delta l} = 1.17 \mu\text{m}$, па неизвесност у функцији од издужења епрувете $\delta(\Delta l)$ износи:

$$\delta(\Delta l) = \frac{1}{\Delta l} \cdot W_{\Delta l} = \frac{1}{0.1285} \cdot 1.17 \cdot 10^{-3} = 9.1 \cdot 10^{-3} \quad (4.23)$$

У разматраном случају, текуће променљиве величине су сила F и издужење Δl . Улазне величине (l_0 , A_0) су познате, а неизвесности везане за мерну инструментацију (W_F , W_{l_0} , W_{A_0} и $W_{\Delta l}$) имају одређене вредности. Ако се величина Δl израчуна на основу израза (4.5):

$$\Delta l = \frac{F \cdot l_0}{A_0 \cdot E} \quad (4.24)$$

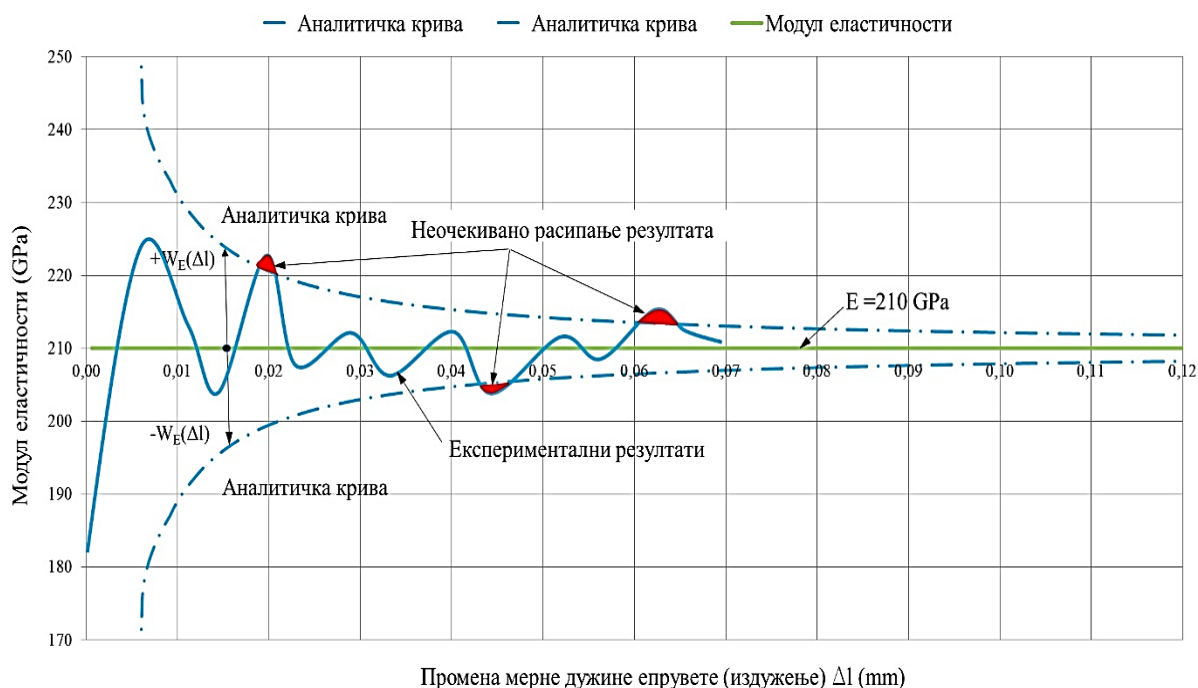
и уврсти у израз (4.9), добија се израз за прорачун W_E који ће бити функција само једне текуће променљиве, тј. тренутног издужења Δl [S. Kostić, 2021]:

$$W_E(\Delta l) = \frac{E}{\Delta l} \cdot \sqrt{\left(\frac{l_0}{E \cdot A_0}\right)^2 \cdot W_F^2 + \left(\frac{\Delta l}{l_0}\right)^2 \cdot W_{l_0}^2 + \left(\frac{\Delta l}{A_0}\right)^2 \cdot W_{A_0}^2 + W_{\Delta l}^2} \quad (4.25)$$

Претходни израз суштински дефинише аналитичке границе неизвесности модула еластичности у односу на референтне вредности E рачунате према изразу (4.5), односно интервал у коме се са датом вероватноћом налази права вредност мерене величине (4.25). Ова неизвесност одговара плус-минус једној стандардној девијацији у закону нормалне расподеле вредности проучаване величине. Комбинована неизвесност има повезан ниво поверења од 68.27%. То значи да се експериментално одређене вредности модула еластичности треба да се крећу у границама:

$$E_{\text{EXP}} = E \pm W_E(\Delta l) \quad (4.26)$$

На слици 4.5 приказан је пример аналитичких кривих неизвесности модула еластичности $W_E(\Delta l)$, на основу израза (4.25) и (4.26), са референтном вредношћу модула еластичности за испитивани материјал (на примеру $E = 210 \text{ GPa}$) као асимптотом кривих, као и један од могућих случајева експериментално одређених вредности модула еластичности $E_{\text{EXP}}(\Delta l)$.



Слика 4.5 Неочекивано расипање измереног модула еластичности; горња и доња аналитичка крива

Аналитички одређене криве неизвесности мерења рачунате према изразу (4.25) могу се сматрати граничним вредностима очекиваних расипања експериментално одређених вредности модула еластичности. Свако одступање резултата ван аналитичких кривих представља неочекивано расипање вредности мерене величине (црвеном бојом осенчене области на слици 4.5), ако се узме у обзир да је неизвесност мерења обухватила неизвесности настале услед геометрије испитиваних узорака и тачности мерне инструментације. Дакле, расипање резултата је последица неких других фактора који утичу на процес испитивања материјала [S. Kostić, 2021].

На расподелу мерних резултата око средње вредности утичу искључиво случајне грешке, ако се претпостави да су систематске грешке кориговане калибрационим поступком. Међутим, потпуна корекција систематских грешака је ретко могућа. Те преостале систематске грешке су разлог због којег је коначни резултат мерења увек неизвеснији него што показују изрази (4.25) и (4.26). Због преосталих систематских грешака границе поузданости средње вредности се проширују.

Приликом одређивања неизвесности затезне чврстоће такође се примењује прорачун по типу А или типу Б, израз (4.3), па се узима неповољнија, односно већа прорачуната вредност од ове две.

Када се користи метода типа А израз за прорачун неизвесности затезне чврстоће W_{R_m} је:

$$W_{R_m} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_m}{\partial F_m}\right)^2 W_{F_m}^2 + \left(\frac{\partial R_m}{\partial w}\right)^2 W_w^2 + \left(\frac{\partial R_m}{\partial t}\right)^2 W_t^2} \quad (4.27)$$

и након замена:

$$W_{R_m} = \sqrt{\left(\frac{1}{w \cdot t}\right)^2 W_{F_m}^2 + \left(\frac{-F_m}{w^2 \cdot t}\right)^2 W_w^2 + \left(\frac{-F_m}{w \cdot t^2}\right)^2 W_t^2} \quad (4.28)$$

где је F_m максимална сила затезања остварена у току испитивања, а R_m затезна чврстоћа материјала, израз (3.12), односно максимални напон који тај материјал може да издржи пре лома.

Избору геометријских величина испитиваног узорка (епрувете) треба посветити посебну пажњу. Са теоријског аспекта „идеални“ узорак би требао да буде што мањег попречног пресека на мерном делу епрувете и великог попречног пресека на прихватним деловима епрувете, чиме би било омогућено да се комплетна испитивања изврше при релативно малим силама затезања и релативно великим вредностима еластичних и пластичних деформација. С обзиром на радове из литературе [S.X. Li, 2007; A.V. Sergueeva, 2009; J.D. Lord, 2010; W.J. Yuan, 2012, 2013; D. Anand, 2014; K. Kumar, 2014; S. Nag, 2014], величину попречног пресека је рационално смањити до нивоа који неће представљати технолошки проблем израде саме епрувете и проузроковати грешку одступања димензија попречног пресека епрувете, што би на индиректан начин могло довести до одступања између познатих референтних вредности (карактеристика материјала познатих према стандардима) од вредности које се могу експериментално добити на кидалицама овог типа.

У складу са резултатима испитивања оптималних облика и геометријских параметара нестандардних епрувета из литературе, као и препорука за њихову обраду и израду, епрувете које ће се користити за испитивање материјала на затезање у овом раду имаће изглед дат на слици 4.8. Димензије епрувете правоугаоног попречног пресека могу варирати, у зависности од тога да ли се епрувете користе за испитивање на собним или повишеним и високим температурама, а условљене су технолошким решењем самог уређаја и коморе за загревање узорка.

4.3 УТИЦАЈ ЕЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦИЈА УЗОРКА (ЕПРУВЕТЕ) НА ТАЧНОСТ РЕЗУЛТАТА МЕРЕЊА МЕХАНИЧКИХ КАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИЈАЛА ИСПИТИВАЊЕМ ЗАТЕЗАЊЕМ

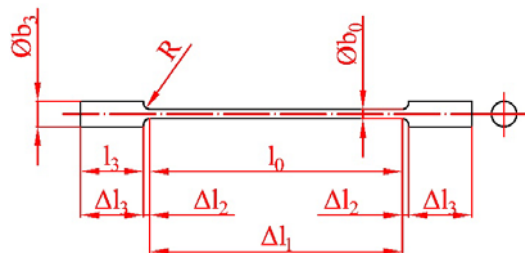
Као што је већ наглашено, код узорка малих попречних пресека и димензија, највећи проблем приликом испитивања затезањем представља тачно мерење еластичне деформације. Код стандардних узорка еластична деформација се са највећом тачношћу одређује уз помоћ екстензиометара, али код нестандардних узорка малих маса и запремина примена екстензиометра је отежана и најчешће се не примењује. Користе се друге методе за мерење еластичне деформације, као што су корелација дигиталне слике DIC, ласерска интерферометрија или се мерење деформације врши на основу мерења померања стезне чељусту уређаја за испитивање затезањем [S. Kostić, 2019]. Последња наведена техника не захтева додатну опрему и обраду података али се при мерењу могу јавити озбиљне грешке у зависности од геометрије узорка (епрувете) и његове величине. Равномерно издужење и издужење након формирања врата на епрувети приликом испитивања расте са смањењем мерне дужине и повећањем дебљине узорка. Експерименталне грешке у мерењима деформација добијене на основу мерења померања стезне чељусту уређаја приписују се попустљивости уређаја за испитивање (посебно рама конструкције) и деформацијама које настају у зонама радијуса епрувете. Поменуте

деформације се повећавају са повећањем дебљине и смањењем мерне дужине епрувете, посебно деформације настале након формирања врата при испитивању [Y.H. Zhao, 2009; A.V. Sergueeva, 2009; F.H. Akbary, 2013].

Како би се добила еластична деформација испитиваног узорка при мерењу померања стезне чељусту, мора се имати у виду да је измерено издужење епрувете укључило и издужење зона радијуса епрувете и издужење прихватног дела епрувете који се поставља у стезну чељуст уређаја, односно мора се узети у обзир попустљивост уређаја која је у функцији апликованог оптерећења током испитивања. Еластично издужење нестандарних, малих узорака је релативно мало, а попустљивост уређаја има значајан утицај на тачност мерења померања стезне чељусту приликом испитивања [S. Kostić, 2019]. Крутост машине зависи од крутости узорка и димензија, наводи се у ASTM стандарду [ASTM E8/E8M-09:2010]. Међутим, експериментална мерења крутости машине откривају да је крутост машине функција примењеног оптерећења и независна је од својстава узорка [S.R. Kalidindi, 1997]. Да би се видео тачан утицај деформација насталих у зонама радијуса епрувета малих димензија и у зонама прихвата епрувете са стезним чељустима уређаја (попустљивост уређаја у подсклоповима) на укупне деформације добијене приликом испитивања затезањем извршен је њихов прорачун и добијен аналитички модел. Одузимањем прорачунатих вредности издужења у зонама радијуса и прихвата епрувете од укупне вредности издужења добијене мерењем померања стезне чељусту уређаја може се извршити корекција те вредности и минимизирати грешка при добијању механичких карактеристика материјала.

4.3.1 ЕПРУВЕТА КРУЖНОГ ПОПРЕЧНОГ ПРЕСЕКА

Епрувета кружног попречног пресека за испитивање затезањем може се посматрати кроз следећих пет зона: мерна (паралелна) дужина Δl_1 , две зоне радијуса Δl_2 и две зоне за прихват епрувете у стезне чељусту уређаја Δl_3 , као што је дато на слици 4.6.



Слика 4.6 Димензије епрувете која се користи при испитивању затезањем

На слици 4.6 су дате димензије епрувете пре почетка испитивања, где су: l_0 - почетна мерна дужина епрувете, b_0 - почетни пречник епрувете, R - радијус епрувете, l_3 - почетна дужина зоне прихвата епрувете у стезној чељусту кидалице, b_3 - почетни пречник зоне прихвата епрувете у стезној чељусту кидалице.

Укупно издужење епрувете Δl_u после испитивања затезањем, као што се види на слици 4.6, може се написати као збир издужења свих пет зона епрувете:

$$\Delta l_u = \Delta l_1 + 2\Delta l_2 + 2\Delta l_3 \quad (4.29)$$

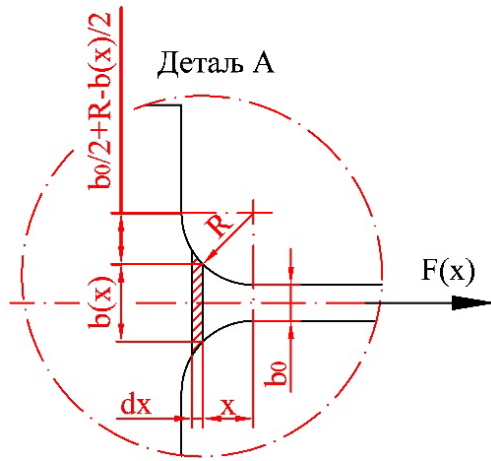
Издужење мерне дужине епрувете може се написати као:

$$\Delta l_1 = \frac{F \cdot l_0}{A_0 \cdot E} = \frac{F}{E} \cdot \frac{l_0}{\frac{b_0^2 \cdot \pi}{4}} = \frac{F}{E} \cdot c_1 \quad (4.30)$$

где је c_1 константа, која је у функцији димензија епрувете пре почетка испитивања затезањем.

$$c_1 = \frac{l_0}{A_0} = \frac{4 \cdot l_0}{b_0^2 \cdot \pi} \quad (4.31)$$

У зони радијуса посматра се издвојени мали део dx , на растојању x од тачке почетка радијуса из зоне паралелног дела епрувете ка зони прихвата епрувете, при чему је ширина епрувете у изабраном пољу радијуса $b(x)$, слика 4.7. На основу геометрије са слике, добија се израз који представља зависност промене ширине епрувете у зони радијуса од тренутне дужине x .



$$R^2 = \left(\frac{b_0 + 2R - b(x)}{2} \right)^2 + x^2$$

$$R^2 - x^2 = \left(\frac{b_0 + 2R - b(x)}{2} \right)^2$$

$$\sqrt{R^2 - x^2} = \frac{b_0 + 2R - b(x)}{2}$$

$$2\sqrt{R^2 - x^2} = b_0 + 2R - b(x)$$

$$b(x) = b_0 + 2R - 2\sqrt{R^2 - x^2}$$

Слика 4.7 Зона радијуса епрувете кружног попречног пресека

Издужење епрувете у зони радијуса:

$$\Delta l_2 = \Delta(x) = \int_{x=0}^{x=R} \varepsilon(x) \cdot dx = \int_{x=0}^{x=R} \frac{\sigma}{E} \cdot dx = \int_{x=0}^{x=R} \frac{F}{A(x) \cdot E} dx \quad (4.32)$$

Површина малог издвојеног дела може се израчунати по изразу (4.33)

$$A(x) = \frac{b(x)^2 \cdot \pi}{4} = \frac{\left[b_0 + 2 \left(R - \sqrt{R^2 - x^2} \right) \right]^2 \cdot \pi}{4} \quad (4.33)$$

$$A(x) = \frac{\pi}{4} \left[b_0^2 + 4b_0R + 8R^2 - \sqrt{R^2 - x^2}(4b_0 + 8R) - 4x^2 \right]$$

Заменом израза (4.33) у израз (4.32) добија се израз где ће решење интеграла дати укупно издужење у зони радијуса епрувете:

$$\Delta l_2 = \int_{x=0}^{x=R} \frac{4 \cdot F \cdot dx}{\left[b_0^2 + 4b_0R + 8R^2 - \sqrt{R^2 - x^2}(4b_0 + 8R) - 4x^2 \right] \cdot \pi \cdot E} \quad (4.34)$$

Даље следи решавање интеграла:

$$\Delta l_2 = \frac{4 \cdot F}{E \cdot \pi} \int_{x=0}^{x=R} \frac{dx}{\left[b_0^2 + 4b_0R + 8R^2 - \sqrt{R^2 - x^2}(4b_0 + 8R) - 4x^2 \right]} \quad (4.35)$$

Ако интеграл означимо са I_0 израз (4.35) можемо написати као:

$$\Delta l_2 = \frac{4 \cdot F}{E \cdot \pi} \cdot I_0 \quad (4.36)$$

Решавање интеграла I_0 започиње увођењем смене из израза (4.37):

$$\begin{aligned} x = R \sin t &\rightarrow \sin t = x/R \rightarrow t = \sin^{-1} x/R \\ dx &= R \cos t \cdot dt \end{aligned} \quad (4.37)$$

$$R^2 - x^2 = R^2 - R^2 \sin^2 t = R^2 \cos^2 t \rightarrow \sqrt{R^2 - x^2} = R \cos t$$

да би се дошло до коначног решења:

$$I_0 = \frac{4R^2}{b_0^{\frac{3}{2}}(b_0 + 4R)^{\frac{3}{2}}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0 + 4R}{b_0}} + \frac{R}{b_0[b_0 + (b_0 + 4R)]} + \frac{R}{(b_0 + 4R)[b_0 + (b_0 + 4R)]} \quad (4.38)$$

Комплетно решавање интеграла налази се у Прилогу 1 рада.

Заменом израза (4.38) у израз (4.36) добија се израз по коме може да се прорачуна издужење епрувете у зони радијуса приликом испитивања материјала затезањем:

$$\Delta l_2 = \frac{4 \cdot F}{E \cdot \pi} \cdot \left[\frac{4R^2}{b_0^{\frac{3}{2}}(b_0 + 4R)^{\frac{3}{2}}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0 + 4R}{b_0}} + \frac{R}{b_0[b_0 + (b_0 + 4R)]} + \frac{R}{(b_0 + 4R)[b_0 + (b_0 + 4R)]} \right] \quad (4.39)$$

Издужење епрувете у зони њеног радијуса може се представити изразом (4.40), при чему је c_2 константна вредност, у функцији димензија епрувете пре почетка испитивања затезањем.

$$\Delta l_2 = \frac{F}{E} \cdot c_2 \quad (4.40)$$

Константа c_2 се може написати у облику израза (4.41)

$$c_2 = \frac{4R}{\pi} \cdot \left[\frac{4R}{b_0^{\frac{3}{2}}(b_0 + 4R)^{\frac{3}{2}}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0 + 4R}{b_0}} + \frac{1}{b_0[b_0 + (b_0 + 4R)]} + \frac{1}{(b_0 + 4R)[b_0 + (b_0 + 4R)]} \right] \quad (4.41)$$

Издужење епрувете у зони прихвата епрувете, односно на њеним крајевима може се приказати изразом (4.42):

$$\Delta l_3 = \frac{F \cdot l_3}{A_3 \cdot E} = \frac{F}{E} \cdot \frac{l_3}{\frac{b_3^2 \cdot \pi}{4}} = \frac{F}{E} \cdot c_3 \quad (4.42)$$

При чему је констата c_3 једнака:

$$c_3 = \frac{4 \cdot l_3}{b_3^2 \cdot \pi} \quad (4.43)$$

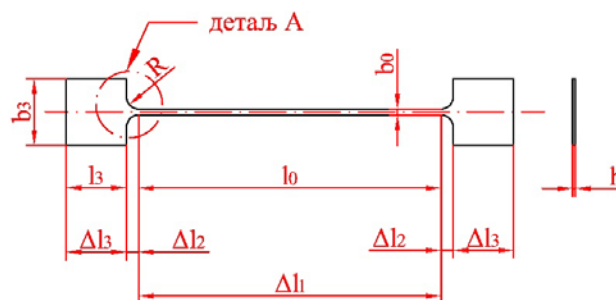
Укупно издужење епрувете Δl_u , као што је приказано на слици 4.6, представља збир свих издужења појединачних зона епрувете, представљених изразима (4.30), (4.40) и (4.42):

$$\Delta l_u = \Delta l_1 + 2\Delta l_2 + 2\Delta l_3 = \frac{F}{E} \cdot (c_1 + 2c_2 + 2c_3) \quad (4.44)$$

Дакле, укупно издужење епрувете зависи од геометријских карактеристика епрувете, модула еластичности материјала који се испитује и силе затезања у току испитивања.

4.3.2 ЕПРУВЕТА ПРАВОУГАОНОГ ПОПРЕЧНОГ ПРЕСЕКА

Епрувета правоугаоног попречног пресека за испитивање материјала затезањем, као и епрувета кружног попречног пресека, може се посматрати кроз пет зона: мерна (паралелна) дужина Δl_1 , две зоне радијуса Δl_2 и две зоне за прихват епрувете у стезној чељусти уређаја Δl_3 .



Слика 4.8 Димезије епрувете правоугаоног попречног пресека која се користи при испитивању затезањем

На слици 4.8 су дате димезије епрувете пре почетка испитивања, где су: l_0 - почетна мерна дужина епрувете, b_0 - почетна ширина мерног дела епрувете, h - почетна дебљина епрувете, R - радијус епрувете, l_3 - почетна дужина зоне прихвата епрувете у стезној чељусти кидалице, b_3 - почетна ширина зоне хватања епрувете у стезној чељусти кидалице.

Укупно издужење епрувете Δl_u после испитивања затезањем, као што се види на слици 4.8, може се написати као збир издужења свих пет зона епрувете по изразу (4.29).

Издужење мерне дужине епрувете Δl_1 може се написати као:

$$\Delta l_1 = \frac{F \cdot l_0}{A_0 \cdot E} = \frac{F}{E} \cdot \frac{l_0}{b_0 \cdot h} = \frac{F}{E} \cdot c_1 \quad (4.45)$$

где су: A_0 почетна површина попречног пресека епрувете у паралелној зони дужине l_0 , c_1 константа, која је у функцији димезија епрувете пре почетка испитивања затезањем.

$$c_1 = \frac{l_0}{A_0} = \frac{l_0}{b_0 \cdot h} \quad (4.46)$$

Како би се добио аналитички израз за издужење епрувете у зони радијуса, посматраће се детаљ А, на слици 4.8. Као и код епрувете са кружним попречним пресеком, детаљ А и геометрија издвојеног делића dx у зони радијуса су идентични епрувети са правоугаоним попречним пресеком, слика 4.7.

Тако се издужење епрувете у зони радијуса може написати по изразу (4.32).

Површина малог издвојеног дела $A(x)$ у зони радијуса епрувете добија се из израза (4.47):

$$A(x) = b(x) \cdot h = \left[b_0 + 2 \left(R - \sqrt{R^2 - x^2} \right) \right] \cdot h \quad (4.47)$$

Заменом израза (4.47) у израз (4.32) добија се израз (4.48), где се интеграцијом може доћи до израза за укупно издужење у зони радијуса епрувете:

$$\Delta l_2 = \int_0^R \frac{F \cdot dx}{\left[b_0 + 2 \left(R - \sqrt{R^2 - x^2} \right) \right] \cdot h \cdot E} \quad (4.48)$$

односно

$$\Delta l_2 = \frac{F}{E \cdot h} \int_{x=0}^{x=R} \frac{dx}{\left[b_0 + 2 \left(R - \sqrt{R^2 - x^2} \right) \right]} \quad (4.49)$$

Обележавањем интеграла из израза (4.49) са I_0 , добијају се изрази (4.50) и (4.51):

$$\Delta l_2 = \frac{F}{E \cdot h} \cdot I_0 \quad (4.50)$$

$$I_0 = \int_{x=0}^{x=R} \frac{dx}{\left[b_0 + 2 \left(R - \sqrt{R^2 - x^2} \right) \right]} \quad (4.51)$$

Решавање интеграла I_0 започиње увођењем смене из израза (4.37), тако да се добија коначан израз:

$$I_0 = -\frac{\pi}{4} + \frac{(b_0 + 2R)}{\sqrt{b_0} \cdot \sqrt{b_0 + 4R}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0 + 4R}{b_0}} \quad (4.52)$$

Комплетно решавање интеграла налази се у Прилогу 1 рада.

Заменом израза (4.52) у (4.50), добија се израз за издужење у зони радијуса епрувете:

$$\Delta l_2 = \frac{F}{E \cdot h} \cdot I_0 = \frac{F}{E \cdot h} \cdot \left[-\frac{\pi}{4} + \frac{(b_0 + 2R)}{\sqrt{b_0} \cdot \sqrt{b_0 + 4R}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0 + 4R}{b_0}} \right] \quad (4.53)$$

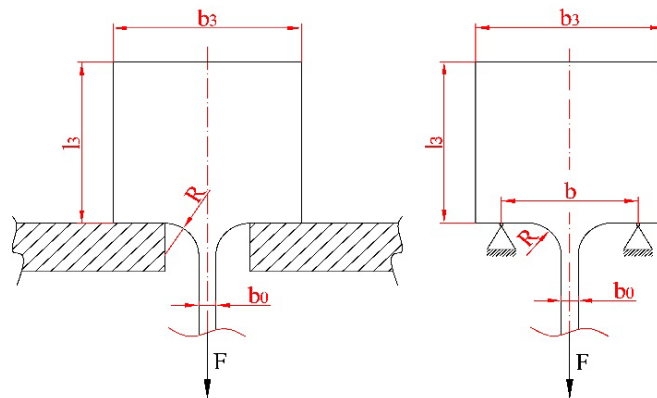
Издужење у зони радијуса епрувете може се представити изразом (4.54), при чему је c_2 константна вредност, у функцији димензија епрувете пре почетка испитивања затезањем:

$$\Delta l_2 = \frac{F}{E} \cdot c_2 \quad (4.54)$$

Константа c_2 се може одредити уз помоћ израза (4.55):

$$c_2 = \frac{1}{h} \cdot \left[-\frac{\pi}{4} + \frac{(b_0 + 2R)}{\sqrt{b_0} \cdot \sqrt{b_0 + 4R}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0 + 4R}{b_0}} \right] \quad (4.55)$$

Издужење епрувете на њеним крајевима, односно у зони прихвата епрувете може се приказати помоћу слике 4.9.



Слика 4.9 а) Зона прихвата епрувете б) Апроксимативни приказ зоне прихвата епрувете

Места ослањања и прихвата епрувете у стезној чељусти кидалице се могу апроксимативно приказати као тачке ослонаца постављене на средини ослоњене зоне епрувете. Тако се може доћи до израза за израчунавање максималног еластичног угиба епрувете у тој зони, који ће бити у правцу осне линије и правцу дејства силе.

$$f = \Delta l_3 = \frac{F \cdot b^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (4.56)$$

где је b растојање између ослонаца, а I момент инерције правоугаоног попречног пресека на том делу епрувете. Угиб епрувете заправо представља потенцијално издужење зоне прихвата епрувете приликом испитивања затезањем.

Са слике 4.9 се може добити израз за растојање између ослонаца: $b = \frac{b_3 + b_0 + 2R}{2}$.

Момент инерције за правоугаони попречни пресек епрувете дат је изразом (4.57):

$$I = \frac{l_3^3 \cdot h}{12} \quad (4.57)$$

Издужење у зони прихвата епрувете у стезне чељусти кидалице може се написати:

$$\Delta l_3 = \frac{F \cdot b^3 \cdot 12}{48 \cdot E \cdot l_3^3 \cdot h} = \frac{F}{E} \cdot c_3 \quad (4.58)$$

При чему је констата c_3 једнака:

$$c_3 = \frac{b^3}{4 \cdot l_3^3 \cdot h} \quad (4.59)$$

Укупно издужење епрувете Δl_u добија се на основу израза (4.44), где су константе c_1 , c_2 и c_3 представљене изразима (4.46), (4.55) и (4.59), респективно. Укупно издужење епрувете зависи од геометријских карактеристика епрувете, модула еластичности материјала који се испитује и силе затезања у току испитивања.

На основу аналитичког израза (4.44) за укупно издужење епрувете Δl_u могу се детаљно прорачунати вредности издужења у појединачним зонама епрувете и на тај начин видети њихови утицаји на укупно измерено издужење. Издужење епрувете у зони прихвата у стезним чељустима заправо представља попуштање стезних чељусти, о чему је већ било речи, што директно узрокује грешке мерења механичких карактеристика материјала. Ово се посебно односи на мерење модула еластичности, где су издужења у области еластичних деформација епрувете јако мала, па попустљивост у стезним чељустима уређаја и епрувете може довести до озбиљних грешака у експериментално одређеним вредностима ове величине.

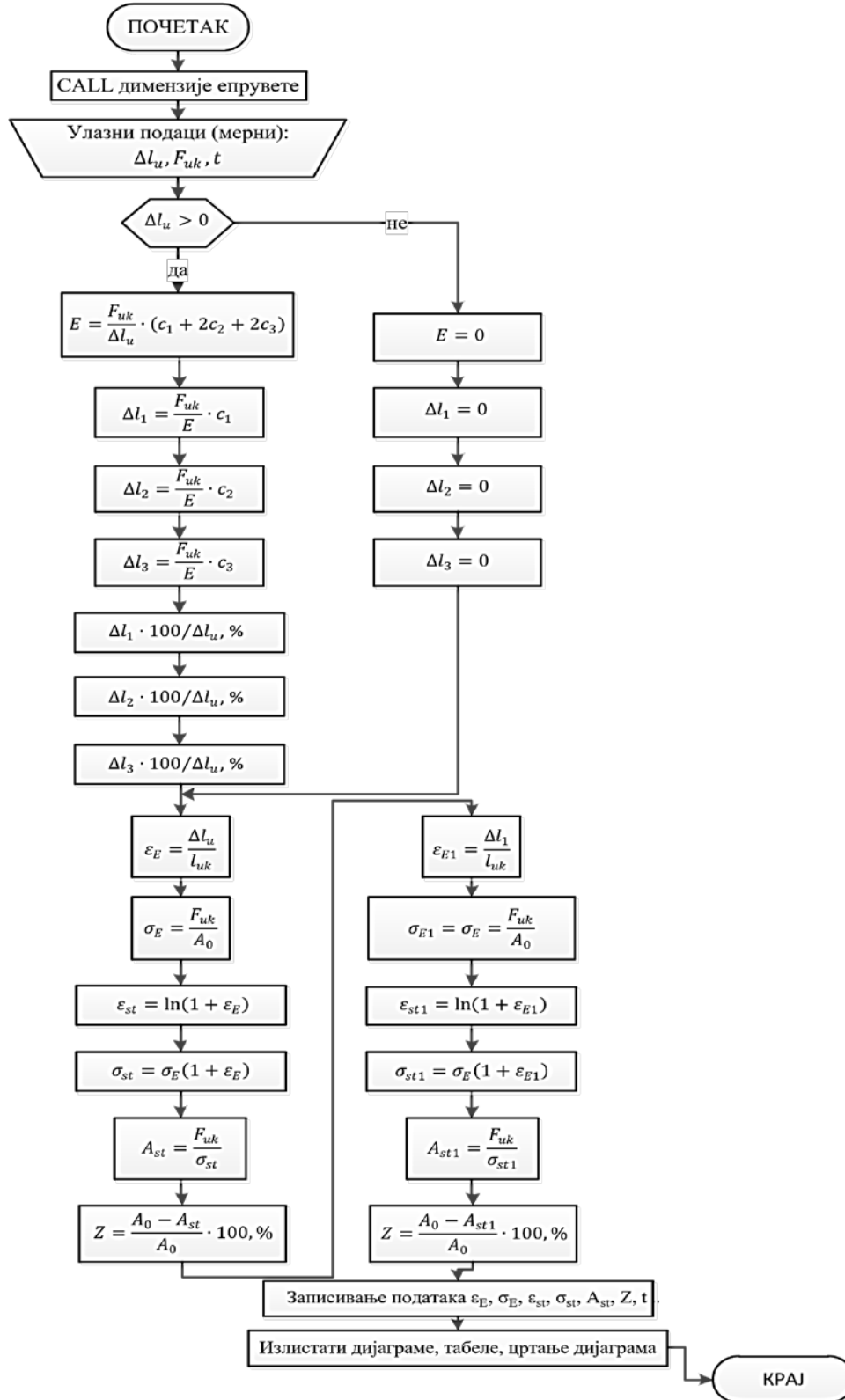
На основу приказаних аналитичких решења издужења епрувете нестандарног облика, може се направити алгоритам који ће представљати основу за развој софтвера, који ће бити имплементиран у уређај за испитивање затезањем. Он ће омогућити аутоматску детекцију стварних напона и издужења у назначеним зонама епрувете, као и могућност приказа дијаграма стварних напона и деформација, контракције попречног пресека, и др.

4.3.3 АЛГОРИТАМ ЗА РАЗВОЈ СОФТВЕРА

На слици 4.10 приказан је алгоритам по коме ће бити развијен јединствени софтвер за малу лабораторијску кидалицу.

Величине дате у алгоритму су ϵ_E - номинална (техничка) деформација, l_{uk} - збир почетне дужине мерне (паралелне) зоне епрувете и зоне радијуса епрувете, σ_E - номинални (технички) напон, A_0 - почетни попречни пресек епрувете, ϵ_{st} - стварна деформација, израз (3.22), σ_{st} - стварни напон, израз (3.17), A_{st} - стварни попречни пресек епрувете, Z - контракција (процентуално сужење) попречног пресека епрувете током испитивања до лома. F_{uk} представља силу затезања током испитивања материјала.

Након прорачуна напона и деформација на основу укупно измереног издужења до лома епрувете приликом испитивања затезањем, врши се прорачун напона σ_{E1} и деформација ε_{E1} мерне дужине епрувете. Даље се прорачунавају стварни напони σ_{st1} и деформације ε_{st1} настале у епрувети на њеној мерној дужини, као и стварни попречни пресек A_{st1} и контракција попречног пресека Z у назначеној зони епрувете.

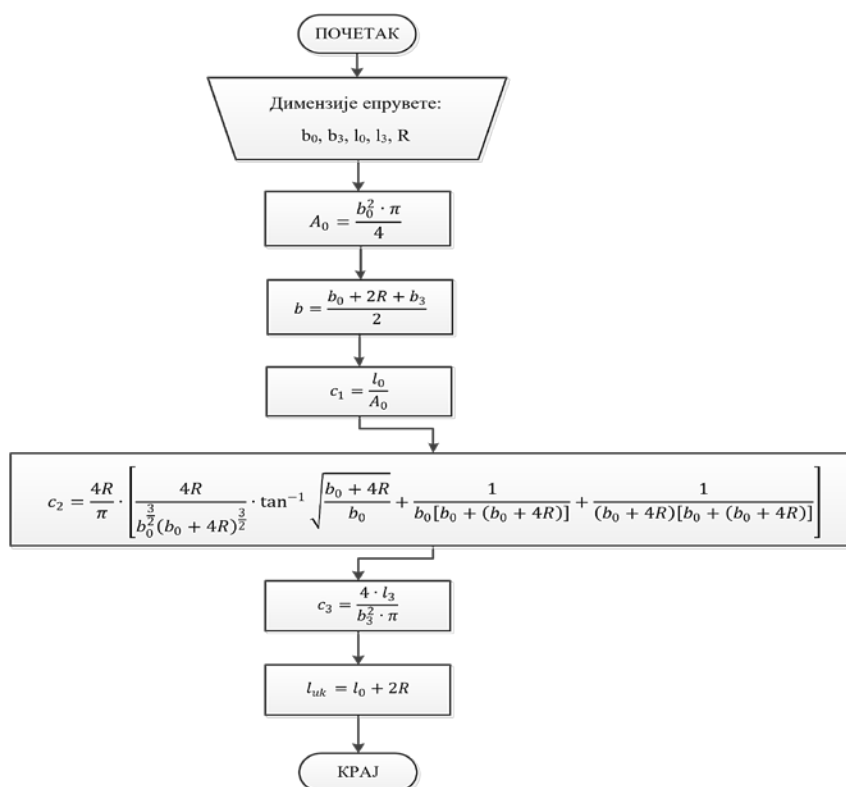


Слика 4.10 Главни алгоритам за развој софтвера [S. Kostić, 2019]

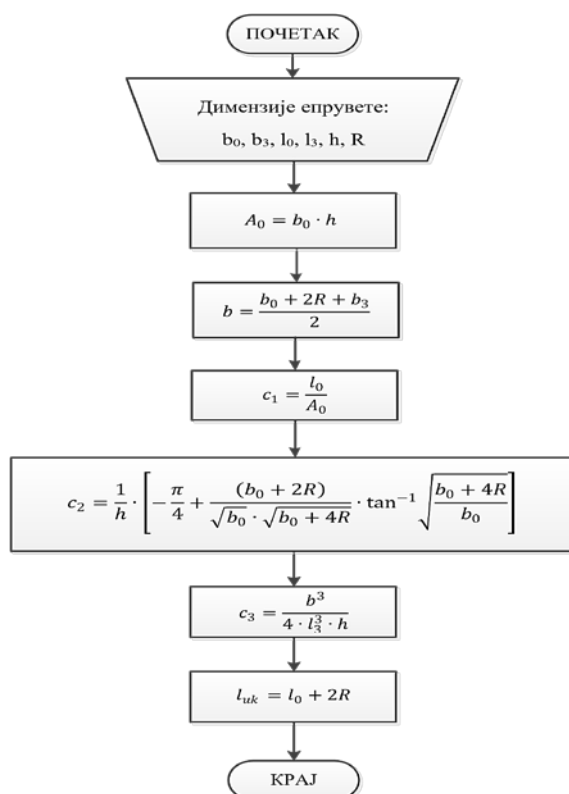
Карактеристике материјала (модул еластичности, Poisson-ов коефицијент) се одређују експериментално, на основу измерених сила и издужења у одговарајућим тачкама. Стварне напоне у материјалу је тешко регистровати, поготову са настајањем већих трајних деформација, с обзиром на то да се површина попречног пресека у току самог испитивања непрекидно мења. Међутим ако се силе сведу на тренутни, увек све мањи и највише деформисани попречни пресек, добиће се стварна крива затезања која показује стални пораст напона са смањењем пресека епрувете. Из претпоставке константне запремине епрувете која се испитује затезањем, долази се до израза стварних напона и деформација датим у алгоритму.

Алгоритам је креиран тако да се излазни подаци након испитивања материјала појављују у облику табела и дијаграма. На основу излистаних података и извршеног прорачуна могу се јасно видети релативни удели деформација по зонама епрувете, односно колики је удео деформација у зони радијуса и зони прихвата епрувете. У оквиру алгоритма је и део прорачуна који врши израчунавање стварних напона и деформација само на мерном делу епрувете, јер се у неким случајевима испитивања жели занемарити постојећи али релативно мали удео деформација које се јављају у зонама радијуса епрувете или зонама прихвата епрувете у стезне чељусти уређаја.

Узорци (епрувете) за испитивање материјала затезањем на малој лабораторијској кидалици су нестандардни, а њихове геометријске карактеристике и облик прилагођени су уређају на којем се врши испитивање. Могу бити правоугаоног или кружног попречног пресека, тако да у главном алгоритму за прорачун постоје два помоћна алгоритма, који омогућавају унос одговарајућих димензија епрувете и њихов комплетан прорачун у зависности од облика површине попречног пресека епрувете. Помоћни алгоритми приказани су на сликама 4.11 (за епрувете са кружним попречним пресеком) и 4.12 (за епрувете са правоугаоном попречним пресеком).



Слика 4.11 Помоћни алгоритам за прорачун константи код епрувета кружног попречног пресека



Слика 4.12 Помоћни алгоритам за прорачун константи код епрувета правоугаоног попречног пресека

4.4 ИСПИТИВАЊЕ УЗОРАКА ОД ПОЛИПРОПИЛЕНА НА МАЛОЈ ЛАБОРАТОРИЈСКОЈ КИДАЛИЦИ

Сложена напонска стања која се јављају приликом затезања челичних ужади су разматрана у литератури [J. Wu, 2014; K. Feurer, 2015; W. Wu, 2016]. Када су оптерећене на затезање, жице у челичном ужету се издужеју и скупљају. Струкови у ужету ће се повијати попут жица у струковима у аксијалном правцу ужета. Жице се међусобно померају у радијалном правцу (ка језгру), под утицајем савијања његових струкова. Између жица долази до појаве трења, које изазива секундарно оптерећење жица на затезање. Како се повећава сила затезања у ужету, повећава се секундарна сила затезања у струковима ужета, од споља ка унутрашњости. Она делује у супротном смеру од смера издужења. Издужење је ограничено на половину дужине жица у струку. Резултујућа сила затезања жице је већа од средње силе затезања језгра ужета и мања од силе која се јавља у спољним деловима ужета. Сила изазвана трењем, односно секундарна сила затезања, може бити затезна или притисна. Она мења свој смер када се сила затезања ужета смањује тако да је резултујућа сила затезања жица у унутрашњости мања, а у спољним деловима већа од средње силе затезања жице. Секундарна сила затезања изазвана трењем у ужету оптерећеним на затезање може достићи знатну вредност [K. Feurer, 2015].

Стварни напони жице у неком слоју ужета k су σ_{tk} , док је укупни напон ужета који се јавља услед оптерећења затезањем σ_z . Стварни напони жице σ_{tk} су већи од напона на затезање ужета σ_z . Поред напона на затезање, жице у ужету под дејством силе затезања су изложене напонима на савијање и увијање, а обично и незнатном притиску. Напони који се јављају у појединачним жицама се разликују услед различитих углова жица по слојевима и струкова по слојевима (систематично), јер жице и струкови врло често

лабаво леже у основи ужета и не почињу да преузимају оптерећење од почетка његовог дејства (несистематично) [K. Feurer, 2015]. Несистематична радна напрезања могу у неким случајевима бити већа од систематичних. Не могу се израчунати, али се може посматрати њихов утицај на издржљивост ужета под променљивим силама затезања. Како би се израчунали напони у ужету уводе се претпоставке да је уже савршене геометрије, да су жице без заосталих напона, да ниједна жица није лабава, већ да преузима оптерећење чим почне да делује, као и да сва напрезања остају у еластичном подручју.

Сазнања стечена из те области могу се применити на феномене који се јављају приликом затезања синтетичких ужади и везива.

Унутар-молекуларна структура полимера омогућава молекулима да се лако окрећу око своје осе, пружајући молекулима способност савијања и покретљивости; врло слаба интер-молекуларна Van der Waals-ова веза је одговорна за флексибилност на молекуларном нивоу као и макро нивоу везива [M.R. O'Masta, 2014].

Услед спољашњег напрезања материјала као што су термопласти, може доћи до прекида влакана пуцањем хемијских веза у полимерном ланцу или до проклизавања ланаца у самој структури. Доминантни механизам отказа влакна под напоном затезања је клизање молекула или групе молекула (микро влакна), а не ломљење (прекидање) молекула. [L. Govaert, 1995].

Напони који се јављају у јединичној ћелији влакнастог материјала у везиву се заправо могу поредити са напонима који се јављају у жицама челичног ужета. Питање које се јавља при овој анализи је која компонента у везиву је еквивалент жици у челичном ужету: нит, нити у прамену (струку) или струкови у везиву, како је наведено у табели 4.1 [P. Wang, 2017].

Табела 4.1 Сличности и разлике предива и челичног ужета

Саставни део предива	Сличности са жицама	Разлике са жицама
нити	и жица и влакнаста нит су основни, недељиви састојци ужета	пречник нити влакна је нормално 10-30 μm док је пречник жице у опсегу mm.
нити у прамену (струку)	и жице и нити у прамену (струку) су сировине које произвођачи ужета набављају	жица не садржи више компоненти у поднивоима, док нити у прамену (струку) обично имају неколико стотина, па чак и неколико хиљада.
струкови у везиву (уплетено/сложено предиво)	величине нити у прамену и жице су врло блиске и у многим ужадима су компоненте које се користе за израду струка. Када се изводи тест након увртања или након сервисног прегледа, струк ужади је често последњи ниво на који се расплиће уже.	жица не садржи више компонената у поднивоима, док влакнаста ужад често имају два поднивоа саставних делова: струк и нити.

Ранија истраживања која су се бавила предвиђањем чврстоће идеалног везива разматрала су структуру везива као нити коначне дужине и одређене чврстоће. За дати коефицијент трења међу нитима и угао увијања површине, чврстоћа везива је зависила од прве нити која откаже, а то је централна нит. Даље повећање деформација водило је ка каскадним отказима нити који су се ширили ка спољашњем делу водећи ка потпуном колапсу. Р. Rogwal и сарадници (2007) објашњавају да се деформације које настају при максималној затезној чврстоћи и деформације при прекиду повећавају за све снопове нити у односу на вредности деформација појединачних нити. Не пуцају сви филаменти истовремено при напрезању затезањем. Једно од најзначајнијих побољшања у моделирању снопова влакана направили су Р. Rogwal и сарадници (2007), укључивањем ефеката трења и притиска, где се при оптималном углу увијања постиже максимум затезне чврстоће, чије се вредности одлично слажу са експерименталним резултатима.

У свом раду D. Durville (2010) симулира понашање узорака тканина, где се посебна пажња посвећује откривању и моделирању интеракција контактнoг трења које се јавља између влакана. 3D симулација је рађена FEM-ом и може бити врло корисна за проучавање утицаја различитих пројектних параметара на механичко понашање текстилних тканина. T.D. Vu и D. Durville са сарадницима (2015) настављају истраживање механичког понашања уплетених ужади моделом коначних елемената. Приступ има за циљ одређивање механичке равнотеже такве структуре, посматране као склоп влакана која се издужују приликом затезања и између којих се развијају интеракције контакт-трење.

Струк влакана или увијени снап нити се најчешће представља геометријским моделом идеалне завојнице [J. Hearle, 1969], у којој су влакна распоређена у концентричне слојеве, пратећи завојне путање исте угаоне оријентације. Површински слој има највећи угао завојнице (односно угао завојнице површине α_s), док слојеви по дубини везива имају постепено мање углове завојнице, све до централног влакна које је равно. Даље, влакна у овој идеалној структури нису деформисана или савијена, што би морао бити случај ако се узима да влакна у различитим концентричним слојевима имају дужине једнаке дужинама завојних путања струкова. У пракси, постизање ове уједначености у дугачком предиву које је аутоматски увијено у производном процесу захтева феномен миграције. Током миграције, гледано дуж влакна у струку, влакна се радијално померају од једног слоја до другог по дужини везива, при чему је веома повољан коефицијент облика l/d . Овај коефицијент представља однос између дужине везива l и његовог пречника d и карактеристичне дужине у близини кидања влакана где се врши пренос напона. Када је таква идеална завојна структура под спољним затезним оптерећењем, деформације влакана су највеће дуж осе везива а најмање у најудаљенијем слоју.

Било је разних студија торзије у челичним жичаним ужадима [I.M.P. Ridge, 2009]. Ефекте деформације настале увијањем на својства жице изложене затезању истраживали су N. Guo и сарадници (2013). „Деформација пред-увијањем“ настајала је увртањем челичних жица на различити број обртаја пре затезања. Показало се да се затезна чврстоћа смањује услед деформација насталих услед торзије, односно смичући напон (торзијски напон) проузрокује смањење крајње затезне чврстоће за неки проценат.

Врло мало истраживања има у области увијања синтетичких везива и ужади. Увијање везива доводи и до јачања и до слабљења утицаја деформација на њену чврстоћу [P. Davies, 2007]. Под малим угловима завојнице површине, повећава се радијални притисак у предиву, што такође доводи до бржег опоравка од спољашњег напона затезања дуж влакана близу прелома што даље доводи до укупног јачања предива. При већим угловима

завојнице површине, ефекти закошености у влакнима постају доминантни, јер компонента напрезања влакана која доприноси чврстоћи је сразмерна квадрату косинуса угла завојнице путање влакана. Свеукупни збир свих компоненти напона се смањује како се повећава угао завојнице површине. Због ова два опречна ефекта постоји ниво увијања, који се назива оптимално увијање, где се постиже максимална чврстоћа везива. Оптимални ниво увијања и максимална чврстоћа такође зависе од различитих својстава саставних делова [J. Hearle, 1969].

Одавно је познато да увијање везива побољшава снагу кратких влакнастих материјала. Нити састављене од кратких влакана увијањем се држе заједно. Увијање струкова везива даје непрекидну целовитост предиву и приморава појединачна влакна да се понашају као јединствена целина. За конвенционална влакна попут најлона и полиестера, користи се благи ниво увијања јер увијање смањује критична својства предива [Y. Rao, 2000].

B. Sanborn и сарадници (2015) су показали да затезна чврстоћа влакна не зависи од мерне дужине узорка, као и да се расподела свих критичних недостатака у влакну може одредити на узорку мерне дужине мање од 5 mm. То указује да зависност затезне чврстоће од мерне дужине узорка ужета мора имати друге утицајне факторе, на пример варијацију у дужини нити и струкова или механичка оштећења на њима.

Када у процесу испитивања затезањем једно влакно пукне, оптерећење које је оно претходно носило се прерасподељује између целих влакана. Ако комплетно везиво са паралелним (неувијаним) сноповима поделимо на идеалне зоне које преносе оптерећење, то би могло да изгледа овако: једнако дељење оптерећења ELS (*енг.* Equal Load Sharing), глобално дељење оптерећења GLS (*енг.* Global Load Sharing) и локално дељење оптерећења LLS (*енг.* Local Load Sharing). Код ELS-а се оптерећење покиданог влакна губи дуж целе дужине влакна између стезних чељусти и прерасподељује подједнако између целих влакана. Код GLS-а се оптерећење покиданог влакна локално губи на месту прекида, али се постепено обнавља при дужини l_f од тачке пуцања преко трења које се јавља између влакана услед смичућих сила. Ту се јавља тзв. зона опоравка, чија дужина износи $2l_f$. У било ком попречном пресеку влакана у зони опоравка, разлика између напона влакана пре кидања и напона у тренутку прекида се равномерно распоређује међу целим влакнима у том пресеку. Код LLS-а изгубљено оптерећење из покиданог влакна се локално прерасподељује међу најближим суседним влакнима према разним могућим правилима [P. Porwal, 2007]. Код увијеног предива, у близини прекида влакана прерасподела оптерећења се врши услед трења које се јавља између влакана која клизају.

Мала торзиона крутост влакнастих ужади пружа мали отпор окретању око осе ужета или увијању, у поређењу са челиком, што може изменити перформансе ужади и ограничити примену. Плетени конопи се често бирају јер су уравнотежени обртним моментом, тако да чисто затезање не би требало да изазове ротацију (за разлику од неких других мање уравнотежених увијених конструкција), али асиметрија у преношењу оптерећења и неправилна оптерећења у радним условима могу да индукују промену.

Приликом увијања везива и његовог оптерећења затезањем у увијеном снопу нити јавља се трење и развија притисак, слика 4.13. У том случају, покидана влакна у било ком слоју везива могу да развијају напон услед сила трења до максималног нивоа одређеног издужењем влакна и стога потенцијално поново пукну на неком другом месту по њиховој дужини.

На слици 4.13 приказано је полипропиленско везиво изложено затезању. Максимални угао завојнице се може израчунати из израза [Н.А. McKenna, 2004]:

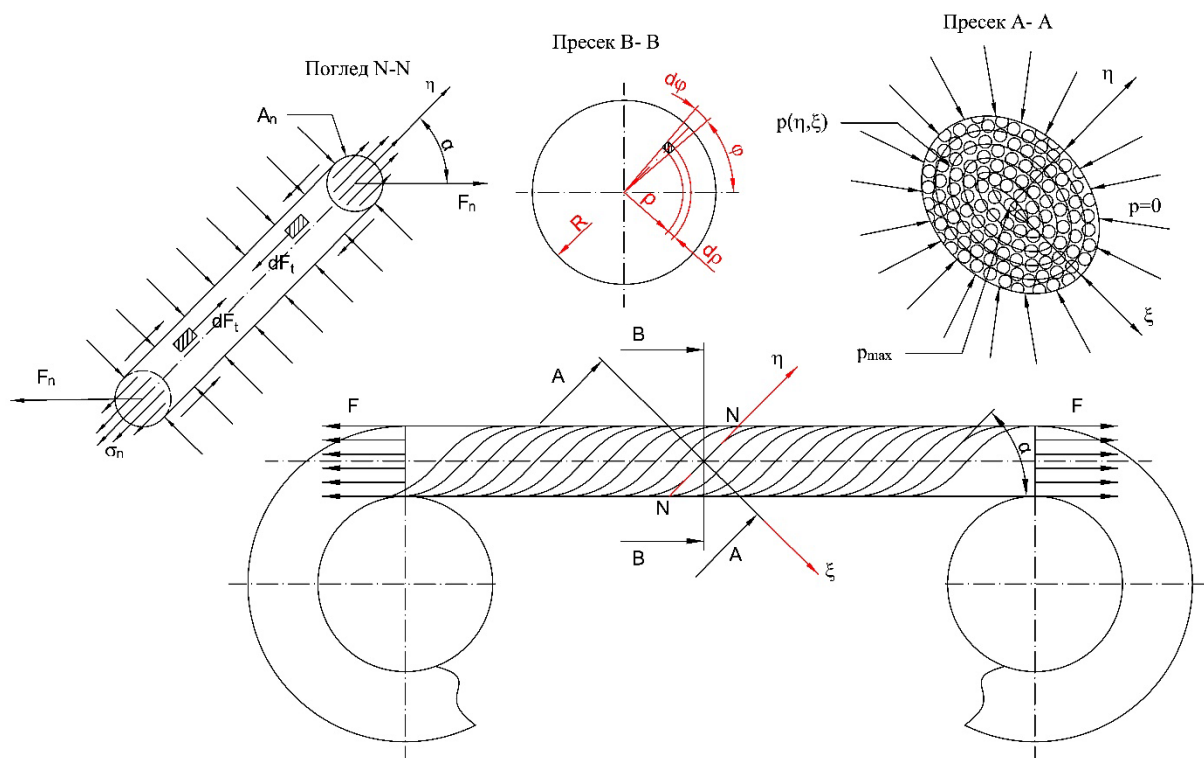
$$\tan \alpha_{\max} = \frac{h}{2 \cdot r \cdot \pi} = c \quad (4.60)$$

где су α_{\max} максимални угао завојнице, h корак завојнице, r полупречник везива, c - константа.

Произвољни угао завојнице нити удаљене од осе везива за величину ρ може се представити као:

$$\tan \alpha = \frac{h}{2 \cdot \rho \cdot \pi} \quad (4.61)$$

где је ρ величина која се креће у распону од 0 до $r = d/2$.



Слика 4.13 Полипропиленско везиво изложено затезању

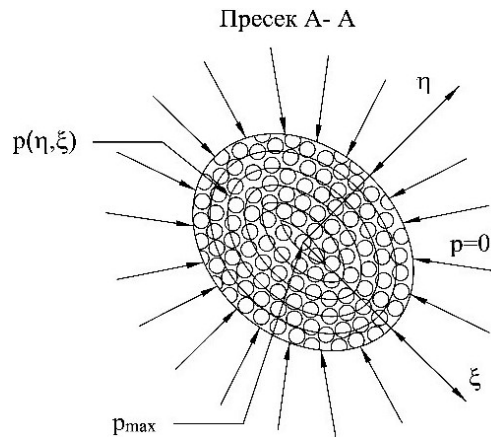
Заменом израза (4.60) у израз (4.61) може се добити зависност произвољног угла завојнице од максималног угла завојнице:

$$\tan \alpha = \frac{r}{\rho} \cdot \tan \alpha_{\max} \rightarrow \alpha = \arctg \left(\frac{r}{\rho} \cdot \tan \alpha_{\max} \right) \quad (4.62)$$

На слици 4.13. је дата шема везива које се испитује на затезање при дејству спољашњих сила F - F на затезним чељустима кидалице. Пресек А-А на слици 4.13 приказује расподелу притиска у влакнима везива приликом испитивања затезањем. Посматрајући распоред притиска од спољашњег ка унутрашњим влакнима везива притисак се мења од

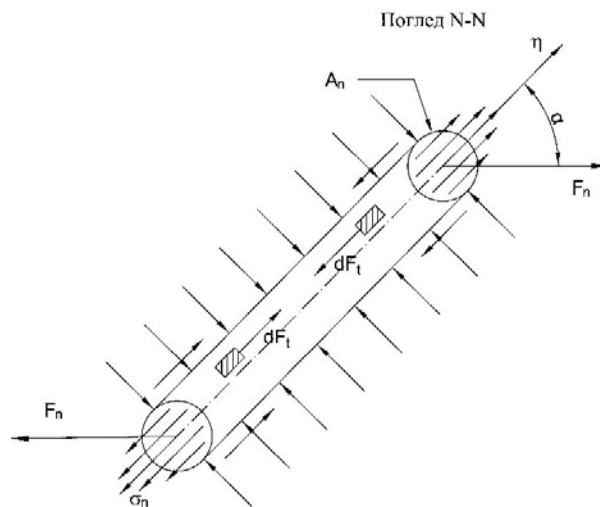
вредности $p = 0$, на влакнима на контури, па све до максималног притиска којем је изложено средишње влакно.

Поље притиска је променљиво, при чему се притисак повећава од нулте вредности на спољашњој контури, преко притиска произвољно изабраног влакна дефинисаног као функција координата η, ξ , тј. $p = p(\eta, \xi)$, па све до максималног притиска којем је изложено средишње влакно, слика 4.14.



Слика 4.14 Пресек А-А, расподела притиска у полипропиленском везиву изложеном затезању

На слици 4.15 је преко погледа N-N, приказана расподела оптерећења дела n-тог влакна (правац N-N), дуж осе η .



Слика 4.15 Поглед N-N, расподела оптерећења дела n-тог влакна (правац N-N), дуж осе η

Влакно је изложено нормалним напонима истезања који настају при затезању везива. Наиме, услед дејства силе затезања влакно ће, у општем случају, преузети део оптерећења у износу F_n . Део спољашњег оптерећења (део силе затезања) које прима влакно проузрокује нормалне напоне притиска по површини обима влакна, који су такође функција координата, односно $\sigma_n = p(\eta, \xi)$. Ови напони изазваће уздужну дилатацију влакна, то јест напоне истезања влакна који ће, у општем случају, уравнотежити део спољашњег оптерећења које преузима влакно. Величина ових напона, који уравнотежавају део спољашњег оптерећења F_n иницираног дејством силе затезања везива, износи:

$$\sigma_{in} = v \cdot p(\eta, \xi) \quad (4.63)$$

где је v Poisson-ов коефицијент. Нормални напони притиска $\sigma_n = p(\eta, \xi)$ иницирани силом затезања и истезањем, који делују по обиму нити везива произвољно изабраног дела нити на завојници, силама F_n , које делују у супротним смеровима (слика 4.15), проузрокују силе трења, које преко тангенцијалних напона по површини обима нити, фактички сабијају нити везива. На слици 4.15, поглед N-N означен је смер дејства елементарних сила трења чија вредност износи:

$$dF_t = p(\eta, \xi) \cdot dA_n \quad (4.64)$$

где је dA_n делић површине попречног пресека n -те нити везива. Резултујући напон, који се јавља у пресеку n -тог влакна, може се представити као разлика напона истезања влакна и тангенцијалног напона влакна насталог као последица притиска и трења између суседних влакана, односно:

$$\sigma_n = p(\eta, \xi) \cdot v - \frac{dF_t}{dA_n} \cdot \mu = p(\eta, \xi) \cdot (v - \mu) \quad (4.65)$$

где је μ коефицијент трења. Укупна сила затезања која делује на n -то влакно може се представити изразом:

$$F_n = p(\eta, \xi) \cdot [v - \mu] \cdot A_n \cdot \cos \alpha \quad (4.66)$$

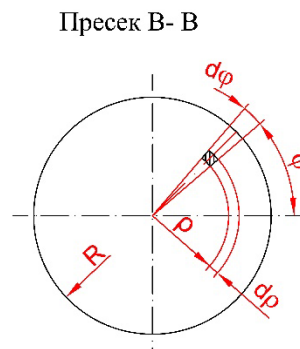
Док се укупна сила затезања може представити преко интеграла:

$$F = \int_{\eta=0}^a \int_{\xi=0}^b p(\eta, \xi) \cdot [v - \mu] \cdot \cos \alpha \cdot d\eta \cdot d\xi \quad (4.67)$$

При томе границе интегралања дефинишу величине полуоса елиптичког пресека N-N, односно величине: $a = r/\sin \alpha$ и $b = r$.

На основу приказа назначеног на пресеку В-В, слика 4.16, могу се успоставити везе координата η и ξ са координатама ρ , α и φ по изразима:

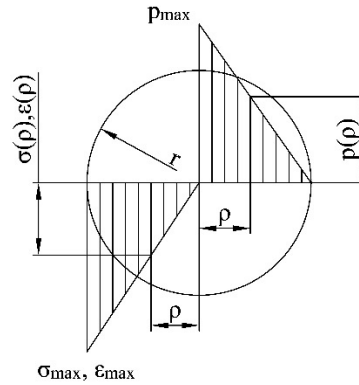
$$\eta = \frac{\rho}{\sin \alpha} \quad \text{и} \quad \xi = \frac{\rho}{\cos \alpha} \quad \text{при чему је:} \quad \alpha = \arctg \left(\frac{r}{\rho} \cdot \tan \alpha_{\max} \right) \quad (4.68)$$



Слика 4.16 Пресек В-В и везе координата η и ξ са координатама ρ и α и φ .

Коришћењем једнакости елементарних површина: $dA = d\eta \cdot d\xi = \rho \cdot d\rho \cdot d\varphi$ и дате везе координата, преласком на поларни координатни систем, укупна сила затезања се може, у општем теоријском смислу, одредити преко интеграла:

$$F = \int_{\rho=0}^r \int_{\varphi=0}^{2\pi} p(\rho, \varphi) \cdot [v - \mu] \cdot \cos \varphi(\rho) \cdot \rho \cdot d\rho \cdot d\varphi \quad (4.69)$$



Слика 4.17 Расподела притиска, напона и деформација n-те нити

Са слике 4.17 се могу добити везе између максималног притиска и притиска у произвољној тачки $\rho(\rho)$, максималног напона и напона у произвољној тачки $\sigma(\rho)$ и максималне деформације и деформације у произвољној тачки $\varepsilon(\rho)$:

$$p(\rho) = \left(1 - \frac{\rho}{r}\right) \cdot p_{\max}$$

$$\sigma(\rho) = \frac{\rho}{r} \cdot \sigma_{\max} \quad (4.70)$$

$$\varepsilon(\rho) = \frac{\rho}{r} \cdot \varepsilon_{\max}$$

Деформациони рад, рад спољашњих сила приликом деформација издвојеног дела, се може добити из израза:

$$A_d = \int_{\rho=0}^r \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{x=0}^{\Delta l} p(\rho, \varphi) \cdot [v - \mu] \cdot \cos \varphi(\rho) \cdot \rho \cdot d\rho \cdot d\varphi \cdot dx = \int_{x=0}^{\Delta l} F(x) \cdot dx \quad (4.71)$$

Претходни израз се базира на једнакости деформационих радова рачунатих преко напона и издужења влакана у функцији радијуса r и измерених вредности сила и померања.

Комбиновањем теоријски утврђених зависности, нумеричких метода и експериментално добијених вредности сила затезања и издужења, може се доћи до функције промене напона по површини пресека везива.

На основу израза (4.71) може се писати:

$$A_d = I = [v - \mu] \cdot f(\alpha) \cdot p_{\max} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot r^2 \cdot 2\pi \cdot \Delta l - \frac{1}{r} \cdot \frac{1}{3} \cdot r^3 \cdot 2\pi \cdot \Delta l \right] \quad (4.72)$$

$$A_d = I = [v - \mu] \cdot f(\alpha) \cdot p_{\max} \cdot \frac{1}{3} \cdot r^2 \pi \cdot \Delta l$$

Сила затезања влакна које лежи на кружном прстену ширине dr , на радијусу r , може се сматрати константном и дефинисати изразом:

$$F = \int_0^r \sigma(r) \cdot \cos \alpha(r) \cdot 2\pi r \cdot dr \quad (4.73)$$

Коришћењем израза:

$$A_d = F \int_{x=0}^{\Delta l} dx \quad (4.74)$$

следи:

$$A_d = \sigma_{\max} \int_{x=0}^{\Delta l} \int_0^r \frac{\rho}{r} \cdot \cos \alpha(\rho) \cdot 2\pi \rho \cdot d\rho \cdot dx \quad (4.75)$$

односно:

$$A_d = \frac{2\pi \cdot \sigma_{\max}}{r} \int_{x=0}^{\Delta l} \int_0^r \rho^2 \cdot \cos \alpha(\rho) \cdot d\rho \cdot dx \quad (4.76)$$

Дефинисани деформациони рад може се израчунати нумеричком интеграцијом на основу експерименталних података, при чему се подинтегрална функција одређује за сваки кружни прстен радијуса ρ у оквиру одређеног издужења dx . Интеграл подинтегралне функције се теоријски може одредити двоструком интеграцијом према познатом изразу:

$$I = \int x^m \cdot \cos x \cdot dx = x^m \cdot \sin x - m \int x^{m-1} \cdot \sin x \cdot dx \quad (4.77)$$

У овом раду зависности косинуса угла завојнице од радијуса ρ одређене су нелинеарном регресионом анализом коришћењем познате функције развоја косинса угла у бесконачни ред као базне функције за регресиону анализу, при чему је узето пет чланова реда који обезбеђују занемарљиву грешку апроксимације.

За везиво са увијањем прорачун се изводи по формули:

$$\cos \alpha(\rho) = c_0 + \sum_{i=1}^5 c_i \cdot \rho^i \quad (4.78)$$

Вредности константи износе: $c_0 = -0.0473$, $c_1 = 8.5001$, $c_2 = -32.1007$, $c_3 = 64.8164$, $c_4 = -67.2423$, $c_5 = 28.0990$, а коефицијент корелације је $R = 0.9997$.

Деформациони рад одређује се према изразу:

$$A_d = \sigma_{\max} \int_{x=0}^{\Delta l} \left\{ \int_0^r \frac{\rho}{r} \cdot \left[c_0 + \sum_{i=1}^5 c_i \cdot \rho^i \right] \cdot 2\pi\rho \cdot d\rho \cdot dx \right\} \quad (4.79)$$

Укупни деформациони рад може се изједначити са средњом вредношћу деформационог рада рачунаог преко вредности силе и остварене дилатације у зони еластичних деформација, па се тако добија:

$$\begin{aligned} A_d &= \overline{A}_d \\ \overline{A}_d &= \overline{F} \cdot \Delta l = \sigma_{sr} \cdot A \cdot \Delta l = \sigma_{sr} \cdot r^2 \pi \cdot \Delta l \\ \sigma_{sr} \cdot r^2 \pi \cdot \Delta l &= \frac{2\pi \cdot \sigma_{\max}}{r} \int_{x=0}^{\Delta l} \int_0^r \rho^2 \cdot \cos \alpha(\rho) \cdot d\rho \cdot dx \end{aligned} \quad (4.80)$$

Однос максималног и средњег напона прорачунат је према изразу:

$$\left[\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{sr}} \right] = \frac{r^3 \cdot \Delta l}{2} \left[\frac{1}{\int_{x=0}^{\Delta l} \left\{ \int_0^r \frac{\rho}{r} \cdot [c_0 + \sum_{i=1}^5 c_i \cdot \rho^i] \cdot 2\pi\rho \cdot d\rho \cdot dx \right\}} \right] \quad (4.81)$$

Дати однос дефинише расподелу напона у везиву приликом затезања.

5 РАЗВОЈ И ОПТИМИЗАЦИЈА УРЕЂАЈА - КИДАЛИЦЕ НАМЕЊЕНЕ ЗА ЕДУКАТИВНЕ И ИСТРАЖИВАЧКЕ СВРХЕ

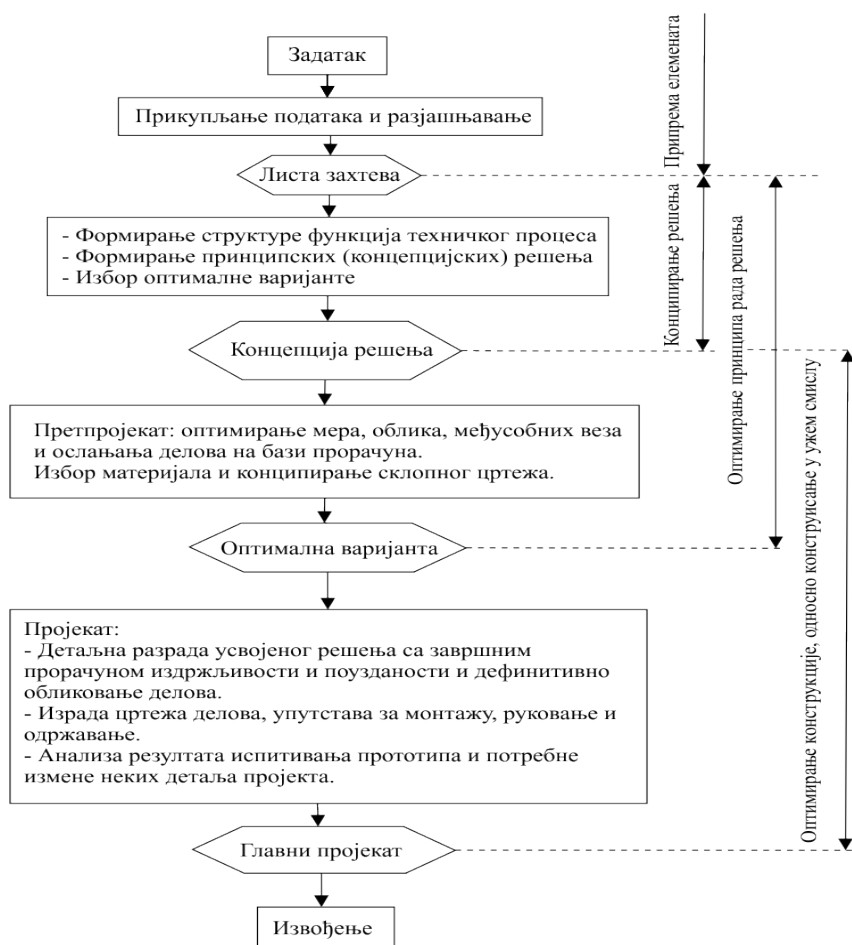
Током развоја производа, пројектанти теже да производ има одређене карактеристике као што су: функционалност, одговарајући дизајн, једноставна израда уз најмање трошкове, безбедност, лака употреба, итд. При пројектовању производа неопходно је узети у обзир многобројна ограничења која потичу како из производног система тако и из окружења. Стога, неопходно је изабрати оно решење које у највећој мери задовољава унапред постављене захтеве. Проблем избора решења може да се постави као задатак више-критеријумске оптимизације. Добијено решење се означава као оптимално решење.

Први корак у процесу конструисања може да се означи као конципирање идејног решења, респектујући унапред задата ограничења. У следећем кораку, усваја се дизајн производа и материјали. На овај начин се добија прототип производа. Испитивање функционалности, безбедности, поузданости и тачности врши се на прототипу. После верификације предложеног решења, израђује се техничка документација делова. Као што је приказано на слици 5.1 [М. Огнјановић, 1990]. Исход прве фазе пројектовања је концепција решења где су усвојене компоненте, делови, њихов распоред и везе. Процес оптимизације концепцијског решења почиње усвајањем листе захтева и траје до завршетка претпројекта. Израда претпројекта и главног пројекта представља конструисање у ужем смислу и подразумева оптимизацију саме конструкције.

Као што је познато, истраживање претходи процесу конструисања. Кроз процес истраживања долази се до конкретних захтева које будућа конструкција треба да испуни. Такође, усвајају се ограничења унутар којих се развија конструкцијско решење. На основу више критеријума доноси се одлука о усвајању оптималног решења. Неки од најважнијих захтева су [М. Огнјановић, 1990]:

- Општа функција будућег производа (машинског система) треба да буде дефинисана тако да оствари високу конкурентност на тржишту. Функција производа се детаљно описује подацима који су резултат истраживања, навођењем улазних и излазних материјала.
- Радна својства објекта који се конструише дефинишу се према захтеваном квалитету извршавања функције, потребној сигурности и поузданости у раду, радном веку, начину руковања и одржавања, итд. Од испуњења ових својстава производа такође зависи конкурентност производа на тржишту, као и његов тржишни век.
- Ергономска својства производа дефинишу начин управљања будућим машинским системом. Поред лакоће руковања и остварене безбедности, пожељно је да се руковање у што већој мери аутоматизује.
- Технолошка својства новог производа су истовремено и ограничења у његовом развоју. Полазни корак при конструисању новог производа је његова могућност реализације у већ постојећој производњи, без употребе специјалних алата и опреме, на економски прихватљив начин. Ако постоји потреба за набавком неких елемената од другог произвођача, потребно је зависност од тог добављача свести на најмању могућу меру.

- Спољни изглед, као захтев новог производа, постаје све значајнији због потенцијално успешног пласмана на тржиште и у уској је вези са његовом функцијом. Уколико је нови производ учило за студенте техничких наука употребна вредност му је утолико већа уколико су видљивији сви елементи и склопови система, поред задовољења његове основне намене. Тада спољни изглед производа није један од водећих захтева при развоју производа.
- Одржавање производа, односно његово склапање и расклапање, је посебно значајно код конструкција које у току експлоатације захтевају честе замене делова. Приступ деловима система које треба мењати мора бити једноставан.
- Услови испоруке, транспорта, монтаже имају посебан значај када су у питању конструкције великих габарита и могу бити један од ограничавајућих фактора при конструисању новог производа.
- Паковање производа је од великог значаја и мора бити одговарајуће, обично такво да је степен заштите производа у пакету пропорционалан цени производа.
- Економска ограничења се морају имати у виду у свим корацима конструисања. Циљ је да се добије производ са што нижим трошковима производње. То је предуслов за стварање што веће разлике између цене производа на тржишту и његових трошкова. На производну цену се може утицати одабиром материјала, применом стандардних и унифицираних компоненти, технологијом, итд.



Слика 5.1 Скраћени приказ садржаја процеса конструисања [М. Ognjanović, 1990]

Неки аутори [D. Vukelja, A. Mišković, 1985; S. Jovičić, N. Marjanović, 2011], сугеришу да није неопходно вршити оптимизацију комплетног производа већ се може спроводити парцијална оптимизација производа, односно техно-економско вредновање насталих варијанти конструкције.

5.1 РАЗВОЈ НЕКОНВЕНЦИОНАЛНЕ КИДАЛИЦЕ

У докторској дисертацији су разматрана четири узастопна решења уређаја, чија је намена испитивање материјала затезањем. Уређај је првенствено био намењен студентима техничких наука, као учило, код којег тачност мерења није пресудна. Било је далеко значајније да учило оствари своју функцију у области образовања, односно да се на њему може лако демонстрирати понашање различитих материјала при затезању и да се као резултат добију дијаграми зависности сила затезања и издужења узорака материјала, односно напона и деформација. У наредним фазама развоја, верзија уређаја која је побољшана у смислу тачности добијених резултата испитивања, могла је да буде примењена у индустрији и у истраживачке сврхе, тако да је уређај, поред учила за едукацију студената постао и лабораторијски уређај за испитивање материјала и истраживање у овој области.

5.1.1 ПРВА ВАРИЈАНТА УРЕЂАЈА

На основу литературних извора и увида у изведена решења уређаја за испитивање материјала затезањем, пре креирања идејног решења за прву варијанту уређаја постављени су основни захтеви које треба испунити:

- да уређај буде намењен едукацији у области испитивања материјала на затезање, односно да се користи као учило;
- да уређај врши затезање узорка;
- да се могу испитивати затезањем струне малих димензија;
- да је у току испитивања могуће мерење силе затезања и издужења узорка;
- да је малих габарита и мале масе (да је лако преносив и без посебних услова носивости подлоге);
- технологичност - што више стандардних, доступних елемената; једноставна израда специјалних елемената;
- економичност - ниски трошкови производње, који се крећу у унапред оквирно утврђеним границама;
- спољни изглед који омогућава да конструкција, њени елементи и склопови, буду видљиви, а процес испитивања транспарентан;
- прихватљива неизвесност мерења механичких карактеристика материјала ($\leq 10\%$);
- безбедност и једноставност руковања уређајем.

Решење првог уређаја засновано је на резултатима brainstorming-a, у који је било укључено више стручњака, као и инжењера и техничара задужених за израду и спајање елемената конструкције из области машинских конструкција и испитивања материјала. Процене стручњака који су учествовали у brainstorming-у су засноване на искуству и

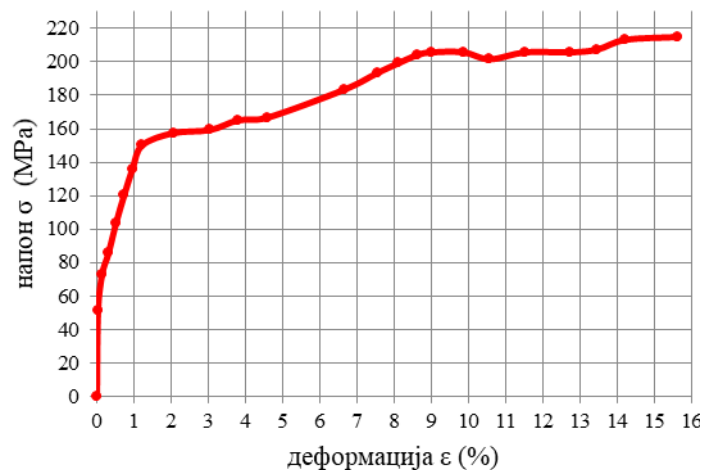
знању из области дизајна експеримената и дизајна уређаја за испитивање механичких карактеристика материјала. Првобитно решење уређаја-кидалице је приказано на слици 5.2.

Затезање епрувете вршено је ручно преко обртног диска, где се преко навојног вретена обртно кретање трансформише у транслаторно и које условљава прираштај силе затезања (слика 5.2). Издужење је мерено помичним мерилом, а сила затезања дигиталним динамометром.



Слика 5.2 Првобитна верзија уређаја

На основу забележених података у току испитивања, након завршеног тестирања вршена је обрада података и израда графичког приказа односа силе и издужења, односно провера Хooke-овог закона. Тачност мерења је била задовољавајућа, односно неизвесност мерених величина није била већа од 10%. На слици 5.3, приказан је дијаграм напон - деформација, добијен на основу испитивања бакарне струне.



Слика 5.3 Дијаграм напон - деформација добијен испитивањем затезањем бакарне струне на првој верзији уређаја

На основу резултата великог броја испитивања затезањем различитих материјала на првобитној верзији уређаја, дошло се до закључка да учило са аспекта функционалности, технолоичности, тржишности и ергономичности у великој мери задовољава постављене захтеве. Учило је нашло примену у едукацији студената о понашању материјала при затезању и Hooke-овом закону, укључујући границе еластичних и пластичних деформација, течења и кидања материјала.

Детаљном анализом решења уређаја закључено је да, иако задовољавајуће, првобитно решење није најбоље могуће у оквиру задатих критеријума. Унапређење конструкционог решења односило се на већи степен задовољења захтева технологичности и економичности (једноставије руковање, резултати испитивања са мањом неизвесношћу мерења, прикупљање података уз помоћ рачунара). То би створило могућност шире примене уређаја, не само у едукативне, већ и у истраживачке сврхе, као и могућност примене у индустрији.

5.1.2 ДРУГА ВАРИЈАНТА УРЕЂАЈА

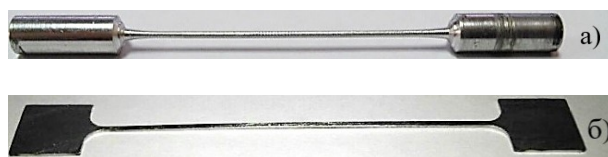
Задржана је већина чврстих захтева који су усвојени при разради првобитног решења; поједини захтеви су кориговани, а неки додати, као што су:

- испитивање узорака малих димензија са крајевима за ослањање, позиционирање и причвршћивање у стезне чељусту уређаја;
- могућност испитивања крутости опруга, без разарања;
- економичност - границе у којима би требало да се крећу трошкови израде су повећане;
- прихватљива граница неизвесности мерења је коригована ($\leq 5\%$);
- ради једноставнијег руковања, као захтев је постављена аутоматизација система задавања силе;
- прикупљање података о измереној сили мора бити решено уз помоћ рачунара, са одговарајућом централном управљачком јединицом;
- израдити модул за испитивање материјала затезањем на повишеним температурама.

На основу кориговане листе захтева, израђено је ново, друго идејно решење.

Рам конструкције је израђен од профила од легура алуминијума. Сила затезања се задаје погоним корачног мотора, преко каишног преносника и навојног вретена, односно линеарног преносника, на коме се налази динамометар. Опсег мерења силе динамометра је $0 \div 400$ N, тачности 1 N. Издужење узорка се мери помичним кљунастим мерилом, опсега $0 \div 150$ mm, тачности 0.01 mm. Силу затезања и настала издужења узорка бележи систем за аквизицију података у току испитивања.

Узорци за испитивање материјала су нестандардних димензија, различитих облика и површине попречног пресека, слика 5.4. Попречни пресек узорака је 0.5 mm^2 . Узорак правоугаоног попречног пресека се ласерски исеца из лима, тако да је одступање од утврђених димензија величине 0.01 mm. Узорци су израђени са крајевима за прихват и причвршћивање у стезне чељусту уређаја за испитивање материјала.



Слика 5.4 Изглед узорка за испитивање материјала затезањем; а) кружни попречни пресек, б) правоугаони попречни пресек

Испитивањем материјала на затезање у циљу добијања његових механичких карактеристика, узорак се испитује до кидања, односно материјал се испитује разарањем, слика 5.5 а. Исти уређај се може користити и за испитивање материјала без разарања, односно за испитивање крутости опруга. Прихват и позиционирање опруга у стезним чељустима уређаја је остварен посебним држачима. Постоји могућност испитивања једне, слика 5.5 б, или више опруга, слика 5.5 в.



Слика 5.5 Позиционирање узорака за испитивање: а) позиција пробног узорка, б) позиција једне опруге, в) позиција две паралелно везане опруге

Друга верзија уређаја приказана је на слици 5.6. Једна од две затезне чељусту у које се поставља узорак за испитивање је непомицна, док се сила затезања остварује кретањем друге чељусту у одговарајућем смеру.

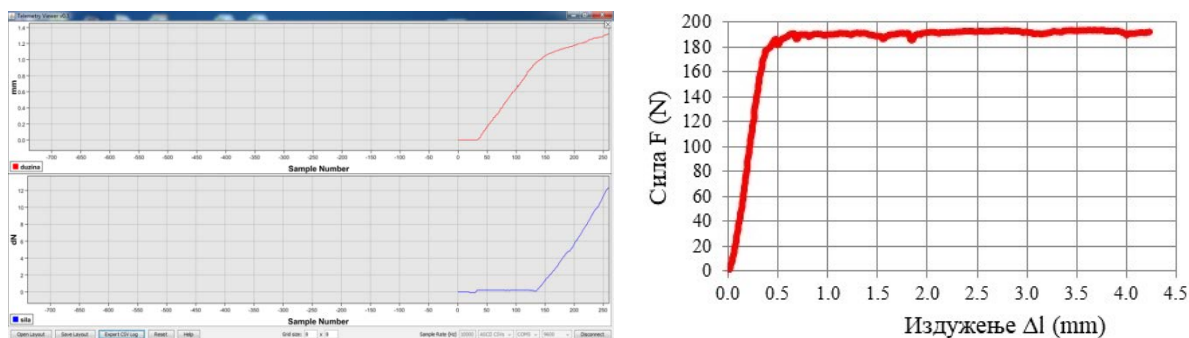


Слика 5.6 Друга верзија уређаја

Код друге верзије уређаја је извршена аутоматизација управљања процесом испитивања. Основу погонског подсистема чини корачни мотор, чији је обртни момент 1.7 Nm, затим каишни преносник преносног односа 6:1 и линеарни преносник, односно навојно вретено на коме се налази динамометар. Обртно кретање претвара се у транслаторно преко ремена, ременице и завојног вретена при чему преносни однос дефинише брзину прираштаја силе. Навојно вретено, чак и са тако малим обртним моментом мотора од 1.7 Nm, би сасвим сигурно могло да оствари силу затезања од преко 1000 N. Имајући у виду намену овог уређаја и учила, изабран је динамометар чији је мерни опсег $0 \div 400$ N и то је ограничење које се, по потреби, може кориговати постављањем динамометра већег опсега. Покретање чељусту у одређеном правцу и смеру врши се активирањем корачног мотора преко управљачке јединице за регулацију брзине и смера кретања покретне чељусту, где се бира жељена брзина. У питању су мале брзине које се мере милиметрима у минутоу.

Систем аквизије података је аутоматизован уз помоћ централне управљачке јединице, која је повезана са рачунаром, тако да се прикупљени подаци сила - издужење током испитивања могу касније обрађивати у одговарајућем формату. Централна управљачка јединица прикупи по пет података са сваког уређаја у току једне секунде. При развоју уређаја изабран је развојни систем Arduino Uno (физичко-рачунарска платформа). Arduino хардвер се састоји од плоче са Atmel AVR процесором и пратећим улазно-излазним елементима, укључујући микроконтролер. Централна управљачка јединица, односно провидна пластична кутија у коју је смештен Arduino Uno налази се на врху рама конструкције уређаја, слика 5.6. Услед потенцијалних оштећења плоче, као и због визуелног угођаја, управљачка јединица ће бити смештена у непровидну црну пластичну кутију.

Током испитивања материјала затезањем на рачунару се у реалном времену, уз помоћ софтвера Telemetry Viewer, приказује дијаграм издужења и дијаграм силе, слика 5.7 а. Добијени подаци о измереним силама и издужењима узорка представљају основ за даљи прорачун и израду одговарајућих графика, слика 5.7 б. Неизвесност мерења механичких карактеристика материјала (модул еластичности, затезна чврстоћа) током експеримента није била већа од 5%. Испитивани су узорци различитих материјала (комерцијални челик, бакар, алуминијум), попречних пресека 0.5 mm^2 . Након поређења добијених резултата испитивања са литературним изворима закључено је да је друга варијанта уређаја задовољила захтевима из почетне листе.



Слика 5.7 Дијаграми добијени испитивањем узорка од комерцијалног челика затезањем: а) дијаграми издужења и силе у току испитивања; б) дијаграм сила - издужење

Један од нових захтева било је испитивање материјала затезањем на повишеним температурама, тако да је израђено ново идејно решење уређаја са додавањем модула за испитивање материјала затезањем на повишеним температурама, слика 5.8 а. Модул садржи комору за загревање узорка до жељене температуре, слика 5.8 б.



Слика 5.8 Уређај са модулом за испитивање материјала на повишеним температурама; а) комплетна апаратура; б) детаљ из коморе након кидања епрувете

Опсег температура у комори је 0 ± 700 °C, што покрива област челика [М. Јовановић, 2003]. Температура се подешава помоћу контролног система, који информације о температури добија од сонде, смештене унутар коморе, слика 5.8 б. Незвесност мерења механичких карактеристика материјала при повишеним температурама такође није бивала већа од 5%.

Након великог броја испитивања материјала испоставило се да уређај производи прекомерну буку, чији извор није звук рада корачног мотора, већ звук типичан за трење између две металне површине. Узрок проблема била је веза ременице са конструкцијом, положај и вођење навојног вретена, као и трење које се јављало на споју покретних чељусти услед несаосности елемената конструкције дуж осе вођења, односно задавања силе затезања. Трење је процењено као фактор који би могао проузроковати грешку мерења коју је тешко унапред проценити. Услед трења, јављале су се такозване паразитне силе, које су утицале на повремено јављање јаког звука, као и на повећање неизвесности мерења.

Као још један од фактора повећања грешке мерења означена је стезна чељуст уређаја, са аспекта тачности њене израде, времена израде и обраде материјала. Чељусти су од прохромског лима, израђене операцијама савијања и заваривања, што доводи у питање тачност њихове израде и контролу димензија са тачношћу од 0.5 mm. Процењено је да се мора наћи другачије решење за чељусти уређаја.

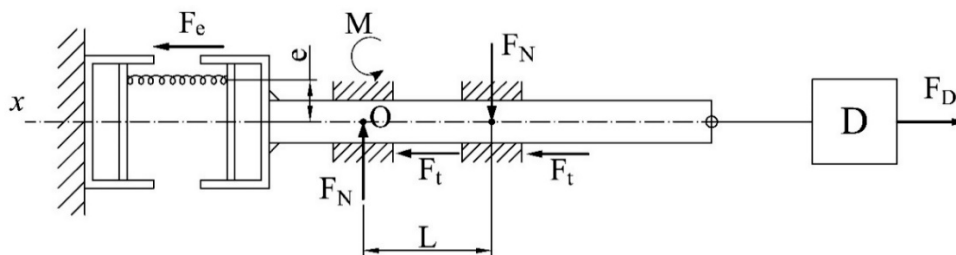
Такође, током испитивања је уочено да је стабилност уређаја доведена у питање, услед пропорција рама конструкције, тј. односа ширине, дужине и висине уређаја.

5.1.3 ТРЕЋА ВАРИЈАНТА УРЕЂАЈА

Имајући у виду да је друго решење задовољило све претходно усвојене захтеве, постављени су нови захтеви које је потребно задовољити како би дизајн уређаја био оптималан:

- смањити неизвесност мерења механичких карактеристика материјала ($\leq 2\%$);
- скратити време израде и повећати тачност израде чељусти;
- решити проблем саосности елемената дуж осе задавања оптерећења;
- смањити трење на споју покретних чељусти;
- решити проблем улежиштења погонске јединице (навојног вретена);
- изместити Arduino Uno и дизајнирати заштитну кутију;
- променити пропорције конструкције.

На слици 5.9 дат је део конструкције друге варијанте уређаја са приказом сила које утичу на грешке мерења приликом испитивања материјала затезањем. У чељустима уређаја приказан је узорак чија је оса померена у односу на осу задавања затезног оптерећења за неко растојање e . У равни нормалној на приказану скицу сматра се да оса узорка и оса вођења оптерећења леже у истој равни. На слици 5.9 приказане су: сила коју мери динамометар F_D , сила која се јавља услед истезања епрувете F_e , нормалне силе које се јављају у ослонцима F_N , као и силе трења F_t . Растојање између два ослонца је L .



Слика 5.9 Преглед сила које утичу на грешку мерења (друга варијанта уређаја)

Ако је сума момената у тачки О једнака нули, може се написати израз за нормалну силу F_N , чија вредност зависи од силе истезања F_e , њеног крака e и растојања L од тачке О:

$$\sum M_o = 0$$

$$F_e \cdot e - F_N \cdot L = 0 \quad (5.1)$$

$$F_e \cdot e = F_N \cdot L \rightarrow F_N = F_e \cdot \frac{e}{L}$$

Изједначавањем са нулом свих сила које делују дуж x осе, добија се разлика између вредности силе динамометра F_D и силе F_e , које би у идеалном случају требало да буду једнаке, када не би долазило до појаве сила трења. При томе се сила трења F_t добија множењем нормалне силе F_N са коефицијентом отпора трења ϵ , односно $F_t = F_N \cdot \epsilon$, док се за нормалну силу користи претходно добијен израз $F_N = F_e \cdot \frac{e}{L}$.

$$\sum F_x = 0$$

$$F_e + 2 \cdot F_t = F_D \quad (5.2)$$

Заменом израза за силу трења, као и израза (5.1) у израз (5.2), добија се:

$$F_e \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{e \cdot \epsilon}{L}\right) = F_D \quad (5.3)$$

Као што је већ речено, идеалан случај би био $F_e = F_D$, али у реалним условима појављују се такозване паразитне силе, које утичу на појаву грешке мерења, односно разлике између измерене силе F_D и силе F_e .

Примера ради, уколико би се посматрао случај да на узорак који је измештен у односу на осу задавања оптерећења за $e = 1 \text{ mm}$, делује сила од $F_e = 100 \text{ N}$, коефицијент трења клизања је $\epsilon = 0.1$, а растојање између ослонаца је $L = 20 \text{ mm}$, интензитет измерене силе F_D из израза (5.3) би износио:

$$F_D = F_e \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{e \cdot \epsilon}{L}\right) = 100 \cdot 1.01 = 101 \text{ N} \quad (5.4)$$

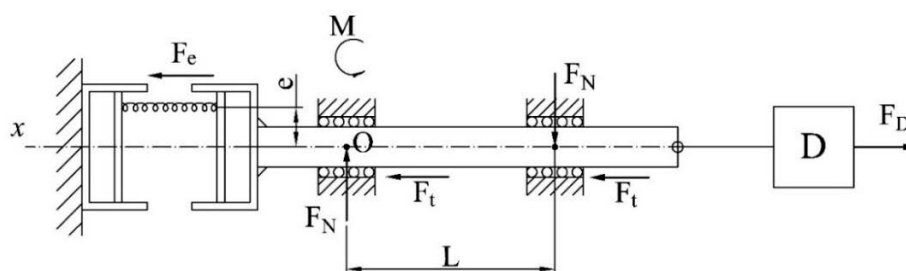
Да нема појаве сила трења, важило би $F_D = F_e = 100 \text{ N}$. Разлика између измерене силе и теоријски идеалне вредности је 1 N , што чини 1% силе F_e . При томе је у питању случај са усвојеним минималним вредностима коефицијента трења и ексцентричности узорка у

односу на осу. У реалним условима, коефицијент трења клизања би могао бити већи [N.J.S. Gorst, 2003], као и ексцентричност узорка.

Како би се избегло трење клизања, постављена су два линеарна куглична лежаја, за које је карактеристичан веома мали коефицијент трења [В.А. Неловру, 1994]. Лежаји се ослањају у четири тачке, па је положај подесив у простору по све три осе x , y и z , чиме се обезбеђује и саосност, односно центричност и минимизира тај узрок грешке.

На слици 5.10 дата је скица трећег решења уређаја са два линеарна котрљајна лежаја у ослонцима, већим размаком између ослонаца и приказом сила које се јављају у оваквој поставци, и то у случају да долази до несаосности епрувете и x осе за неку вредност e . Таква грешка би се могла догодити, на пример, због погрешног руковања при испитивању опруга, уколико би се уместо две опруге, поставила само једна, или уколико би се поставиле две опруге различитих крутости. Такође, могуће је да до измештања у односу на осу дође и због непрецизности при самој изради.

Као и у случају анализе скице другог решења уређаја, слика 5.9, анализом скице трећег решења уређаја, слика 5.10, изједначавањем момената са нулом у ослонцу O и посматрањем сила дуж x осе, долази се до истог израза као у претходном случају, израз (5.3).



Слика 5.10 Преглед сила које утичу на грешку мерења (трећа варијанта уређаја)

Да би се постигао идеалан случај $F_e = F_D$, потребно је да израз $2 \cdot \frac{e \cdot \varepsilon}{L}$ тежи нули, а то би се постигло повећавањем растојања између два линеарна лежаја ($L \rightarrow \infty$), при чему коефицијент трења тежи вредности ε_1 која је приближно 0.01 ($\varepsilon \rightarrow \varepsilon_1 \rightarrow 0.01$), што је карактеристично за котрљајуће лежаје (коефицијент трења се креће од 0.01 до 0.05) [В.А. Неловру, 1994]), а ексцентричност у односу на осу треба да тежи нули ($e \rightarrow 0$):

$$\lim_{\substack{\varepsilon \rightarrow \varepsilon_1 \rightarrow 0.01 \\ L \rightarrow \infty \\ e \rightarrow 0}} \frac{e \cdot \varepsilon}{L} \rightarrow 0 \quad (5.5)$$

Постављањем линеарних лежаја губи се трење клизања, а добија трење котрљања које је знатно мање. Закључак који се намеће је да треба да се повећа растојање L између ослонаца.

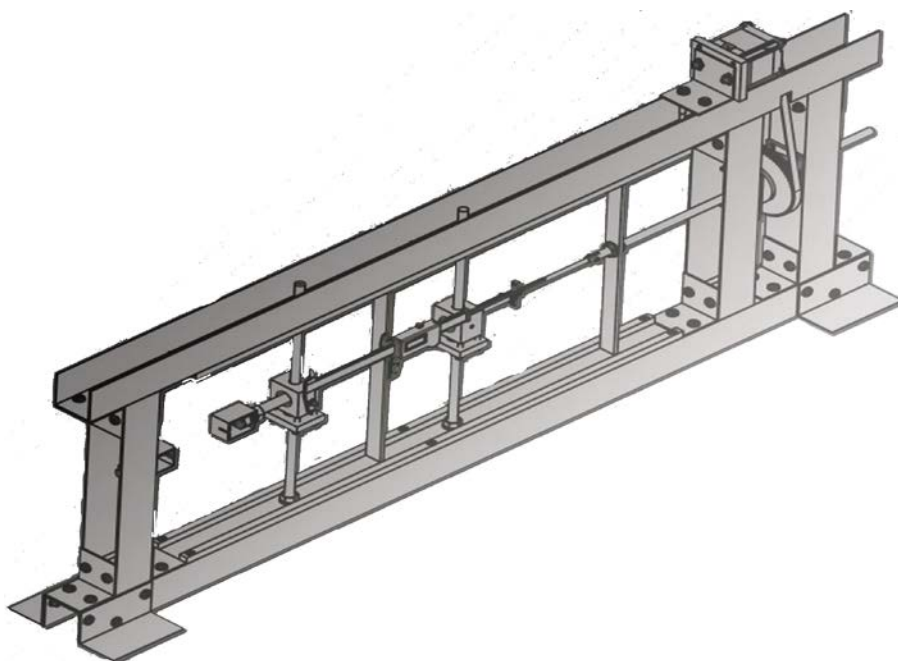
Примера ради, уколико би се посматрао случај где је $e = 2 \text{ mm}$, $F_e = 100 \text{ N}$, $\varepsilon = 0.05$, $L = 200 \text{ mm}$, интензитет измерене силе F_D би износио:

$$F_D = F_e \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{e \cdot \varepsilon}{L}\right) = 100.1 \text{ N} \quad (5.6)$$

У идеалном случају било би: $F_D = F_e = 100 \text{ N}$. Разлика између измерене силе и теоријски идеалне вредности је 0.1 N што чини 0.1% силе F_e . Ако при постављању епрувете у стезне чељусти дође до веће ексцентричности ($e = 2 \text{ mm}$), имајући у виду да коефицијент трења код котрљајних лежаја не прелази вредност од 0.05 [В.А. Hérouvry, 1994], при растојању $L = 200 \text{ mm}$ између два лежаја, разлика између идеалне и измерене вредности силе је свега 0.1% . Наведени пример је са веома неповољним параметрима, са усвојеним великим вредностима коефицијента трења и ексцентричности узорка у односу на осу x . Уносом реалнијих вредности коефицијента трења лежаја од 0.01 и ексцентричности узорка од 1 mm у израз (5.6), добила би се разлика од свега 0.01% . Претходно, друго, решење конструкције уређаја предвиђало је мање растојање L између ослонаца, без линеарних котрљајних лежаја, тако да је долазило до појаве трења клизања, где је вредност коефицијента трења доста већа од коефицијента трења котрљања. Таква поставка је значајно утицала на повећање неизвесности мерења карактеристика материјала.

Један од постављених захтева било је и решавање проблема тачности израде чељусти, које се обрађују савијањем и заваривањем, као и потребном времену за израду. Усвојено је ново решење за чељусти, које се израђује у комаду, сечењем цеви, без савијања, тако да је омогућена контрола свих мера и знатно је скраћено време израде.

Такође, усвојено је да у новој конструкцији рама кидалице сви профили буду стандардни, што такође олакшава и скраћује време израде. 3D модел трећег решења, на којем се види како изгледају нове чељусти и на који начин су постављени линеарни лежаји, приказан је на слици 5.11.



Слика 5.11 3D модел оптимизираних треће варијанте уређаја

Имајући у виду да се, генерално, од навојног вретена очекује што дужи период експлоатације, а да се при томе задржи захтевана тачност вођења, као најекономичније решење за проблем улежиштења навојног вретена изабрани су конусни ваљкасти лежаји [В. Костић, 2018]. Уз постојање већ описане могућности подешавања саосности код лежаја, улежиштењем навојног вретена је генерално решен проблем саосности, слика

5.12 а. Предложено је и решење за измештање и дизајн модула централне управљачке јединице, слика 5.12 б.



Слика 5.12 Оптимална решења улежиштења и естетске функције: а) конусни ваљкасти лежаји лево и десно од ременице; б) дизајн и позиција кутије за Arduino

Променом односа димензија уређаја решен је и евентуални проблем стабилности. Стопе су проширене, висина смањена, а дужина рама конструкције уређаја повећана, слика 5.13.

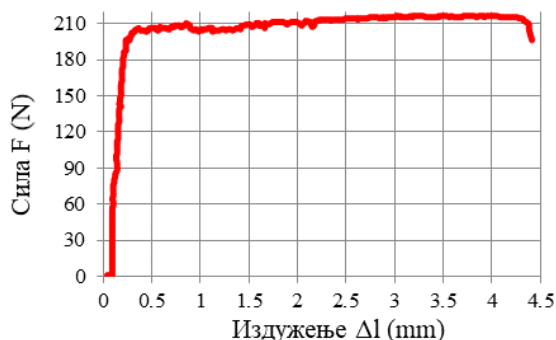


Слика 5.13 Фотографија треће верзије уређаја

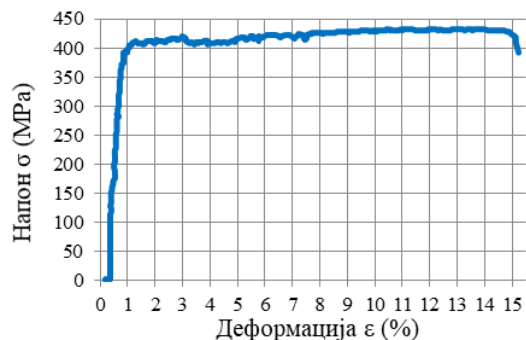
И ова верзија уређаја је предвиђена како за испитивање затезањем узорака различитих материјала, тако и за испитивање крутости опруга, а додавањем одговарајућег модула, може се, као и претходна верзија, користити за испитивања затезањем на повишеним температурама.

На слици 5.14 приказа је дијаграм зависности сила - издужење, а на слици 5.15 дијаграм зависности напон - деформација, за случај испитивања узорка израђеног од челика негарантованог хемијског састава, на трећој верзији уређаја. Анализом датих дијаграма

уочава се да добијене вредности максималних напона одговарају литературним подацима за те врсте материјала.



Слика 5.14 Дијаграм сила-издужење, добијен испитивањем челика на трећој верзији уређаја



Слика 5.15 Дијаграм напон - деформација, добијен испитивањем челика на трећој верзији уређаја

Испитивањима на овом уређају, за челик трговачког квалитета, негарантованог хемијског састава, гарантованих механичких особина, добијане су граничне вредности силе које су се кретале у опсегу од 200 до 210 N (слика 5.14). На основу литературних извора [M. Oruč, 2008] вршено је поређење механичких карактеристика материјала, рецимо затезне чврстоће која је дата у одређеном опсегу вредности. Ако се има у виду да је попречни пресек испитиваних узорка 0.5 mm^2 , затезна чврстоћа у овом случају износи [J.R. Davis, 2004]:

$$R_m = \frac{F_m}{A_0} = \frac{210 \text{ N}}{0.5 \text{ mm}^2} = 420 \text{ N/mm}^2 \quad (5.7)$$

при чему је F_m највећа вредност силе затезања која је очитана при испитивању, док је A_0 површина попречног пресека узорка.

5.1.4 ЧЕТВРТА ВАРИЈАНТА УРЕЂАЈА

Треће решење уређаја је, такође, у потпуности одговорило на све претходно постављене захтеве. Дуготрајним испитивањем материјала на трећој верзији уређаја, наметнули су се нови захтеви које је потребно задовољити како би дизајн уређаја био оптималан:

- смањити неизвесност мерења ($\leq 1.6\%$);
- смањити попустљивост носећег рама уређаја, побољшањем његове крутости;
- решити проблем попустљивости у чељустима у току испитивања;
- повећати попречни пресек епрувете за испитивање и њену мерну дужину;
- поставити динамометар већег опсега;
- модул за испитивање материјала на повишеним температурама прилагодити новом решењу прихвата и стезања епрувете;
- имплементирати сензоре за почетак и крај испитивања;
- имплементирати софтвер који ће омогућити добијање стварних вредности праћених параметара (модул еластичности, граница течења, затезна чврстоћа и др.);

У претходном поглављу рада 4.1, детаљно је указано на основне проблеме који иницирају грешке мерења везане за поједине зоне попустљивости назначених подсклопова кидалице. Грешке везане за попустљивости одређених целина (подсклопова) могуће је у великој мери свести на минималну вредност оптимизацијом решења. Једино у том случају је могуће смањити неизвесност мерења испод захтеваног нивоа.

Зону носеће конструкције кидалице (облика рама $F_1 F_2 F_3 F_4$), слика 4.1, могуће је оптимизирати са аспекта попустљивости (тј. померања ε_1) повећањем крутости и начина везивања елемената рама (растављива веза, заварена конструкција, ливена конструкција). Теоријски и експериментално се може показати да се грешка ε_1 избором погодних профила и растављивог типа конструкције, као најнепогоднијег типа конструкције са аспекта крутости, може свести на вредности значајно мање од 2-3 μm , фактички занемарљиве вредности. Ово се посебно односи на испитивања епрувета малог попречног пресека, где сила затезања и читаво оптерећење кидалице није веће од 2000 N. Укрупњење кидалице и смањење грешке ε_1 до нивоа 2 μm не захтева утрошак алуминијума и класичног конструктивног угљеничног челика већи од 30 kg. У вези са претходно реченим, попустљивост основне конструкције кидалице, када је реч о силама затезања до 2000 N, не представља велики проблем, односно, грешка ε_1 се може техничко-технолошким мерама свести на занемарљиву вредност.

Зона везе рама носеће конструкције и леве чељусти такође се, са аспекта попустљивости, може оптимизовати, релативно једноставним техничко-технолошким методама, што се своди на избор пресека елемента везе АВ и самог начина остваривања везе између овог елемента и рама, слика 4.1, детаљ А. Веза елемента АВ и рама може се једноставно решити преко навојне везе, при чему треба водити рачуна да и сама веза навојног споја има одређену крутост, односно попустљивост. Аналогно претходном разматрању и грешка ε_2 се може свести на занемарљиву вредност, што је приказано на слици 5.16. Након задавања оптерећења праћено је померање подсклопа уређаја компаратером, тачности десет микрометра, претходно потпуно учвршћене конструкције за ослонац. Како није било очекиваног померања у правцу дејства силе затезања, могућа грешка мерења услед попустљивости подсклопа је занемарена.



Слика 5.16 Попустљивост подсклопа везе рама носеће конструкције уређаја и леве чељусти кидалице:
 а) постављање компаратера, б) Мерење померања непокретне чељусти уређаја током испитивања;
 в) навојна веза између непокретне чељусти и рама конструкције

Попустљивост леве чељусти LCH, део CC' и десне чељусти RCH, део GG', означени на слици 4.1, односно грешке ε_3 и ε_5 , могу се такође свести на минималну вредност. То се може постићи ако се лева и десна чељуст имплементирају у везу рама носеће конструкције са левом АВ и десном чељусти ER. Дакле, лева чељуст LCH и елемент везе АВ су фактички један механички елемент, док је други механички елемент десна чељуст RCH и елемент везе ER. Попустљивост ових елемената се избором њиховог пресека, адекватном конструкцијом и стабилном везом са рамом може свести на занемарљиву вредност.

Критичне зоне са аспекта попустљивости и грешака мерења представљају зоне контакта испитиваног узорка (епрувете) са левом LCH и десном чељусти RCH, слика 4.1, детаљ А и детаљ В, односно грешке ε_4 и ε_6 .

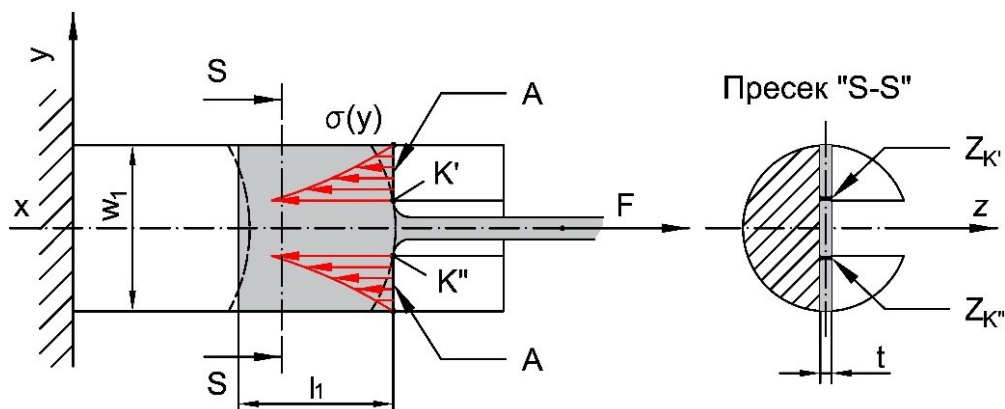
Стандардне епрувете које се користе на конвенционалним кидалицама, стежу се у стезним чељустима кидалице по површинама прихвата. Сила затезања преноси се са епрувете на стезне чељусти преко површина у контакту, силама трења. У оваквом случају преноса оптерећења настају значајне попустљивости у самом контакту стезних чељусти и узорка [В. Tadić, 2012].

У суштини, један од кључних узрока настанка значајних грешака одређивања механичких карактеристика материјала, посебно модула еластичности, јесте неконтролисани део померања, који током затезања узорка настаје у самом контакту епрувете и стезних чељусти. Без обзира што је систем, статички посматрано, у равнотежи, напони који се јављају на самим површинама контакта морају изазвати одређени ниво померања, који је у директној вези са нивоом силе затезања [V.L. Popov, 2010].

Проблеми попустљивости односно померања прихватних делова епрувете са левом и десном чељусти могу се сагледати преко следећих чињеница. Належуће површине епрувета, треба да буду знатно веће вредности у односу на површину пресека мерног дела епрувете која се истеже, у циљу смањења вредности контактне притиска (напона) који се јавља између належућих површина епрувете са левом и десном чељусти. Напони директно утичу на померања у овим зонама односно на грешке (ε_4 и ε_6) које се, као и све остале парцијалне грешке, не могу квантификовати. На пример, при испитивању епрувете попречног пресека 2 mm^2 и дужине 100 mm израђене од челика, теоријска вредност издужења у зони еластичних деформација износи приближно 0.12 mm . То значи, да укупна грешка издужења од свега 0.012 mm у области еластичних деформација, у свим иницијалним поменутим зонама, прави укупну грешку одређивања модула еластичности од 10%. Вероватноћа да се грешка ове вредности издужења, па и већа грешка, јави управо у зони прихватања епрувете од стране чељусти је веома високог нивоа. Ако се део епрувете већег попречног пресека ослања на деловима леве и десне чељусти, грешка настаје због сложеног напонско-деформационог стања, претежно у самој зони контакта између епрувете и чељусти и не постоји начин да се вредност настале грешке експериментално квантификује.

С обзиром на литературне наводе (С.Т. Li, 1985; J.R. Davis, 2004; А. Mucsi, 2013; G.B. Rathmayr, 2013; L. Woong, 2013; K. Kumar, 2014), прихватни део епрувете приказан на слици 5.17, био би са аспекта тачности одређивања механичких карактеристика материјала, посебно модула еластичности, значајно повољнија опција. Прихват епрувете на левој страни је непомичан током испитивања, док је десни прихват епрувете покретан у правцу дејства силе затезања.

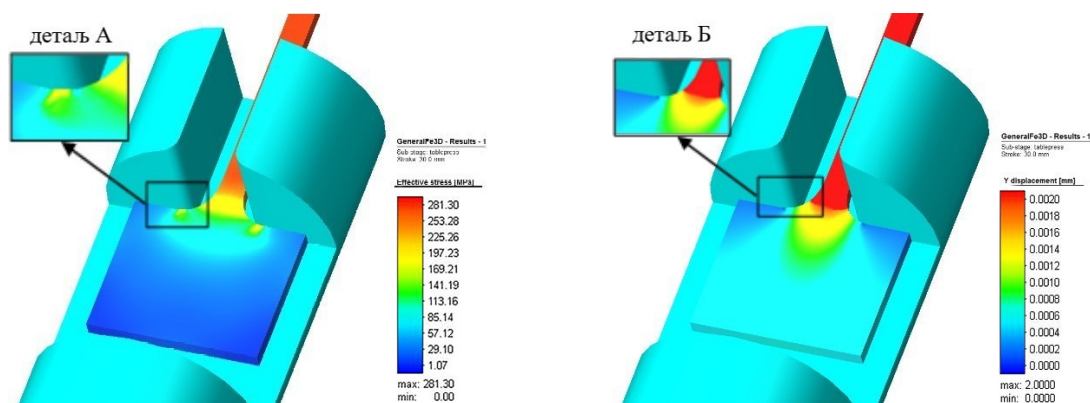
У току развоја уређаја у циљу минимизације неконтролисаног дела померања (попустљивости у самој зони контакта) реализовано је и експериментално испитано више решења система стезања епрувете у стезним чељустима. Прво реализовано решење подразумевало је слободно ослоњену епрувету (слика 5.17). Укупна контактна површина епрувете А, приказана на слици 5.17, при испитивању материјала на малој лабораторијској кидалици била је пет пута већа у односу на површину почетног пресека на мерном делу епрувете. Међутим, то не значи да ће напони и деформације у зони налегања епрувете на површине стезне чељустима имати сразмерно мање вредности. Максимални напони у овом случају јављају се по дебелини епрувете t (оса z) у зонама $Z_{K'}$ и $Z_{K''}$ у околини тачака K' и K'' .



Слика 5.17 Систем позиционирања и прихвата епрувете: слободно ослоњена епрувета на уређају

При дејству силе затезања F на наведеним контактним површинама делују напони притиска и долази до сабијања елементарних делића материјала епрувете у самој зони контакта, при чему је максимална концентрација напона на деловима $Z_{K'}$ и $Z_{K''}$. Због велике концентрације напона на контактної површини епрувете настаће и одређена померања епрувете у стезној чељустима. То померање није могуће издвојено квантификовати, већ се исто у процесу мерења придружује укупном издужењу мерног дела епрувете. То значи да ова грешка мерења настаје као директна последица попустљивости контакта епрувете и стезне чељустима. Претпостављено поље напона $\sigma(y)$ у потпуности одговара облику епрувете деформисане при овом начину базирања у стезним чељустима, што су показали и резултати изведених FEA анализа и обављених експеримената. У овом разматраном случају, неконтролисани део померања значајније утиче на вредности експериментално одређеног модула еластичности (и осталих механичких карактеристика).

На слици 5.18 су приказани резултати FEA анализе добијени у условима истезања епрувете од челика. FEA анализа је рађена у програмском пакету Simufact Forming 15.0. Мрежа хексаедарних коначних елемената и број елемената (укупно 21688 елемената) су генерисани у складу са зонама у којима се очекују значајне концентрације напона и померања елемената.

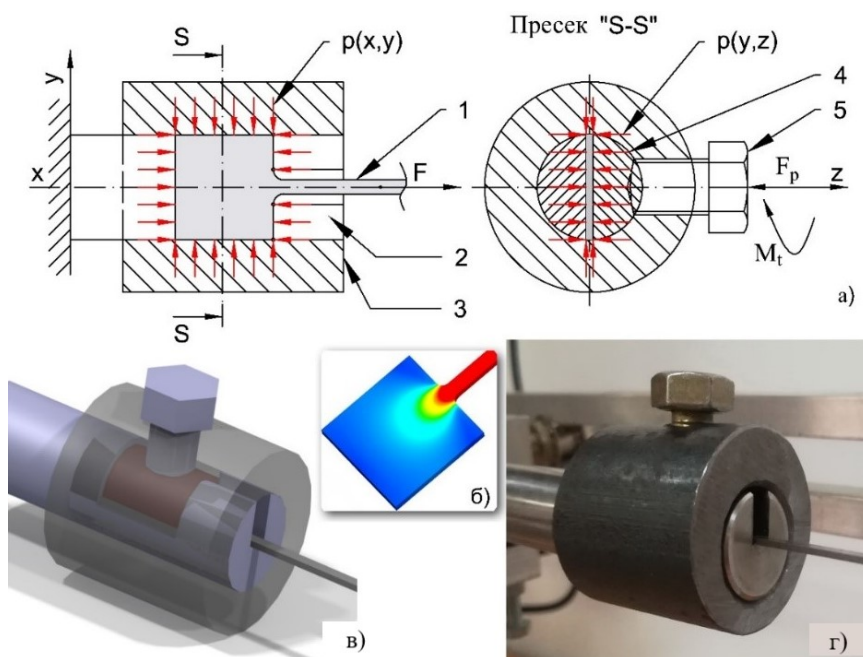


Слика 5.18 Резултати FEA анализе за напонско стање епрувете (лево) и издужења епрувете по оси затезања (десно)

Са слике се јасно може уочити да су напони и померања управо концентрисани у поменутом зонама (слика 5.18, детаљ А и детаљ Б). Имајући наведено у виду произилази да се попустљивост може свести на минималну вредност избором димензија епрувете, односно повећањем вредности контактне површине, посебно дебљине епрувете.

Како би се смањили напони и померања у зони контакта епрувете и стезне чељустима, зона прихвата епрувете је измењена тако, да се уместо слободно ослоњене епрувете изведе стезање по целој зони прихвата.

Коначно решење система стезања епрувете у стезним чељустима, слика 5.19, у највећој мери елиминисало је грешке попустљивости у зонама контакта епрувете и стезних чељустима. Пошло се од идеје да се комплетном прихватном делу епрувете, идентичне геометрије као у претходном разматрању, онемогући померање по свим осама, односно, да комплетан прихватни део епрувете представља заробљену запремину материјала у стезним чељустима, које се могу, у конкретном случају, сматрати апсолутно крутим телом.



Слика 5.19 Систем позиционирања и стезања епрувете: а) шематски приказ, б) FE померање, в) 3D модел и г) фотографски приказ

Слика 5.19 представља шематски приказ, 3D модел и фотографски приказ система за стезање епрувете, са свим елементима и карактеристичним зонама. Елементи система за прихват и стезање епрувете су: узорак (епрувета) (1), елемент за позиционирање и прихват узорка (стезне чељуст) (2), чаура (3), полуцилиндрични стезни елемент (4), и вијак (5). Попустљивост се разматра само у контактної зони између узорка и леве стезне чељусту уређаја. Узорак (1) се поставља у елемент за позиционирање (2) и стеже преко стезног елемента (4). Чаура (3) и вијак (5) постављени су преко елемента за позиционирање. Цилиндрична страница елемента за позиционирање одговара облику чауре. Монтажа тих елемената се остварује са малим зазором између њих.

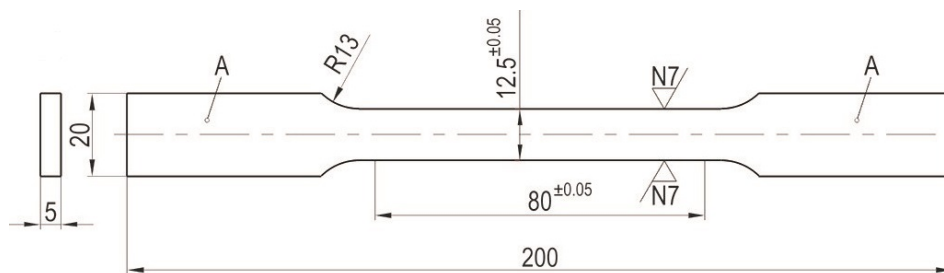
Геометријске мере епрувете и елемената за позиционирање и стезање након затезања вијка обезбеђују саосност леве и десне стезне чељусту и равнотежу сила по осу затезања и у правцима нормалним на осу затезања.

Оваквом шемом стезања, епрувета је у стезним чељустима изложена свестраном притиску по свим осам и представља „заробљени“ део материјала који при дејству силе затезања има веома повољну расподелу поља напона и деформација и минималну попустљивост у зони контакта. На слици 5.19 б) приказан је и детаљ анализе коначним елементима (FEA), који указује на веома повољну расподелу и мале вредности померања у контактним зонама, која не превазилазе вредности од 2 μm .

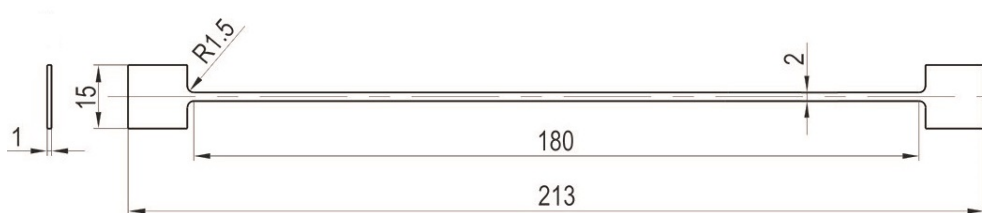
Треба нагласити да је при реализацији предложеног метода позиционирања и стезања епрувете веома битно испоштовати низ технолошких захтева, који се односе на вредности толеранција и остваривање благо пресованих спојева епрувете и елемента (2) по димензији l_1 , епрувете и чауре по димензији w_1 , уз адекватно стезање епрувете преко завртња (5) и стезног елемента (4). Ефекти оваквог начина стезања епрувете потврдили су резултати изведених FEA, као и резултати изведених експеримената.

Поред наведене грешке у овој зони настају и грешке због одступања реалне кинематске осе дејства силе затезања и осе самог узорка (епрувете), тј. закривљења ослоних површина епрувете, што је приказано на детаљима В и D, слика 4.1. Минимизација грешака померања у овој зони (ϵ_4 и ϵ_6) може се најједноставније одрадити технолошким методама, односно постизањем високе тачности између кинематске осе дејства силе и геометријске осе епрувете. Ова технолошка мера значајно доприноси смањењу грешака (ϵ_4 и ϵ_6) и посебно позитивно утиче на минимизацију паразитних сила трења у линеарним прилагодљивим лежајевима, које се јављају при одступању поменутих оса и порасту радијалног оптерећења у лежајевима.

На основу прегледа литературе на тему облика и геометријских карактеристика епрувете из другог поглавља овог рада и имајући у виду теоријске основе дате у поглављу 4.4, закључено је да се епрувета која се користи за испитивање материјала на малој лабораторијској кидалици разликује по облику и геометријским параметарима од стандардних епрувета које се користе код конвенционалних кидалица. На сликама 5.20 и 5.21 приказани су облици стандардне епрувете од лима и геометријске карактеристике нестандардне епрувете од лима, која се користи као узорак код мале, лабораторијске кидалице за испитивање материјала затезањем. На слици 5.21 је приказана епрувета за испитивање материјала затезањем на собној температури. За испитивање на повишеним и високим температурама, комора за загревање епрувете лимитира мерну дужину епрувете. Епрувете су идентичног облика али мањег попречног пресека и мерне дужине.



Слика 5.20 Облик и геометријске карактеристике епрувете за испитивање затезањем за конвенционалне кидалице



Слика 5.21 Облик и геометријске карактеристике епрувете за испитивање затезањем за мале, лабораторијске кидалице

Повећањем попречног пресека епрувете повећале су се силе затезања током испитивања, што је захтевало промену уређаја за мерење силе до одговарајућег опсега, односно промену динамометра (CZL 302), чији је мерни опсег од 0 - 2000 N, а тачност 0.03% или 0.6 N.

Модул за испитивање материјала на повишеним температурама код друге и треће варијанте уређаја је представљао комору стационарног типа, непомерљиву по оси задавања оптерећења, слика 5.8 а, б. Епрувета је била слободно ослоњена у стезним чељустима уређаја. Како је тај начин ослањања епрувете представљао извор грешака мерења услед попустљивости која се јављала у тим зонама, било је потребно конструктивно прилагодити комору новом решењу прихвата и стезања епрувете са чауром, слика 5.19. Комора је израђена тако да јој је дозвољено померање дуж осе оптерећења, али су јој димензије биле условљене габаритима саме конструкције уређаја, слика 5.22 а, б. Димензије епрувета за испитивање материјала на повишеним температурама су, из истог разлога, мање и детаљно су описане у наредном поглављу овог рада.



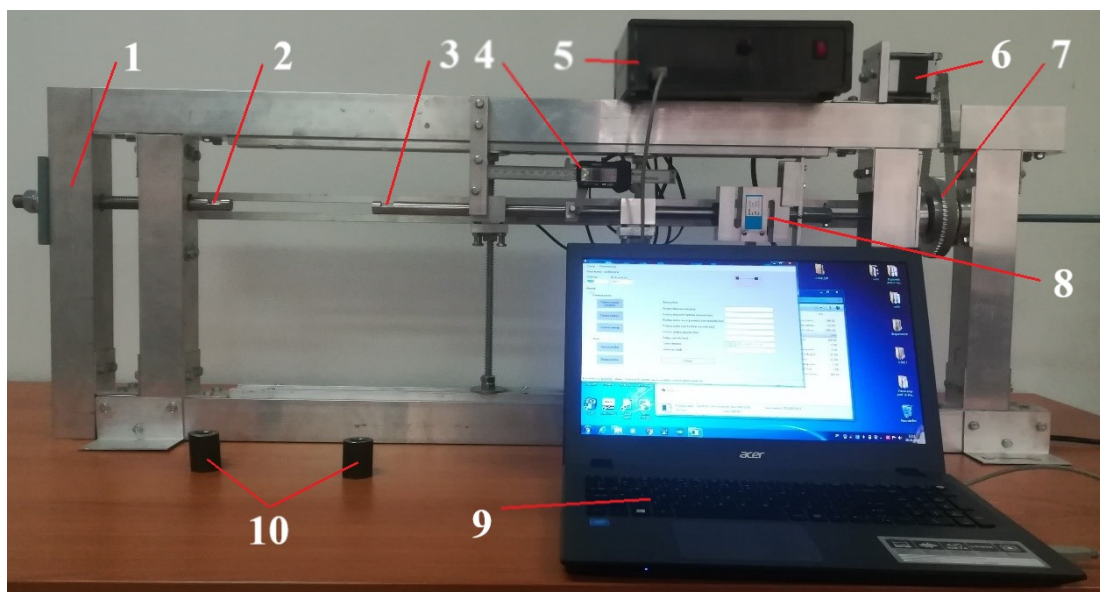
Слика 5.22 Модул са комором: а) кретање коморе ради позиционирања и стезања епрувете пре почетка испитивања, б) епрувета у систему прихвата и стезања чаурама са вијком

Уређај има граничнике положаја, који су смештени на задњем делу кидалице. Уз помоћ два индуктивна сензора подешавају се гранични положаји, дакле почетни положај када креће затезање и крајњи положај, када ће преко индуктивног сензора систем за управљање добити сигнал да рад електромотора треба да буде прекинут. Читав процес се, дакле, обавља аутоматски, слика 5.23.



Слика 5.23 Сензори положаја на уређају

На основу испуњене листе свих захтева, пројектована је и развијена четврта варијанта уређаја за испитивање материјала затезањем, слика 5.24. Основне целине уређаја су: носећа конструкција кидалице; погонски систем; прихватни елементи за узорке (епрувете) и систем за центрирање и вођење по оси затезања; граничници положаја; мерни систем (сензор силе и сензор померања); систем за управљање (одговарајуће електронске компоненте) са одговарајућим софтвером.

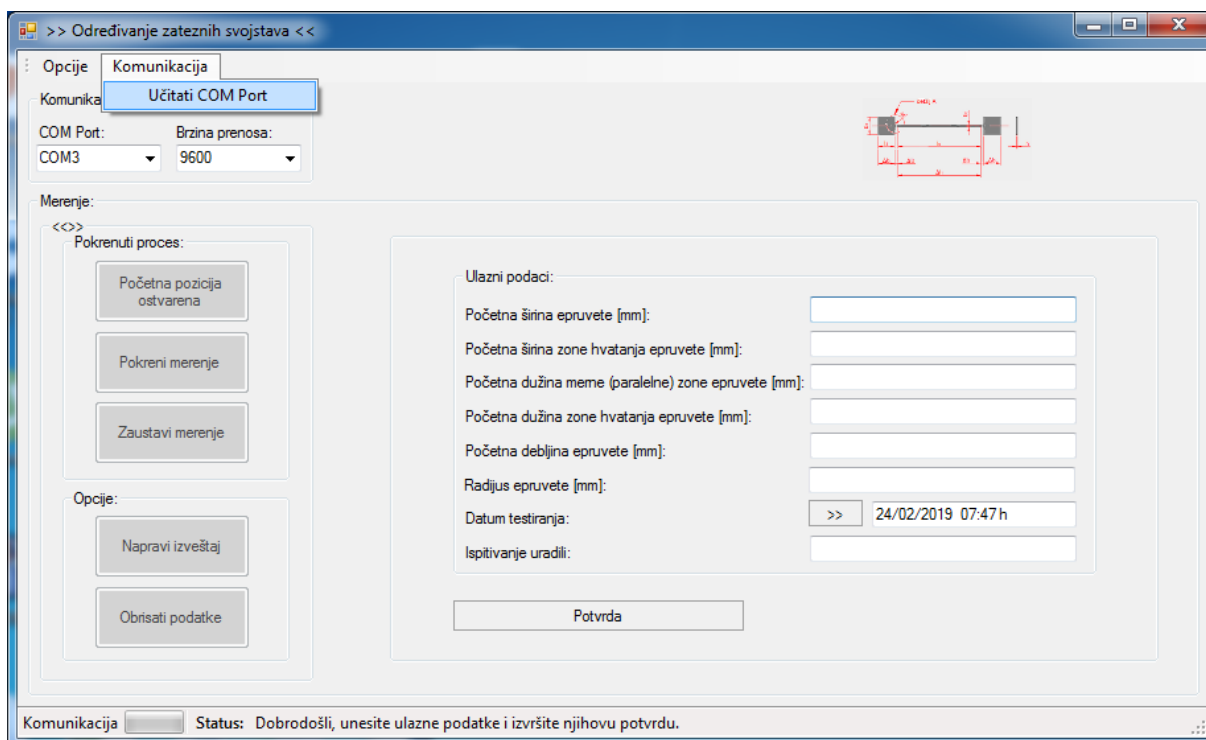


Слика 5.24 Уређај за испитивање материјала затезањем: 1) носећа конструкција уређаја, 2) лева чељуст кидалице, 3) десна чељуст кидалице, 4) помично мерило, 5) централна управљачка јединица, 6) степ (корачни) мотор, 7) каишни преносник, 8) динамометар, 9) рачунар и 10) чауре за притезање епрувете у стезним чељустима уређаја

Обрада мерених података врши се помоћу софтвера Кидалица који је развијен у програму Visual Studio C++.

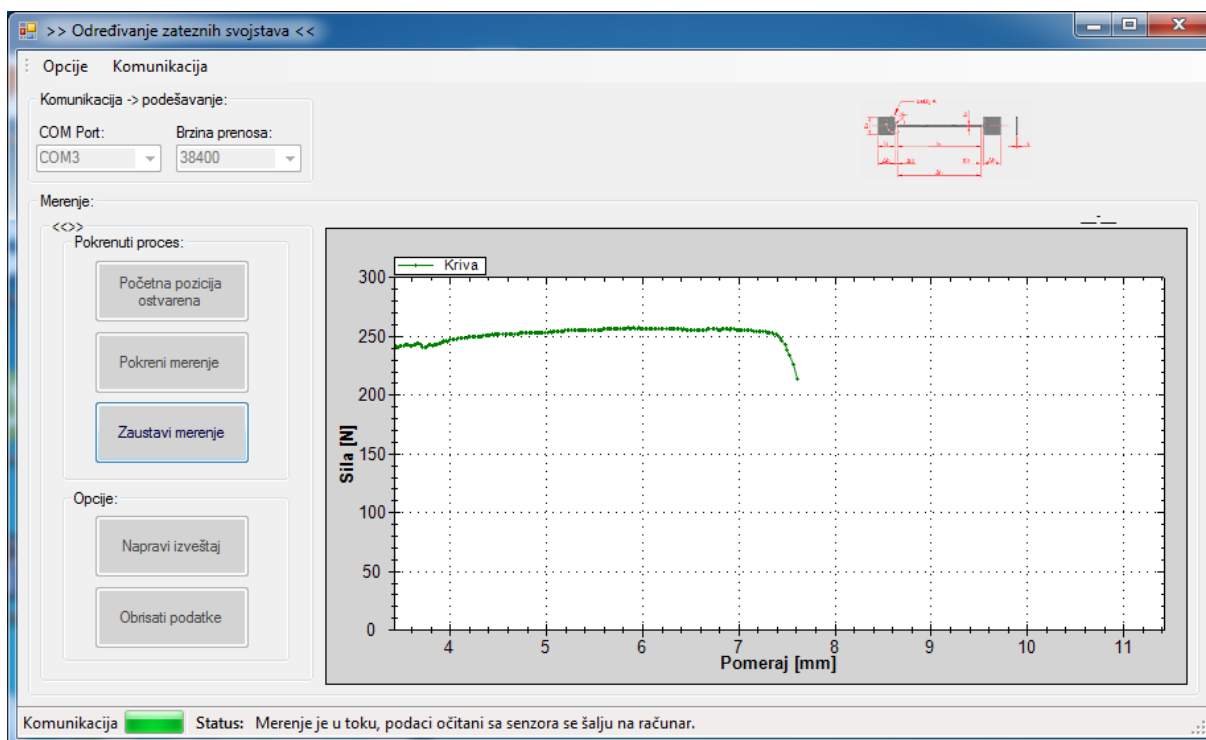
На основу теоријских разматрања у поглављу 4.3. извршен је развој софтвера и његова имплементација на уређају за испитивање материјала затезањем, чиме је омогућена

аутоматска обрада података добијених испитивањем. Као што је приказано на слици 5.25, пре почетка испитивања у почетну страницу софтвера уносе се измерени почетни подаци о геометрији епрувете.



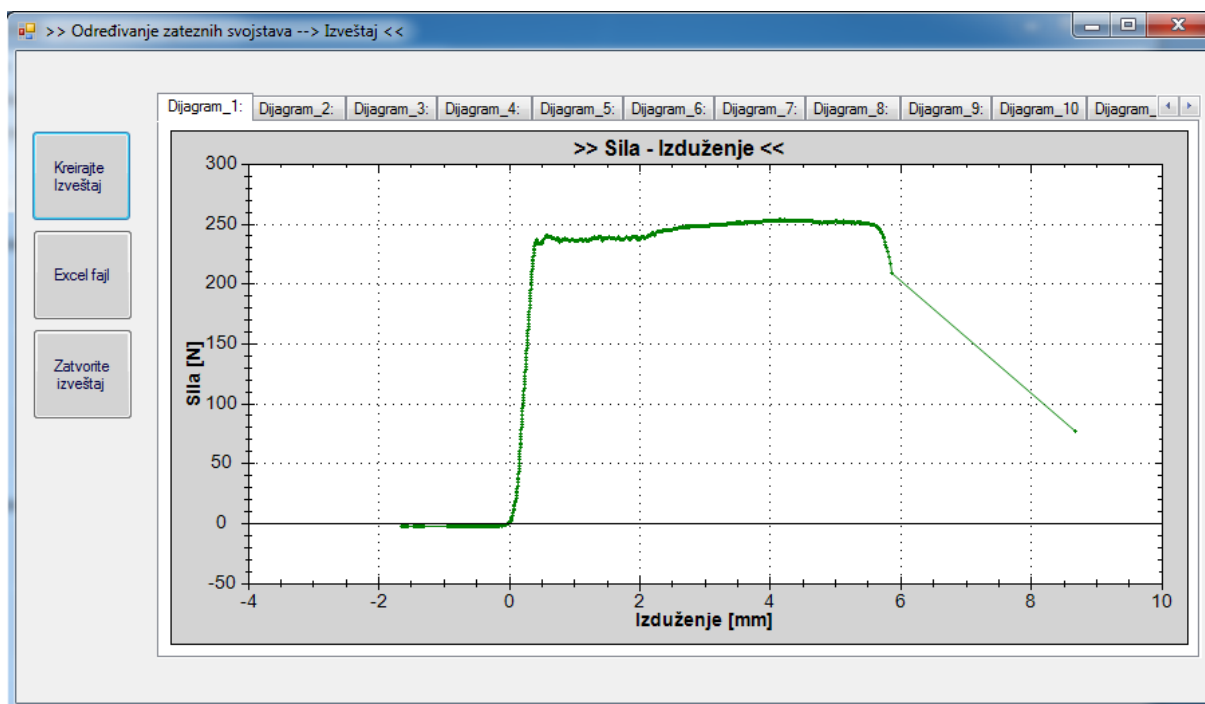
Слика 5.25 Почетни екран при покретању софтвера Кидалица

Након правилно унетих димензија епрувете, потврђује се унос и покреће мерење. Комплетан ток испитивања се прати исцртавањем дијаграма сила - издужење, слика 5.26.



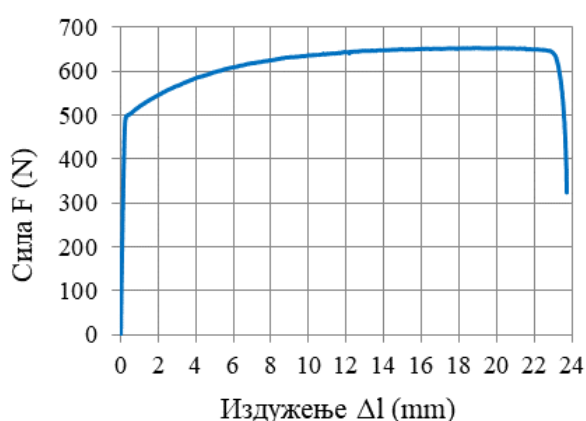
Слика 5.26 Дијаграм сила - издужење у реалном времену у току испитивања материјала

По завршетку мерења, процес се зауставља, а софтвер Кидалица нуди опцију креирања извештаја у форматима погодним за даљу обраду или прегледног извештаја са свим потребним дијаграмима добијених резултата испитивања материјала, слика 5.27.

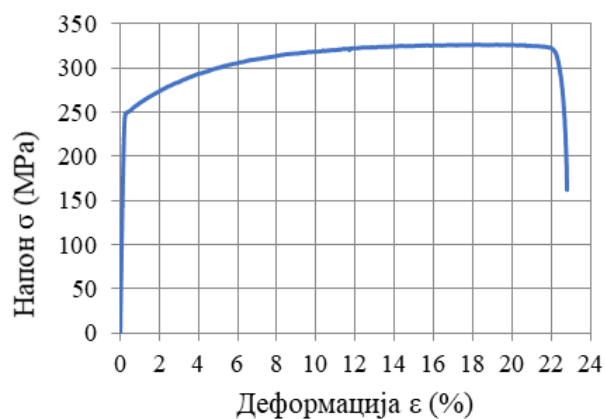


Слика 5.27 Креирање извештаја и дијаграма испитивања затезањем у софтверу Кидалица

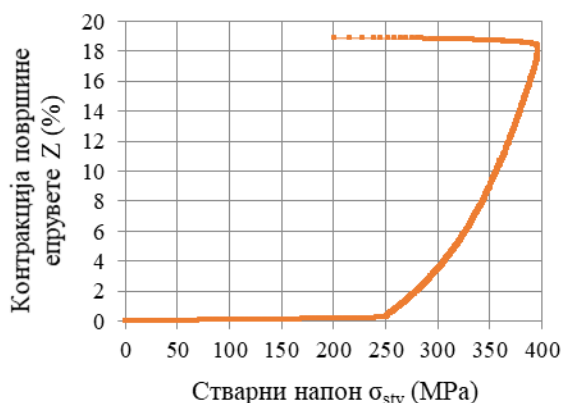
Након аутоматског прорачуна деформација испитиваног узорка у све три зоне (мерна дужина епрувете, зона радијуса и зона прихвата епрувете у стезне чељусту уређаја), софтвер омогућава аутоматски приказ дијаграма напон – деформација и стварни напон - деформација, као и приказ контракције пресека и смањења попречног пресека испитиване епрувете, као што је приказано на сликама 5.28 - 5.31.



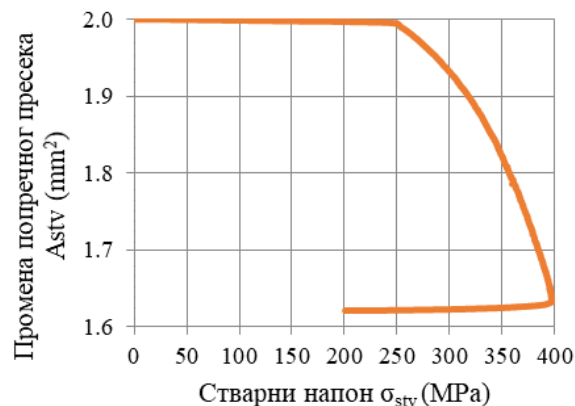
Слика 5.28 Дијаграм сила - издужење, добијен испитивањем челика на четвртој верзији уређаја



Слика 5.29 Дијаграм напон - деформација, добијен испитивањем челика на четвртој верзији уређаја



Слика 5.30 Дијаграм контракција површине - стварни напон, добијен испитивањем челика на четвртој верзији уређаја



Слика 5.31 Дијаграм промена попречног пресека - стварни напон, добијен испитивањем челика на четвртој верзији уређаја

Прелиминарна испитивања материјала на затезање на четвртој верзији уређаја дали су јако добре резултате. Резултати једне серије епрувета су поређени са резултатима добијеним на конвенционалним кидалицама. Неизвесност мерења модула еластичности материјала, као величине коју је јако тешко тачно одредити овом методом, износила је испод 1.6%, што је био један од основних захтева при побољшању и оптимизацији технолошког решења уређаја [S. Kostić, 2021].

5.2 ПРИМЕНА МЕТОДА ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ У ОЦЕНИ И ИЗБОРУ РАЗЛИЧИТИХ РЕШЕЊА КИДАЛИЦА

Оцена и рангирања различитих решења разматраног учила (алтернатива) је проблем који је важан како за пројектанта, тако и за произвођача и кориснике (студенти машинског инжењерства, инжењери индустријских предузећа и истраживачи). Третирани проблем може да се постави као проблем вишекритеријумске оптимизације. Решење проблема може да се добије применом различитих вишекритеријумских метода оптимизације. У овом докторском раду, разматрани проблем је решен у два корака. У првом кораку, одређивање релативне важности критеријума различитих решења је постављен као проблем групног одлучивања. Вектор тежина критеријума је добијен применом аналитичког хијерархијског процеса односно АНР методе (*енг.* Analytic Hierarchical Process) [T.L. Saaty, 2013]. У другом кораку, приоритет алтернатива је добијен применом технике за одређивање преферентности помоћу сличности идеалном решењу односно TOPSIS методе (*енг.* The Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) [C.L. Hwang, K. Yoon, 1981]. Надаље, ове две методе су укратко изложене у циљу бољег разумевања предложеног модела.

5.2.1 ДЕФИНИСАЊЕ СКУПА ДОНОСИОЦА ОДЛУКА

Избор критеријума према којима се оцењују разматране алтернативе заснован је на процени доносилаца одлука. Процена њихове релативне важности заснована је на групном одлучивању. Сматра се да одлука може тачније да се донесе када у процесу одлучивања учествује више доносилаца одлука. Они формално могу да се поставе

скупом индекса $\{1, \dots, e, \dots, E\}$. Укупан број доносилаца одлука је означен као E . Индекс доносиоца одлука је означен као e , при чему је $e = 1, \dots, E$.

У проблему који се разматра у процесу одлучивања учествује четворо доносилаца одлука: пројектант ($e = 1$), менаџер финансија ($e = 2$), студенти ($e = 3$) и купци ($e = 4$). Процена релативне важности критеријума је заснована на већем броју студената и већем броју купаца. Сматра се да у скупу студената, сви студенти имају слично знање и слично искуство коришћења пројектованог учила и уређаја. Иста претпоставка може да се уведе када се разматра скуп купаца. Стога, укупна релативна важност сваког критеријума процењена од трећег и четвртог доносиоца одлука добија се применом оператора средња вредност.

5.2.2 ИЗБОР КРИТЕРИЈУМА ПРЕМА КОЈИМА СЕ ОЦЕЊУЈУ РАЗЛИЧИТА РЕШЕЊА УРЕЂАЈА

Намена уређаја за испитивање материјала затезањем је примена у индустрији, у истраживању, као и у едукацији студената техничких факултета. Избор критеријума према којима могу да се оцењују алтернативе су многобројни и различити. Надаље су укратко описани критеријуми који су класификовани у различите групе. Једна класа критеријума је означена као чврсти захтеви. То су критеријуми који морају да буду испуњени, јер њихово неиспуњење условљава апсолутну непогодност уређаја за употребу. Друга класа критеријума је означена као најмањи захтеви. Постоји и класа захтева која мора да буде испуњена у највећој мери, имајући у виду постојеће услове и сва пратећа ограничења; на овај начин се омогућава да решење буде оптимално.

У општем случају критеријуми према којима се оцењују алтернативе формално могу да се представе скупом индекса $\{1, \dots, k, \dots, K\}$. Укупан број критеријума је означен као K . Индекс критеријума је k , $k = 1, \dots, K$. Надаље је описан поступак избора критеријума према којима се оцењују различите варијанте учила.

Према систематизованом приказу особина и својстава конструкције [S. Jovičić, N. Marjanović, 2011] критеријуми као што су: функционалност, радне и помоћне функције уређаја, мали габарити, сигурност и др. су били у потпуности задовољени већ при изради првобитног решења тако да се нису разматрали у овом докторском раду. Прва верзија уређаја је успешно остваривала своје функције, као учило и уређај на којем се изводе експерименти истезања струне, са задовољавајућом тачношћу резултата испитиваних механичких карактеристика материјала (Нооке-ов дијаграм), кроз читав процес који је транспарентан.

- Критеријуми као што су: технологичност, погодност и економичност израде, такође су уочени као чврсти захтеви, који морају бити задовољени, без обзира на концепцију предложеног решења.
- Кориговање неизвесности мерења механичких карактеристика материјала и решавање проблема буке, било је у директној вези са решавањем проблема трења и саосности (посебно је било изражено у случају преласка са другог на треће решење). Преласком са трећег на четврто решење повећана је крутост уређаја и смањена неизвесност мерења механичких карактеристика материјала, са посебним освртом на тачност мерења модула еластичности. Направљен је значајан помак када је у питању тачност мерења, па је било

важно сазнати колико је тај аспект значајан потенцијалним корисницима уређаја. Први усвојени критеријум био је **Тачност мерења** ($k = 1$). Одговарајућа мерна несигурност за одређивање модула еластичности је између 1.2% и 5% (на нивоу поузданости од 95%) [SRPS EN ISO 6892-1:2020]. Овај критеријум припада групи квантитативних критеријума, јер су познати подаци о износу неизвесности мерења модула еластичности за разматрана решења, односно алтернативе и оне су: $\leq 10\%$, $\leq 5\%$, $\leq 2\%$, $\leq 1.6\%$, респективно.

- За кориснике разматраног уређаја веома је важно проценити стабилност конструкције, која између осталог зависи од пропорција носећег рама уређаја. Ергономска својства, попут погодности управљања и опслуживања, надаље означено као **Лакоћа руковања** ($k = 2$) разматран је као критеријум према којима алтернативе треба да се оцењују.
- Један од основних тржишних захтева сваког производа, па самим тим и разматраних решења учила, је да буде конкурентан на тржишту. Јединична цена продаје у највећој мери утиче на конкурентност учила. Стога, доносиоци одлука сматрају да је трећи критеријум **Цена коштања** ($k = 3$). Вредност и овог критеријума може да се опише прецизним бројевима.
- Првобитно решење је било прилагођено намени уређаја као учила, које се користи у процесу едукације студената. Остала решења, са смањењем неизвесности мерења, постала су погодна за употребу у индустрији и истраживањима. Са једне стране, коришћење мале лабораторијске кидалице за испитивање материјала омогућило је упознавање студената са одређеним физичким законима, особинама материјала, начинима њиховог испитивања итд. Такође, студенти су могли да уоче конструкцијска решења, везе, склопове, елементе итд. У таквим случајевима спољни изглед производа има веома малу важност за кориснике. При дизајнирању нових решења (алтернатива) имало се у виду да ће нови елементи (корачни мотор, електроника и сл.), поред функције аутоматизације управљања процесом истезања (којим се код првобитног решења управљало ручно), допринети бољем дизајну учила. Са друге стране, мала лабораторијска кидалица као уређај за индустријску примену и истраживање треба да буде тако пројектована да буде стабилна и истовремено одговарајућег дизајна. Имајући у виду да је уређај као учило намењен студентима, дакле припадницима генерације којима је електроника блиска и атрактивна, као и истраживачима и корисницима из индустрије, сматрало се да је **Дизајн уређаја** ($k = 4$) треба да се разматра као четврти критеријум [<https://www.tecquipment.com>].

Треба напоменути да критеријуми као што су употребљивост и својства коришћења (попут чврстоће, потрошње енергије, отпорности на корозију и хабање и погодност оправки), нису се разматрали јер они припадају класи захтева који су унапред усвојени и испоштовани.

5.2.3 ОДРЕЂИВАЊЕ РЕЛАТИВНЕ ВАЖНОСТИ КРИТЕРИЈУМА

У општем случају релативна важност критеријума може да се процени на: (1) директан начин и (2) преко матрице парова упоређења. У овом докторском раду пошло се од претпоставке да је доносиоцима одлуке значајно лакше да пореде сваки пар критеријума него да користе директан начин процене.

Конструисање матрице парова упоређења релативног односа важности критеријума, провера тачности процена и израчунавање вектора тежине критеријума засновано је на конвенционалној АНР методи [Т.Л. Saaty, 2013] која је надаље приказана.

Конвенционална АНР метода

Доносиоци одлука релативну важност критеријума процењују на уобичајеној скали мера која је приказана у Табели 5.1:

Табела 5.1 Скала мера

интензитет важности	дефиниција
1	једнак значај
2	слаба или мала
3	умерена важност
4	већа умерена важност
5	јака важност
6	већа јака важност
7	веома јака или демонстрирана важност
8	веома, веома јака
9	екстремни значај

Претпостављено је да релативна важност критеријума може на довољно добар начин да се представи помоћу матрице парова упоређења релативне важности критеријума:

$$A = [w_{kk'}]_{K \times K} \quad \text{и} \quad (k, k') = 1, \dots, K; \quad k \neq k' \quad (5.8)$$

Ова матрица има следеће особине [Т.Л. Saaty, 2013]:

- квадратна је и димензије ове матрице једнаке су броју разматраних критеријума,
- елементи на главној дијагонали нису дефинисани и
- елементи у односу на главну дијагоналу су симетрични.

Најмања вредност матрице A је једнака 1, а остале вредности су добијене када се та вредност помножи неком константом. У пракси, готово је немогуће да доносиоци одлуке изврше процене које обезбеђују да вредности елемената симетричних у односу на главну дијагоналу су уједно и реципрочне.

Из тог разлога, матрица парова упоређења релативне важности критеријума се са десне стране множи вектором колона тако да се добија матрична једначина:

$$[w_{kk'}]_{K \times K} \cdot [w_k]_{K \times 1} = K \cdot [w_k]_{K \times 1} \quad (5.9)$$

или сажето написано: $A \cdot w = K \cdot w$.

Елементи матрице парова упоређења релативног односа важности критеријума су нормализовани применом методе линеарне нормализације [J.C Pomerol, S. Varba-Romeo, 2000]. Нека је K сопствена вредност матрице A тада је w сопствени вектор који је

придружен матрици A . Све сопствене вредности матрице A искључују вредности 0 и 1. Решење горње матричне једначине означено је као десни сопствени вектор матрице A .

Да би решење било јединствено потребно је да матрица A буде конзистентна. Ако су сви елементи матрице A реципрочни у односу на главну дијагоналу онда се може сматрати да је испуњен потребан услов да матрица A буде конзистентна. Довољан услов постизања конзистентности матрице A је да сопствена вредност буде једнака K .

Примењујући методу сопственог вектора [Т.Л. Saaty, 2013] може да се израчуна сопствени вектор, λ_{\max} из матричне једначине:

$$A \cdot w = \lambda_{\max} \cdot w \quad (5.10)$$

Метода сопственог вектора је природна мера неконзистентности.

Мера конзистентности се одређује преко коефицијента конзистентности:

$$C.I. = C.R./R.I. \quad (5.11)$$

где је: $C.R.$ - однос конзистентности, $C.R. = \frac{\lambda_{\max} - K}{K-1}$ [Т.Р. Haker, 1998; Т.Л. Saaty, 2013], $R.I.$ су случајне вредности чије димензије зависе од димензије матрице [Т.Р. Haker, 1998] и које су приказане у Табели 5.2.

Табела 5.2 Вредности $R.I.$ у зависности од димензија матрице A

K	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$R.I.$	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57

Сматра се да је матрица A конзистентна ако и само ако је $C.I. \leq 0.01$. Ако није задовољен овај услов тада доносиоци одлуке поново морају да врше процене.

5.2.4 ОПИС АЛТЕРНАТИВА

Разматрана су четири описана решења уређаја, која су приказана на слици 5.32.

Алтернатива 1

- неизвесност мерења $\leq 10\%$
- мануелно руковање
- испитивање струна



Алтернатива 2

- неизвесност мерења $\leq 5\%$
- аутоматско управљање
- микроконтролер и повезивање са рачунаром за аквизицију података
- модул за испитивање на високим температурама
- проблем буке



Алтернатива 3

- неизвесност мерења $\leq 2\%$
- аутоматско управљање
- микроконтролер и повезивање са рачунаром за аквизицију података
- модул за испитивање на високим температурама
- кутија за Arduino Uno
- бешуман рад



Алтернатива 4

- неизвесност мерења $\leq 1.6\%$
- аутоматско управљање
- модул за испитивање на високим температурама
- побољшана крутост уређаја
- динамометар већег опсега мерења
- имплементација сензора положаја
- имплементација софтвера за аутоматску обраду података



Слика 5.32 Приказ алтернатива, четири варијанте мале лабораторијске кидалице

5.2.5 ПРЕДЛОЖЕНИ АЛГОРИТАМ

Предложени Алгоритам интегрише АНР методу [Т.Л. Saaty, 2013] и TOPSIS методу [С.Л. Hwang, К. Yoon, 1981]. У првој фази се одређује вектор тежине критеријума применом АНР методе. У другој фази се врши избор алтернатива помоћу модификоване TOPSIS методе.

Кораци развијеног Алгоритма су надаље приказани:

Корак 1. Поставити матрицу парова упоређења релативног односа важности критеријума на нивоу сваког доносиоца одлуке:

$$[w_{kk'}^e]_{K \times K} \quad (5.12)$$

Корак 2. Проверити конзистентност процене доносиоца одлуке e , $e = 1, \dots, E$ применом методе сопственог вектора [Т.Л. Saaty, 2013].

Корак 3. Одредити вектор тежина разматраних критеријума на нивоу сваког доносиоца одлуке:

$$[\omega_k^e]_{K \times 1} \quad (5.13)$$

Корак 4. Одредити агрегирани вектор тежина критеријума применом OWA оператора [К.Р. Yoon, С.Л. Hwang, 1995]:

$$[\omega_k]_{K \times 1} \quad (5.14)$$

тако да:

$$\omega_k = \varphi_e \cdot \omega_k^e \quad (5.15)$$

Корак 5. Поставити матрицу одлучивања:

$$[x_{ik}] \quad (5.16)$$

Корак 6. Конструисати нормализовану матрицу одлучивања $[r_{ik}]$ применом методе векторске нормализације [J.C Pomerol, S. Varba-Romeo, 2000], тако да:

а) за бенефитан тип критеријума:

$$r_{ik} = \frac{x_{ik}}{\sqrt{\sum_{i=1, \dots, I} x_{ik}^2}} \quad (5.17)$$

б) за небенефитан тип критеријума:

$$r_{ik} = \frac{1/x_{ik}}{\sqrt{(\sum_{i=1, \dots, I} 1/x_{ik}^2)}} \quad (5.18)$$

Корак 7. Конструисати отежану нормализовану матрицу одлучивања $[z_{ik}]$, тако да:

$$z_{ik} = \omega_k \cdot r_{ik} \quad (5.19)$$

Корак 8. Одредити Позитивно идеално решење (енг. Positive Ideal Solution) PIS и Негативно идеално решење NIS (енг. Negative Ideal Solution) тако да су дистанце дате изразима:

$$d_i^+ = \sum_{k=1, \dots, K} \omega_k \cdot |PIS - r_{ik}| \quad (5.20)$$

$$d_i^- = \sum_{k=1, \dots, K} \omega_k \cdot |NIS - r_{ik}| \quad (5.21)$$

Корак 9. Одредити вредност коефицијента приближења за сваку алтернативу:

$$c_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (5.22)$$

Корак 10. Сортирати вредности коефицијента приближења у опадајући ред. На првом месту се налази она алтернатива којој је придружена највећа вредност коефицијента приближења. Ова алтернатива може се сматрати најбољом. На последњем месту је алтернатива којој је придружена најмања вредност коефицијента приближења, тако да се ова алтернатива може сматрати најлошијом.

5.2.6 ДИСКУСИЈА ДОБИЈЕНИХ РЕШЕЊА

Рангирање разматраних алтернатива према дефинисаним критеријумима је извршено применом предложеног Алгорита.

Матрице парова упоређења релативног односа важности критеријума доносиоца одлука су постављене и израчуната је вредност коефицијента конзистенције (Корак 1 до Корак 2 развијеног Алгорита):

<p>Пројектант:</p> $\begin{bmatrix} - & 9 & 5 & 3 \\ & - & 1/2 & 1/4 \\ & & - & 1/3 \\ & & & - \end{bmatrix}, \text{C.I.} = 0.02$	<p>Финансијски менаџер:</p> $\begin{bmatrix} - & 1/2 & 1/8 & 1 \\ & - & 1/7 & 1 \\ & & - & 6 \\ & & & - \end{bmatrix}, \text{C.I.} = 0.03$
<p>Студенти:</p> $\begin{bmatrix} - & 1/3 & 1/7 & 1/2 \\ & - & 1/2 & 1 \\ & & - & 1/5 \\ & & & - \end{bmatrix}, \text{C.I.} = 0.04$	<p>Купци:</p> $\begin{bmatrix} - & 7 & 1 & 5 \\ & - & 1/8 & 1/4 \\ & & - & 6 \\ & & & - \end{bmatrix}, \text{C.I.} = 0.08$

Применом методе сопствене вредности [T.L. Saaty, 2013] проверена је конзистентност процене сваког доносиоца одлуке. Ова метода је илустрована на примеру пројектанта:

$$\begin{bmatrix} 1 & 9 & 5 & 3 \\ 1/9 & 1 & 1/2 & 1/4 \\ 1/5 & 2 & 1 & 1/3 \\ 1/3 & 4 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

Нормализована матрица парова упоређења релативне важности критеријума је:

$$\begin{bmatrix} 0.608 & 0.562 & 0.526 & 0.655 \\ 0.067 & 0.062 & 0.052 & 0.055 \\ 0.122 & 0.125 & 0.105 & 0.073 \\ 0.203 & 0.250 & 0.316 & 0.218 \end{bmatrix}$$

Вектор тежина критеријума на нивоу пројектанта је:

$$\begin{bmatrix} 0.608 & 0.562 & 0.526 & 0.655 \\ 0.067 & 0.062 & 0.052 & 0.055 \\ 0.122 & 0.125 & 0.105 & 0.073 \\ 0.203 & 0.250 & 0.316 & 0.218 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.588 \\ 0.059 \\ 0.106 \\ 0.247 \end{bmatrix}$$

Одредимо максималну сопствену вредност, λ_{\max} :

$$\begin{bmatrix} 1 & 9 & 5 & 3 \\ 1/9 & 1 & 1/2 & 1/4 \\ 1/5 & 2 & 1 & 1/3 \\ 1/3 & 4 & 3 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.588 \\ 0.059 \\ 0.106 \\ 0.247 \end{bmatrix} = \lambda \cdot \begin{bmatrix} 0.588 \\ 0.059 \\ 0.106 \\ 0.247 \end{bmatrix}$$

тако да:

$$\begin{bmatrix} 2.390 \\ 0.239 \\ 0.424 \\ 0.997 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda \cdot 0.588 \\ \lambda \cdot 0.059 \\ \lambda \cdot 0.106 \\ \lambda \cdot 0.247 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{matrix} \lambda_1 = 4.065 \\ \lambda_2 = 4.053 \\ \lambda_3 = 3.999 \\ \lambda_4 = 4.036 \end{matrix}$$

и $\lambda_{\max} = 4.065$

Коефицијент конзистентности (C.I.) је:

$$C.R. = \frac{4.065 - 4}{3} = 0.022$$

$$C.I. = \frac{0.022}{0.9} = 0.024 \approx 0.02$$

На сличан начин израчунате су вредности коефицијената конзистентности процена осталих доносилаца одлуке.

Како су вредности коефицијента конзистентности ($C.I. \leq 0.1$) на нивоу сваког доносиоца одлуке, следи, да се могу усвојити њихове процене као тачне.

Вектор тежина критеријума (Корак 3 развијеног Алгоритма) на нивоу сваког доносиоца одлуке је добијен према процедури коју је развио [T.L. Saaty, 2013], тако да:

Пројектант:	$\begin{bmatrix} 0.588 \\ 0.059 \\ 0.106 \\ 0.247 \end{bmatrix}$	Финансијски менаџер:	$\begin{bmatrix} 0.083 \\ 0.121 \\ 0.692 \\ 0.104 \end{bmatrix}$
Студенти:	$\begin{bmatrix} 0.090 \\ 0.227 \\ 0.306 \\ 0.377 \end{bmatrix}$	Купци:	$\begin{bmatrix} 0.405 \\ 0.046 \\ 0.438 \\ 0.110 \end{bmatrix}$

Агрегирани вектор тежине разматраних критеријума (Корак 4 развијеног Алгоритма) рачуна се применом OWA оператора [K.P. Yoon, C.L. Hwang, 1995]. Ова процедура је илустрована на примеру одређивања тежине критеријума који је означен као тачност мерења ($k = 1$):

$$\omega_1 = 0.35 \cdot 0.588 + 0.1 \cdot 0.083 + 0.2 \cdot 0.090 + 0.35 \cdot 0.405 = 0.374$$

На сличан начин су израчунате тежине осталих критеријума, тако да:

$$\omega_2 = 0.094, \omega_3 = 0.357 \text{ и } \omega_4 = 0.211$$

Матрица одлучивања (Корак 5 развијеног Алгоритма) је:

	k = 1	k = 2	k = 3	k = 4
i = 1	≤10%	2	500	2
i = 2	≤5%	4	600	3
i = 3	≤2%	7	1000	5
i = 4	≤1.6%	8	1200	8

Треба напоменути да вредности критеријума који је означен као тачност мерења ($k = 1$) је одређен неизвесношћу мерења модула еластичности. Вредности цене коштања ($k = 3$) је одређена на основу цена уложеног материјала и рада респектујући цене сличних уређаја које постоје на тржишту. Вредности лакоће руковања ($k = 2$) и дизајна ($k = 4$) су добијени на основу процене доносиоца одлука који користе уобичајену скалу мера [T.L. Saaty, 2013]. Вредност 1, односно 9 означава најмању, односно највећу вредност разматраног критеријума, респективно.

Нормализована матрица одлучивања је (Корак 6 развијеног алгоритма):

	k = 1	k = 2	k = 3	k = 4
i=1	0.1203	0.1734	0.6871	0.1980
i=2	0.2407	0.3468	0.5726	0.2970
i=3	0.6017	0.6069	0.3436	0.4951
i=4	0.7521	0.6937	0.2863	0.7921

Применом развијеног Алгоритма (Корак 7 до Корак 8) добија се отежана нормализована матрица одлучивања, као и PIS и NIS:

	k=1	k=2	k=3	k=4
i = 1	0.0450	0.0163	0.2452	0.0418
i = 2	0.0900	0.0326	0.2044	0.0627
i = 3	0.2250	0.0570	0.1227	0.1045
i = 4	0.2813	0.0652	0.1022	0.1671
PIS	0.2813	0.0652	0.2452	0.1671
NIS	0.0450	0.0163	0.1022	0.0418

Одређивање коефицијента приближења (Корак 9 развијеног Алгоритма) је илустровано за алтернативу (i = 2):

$$d_2^+ = |0.2813 - 0.0900| + |0.0652 - 0.0326| + |0.2452 - 0.2044| + |0.1671 - 0.0627| = 0.3691$$

$$d_2^- = |0.0450 - 0.0900| + |0.0163 - 0.0326| + |0.1022 - 0.2044| + |0.0418 - 0.0627| = 0.1844$$

тако да:

$$c_2 = \frac{0.1844}{0.1844 + 0.3691} = 0.3332$$

На сличан начин израчунате су вредности коефицијента приближења за остале алтернативе. У Табели 5.3 приказане су израчунате вредности и ранг алтернатива (Корак 10 развијеног алгоритма).

Табела 5.3 Вредности коефицијента приближења и ранг алтернатива

	c_i	ранг
i = 1	0.2583	4
i = 2	0.3332	3
i = 3	0.5491	2
i = 4	0.7416	1

На основу добијених резултата може се закључити да је најбоља алтернатива са респектовањем унапред дефинисаних критеријума четврта алтернатива. Другим речима, побољшања која су извршена на разматраном уређају су допринела да уређај буде атрактивнији како за пројектанта тако и за кориснике.

6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА

6.1 ПЛАН ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСПИТИВАЊА

План експерименталних испитивања приказан је алгоритмом на слици 6.1. Представља главне етапе у експерименталном испитивању, хронолошким редом.



Слика 6.1 План експерименталних испитивања

6.1.1 МАТЕРИЈАЛИ ЗА ИСПИТИВАЊЕ

Прва етапа плана експерименталних испитивања односи се на одабир материјала испитивања. Први усвојени материјал за испитивање затезањем је топловаљани нискоугљенични челик S355J2 хемијског састава: $\leq 0.22\%$ C, $\leq 0.55\%$ Si, $\leq 1.6\%$ Mn, $\leq 0.025\%$ P, $\leq 0.025\%$ S, $\leq 0.55\%$ Cu [EN 10025-2:2004]. Механичке и физичке

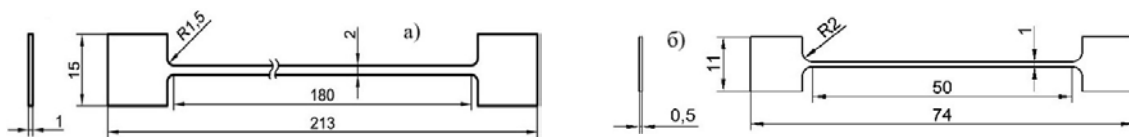
карактеристике нискоугљеничног челика S355J2 су: модул еластичности = 210 GPa, тврдоћа = 185 HV, затезна чврстоћа = 510-680 MPa, граница еластичности = 355 MPa, Poisson-ов коефицијент = 0.3 и густина = 7.800 g/cm³. Ови челици су погодни за већину општих примена. Највише се користе у грађевинарству и машинству. Примене укључују израду компонената, контејнера, резервоара и хладно обликованих профила.

Облик и геометријске карактеристике епрувете су у складу са теоријским разматрањима датим у трећем поглављу овог рада. Од лима дебљине 1 mm сечене су епрувете правоугаоног попречног пресека на ширину 2 mm, па је површина попречног пресека испитиваних узорака износила 2 mm², слика 6.2.



Слика 6.2 Облик епрувете од материјала челик S355J2

Сви испитивани узорци су исецани из исте табле лима са истим правцем исецања и истим параметрима машине. Епрувете су сечене Waterjet-ом. Облик и димензије епрувете прилагођене су уређају на коме су вршена испитивања, слика 6.3 а. Дебљина и ширина епрувета се мере микрометром са тачношћу од $\pm 10 \mu\text{m}$, пре сваког испитивања.

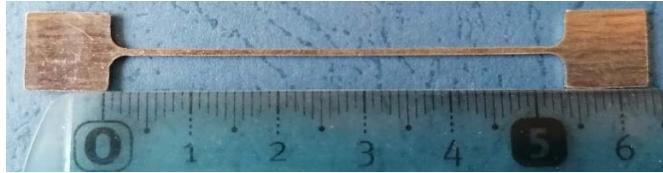


Слика 6.3 Димензије епрувете за испитивање затезањем на малој, лабораторијској кидалици:
а) материјал челик S355J2, б) материјал челик DC01

Резултати добијени испитивањем материјала S355J2 на малој, лабораторијској кидалици су поређени са резултатима из литературе, добијеним за исти материјал на стандардним, конвенционалним кидалицама [A.R. Dišić, 2018].

Планом експерименталних испитивања предвиђено је одређивање механичких карактеристика хладноваљаног нискоугљеничног челика EN10130 квалитета DC01. Нискоугљенични челик DC01 је материјал који се широко примењује у индустрији (у аутоиндустрији, сектору кућних апарата, производњи металног намештаја, резервоара, радијатора, вентилатора, цеви и малих профила), због своје приступачности и ниже цене. Хемијски састав: $\leq 0.12\% \text{ C}$, $\leq 0.6\% \text{ Mn}$, $\leq 0.045\% \text{ P}$, $\leq 0.045\% \text{ S}$, $\leq 0.03\% \text{ Si}$, $\leq 0.02\% \text{ Al}$. Механичке и физичке карактеристике нискоугљеничног челика DC01 су: модул еластичности = 210 GPa, тврдоћа = 105 HV, затезна чврстоћа = 270-410 MPa, граница еластичности = 280 MPa, Poisson-ов коефицијент = 0.29 и густина = 7.800 g/cm³.

Од лима дебљине 0.5 mm ласерским зраком на машини Electra FL 3015 су сечене епрувете правоугаоног попречног пресека на ширину 1 mm, па је површина попречног пресека испитиваних узорака износила 0.5 mm², слика 6.4.



Слика 6.4 Облик епрувете од материјала челик DC01

Сви испитивани узорци су исецани из исте табле лима са истим правцем исецања и истим параметрима машине. Облик и димензије епрувете прилагођене су комори уређаја за испитивање, у којој се врши загревање епрувета на дефинисаним температурама, слика 6.3 б. Да би се упознале механичке карактеристике материјала у оквиру задатих температурних поља, потребно је извести бројна испитивања, јер понашање структуре материјала на вишим температурама мора бити познато још у фази пројектовања. Увек треба имати у виду да се понашање било којих структура под термичким оптерећењем може разликовати од њиховог понашања под механичким оптерећењем, у зависности од радне температуре.

Планом експерименталних испитивања предвиђено је одређивање механичких карактеристика неметалних материјала. Испитиване су две групе узорака од полипропиленског везива ТИП800, слика 6.5, по 30 узорака из сваке серије. Маса оригиналног паковања везива је 1 kg, дужинска маса износи 800 ± 64 m/kg, линеарна густина је 1250 tex, односно 11250 den. Дужинска маса представља финоћу везива, односно однос масе и дужине везива и директно је сразмерна површини попречног пресека. Јединице за изражававање финоће везива су дате у тексима или денијерима.



Слика 6.5 Полипропиленско везиво ТИП800

Испитивање затезањем вршено је на узорцима без преднапрезања увијањем и узорцима код којих је пре испитивања извршено увијање везива. Приликом преднапрезања узорака увијањем водило се рачуна да се не достигне висок ниво увијања и тиме утиче на смањење чврстоће материјала. Увијање везива вршено је фиксирањем везива у стезне чељусти мале лабораторијске кидалице и ротирањем око правца затезања везива унапред дефинисаном ротацијом и бројем увијања фиксне дужине везива, уз одржавање благог затезања. Број увијања, који се означава са N представља n -обртаја за 360° око осе и за сваки узорак је $N = 8$. Након увијања бележена је дужина везива. Познавајући денијере и

густину полипропиленског везива $\rho = 0.9 \text{ g/cm}^3$, израчуната је површина попречног пресека везива на узорцима из обе серије.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot m}{\rho \cdot l \cdot \pi}} \quad (6.1)$$

где су m , ρ и l маса, густина и дужина везива респективно.

Ефективна мерна дужина узорака је приближно 145 mm (средња вредност 30 узорака из сваке серије узорака).

6.1.2 УСЛОВИ ЗА ИСПИТИВАЊЕ МАТЕРИЈАЛА

Друга етапа плана експерименталних испитивања се односи на дефинисање услова у којима ће се вршити испитивање, који зависе од тога да ли ће се материјал испитивати на затезање на собној или повишеним температурама. Сва испитивања материјала (челик S355J2 и полипропиленско везиво ТИП800) затезањем на собној температури су извршена у стандардним условима, при температури $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ и релативној влажности $65 \pm 2\%$. Експерименти су спроведени у контролисаним микроклиматским условима по стандарду SRPS EN ISO 6892-1:2020 (идентичан са EN ISO 6892-1:2019). Сва наведена испитивања затезањем су са истим брзинама затезања како би било могуће међусобно поређење добијених података и износиће 2.5 mm/min .

Планом експерименталних истраживања предвиђено је испитивање епрувете од челика DC01 на повишеним и високим температурама у интервалу од 23 ± 2 до $600 \text{ }^\circ\text{C}$, у складу са основним прописима датим у стандарду SRPS EN ISO 6892-2:2018. Сви остали услови испитивања су идентични дефинисаним условима испитивања материјала на собној температури.

6.1.3 РЕШЕЊЕ КОНСТРУКЦИЈЕ УРЕЂАЈА ЗА ИСПИТИВАЊЕ

Идејно решење уређаја за испитивање материјала затезањем је детаљно описано у петом поглављу овог рада, а обухвата функционалност будућег производа, односно конструкције, са посебним освртом на тачност мерења механичких карактеристика материјала и ниску цену коштања уређаја. Као што је већ наглашено, у почетној фази почиње и процес оптимизације, где се на основу захтева који морају бити испуњени и одређених ограничења добија оптимално принципско решење.

6.1.4 РЕШЕЊЕ СИСТЕМА ЗА ПРЕНОС И АКВИЗИЦИЈУ ПОДАТАКА

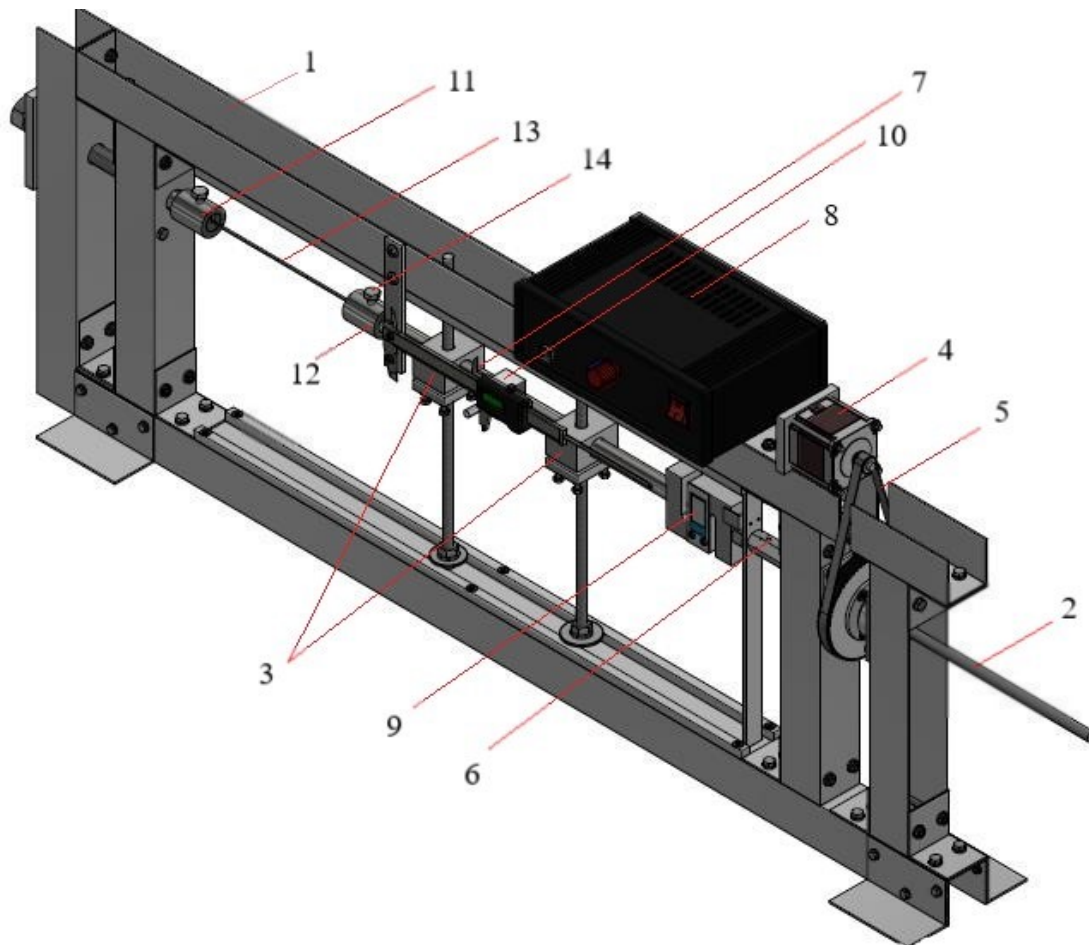
Од избора материјала зависе површина попречног пресека узорка (епрувете) и потребне силе затезања. Ови подаци неопходни су за оптимизацију конструкције мерног система, који обухвата мерни систем за мерење силе затезања, динамометар, и мерни систем за мерење померања стезне чељусту кидалице, кљунасто мерило. Након дефинисања

идејног решења конструкције уређаја приступа се генерисању идејног решења система за пренос и аквизицију, тј. прикупљање података. Засебан систем уређаја чини пратећа електроника која је смештена у кутији, а састоји се од контролера, потенциометра за промену смера задавања оптерећења и AD конвертора. Обрада мерених података врши се помоћу софтвера кидалице који је развијен у програму Visual Studio C++, као што је речено у поглављима 4.3.3. и 5.1.4 овог рада.

6.1.5 РАЗВОЈ УРЕЂАЈА ЗА ИСПИТИВАЊЕ

Након дефинисања идејног решења конструкције уређаја за испитивање и свих система који обезбеђују његову функционалност, отклоњени су сви недостаци конструкције и мерног система и склопљен је уређај за испитивање материјала на собним температурама, што је задовољило потребе планираног експеримента. По завршетку израде конструкције уређаја и мерног система, врши се пробно испитивање у циљу испитивања тачности система за мерење силе затезања и система мерења померања. Како су тачност и поузданост система дали податке у очекиваним опсезима, приступа се обављању планираних испитивања материјала на затезање на собним температурама.

За потребе испитивања материјала пројектован је и развијен уређај за испитивање материјала затезањем, слика 6.6, који се применом метода вишекритеријумске оптимизације у оцени и избору различитих решења кидалица показао као најбољи.



Слика 6.6 Уређај за испитивање материјала затезањем

Конструкцију кидалице чине целине:

- Носећа конструкција кидалице (1) је урађена од крутих алуминијумских профила, који су спојени растављивом везом. Прихватни елемент - стабилна лева стезна чељуст је фиксирана за леви стуб кидалице.
- Систем за центрирање и вођење по оси затезања (2) решен је преко линеарних лежајева (3) који су смештени у кућиштима, која се могу подешавати и фиксирати по све три осе. На тај начин, паразитне силе, односно силе трења и силе које могу настати услед ексцентричности силе затезања у односу на кинематску осу, су такоређи елиминисане, односно сведене на минималну вредност.
- Погонски систем кидалице чини корачни мотор (4), зупчасти каишни преносник (5) и линеарни преносник, односно завојно вретено (6) и елементи који спречавају обртање завојног вретена услед момента трења у навојном споју кога чине завојно вретено и зупчаста ременица.
- Четврти систем кидалице чине граничници положаја (7) који су смештени на задњем делу кидалице. Уз помоћ два индуктивна сензора подешавају се гранични положаји - почетни положај, када почиње процес испитивања затезањем и крајњи положај, када преко сензора систем за управљање добија сигнал да се заустави рад електромотора. Читав процес се обавља аутоматски.
- Засебан систем чини пратећа електроника, која је смештена у кутији (8), а састоји се од контролера, потенциометра и АД конвертора.
- Мерни систем, кога чине динамотетар (9), који ради у опсегу сила до 2000 N, и помично мерило (10) са опсегом померања од 150 mm. Тачност мерења динамометра је 0.6 N, а помичног мерила 0.01 mm.
- За потребе испитивања при повишеним и високим температурама, кидалица поседује комору за загревање узорака (епрувета) до жељене температуре. Модул за испитивање на високим температурама се састоји од напојног кабла и напојног конектора, исправљача унутар кутије, где је смештен и терморегулатор који комуницира са сондом, која је смештена у комори. Сонда, у зависности од вредности постигнуте температуре, даје информацију терморегулатору када треба прекинути струјно коло ка грејачу, односно загревање. Комора се може померати захваљујући клизачима смештеним на основној конструкцији. Дакле, када се врше испитивања при високим температурама, модул се помера на леву страну. Епрувета и читав систем који обухвата дужину епрувете и дужину истезања епрувете ће се налазити у зони која одржава тачно одређену задату температуру. При мерењима на собним температурама, комора се помера у десну страну и тада неће бити прикачен модул за високе температуре. Капацитет коморе и грејача омогућава загревање узорака до 700 °C. Кидалица је намењена испитивању металних и неметаних материјала, а опсег температура коморе задовољава потребе испитивања материјала на повишеним и високим температурама. Захваљујући квалитетној изолацији коморе, упркос достизању високих температура, комора се слободно може додирнути.

Управљачка јединица (8) се напојним каблом постављаним у утичницу повезује са напајањем од 220 V (50 KHz). Активирањем прекидача на предњој страни управљачке јединице пушта се струја напона 220 V, који ће исправљач напона, смештен унутар управљачке јединице, претворити у напон од 12 V, тако да је цео систем управљања безбедан за руковање. Преко USB кабла централна управљачка јединица се повезује са

рачунаром који се користити за прикупљање података. Десна стезна чељуст кидалице (12) се поставља у почетни положај (лева чељуст кидалице (11) је непомична). Епрувета за испитивање материјала (13) се позиционира и прихвата у стезне чељусту. Врши се притезање епрувете преко чаура са вијцима (14), на начин који је детаљно описан у претходној глави овог рада.

Уз помоћ десног прекидача на предњој страни управљачке јединице активира се погон кидалице, односно корачни мотор. Корачни мотор врши затезање покретне чељусту у процесу испитивања или враћање чељусту у почетни положај након испитивања, променом смера електромотора једноставним окретањем потенциометра на једну или другу страну. Брзина којом се задаје оптерећење при процесу испитивања односно затезања материјала, дефинише се помоћу јединице (драјвер) која управља радом корачног мотора тј. дефинисањем броја корака мотора у јединици времена. Број корака мотора се програмски прерачунава у померање навојног вретена тј. чељусту уређаја и исписује на дисплеју јединице. Мотор се у смеру опуштања окреће знатно брже, како би се што пре успоставио почетни положај. У тренутку када стезна чељуст заузме почетни положај, индуктивни сензор зауставља кретање електромотора. Индуктивни сензор, такође, врши заустављање електромотора одмах након кидана епрувете.

Пре почетка испитивања, када је епрувета позиционирана и причвршћена у стезним чељустима уређаја, у почетни положај се доводи помично мерило, нулира се и на тај начин задаје референтна тачка. Након активирања софтвера за аквизицију података, уносом улазних података о геометријским карактеристикама епрувете покреће се мерење, стартовањем корачног мотора који преко каишног преносника врши пренос кретања на завојно вретено. На тај начин се врши задавање оптерећења на испитивани узорак, односно његово затезање.

Након завршеног испитивања, софтвер кидалице пружа могућност прављења извештаја у облику Excel датотеке са табеларним вредностима силе и издужења или датотеке у pdf формату, која садржи дијаграме зависности мерених величина сила - издужење, као и дијаграме који се добијају обрадом података након испитивања, као што су дијаграми напон - деформација, стварни напон деформација, зависност површине попречног пресека од напона, зависност контракције попречног пресека од напона итд.

Последње две етапе плана испитивања, испитивање материјала при дефинисаним условима и анализирање резултата добијених експериментима, биће обухваћене у наредној тачки 6.2. овог рада, у оквиру које су приказани резултати експеримената.

6.2 РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЕРИМЕНАТА

Резултати експеримената ће бити приказани и анализирани по следећем редоследу:

- Испитивање материјала S355J2 затезањем на собној температури. Резултати су поређени са резултатима испитивања добијеним на конвенционалној кидалици.
- Испитивање материјала DC01 затезањем на собној, повишеним и високим температурама. Резултати су поређени са резултатима из литературних извора.

- Испитивање неметалних материјала на затезање на собној температури. Испитивани су узорци полипропиленског везива ТИП800. Резултати су показали сагласност са теоријским разматрањима.

6.2.1 ИСПИТИВАЊЕ МАТЕРИЈАЛА S355J2 ЗАТЕЗАЊЕМ НА СОБНОЈ ТЕМПЕРАТУРИ

Облик и геометријске карактеристике епрувете дате су на сликама 5.20 и 5.21. Слика 5.20 представља епрувету стандардног облика која се користи за испитивање материјала на конвенционалним кидалицама. Слика 5.21 и 6.3 а) илуструју димензије и облик нестандардне епрувете која се користи за испитивање материјала затезањем на малој лабораторијској кидалици. Како би добијени резултати испитивања били упоредиви епрувете су израђене од истог материјала, топловаљаног нискоугљеничног челика S355J2. Такође се водило рачуна о условима под којима је експеримент извршен, а у складу са стандардом SRPS EN ISO 6892-1:2020.

За испитивање материјала S355J2 на малој лабораторијској кидалици МЛК, тестирано је 5 узорака. За процену неизвесности разматрано је само једно испитивање, које је представљало најприближнију вредност средњој вредности за серију мерења од 5 узорака. Стандардни узорак за конвенционалну кидалицу КК је имао почетну мерну дужину 80 mm. Почетна мерна дужина епрувете је 180 mm за малу лабораторијску кидалицу. Код обе, толеранција облика је ± 0.05 mm, паралелност је ± 0.1 mm, средње висине неравнина површина епрувета су $R_z < 6.3$ μ m, у складу са стандардом [W. Gabauer, 2000]. Током експерименталних истраживања мерени су сила и издужење.

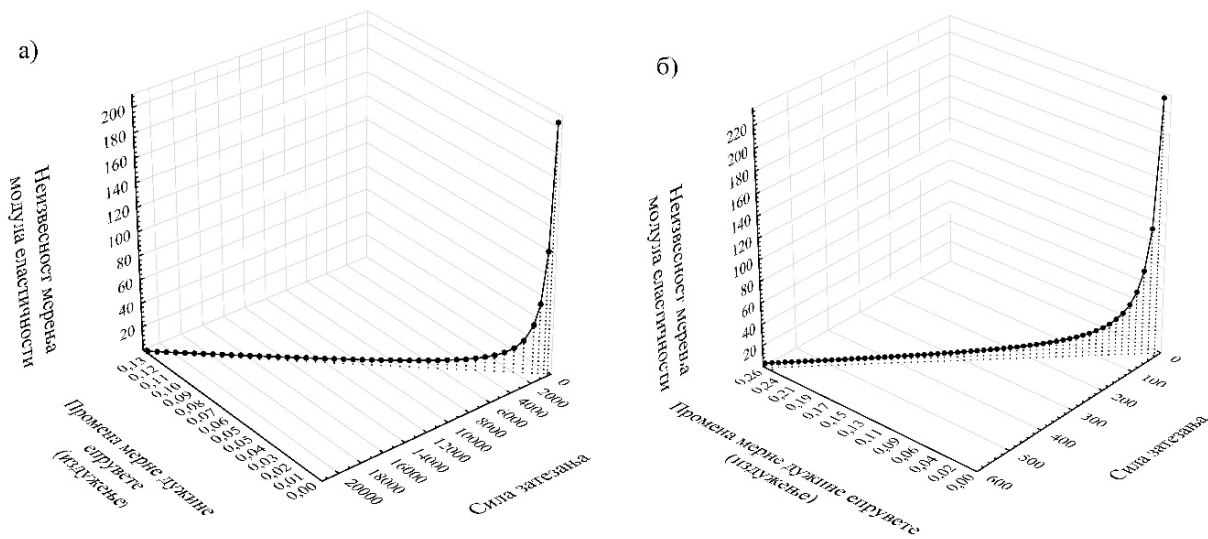
На основу теоријских разматрања у поглављу 4.2 овог рада, неизвесност мерења модула еластичности може се добити аналитички из израза (4.9). Величине F и Δl су текуће променљиве. Величина F се задаје у распону силе затезања епрувете у области еластичних деформација, док се величина издужења епрувете рачуна из израза (4.24).

Подаци неопходни за симулацију прорачуна неизвесности одређивања модула еластичности (геометрија епрувете, тип кидалице, модул еластичности испитиваног материјала) приказани су у Табели 6.1 [S. Kostić, 2021].

Табела 6.1 Подаци потребни за симулацију прорачуна неизвесности мерења модула еластичности за различите типове кидалица и геометрију узорака

тип кидалице	конвенционална кидалица са екстензиомером	мала лабораторијска кидалица
материјал епрувете	S355J2 ($E = 210$ GPa)	
геометријске карактеристике епрувете	$l_0 = 80$ mm; $A_0 = 62.5$ mm ² (слика 5.20)	$l_0 = 180$ mm; $A_0 = 2$ mm ² (слика 5.21)
распон силе затезања (N)	0-21500	0-600

Неизвесност мерења модула еластичности у функцији од силе затезања и издужења дата је на слици 6.7. Прорачун је извршен у софтверу Statistica 12, на основу параметара датих у табели 6.1.



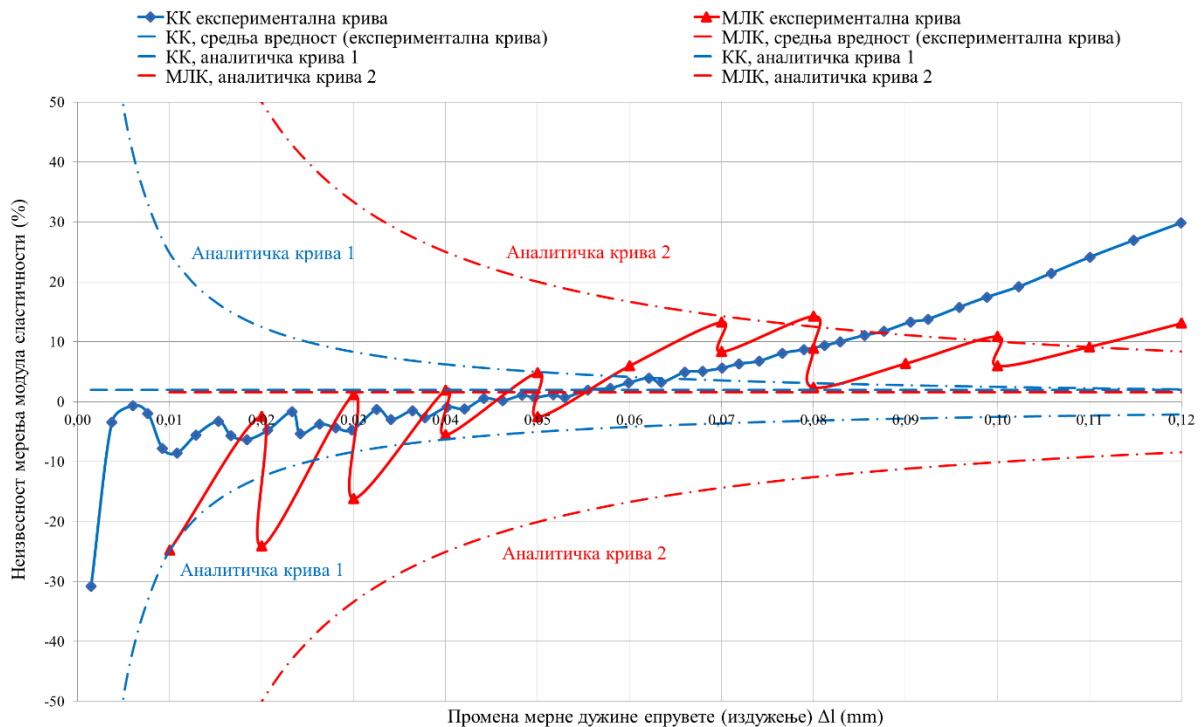
Слика 6.7 Зависности неизвесности мерења модула еластичности од силе затезања и величине издужења за различите материјале и геометрије епрувета: а) КК (конвенционална кидалица са екстензиометром), б) МЛК (мала лабораторијска кидалица)

За дате услове испитивања (табела 6.1), уочава се идентичан тренд зависности неизвесности модула еластичности од сила затезања и издужења, без обзира на тип уређаја за испитивање материјала (слика 6.7). Неизвесност модула еластичности је већа у подручју ниских вредности сила и издужења, што је последица грешака у процесу мерења и несавршености мерне инструментације. При вишим нивоима сила затезања и већим вредностима издужења на неизвесност мерења модула еластичности мање утиче несавршеност мерне инструментације [S. Kostić, 2021].

Испитивања материјала S355J2 на затезање (табела 6.1, слике 5.20 и 5.21) су извршена на конвенционалној кидалици са екстензиометром КК и малој лабораторијској кидалици МЛК. За испитиване материјале познате су референтне вредности модула еластичности E . Експерименталне вредности модула еластичности $E_{\text{ЕХР}}$ одређене су применом израза (4.5), на основу измерених вредности сила и издужења, за познате вредности геометрије испитиваних епрувета. Упоредни дијаграми релативних несигурности модула еластичности дати су на слици 6.8.

Експериментално добијена вредност модула еластичности $E_{\text{ЕХР}}$ рачунатог према изразу (4.5) одступа у односу на познате референтне вредности модула еластичности у позитивном и негативном смеру. То значи да су експериментално добијене вредности модула еластичности $E_{\text{ЕХР}}$ у одређеном опсегу сила и издужења, мање или веће у односу на познату вредност модула еластичности испитиваних материјала.

Прихватљиве границе неизвесности модула еластичности (аналитичка криве 1 и 2, слика 6.8) одређене су помоћу израза (4.25), за све изведене експерименте. Према изразу (4.25), с обзиром на геометрију узорка и несавршености мерне инструментације, неизвесност модула еластичности може варирати и у позитивном и у негативном смеру. Прихватљиве границе тих варијација одређене су аналитичким кривама датим на слици 6.8.



Слика 6.8 Дијаграмски приказ неизвесности модула еластичности, за материјале испитиване на конвенционалној кидалици КК и малој лабораторијској кидалици МЛК, у области малих издужења

Потребно је извршити одређену процену неизвесности повезану са методама испитивања, јер то може помоћи у идентификовању експерименталних параметара или аспеката испитивања који највише доприносе неизвесности мерења. Сила, површина попречног пресека и димензије узорка мере се са високим степеном тачности како би се добили тачни прорачуни напона и деформација.

Табела 6.2 приказује прорачун неизвесности мерења модула еластичности при испитивању затезањем за оба уређаја. Према овом прорачуну, фактор који највише доприноси неизвесности мерења модула еластичности је неизвесност површине попречног пресека [S. Kostić, 2021].

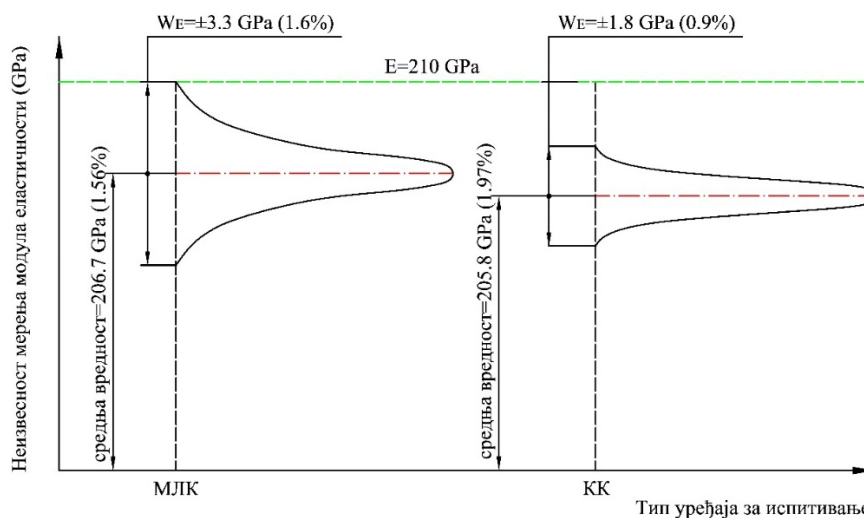
Средња вредност неизвесности модула еластичности за малу лабораторијску кидалицу МЛК износи 1.56% (црвена испрекидана линија, слика 6.8), док је средња вредност неизвесности модула еластичности за конвенционалну кидалицу са екстензиометром КК 1.97% (плава испрекидана линија, слика 6.8).

Аналитичке криве 1, 2 (слика 6.8) представљају границе „очекиваних“ расипања резултата мерења модула еластичности јер су настале као последица неизвесности мерне инструментације коришћене приликом извођења приказаних експеримената. Може се закључити да су неочекиване неизвесности експерименталог одређивања модула еластичности само оне изван кривих 1, 2. У питању је, дакле, део резултата мерења који се не може оправдати несавршеношћу мерне инструментације [S. Kostić, 2021].

Табела 6.2 Прорачун неизвесности мерења модула еластичности [S. Kostić, 2021]

Уређај за испитивање	Мерне вредности процењених величина	Вредности неизвесности	Коефицијенти осетљивости	Допринос стандардној несигурности
МЛК	$w = 1.99 \text{ mm}$	$W_w = 0.01 \text{ mm}$	$c_w = t = 1 \text{ mm}$	$1.00 \cdot 10^{-2}$
	$t = 1 \text{ mm}$	$W_t = 0.01 \text{ mm}$	$c_t = w = 1.99 \text{ mm}$	$1.99 \cdot 10^{-2}$
	$A_0 = 1.99 \text{ mm}^2$	$W_{A_0} = 0.03 \text{ mm}^2$	$c_{A_0} = 0.5 \text{ mm}^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$
	$l_0 = 180 \text{ mm}$	$W_{l_0} = 0.1 \text{ mm}$	$c_{l_0} = 5.5 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$	$5.50 \cdot 10^{-4}$
	$\Delta l = 0.125 \text{ mm}$	$W_{\Delta l} = 1.17 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$	$c_{\Delta l} = 8 \text{ mm}^{-1}$	$9.36 \cdot 10^{-3}$
	$F = 299.1 \text{ N}$	$W_{\Delta F} = 0.53 \text{ N}$	$c_{\Delta F} = 3.3 \cdot 10^{-3} \text{ N}^{-1}$	$1.75 \cdot 10^{-3}$
	$E = 206.7 \text{ GPa}$	$W_E = \pm 3.3 \text{ GPa} = \pm 1.6\%$		
КК	$w = 12.4 \text{ mm}$	$W_w = 0.01 \text{ mm}$	$c_w = t = 4.99 \text{ mm}$	$4.99 \cdot 10^{-2}$
	$t = 4.99 \text{ mm}$	$W_t = 0.01 \text{ mm}$	$c_t = w = 12.4 \text{ mm}$	$12.4 \cdot 10^{-2}$
	$A_0 = 61.88 \text{ mm}^2$	$W_{A_0} = 0.15 \text{ mm}^2$	$c_{A_0} = 0.02 \text{ mm}^{-2}$	$0.30 \cdot 10^{-2}$
	$l_0 = 80 \text{ mm}$	$W_{l_0} = 0.1 \text{ mm}$	$c_{l_0} = 12.5 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$	$1.25 \cdot 10^{-3}$
	$\Delta l = 0.1275 \text{ mm}$	$W_{\Delta l} = 2.60 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$	$c_{\Delta l} = 7.84 \text{ mm}^{-1}$	$1.22 \cdot 10^{-3}$
	$F = 21551 \text{ N}$	$W_{\Delta F} = 175.9 \text{ N}$	$c_{\Delta F} = 4.6 \cdot 10^{-5} \text{ N}^{-1}$	$8.09 \cdot 10^{-3}$
	$E = 205.8 \text{ GPa}$	$W_E = \pm 1.8 \text{ GPa} = \pm 0.9\%$		

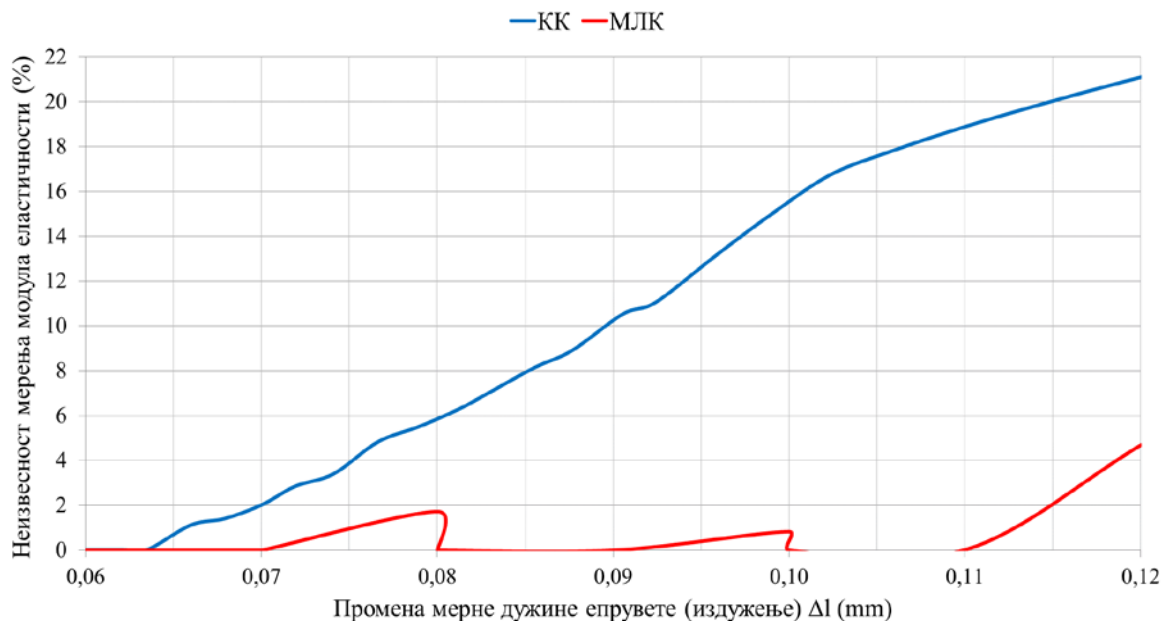
Средње вредности неизвесности мерења модула еластичности дате су на слици 6.9. Неизвесност мерења модула еластичности добијена на МЛК је 206.7 GPa, што одступа од референтне вредности модула еластичности за 1.56%. Код КК, средња вредност неизвесности мерења модула еластичности од 205.8 GPa одступа од референтне вредности модула еластичности за 1.97%. Са аспекта вероватноће, средња вредност измереног модула еластичности представља највероватнији догађај, тј. математичко очекивање. Стога, узимајући у обзир средње вредности као највероватније резултате мерења, мала лабораторијска кидалица МЛК има предност у односу на конвенционалну кидалицу КК.



Слика 6.9 Неизвесност мерења модула еластичности за два типа уређаја за испитивање затезањем

Расипање резултата око средње вредности је ± 3.3 GPa или 1.6% за МЛК и ± 1.8 GPa или 0.9% за КК. Веће расипање резултата (неизвесност) за МЛК првенствено је последица веће парцијалне неизвесности везане за мерење издужења, које износи $1.17 \cdot 10^{-3}$ mm за МЛК и $2.60 \cdot 10^{-4}$ mm за КК. Ове парцијалне неизвесности су у највећој мери утицале на укупне неизвесности, имајући у виду да је тачност линеарног енкодера код МЛК 0.01 mm, док је тачност линеарног енкодера екстензиометра код КК 0.001 mm [S. Kostić, 2021].

На слици 6.10, приказане су релативне неизвесности модула еластичности одређене експерименталним путем код оба типа уређаја са испитивање материјала, које нису последица несавршености мерне инструментације са којом је извршено мерење потребних физичких величина (F , l_0 , A_0 , Δl).



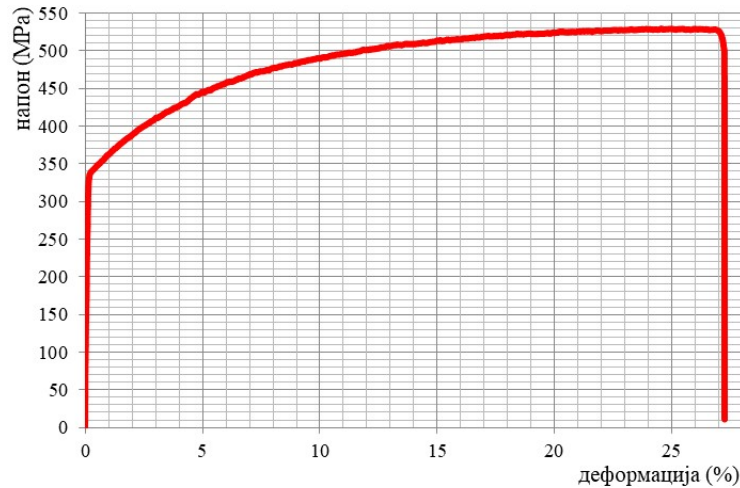
Слика 6.10 Релативне неизвесности одређивања модула еластичности које нису последица несавршености мерне инструментације

Додатно, у циљу валидације методологије предложене у овом истраживању, извршен је прорачун мерне несигурности према SRPS EN ISO 6892-1:2020, тј. делу стандарда који се односи на прорачун мерне несигурности модула еластичности CWA 15261-2:2005. Добијене су следеће вредности: За МЛК неизвесност модула еластичности је износила 1.9% према CWA 15261-2:2005, док је према SRPS EN ISO 6892-1:2020 износила 3.2% за ниво поверења од 95%. За КК неизвесност модула еластичности је износила 1.3% према CWA 15261-2:2005, док је према SRPS EN ISO 6892-1:2020 износила 1.8% за ниво поверења од 95%. Добијени резултати неизвесности према SRPS EN ISO 6892-1:2020 су блиски резултатима добијеним у овом истраживању. То указује на исправност примењене методологије. Нешто већа мерна несигурност код МЛК је последица добијених резултата у еластичној области мерења деформација [S. Kostić, 2021].

Софтвер који је имплементиран у малој лабораторијској кидалици врши аутоматски запис мерених величина силе затезања и издужења током испитивања и врши обраду података исцртавањем дијаграма и креирањем извештаја. Базира се на алгоритмима датим у поглављу 4 овог рада, тако да се и прорачун стварних напона и деформација добија у облику извештаја и дијаграма након испитивања. Код епрувета датог облика и

геометријских карактеристика са слике 6.3 а) проценат издужења епрувете у зони радијуса је мањи од 0.5%, а у зони прихвата епрувете мањи од 0.08%, што се може занемарити. Дакле, може се сматрати да је издужење мерено на малој лабораторијској кидалици у целости издужење мерне дужине епрувете.

На слици 6.11 приказан је дијаграм напон – деформација, на коме нема јасно израженог карактеристичног течења материјала.



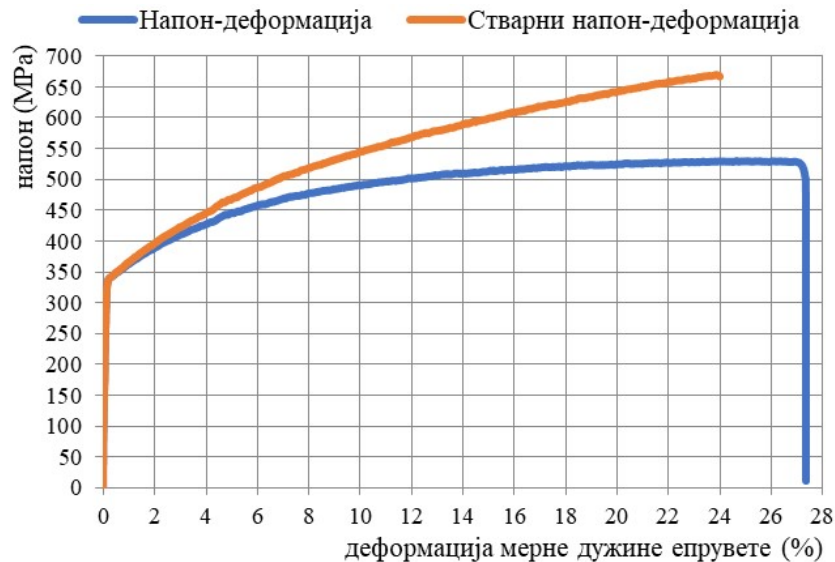
Слика 6.11 Дијаграм напон - деформација за материјал челик S355J2

Са дијаграма се јасно види вредност затезне чврстоће 529.06 МПа, што представља вредност која одговара опсегу референтних вредности датих у литератури [S. Seitzl, 2020], а у поређењу са вредношћу затезне чврстоће 529.11 МПа добијене на конвенционалној кидалици разлике у резултату готово да нема. Неизвесност мерења затезне чврстоће код МЛК износи ± 7.32 МПа, или $\pm 1.38\%$, док је код КК ± 4.42 МПа или $\pm 0.84\%$. Поређењем резултата добијеним на МЛК и КК закључено је да је граница еластичности код МЛК (340.26 МПа) нижа за 1.59% од границе еластичности код КК (345.78 МПа), као и вредности деформације до лома. Код МЛК укупна деформација износи 27.26%, док је код КК 28.93%, што се објашњава геометријским карактеристикама епрувета (дебљина епрувете код МЛК испод 3 mm доводи до тога да се укупно издужење до лома смањује, јер се смањује издужење након формирања врата епрувете, слика 6.12) [Y.H. Zhao, 2008 и 2009].



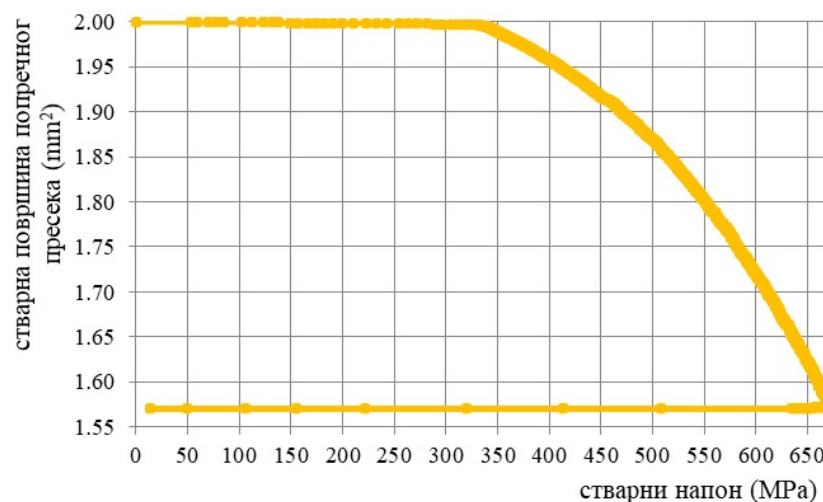
Слика 6.12 Формирање врата на епрувети током испитивања

На слици 6.13 је приказан дијаграм стварних напона и деформација. Стварни напони су реално већи од техничких напона, јер у току испитивања настаје смањење попречног пресека епрувете у односу на његову почетну вредност. Стварна вредност затезне чврстоће је већа за 21% у односу на њену номиналну вредност, што показује дијаграм стварних напона - деформација.



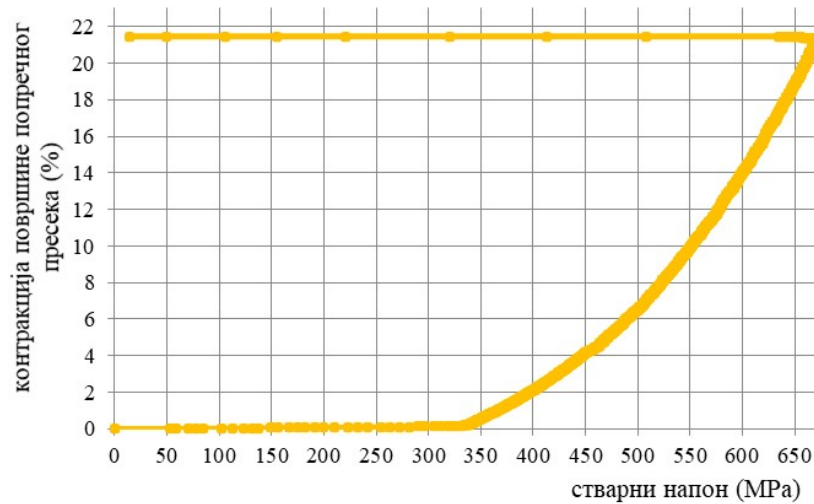
Слика 6.13 Дијаграм стварни напон - деформација за материјал челик S355J2

Слика 6.14 представља зависност површине попречног пресека од напона у току испитивања, односно визуелизује смањење почетног пресека услед затезног оптерећења. У тренутку настанка пластичних деформација, односно изласком из зоне еластичних деформација, смањење попречног пресека је трајно. Почетни попречни пресек епрувете се са 2 mm^2 смањило на 1.57 mm^2 , након чега је уследио лом епрувете.



Слика 6.14 Дијаграм зависности стварне површине попречног пресека епрувете од напона - у току испитивања за материјал челик S355J2

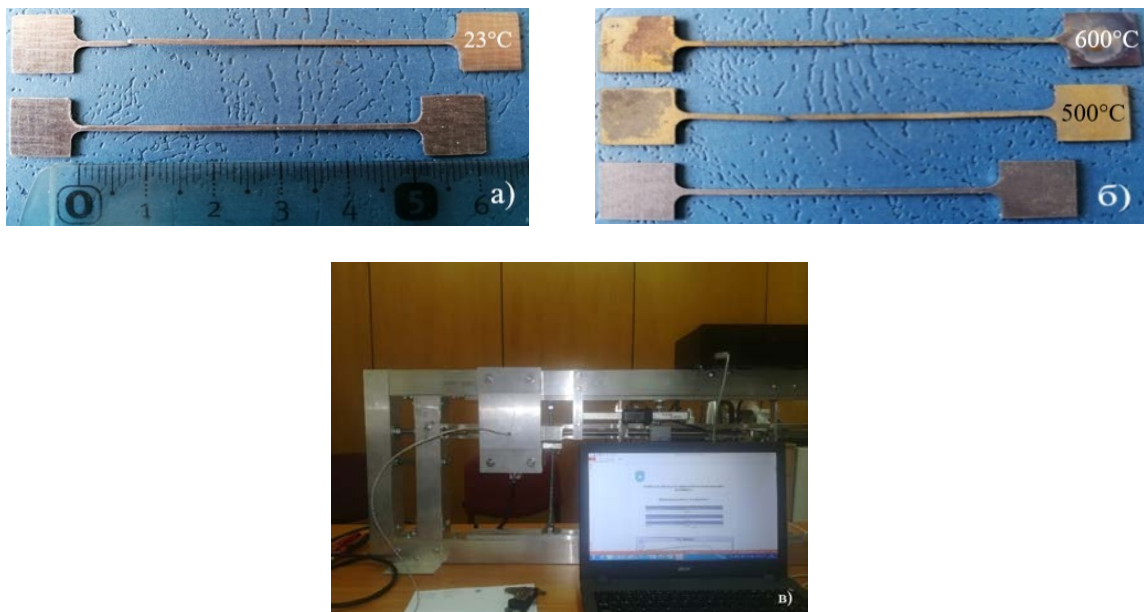
На слици 6.15 представљена је контракција попречног пресека у процентима у току испитивања затезањем. Контракција попречног пресека у тренутку лова износи 21.48%.



Слика 6.15 Дијаграм зависности контракције површине попречног пресека епрувете од напона - у току испитивања за материјал челик S355J2

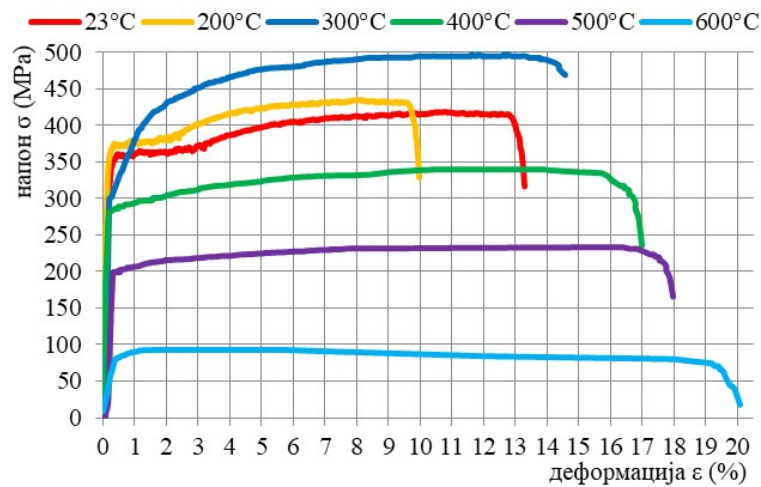
6.2.2 ИСПИТИВАЊЕ МАТЕРИЈАЛА DC01 ЗАТЕЗАЊЕМ НА СОБНОЈ, ПОВИШЕНИМ И ВИСОКИМ ТЕМПЕРАТУРАМА

Код челика до 180 °C нема битнијих промена механичких својстава, па се те температуре сматрају ниским. Радне температуре од 180÷450 °C за челик су повишене, а изнад 450 °C високе, јер тада почиње пузање челика, односно долази до појаве пластичне деформације испод напона течења при повишеним температурама [Т. Filetin, 2002]. Узорци од материјала DC01 испитивани су затезањем на собној температури и на повишеним температурама од 200÷600 °C. На слици 6.16 приказане су епрувете након испитивања материјала затезањем до лома, на малој лабораторијској кидалици са комором за загревање узорака до жељене температуре.



Слика 6.16 Испитивање епрувета на собним, повишеним и високим температурама: а) на собној температури; б) епрувете на собној температури 23 °C и након лома на температурама од 500 °C и 600 °C и в) уређај са комором за загревање узорака

На основу добијених експерименталних података за силу затезања и издужење епрувете у току испитивања, исцртавају се дијаграми зависности напона и деформација, приказани на слици 6.17.



Слика 6.17 Дијаграм напон - деформација за материјал DC01 на собним и повишеним температурама

Затезна чврстоћа челика DC01 на собној температури износи 418.45 МПа, што представља вредност из опсега референтних вредности датих у литератури. На температури од 200 °С долази до пораста вредности затезне чврстоће од 3.79%, док при температури 300 °С она наставља да расте до 18.64% у односу на затезну чврстоћу на собној температури. Након тога следи пад вредности затезне чврстоће, на температури од 400 °С у износу од 18.98% у односу на затезну чврстоћу добијену на собној температури. Тренд се наставља са даљим порастом температуре на којој се врши испитивање, па тако, на температури од 500 °С пад вредности затезне чврстоће износи 44.16%, а при температури од 600 °С чак 77.91%, све то у односу на вредност затезне чврстоће на собној температури.

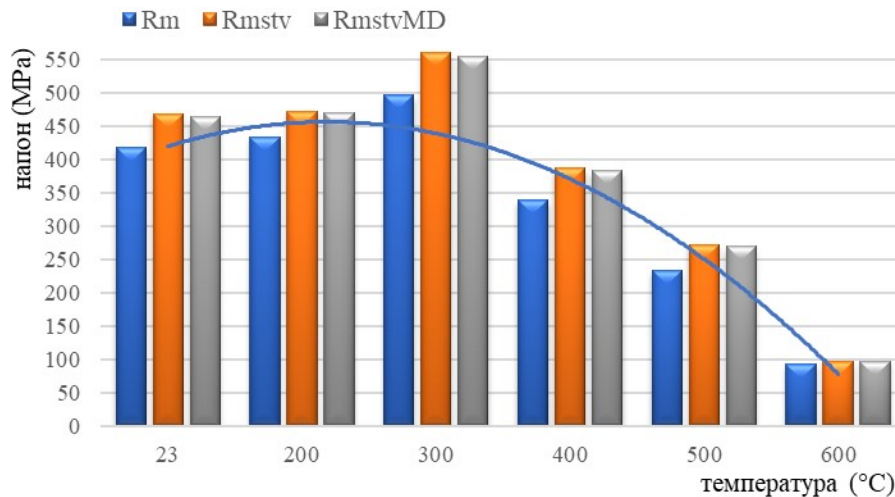
На основу теоријских разматрања из поглавља 4 овог рада, може се прорачунати стварни максимални напон који испитивани материјал може да издржи пре лома. Стварне вредности затезне чврстоће, у функцији од температуре на којој је испитивање извршено дате су у табели 6.3.

Табела 6.3 Вредности затезне чврстоће R_m (МПа) и стварне затезне чврстоће R_{mstv} (МПа) у функцији од температура испитивања

Температура	23 °С	200 °С	300 °С	400 °С	500 °С	600 °С
Затезна чврстоћа R_m	418.45	434.33	496.48	339.00	233.64	92.40
Стварна затезна чврстоћа R_{mstv}	468.23	472.28	560.30	386.44	271.99	97.81
R_{mstvMD} (мерна дужина епрувете)	464.04	469.32	555.53	382.76	269.22	97.41

Код епрувета облика и геометријских карактеристика као на слици 6.3 б) проценат издужења епрувете у зони радијуса је 2.38%, а у зони прихвата епрувете 0.24%. Процент издужења који је настао на мерној дужини епрувете је 97.38% од укупног измереног издужења. У том случају може се извршити корекција измереног издужења одузимањем

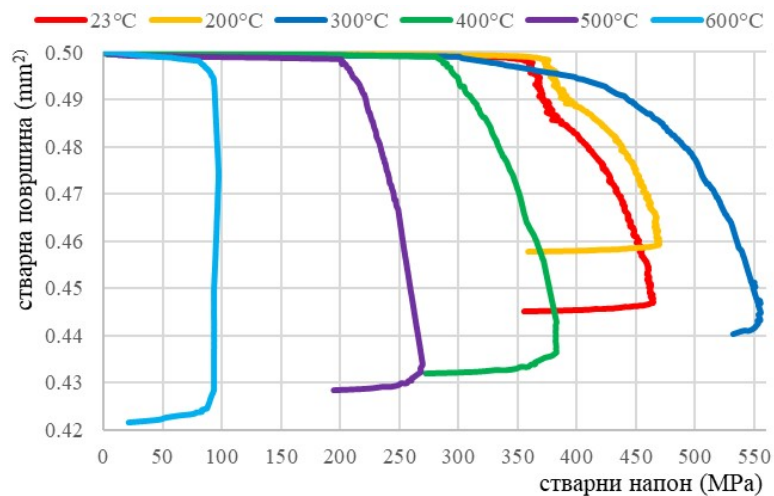
прорачунатих вредности издужења у зони радијуса и зони прихвата епрувете, и добити издужење епрувете на њеној мерној дужини. На основу тих вредности могу се добити кориговане стварне вредности затезне чврстоће, посматрањем издужења само на мерној дужини епрувете (израз 3.17), R_{mstvMD} на задатим температурама испитивања, како је приказано у табели 6.3. Разлике између стварних вредности затезне чврстоће, када се узме у обзир укупно измерено издужење или само издужење мерне дужине епрувете, су мање од 1%, а за температуре 500 °C и 600 °C мање од 0.4%.



Слика 6.18 Зависност затезне чврстоће од температуре испитивања за челик DC01

Плава линија на дијаграму са слике 6.18, показује тренд раста затезне чврстоће до 300 °C, а затим пад њених вредности са даљим порастом температуре на којој се материјал испитује на затезање.

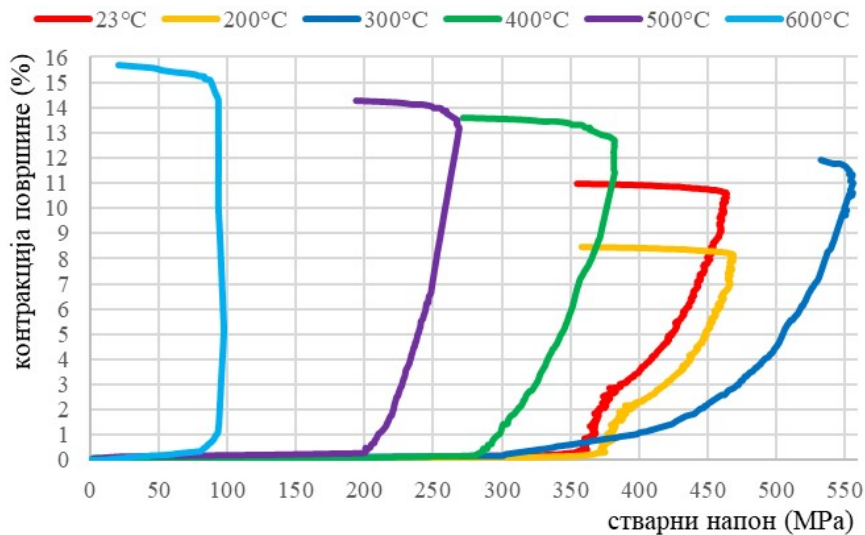
Софтвер кидалице пружа могућност обраде добијених података и штампање дијаграма зависности механичких карактеристика материјала, како на собним, тако и на повишеним температурама. Један од тих дијаграма представља зависност површине попречног пресека на мерној дужини епрувете од стварног напона у току испитивања, а све то на одређеној температури, слика 6.19.



Слика 6.19 Дијаграм зависности површине попречног пресека од стварног напона челика DC01 на собној и повишеним температурама

Са порастом температуре од собне до 600 °C примећује се тренд смањења површине попречног пресека у тренутку лома. Једино при температури од 200 °C је површина попречног пресека већа него што је то случај са површином у тренутку лома на собној температури.

Слика 6.20 представља дијаграм зависности контракције површине попречног пресека од стварног напона у току испитивања.



Слика 6.20 Дијаграм зависности контракције површине попречног пресека од стварног напона челика DC01 на собној и повишеним температурама

Посматрајући дијаграм са слике 6.20 може се закључити да контракција површине попречног пресека расте са порастом температуре. Изузетак је понашање материјала DC01 на температури од 200 °C, где је контракција попречног пресека мања од оне на собној температури и износи 8.458% у односу на почетну површину попречног пресека.

Вредности површине попречног пресека у тренутку лома, као и проценат контракције површине попречног пресека у функцији од температуре на којој је вршено испитивање материјала, су дате у табели 6.4.

Табела 6.4 Вредности површине попречног пресека A_k и њене контракције ψ након лома епрувете на собној, повишеним и високим температурама

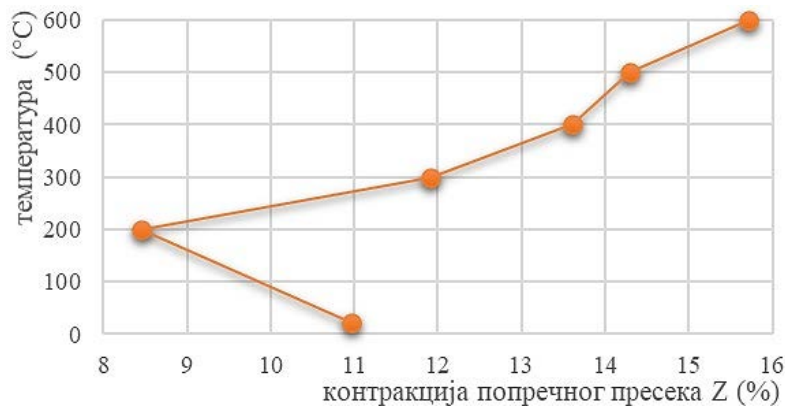
Температура	23 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
A_k (mm ²)	0.445	0.457	0.440	0.432	0.428	0.421
ψ (%)	10.968	8.458	11.916	13.605	14.297	15.706

На слици 6.21 је приказана зависност површине попречног пресека у тренутку лома од температуре на којој је вршено испитивање, где се јасно види да се са порастом температуре смањује попречни пресек епрувете, осим на температури од 200 °C.



Слика 6.21 Зависност површине попречног пресека у тренутку лома од температуре

На слици 6.22 приказана је зависност контракције површине попречног пресека у тачки лома од температуре на којој се врши испитивање. Уочава се да са порастом температуре расте проценат контракције попречног пресека епрувете, сем за температуру 200 °C.



Слика 6.22 Зависност контракције површине попречног пресека у тренутку лома од температуре

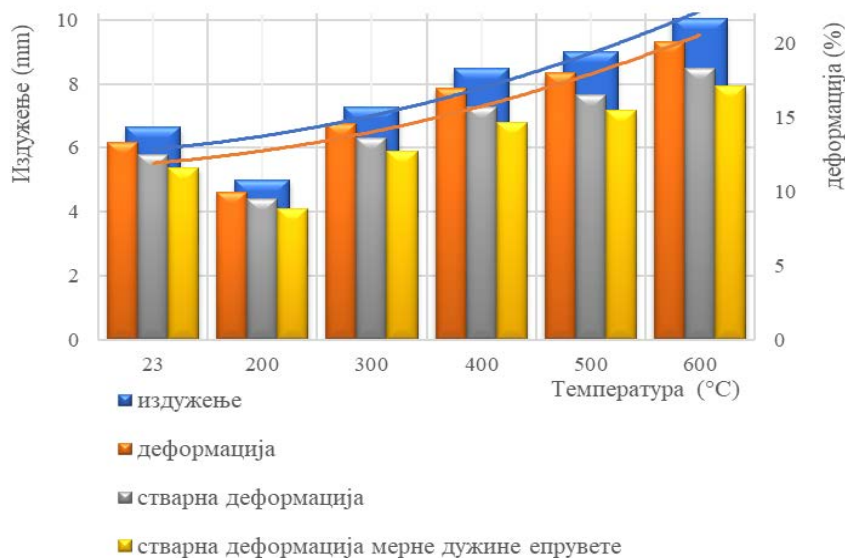
У табели 6.5 дат је преглед вредности издужења Δl , деформација насталих у тачки лома епрувете ϵ_k , стварних деформација ϵ_{kstv} , као и коригованих стварних деформација насталих само на мерној дужини епрувете ϵ_{kstvMD} , при свим температурама на којима је вршено испитивање материјала.

Табела 6.5 Вредности издужења и деформација након лома епрувете на собној, повишеним и високим температурама

Температура	23 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
Δl (mm)	6.64	4.98	7.29	8.48	8.99	10.04
ϵ_k (%)	13.28	9.96	14.58	16.97	17.98	20.08
ϵ_{kstv} (%)	12.47	9.49	13.61	15.68	16.54	18.30
ϵ_{kstvMD} (%)	11.62	8.83	12.68	14.62	15.43	17.08

На дијаграмима са слике 6.23 уочава се јасан тренд повећања издужења, односно деформације епрувете у тачки лома са порастом температуре. Изузетак представљају

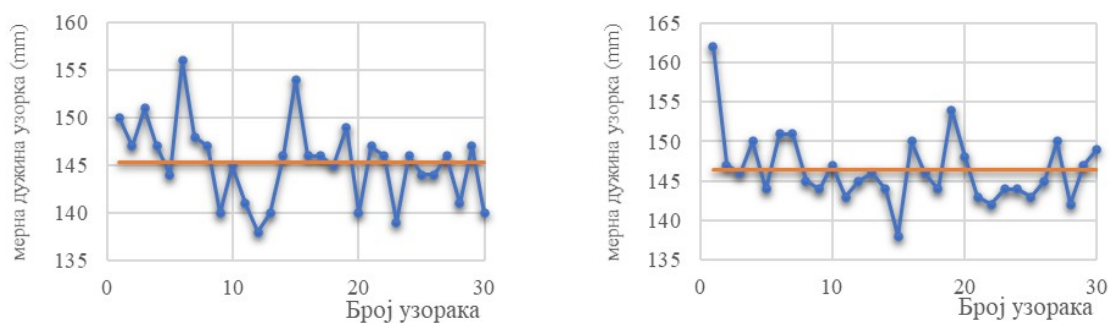
результати на температури испитивања од 200 °С, где је уочљив пад својстава пластичности материјала. Стварне деформације на мерној дужини епрувете ϵ_{stvMD} представљају кориговане вредности стварних деформација, када се од укупно измереног издужења у току испитивања одузме одговарајући проценат издужења настао у зони радијуса и зони прихвата епрувете у стезне чељусту уређаја.



Слика 6.23 Дијаграми зависности издужења и деформација у тачки лома епрувете од температуре испитивања

6.2.3 ИСПИТИВАЊЕ НЕМЕТАЛНИХ МАТЕРИЈАЛА НА ЗАТЕЗАЊЕ НА СОБНОЈ ТЕМПЕРАТУРИ

Слободни крајеви везива су фиксирани у стезним чељустима везивањем у чвор. Испитиване су две серије епрувета од везива, свака са 30 узорака. Епрувете од везива су у првој серији испитивања имале средњу почетну мерну дужину 145.3 mm, која је у другој серији испитивања износила 146.5 mm.

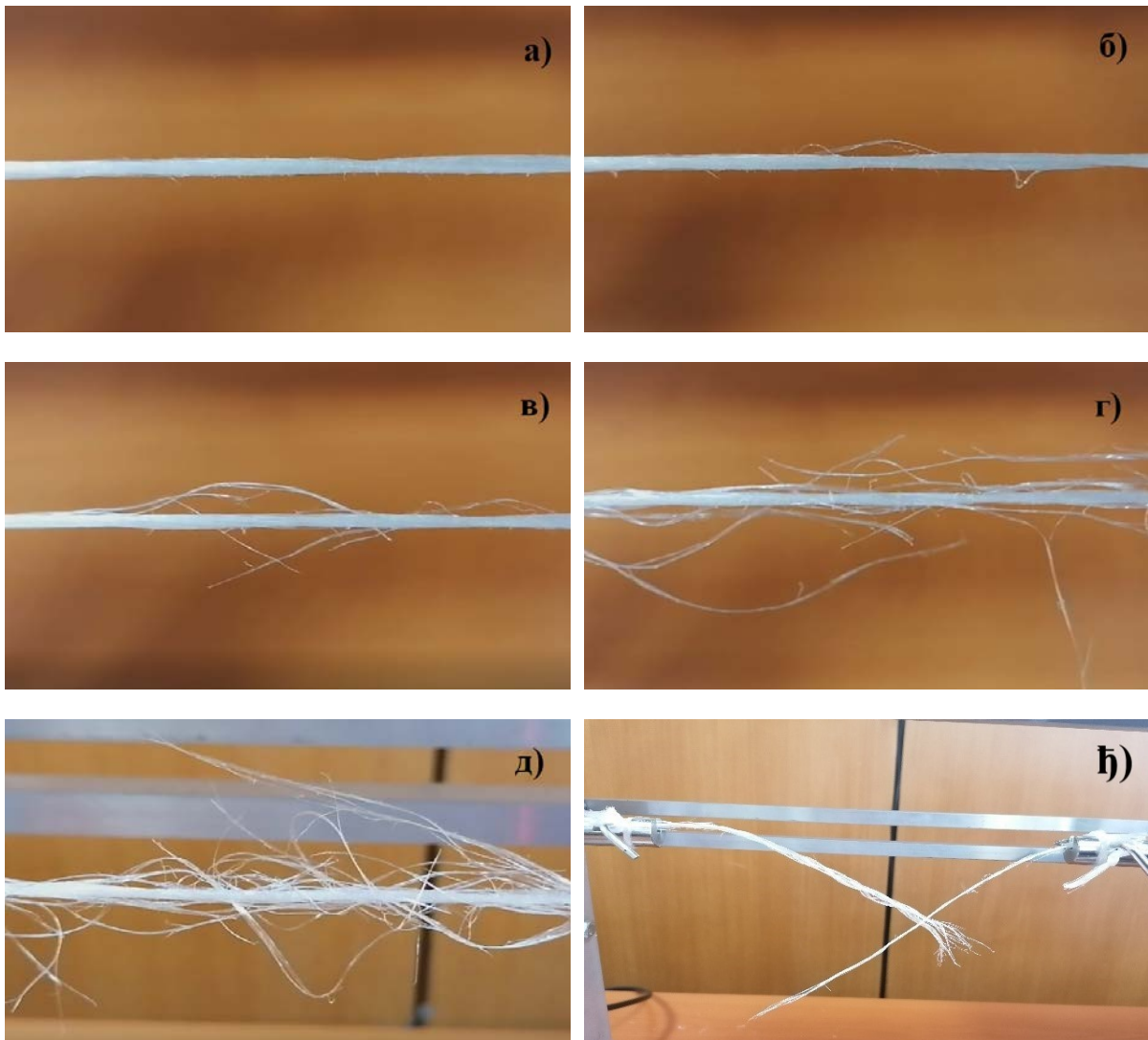


Слика 6.24 Почетне вредности мерне дужине везива, средње вредности за обе серије: а) прва серија узорака; б) друга серија узорака

Прву серију епрувета чине узорци везива скинути са котура, сечени на меру, без претходног преднапрезања. Другу серију епрувета чине узорци везива који су увијени једнаки број пута око своје осе по дужини. Када се примени увијање везива, једно влакно се скраћује а друго се продужава. При задавању оптерећења, кратка затегнута влакна ће

одмах преузети оптерећење, док ће се дуга олабављена влакна прво мало издужити па тек онда преузети оптерећење. Тако ће кратка влакна пре достигнути издужења до пуцања од дугих влакана. Дугим влакнима се додаје оптерећење након прекида кратких влакана.

Слика 6.25 представља фазе прекида влакана приликом испитивања затезањем. Са слика се јасно види да прво пуцају спољашња влакна везива, слика 6.25 а-д, што на дијаграму напон - деформација представља повремени пад силе односно напона уз константан раст издужења односно деформација до крајњег отказа везива. Код узорака из серије 2 карактеристичан је нагли прекид везива, слика 6.25 ђ.

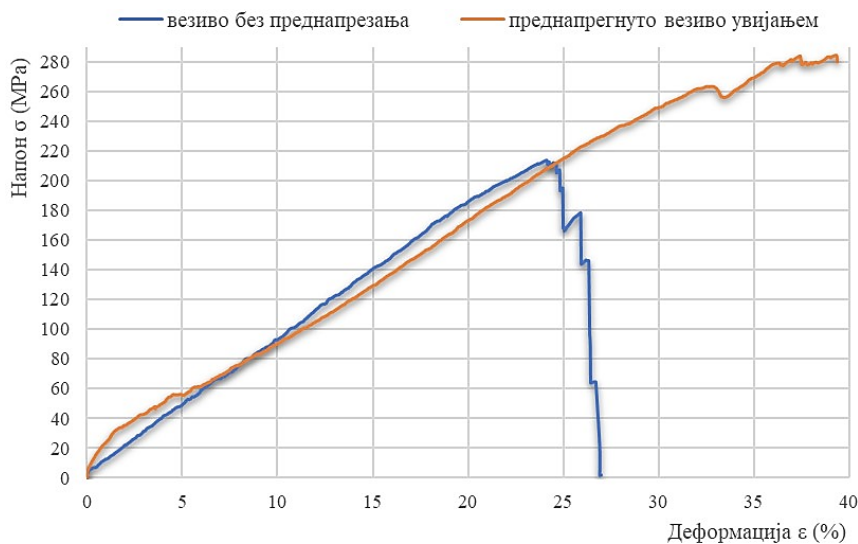


Слика 6.25 Пуцање спољашњих нити полипропиленског везива у току испитивања затезањем, по фазама а-ђ

Због великог односа дужине и пречника узорка, грешке услед мерења издужења у области стезних чељусти су занемарљиво мале.

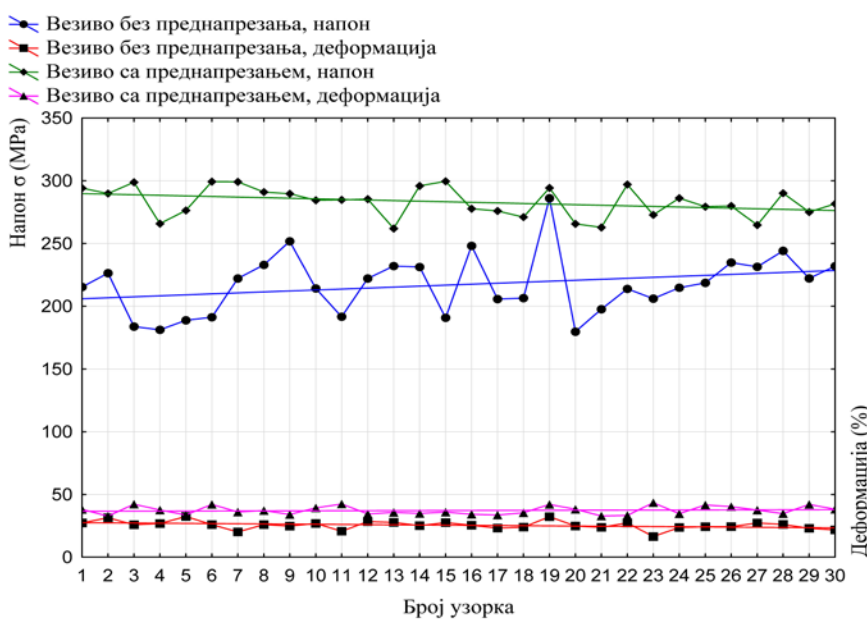
Дијаграм напон - деформација на слици 6.26, показује повећање механичких карактеристика полипропиленског везива серије 2 у односу на серију 1. Криве на дијаграму представљају средње вредности експериментално добијених резултата на основу 30 узорака из сваке серије. Код узорка полипропиленског везива из серије 1

постоји интеракција између суседних нити, али је она мања него код узорака који су пре испитивања увијани. Свако влакно се такорећи независно деформише и пуца. Отуда тестераст изглед криве напон - деформација након постизања максималне вредности напона затезања. Код узорака из серије 2, спречено је пуцање слабих места у влакну, јер их захватају суседна влакна. Пренос оптерећења доводи до првог пуцања влакана што убрзо доводи до пуцања комплетног везива, односно, дешава се нагли прекид. Са дијаграма на слици 6.26 се јасно види да је средња вредност деформације полипропиленског везива серије 2 већа за 12.36% од средње вредности деформације узорака серије 1. Пораст затезне чврстоће у износу од 32.7% је очигледан.



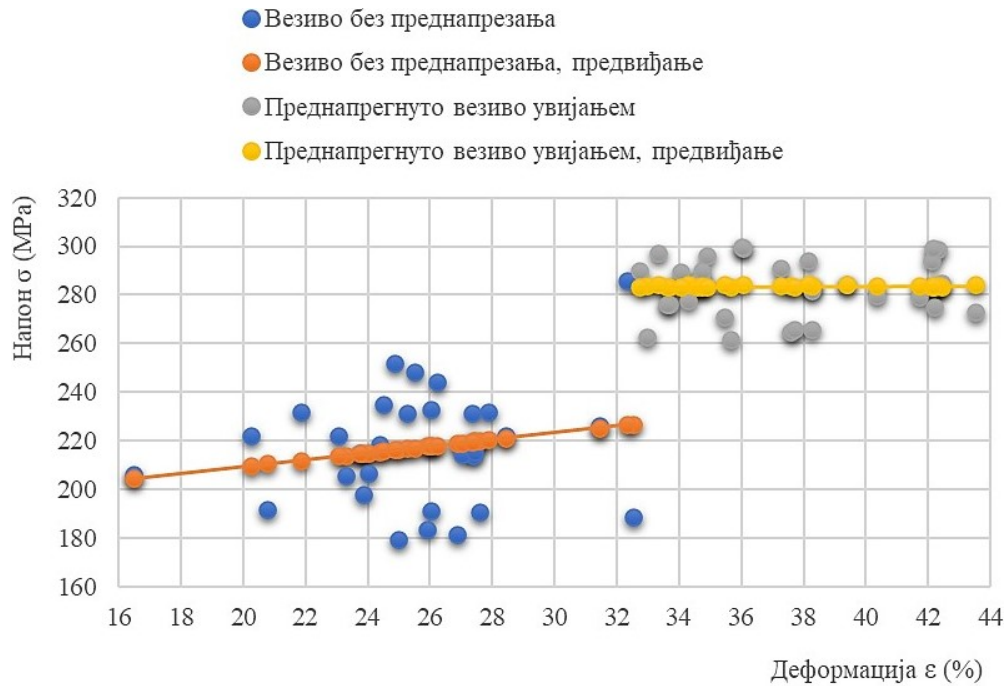
Слика 6.26 Дијаграм напон - деформација серија узорака 1 и 2, средње вредности

На слици 6.27, приказани су експериментални подаци напона и деформација свих узорака из серије 1 и серије 2. Ту се јасно види да су узорци из серије 2 достигли већи проценат деформације и веће вредности напона затезања приликом испитивања на малој лабораторијској кидалици.



Слика 6.27 Експериментални резултати напона - деформација за серије узорака 1 и 2

Анализом дијаграма са слике 6.28 може се уочити уједначеније понашање групе узорака из серије 2, односно мање расипање експерименталних података око аритметичке средине. Узорци из серије 1 показују веће расипање вредности и напона и деформација добијених експериментом.



Слика 6.28 Стандардна девијација од аритметичке средине која обухвата 95.45% скупа добијених експерименталних резултата за: а) узорке серије 1 и б) узорке серије 2

7 ДИСКУСИЈА ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА

Дискусија резултата добијених у поглављу 6 овог рада прати редослед претходног приказа резултата.

Резултати испитивања материјала S355J2 затезањем на собној температури приказани су у претходном поглављу. Резултати добијени на МЛК поређени су са резултатима добијеним на КК, као и са референтним вредностима доступним у литератури.

На кривама са слике 6.8 и слике 6.10, које су добијене испитивањем материјала на конвенционалној кидалици са екстензиомером КК и на малој лабораторијској кидалици МЛК, уочава се да у области еластичних деформација и малих издужења, при релативно ниским нивоима силе затезања, преовлађују неизвесности мерења услед несавршености мерне инструментације. Реч је о издужењима до 0.06 mm. Расипање резултата модула еластичности је веће при испитивању на малој лабораторијској кидалици. Разлог је мања тачност мерења издужења. Тачност мерења издужења на МЛК је 0.01 mm, па и нема регистрованих података о издужењу у области издужења епрувете мањих од 0.01 mm. Са дијаграма се уочава да за издужења већа од 0.06 mm промене релативне неизвесности модула еластичности имају исти тренд за обе кидалице. При томе, на неизвесност мерења не утиче само несавршеност мерне инструментације, већ и попустљивост која се јавља у подсистемима конструкције кидалице, посебно у зони контакта епрувете и стезних чељусти [S. Kostić, 2021].

Проблем попустљивости је посебно изражен код епрувета које се у стезним чељустима стежу по свом обиму, при чему се сила затезања епрувете преноси преко силе трења која настаје између стезних чељусти и прихватног дела епрувете. Величине реалних вредности издужења епрувета у еластичној области су мале вредности (реда величине неколико десетих делова милиметра), па сходно томе и попустљивост у зони контакта реда величине неколико стотих делова милиметра проузрокује веома значајну грешку одређивања модула еластичности. Очигледно је да неизвесности одређивања модула еластичности настале услед несавршености мерне инструментације преовлађују у области малих померања и малих вредности сила затезања, док је утицај попустљивости израженији при већим вредностима сила затезања.

Код мале лабораторијске кидалице проблем попустљивости конструкције и подклопова кидалице мање је изражен, а може се елиминисати повећањем крутости целокупног склопа конструкције кидалице, коришћењем епрувета мањих попречних пресека и испитивањем при релативно малим силама затезања. На грешке мерења, па последично и на неизвесност мерења, може се утицати и избором погодног решења за прихватање и стезање епрувете. У циљу минимизације неизвесности одређивања модула еластичности, веома је важно извршити оптимални избор геометријских параметара узорака - епрувета за испитивање. У суштини, испитивање на епруветама веће мерне дужине и мањег попречног пресека, при било ком нивоу напона у еластичној области, даће тачније резултате мерења [S. Kostić, 2021].

Резултати експерименталних испитивања (слика 6.8) показали су да су средње вредности неизвесности модула еластичности добијене мерењем на малој лабораторијској кидалици, у износу од 1.56% у класи средње вредности неизвесности модула еластичности у износу од 1.97%, добијене мерењем на конвенционалној кидалици са

екстензиометром. При томе је мерење издужења на конвенционалној кидалици са екстензиометром вршено са тачношћу од једног микрометра, док је исто мерење на малој лабораторијској кидалици вршено са тачношћу од 10 микрометара [S. Kostić, 2021].

Посматрањем дијаграма приказаних на сликама 6.8 и 6.10 може се приметити да се резултати мерења везани за испитивања на конвенционалној кидалици са екстензиометром крећу у границама очекиваних расипања (границе аналитичке криве 2) само до нивоа издужења од 0.064 mm, иако граница издужења у еластичној области за дате услове испитивања износи 0.13 mm. За издужења већа од 0.064 mm, одступања од вредности модула еластичности по ISO и ASTM стандардима се крећу од 0 до 20% (слика 6.10).

На истим дијаграмима (слике 6.8 и 6.10) се може уочити и да резултати мерења добијени на малој лабораторијској кидалици одступају мање од 5% у односу на вредности модула испитиваног материјала према ISO и ASTM стандардима у читавој области еластичних деформација [S. Kostić, 2021].

Ако се посматра дијаграм на слици 6.11 јасно се може уочити да је деформација епрувете која настаје након достизања максималног напона приликом испитивања, видно мања од деформације епрувете која се дешавала до максималне тачке напона, односно тренутка формирања врата на епрувети. Равномерна расподела деформације до тачке формирања врата била је праћена равномерном контракцијом попречног пресека дуж целог мерног дела епрувете, као што је приказано на слици 6.15. Узрок мале вредности деформација након формирања врата је у чињеници да запремина материјала на формираном врату није била у стању да дуго пружа отпор на лом, јер је почетни пресек епрувете релативно мали, као што се износи у литератури [K. Kumar, 2016]. Отуда разлика у вредностима укупне деформације добијене испитивањем на МЛК и КК, где је укупна деформација код МЛК достигла нижу вредност за 5.4%.

Резултати испитивања материјала DC01 затезањем на собној, повишеним и високим температурама приказани су у претходном поглављу овог рада. Резултати добијени на МЛК поређени су са референтним вредностима доступним у литератури.

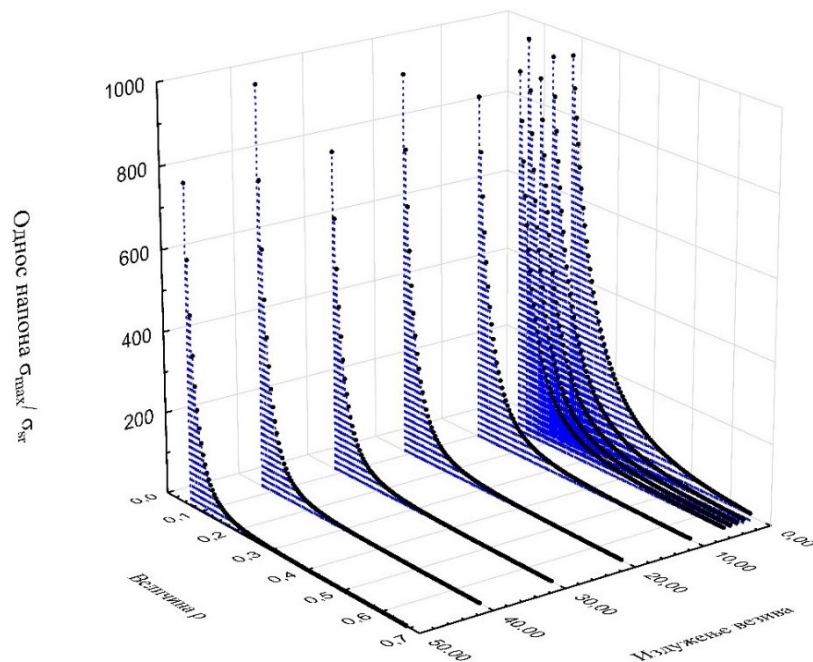
На дијаграмима са слике 6.17 се уочава да се материјал на температурама 200 °C и 300 °C степени понаша другачије него на температурама вишим од наведених. Дакле, при температури од 200 °C евидентан је пораст вредности затезне чврстоће од 3.79% у односу на њену вредност на собној температури. На температури од 300 °C пораст затезне чврстоће је још већи и износи 18.64%. Од свих температура изнад 0 °C челик има највећу затезну чврстоћу између 200 °C и 300 °C, каже се у литературним наводима L.A. Dobrzanski-ог (2002), што је сагласно добијеним експерименталним резултатима на МЛК. Понашање материјала при даљем порасту температуре показује видно опадање вредности затезне чврстоће, као и вредности напона течења и модула еластичности. Код челика DC01 долази до великог појачања ефекта пузања када је температура виша од 450 ÷ 500 °C [L.A. Dobrzanski, 2002], што показују и приказани резултати добијени на МЛК.

Када се на дијаграмима са слике 6.17 посматрају укупне деформације до лома, за све температуре испитивања више од собне, деформације епрувете имају тренд раста са порастом температуре. Изузетак представљају резултати добијени испитивањем материјала на 200 °C, као што је приказано на слици 6.21, где је деформација у тренутку лома износила 9.96%, док је на собној температура та вредност била 13.28%. Познато је да челици могу показивати повишене вредности затезне чврстоће у односу на

референтне вредности на температури околине у опсегу од $150\text{ }^{\circ}\text{C} \div 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ у комбинацији са падом својстава дуктилности. Ово специфично понашање је манифестација динамичког старења деформација [Н. Bhadeshia, R. Honeycombe, 2006], тако да су добијени подаци на МЛК сасвим у складу са литературним изворима.

Резултати испитивања неметалног материјала, ПП везива, затезањем на собној температури приказани су у претходном поглављу.

Анализом дијаграма са слике 6.26 могу се уочити побољшања механичких карактеристика везива из серије 2, које је пре испитивања било изложено преднапрезању увијањем. Као што је истакнуто у литератури [J. Hearle, 1969], мали ниво увијања везива пре испитивања повећао је радијални притисак у везиву, што је довело до бржег опоравка везива од спољашњег напона затезања дуж влакана близу прелома. То је за последицу имало укупно јачање везива, што се огледа у већој вредности деформације до лома и већој вредности затезне чврстоће. Повећањем нивоа увијања везива до неке границе, јавља се слабење карактеристика везива (мање издужење, пад затезне чврстоће), али дијаграм у области кидања више подсећа на дијаграм металних материјала, односно изостају каскадни делови промене напона у тој области као на слици 6.26. То значи да је потребно одредити оптималан ниво увијања везива, односно оптималан угао завојнице површине пре испитивања, како не би дошло до слабења везива. На основу теоријских разматрања из поглавља 4.4 овог рада, долази се до закључка да је енергија уложена у везиво увијањем, довела до бољих перформанси. Са слике 6.26 можемо уочити да је површина испод криве напон - деформација код везива из серије 2 већа до деформације од 8.7%. Како је то заправо деформациони рад, ту разлику површине између једне и друге криве можемо сматрати уложеном енергијом које је везиво добило у процесу преднапрезања увијањем и на основу тога показало боља својства приликом затезања. Однос максималног и средњег напона $\left[\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{sr}}\right]$ из израза (4.81) се може представити у функцији радијуса ρ на којем су распоређена влакна и издужења Δl , добијена експериментално, као на слици 7.1.



Слика 7.1 3D дијаграм зависности $\left[\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{sr}}\right]$ од радијуса ρ на којем су распоређена влакна и издужења Δl

Однос $\left[\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{sr}} \right]$ је највећи у средишњој области везива, а крећући се ка контури везива тај однос константно пада. Оваква зависност изражена је при малим издужењима, док са порастом издужења задржава исти тренд али вредности опадају. Анализом датог дијаграма могу се потврдити теоријска разматрања и експериментално добијени резултати испитивања, јер је јасно да је расподела напона у влакнима приликом затезања таква да су максимални напони на контури везива, где прво и долази до појаве оштећења влакана у везиву.

8 ЗАКЉУЧЦИ

Да би се развио и пројектовао нови конвенционални лабораторијски уређај за испитивање материјала затезањем и припремио одговарајући узорак, поред економских ограничења, постоји низ утицајних фактора који могу да доведу до тога да поузданост и тачност мерења карактеристика материјала постану изазов. Такође, за управљање уређајима за испитивање материјала, посебно серво-хидрауличком машином, неопходне су савремене вештине. Наметнуо се као неопходан нови приступ, као одговор на све учесталије захтеве за стварањем економски исплативијег система за испитивање затезањем, ергономски и техничко-технолошки прихватљивијег уређаја, једноставнијег за употребу, који ће задовољити мултифункционалност са аспекта образовања, истраживања и примене у реалним производним системима.

Како би могли да се испуне сви услови за развој мале лабораторијске кидалице која ће представљати поуздан и тачан уређај за испитивање материјала, неопходно је било отклонити већину утицајних фактора. Морала је бити постигнута одговарајућа крутост уређаја, који је у опсегу задатих оптерећења требало да представља систем без попустљивости, што није једноставан задатак. Анализиране су попустљивости свих подсклопова уређаја и на већину се могло утицати адекватним техничко-технолошким решењем. Попустљивост која се јављала у контакту епрувете и зоне прихвата стезне чељусту уређаја представљала је извор великих грешака мерења карактеристика материјала испитивањем затезањем. Због тога је развијен нови систем за прихват и стезање епрувете, који је минимизирао тај извор грешке.

Процес израде епрувете, облик и геометријски параметри епрувете, били су предмет аналитичког истраживања у овом раду. Поред оптимизације геометријских мера, у смислу повећања мерне дужине и смањења попречног пресека, повећања димензија зоне прихвата епрувета, развијено је аналитичко решење, чијом применом је могуће кориговати вредности измереног укупног издужења током испитивања. Дакле, издужења која су настала у зони радијуса епрувете и потенцијална издужења која се јављају деформацијом зоне прихвата епрувете могу се одузети од укупног и на тај начин се могу добити издужења мерне дужине епрувете, која представљају основ за прорачун карактеристика испитиваних материјала.

Поред поменутих чињеница, несавршеност мерне инструментације уређаја је била основ за прорачун неизвесности мерења модула еластичности, који се приликом испитивања затезањем сматра карактеристиком коју је јако тешко одредити са задовољавајућом тачношћу. Теоријским приступом који је примењен у 4. поглављу овог рада дефинисане су аналитичке криве као граничне криве области очекиваних резултата модула еластичности добијених експерименталним путем. Свако одступање добијених резултата ван области дефинисаних аналитичким кривама, сматра се неочекиваним и не може се оправдати несавршеношћу мерне инструментације. Резултати добијени испитивањем материјала на малој лабораторијској кидалици су показали слагање са резултатима испитивања на конвенционалној кидалици. При томе, прорачуном неизвесности модула еластичности добијене су вредности које су биле ближе референтним вредностима за конкретан материјал од вредности добијених на конвенционалној кидалици са екстензиометром.

За потребе испитивања материјала на повишеним и високим температурама развијен је посебан модул, који се показао као поуздан и економски исплатив систем. Резултати изведеног експеримента су показали тачност постигнутих резултата кроз верификацију са литературним изворима.

На основу анализе литературних извора, теоријских разматрања и резултата експерименталних истраживања датих у раду може се доћи до следећих закључака:

- Задовољавајућа крутост мале лабораторијске кидалице, која се користи за испитивање материјала силама затезања релативно малих вредности, предвиђених задатим опсезима, може се постићи адекватним техничко-технолошким приступом.
- Попустљивост подсклопова конструкције, посебно на месту прихвата епрувете у стезне чељусти, може се минимизирати применом новог конструктивног решења позиционирања и притезања епрувете.
- Незвесности одређивања модула еластичности су последица несавршености мерне инструментације и попустљивости конструкције кидалице тј. попустљивости одређених подсклопова кидалице, посебно попустљивости у зонама прихвата и стезања узорака – епрувета за испитивање.
- Утицај величине и толеранције геометријских параметара епрувете и могућности мерне инструментације (несавршеност мерних инструмената), на очекивану аналитички одређену неизвесност резултата мерења и највероватније расипање вредности модула еластичности одређених испитивањем, потврђују управо резултати теоријских анализа приказаних у раду.
- Резултати експерименталних истраживања на малој лабораторијској кидалици у складу су са теоријским разматрањима везаним за анализу неизвесности одређивања модула еластичности.
- Теоријска основа предложене методе за процену неизвесности мерења модула еластичности може се ефикасно применити у многим другим методама које се користе за испитивање и одређивање вредности модула еластичности. Различите методе се заснивају на различитим параметрима. Због тога је потребно анализирати трендове утицаја параметара повезаних са одређеном методом, тј. аналитичке или регресионе функције које дефинишу зависност модула еластичности од утицајних параметара. Статистичке методе се потом могу користити за одређивање неизвесности за сваки од утицајних параметара.
- Применом приказаних аналитичких решења, за епрувете малих попречних пресека и димензија, грешке мерења се могу свести на минимум, уколико се изврши корекција вредности укупног издужења мереног померањем стезне чељусти уређаја умањивањем за вредност насталих издужења у зонама радијуса и прихвата епрувете.
- Развојем мале, лабораторијске кидалице за испитивање материјала затезањем на собним температурама и модула за испитивање на повишеним и високим температурама, добијен је уређај са једноставним управљачким системом, где се лако врши контрола и одржавање задате температуре и где је енергија потребна за загревање узорака најмања могућа.
- Узорци материјала за малу, лабораторијску кидалицу су доста мањи од стандардних, па је гледано са економског аспекта, могуће испитивати велики број узорака. Након тога се може вршити процена карактеристичних величина

применом статистичких метода. На овај начин се може потврдити поузданост и тачност уређаја за испитивање.

- Развојем софтвера који одговара предложеним аналитичким моделима могуће је добити вредности стварних напона и сужења пресека у току испитивања, као и визуелни приказ промене почетног попречног пресека епрувете у функцији од стварних напона током испитивања.
- Уређаји су лаки, преносиви, једноставни за употребу, не захтевају посебну обуку руковођаца, а поред тога су и примењиви у процесу едукације.

На почетку истраживања приказане су полазне хипотезе, које су током истраживања и доказане. Следи анализа сваке од хипотеза.

Механичке карактеристике материјала одговарајуће тачности могу се испитати на епруветама малог попречног пресека при релативно ниским вредностима сила затезања, што се може дефинисати као прва хипотеза докторске дисертације. На овај начин може се развити уређај одговарајуће крутости, обезбедити једноставан и поуздан модул уређаја за испитивање материјала на повишеним и високим температурама. Треба у обзир узети чињеницу да мали пресеци испитиваних узорака повлаче за собом грешку мерења везану за одступања димензија пресека. Теоријским разматрањем и оптимизацијом пресека узорака могуће је са занемарљивом грешком одредити карактеристике испитиваних материјала (модул еластичности, граница течења, затезна чврстоћа и др.). Испитивање материјала затезањем на узорцима малих попречних пресека има предности у односу на испитивање узорака стандардних димензија, гледано са економског аспекта.

- Теоријским приступом датим у раду, извршен је прорачун неизвесности модула еластичности. Модул еластичности се испитивањем затезањем одређује на основу података о сили и издужењу, у еластичној области деформација, дакле при јако малим вредностима. Због тога је важно тачно мерење тих величина. Експериментални подаци добијени испитивањем материјала на малој, лабораторијској кидалици су потврдили теоријска разматрања и у поређењу са резултатима добијеним на конвенционалној кидалици, где су издужења мерена екстензиометром, показали су изузетну тачност, са неизвесношћу мерења модула еластичности мањом од 1.6%.

Мала, лабораторијска кидалица за испитивање материјала затезањем на собним температурама, као и на повишеним и високим, омогућава ефективније и ефикасније управљање системом, уз истовремено смањивање трошкова. Ово представља другу хипотезу докторске дисертације.

- Модул кидалице за испитивање материјала затезањем на повишеним и високим температурама је детаљно описан у раду. Модул се састоји од коморе за загревање, са сондом за тачно мерење тренутне температуре. Систем је енергетски ефикасан, процес се одвија релативно брзо и потпуно је безбедан. Експериментална испитивања дала су резултате у складу са релевантним изворима из литературе, тако да се и ова хипотеза сматра доказаном.

На крају, може се поставити трећа хипотеза: на основу предложених аналитичких модела могуће је развити одговарајући софтвер, чијом применом се могу добити вредности

стварних напона, сужења попречног пресека узорака материјала и визуелног приказа смањења попречног пресека испитиване епрувете.

- На основу теоријских разматрања датих у четвртом поглављу овог рада, за малу лабораторијску кидалицу развијен је и одговарајући софтвер. Софтвер је омогућио аутоматизацију процеса обраде података током и након испитивања материјала, са могућношћу креирања готових извештаја са дијаграмима сила - издужење, напон - деформација, стварни напон - деформација, стварни напон - деформација мерне дужине епрувете, смањење попречног пресека у функцији напона, контракција попречног пресека итд. Софтвер пружа могућност прављења извештаја у форми Excel датотеке, ради даље обраде података.

На основу доказаних полазних хипотеза, показана је релевантност истраживања. Мале неконвенционалне лабораторијске кидалице имају низ евидентних предности у односу на конвенционалне кидалице са теоријског, техничког, технолошког и посебно економског аспекта.

Дакле, мале лабораторијске кидалице, због малих нивоа сила затезања и релативно малог попречног пресека епрувета, у великој мери елиминишу систематску грешку насталу као последица попустљивости подсклопова кидалице и отварају широк простор за будућа истраживања, у смислу побољшања њихових перформанси и проширења области њихове примене.

Правци будућих истраживања биће усмерени на квантификацију грешака насталих услед попустљивости одређених подсклопова конструкције кидалице. Ове грешке настају при већим нивоима сила затезања и припадају категорији систематских грешака.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Akkurt, (2009). Surface properties of the cut face obtained by different cutting methods from AISI 304 stainless steel materials, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, Vol. 16, No. 6, pp. 373-384.
2. A. Akkurt, M.K. Kulekci, U. Seker, F. Ercan, (2004). Effect of feed rate on surface roughness in abrasive waterjet cutting applications, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 147, No. 3, pp. 389-396, doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.01.013.
3. A. Fourdeux, A. Wronski, (1963). New electrolytic method for cutting and shaping metal specimens, *British Journal of Applied Physics*, Vol. 14, No. 4, pp. 218-220, doi:10.1088/0508-3443/14/4/317.
4. A. Ilzhöfer, H. Schneider, C. Tsakmakis, (1997). Tensile testing device for microstructured specimens, *Microsystem Technologies*, Vol. 4, No. 1, pp. 46-50, doi:10.1007/s005420050091.
5. A. Kohyama, K. Hamada, H. Matsui, (1991). Specimen size effects on tensile properties of neutron-irradiated steels, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 179-181, pp. 417-420, doi:10.1016/0022-3115(91)90113-1.
6. A. Lamikiz, L.N. López de Lacalle, J.A. Sánchez, D. Del Pozo, J.M. Etayo, J.M. López, (2005). CO₂ laser cutting of advanced high strength steels (AHSS), *Applied Surface Science*, Vol. 242, No. 3-4, pp. 362-368, doi:10.1016/j.apsusc.2004.08.039.
7. A. Majstorović, V. Đukić, (1988). Ispitivanje mašinskih materijala - Uputstva. Naučna knjiga Beograd.
8. A. Molotnikov, R. Lapovok, C.H.J. Davies, W. Cao, Y. Estrin, (2008). Size effect on the tensile strength of fine-grained copper, *Scripta Materialia*, Vol. 59, No. 11, pp. 1182-1185, doi:10.1016/j.scriptamat.2008.08.004.
9. A. Mucsi, (2013 a). Analysis of Stress Distribution in Tensile Test Specimens Using Modified Versions of a Novel Gripping System, *Universal Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 1, No. 4, pp. 109-113, doi: 10.13189/ujme.2013.010401.
10. A. Mucsi, (2013 б). Effect of gripping system on the measured upper yield strength estimated by tensile tests, *Measurement*, Vol. 46, No. 5, pp. 1663-1670, doi:10.1016/j.measurement.2012.11.036.
11. A. Pilipović, T. Brajlili, I. Drstvenšek; (2018). Influence of Processing Parameters on Tensile Properties of SLS Polymer Product, *Polymers*, Vol. 10, No. 1208; pp. 1-18, doi:10.3390/polym10111208.
12. A. Shivade, P. R.Kubade, G. Shinde, (2017). Multi-Parametric Optimization of WEDM Process Using Desirability Function Analysis, *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, Vol. 4, Special Issue 1, pp. 84-88, doi:10.17148/iarjset/ncdmete.2017.21.
13. A. Wolfenden, W. Schwanz, (1995). An Evaluation of Three Methods to Measure the Dynamic Elastic Modulus of Steel, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 23, No. 3, pp. 176-179, doi:10.1520/JTE10407J.

14. A.A. Ostsemin. (2009). On the Analysis of Stress State in Elliptical Tensile Neck. *Strength of Materials*. Vol. 41. No. 4. pp. 356-362.
15. A.B. Puri, B. Bhattacharyya, (2003). An analysis and optimisation of the geometrical inaccuracy due to wire lag phenomenon in WEDM, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 43, No. 2, pp. 151-159, doi:10.1016/s0890-6955(02)00158-x.
16. A.C. Fisher-Crips, (2002). *Nanoindentation*, Springer-Verlag, New York, Mechanical Engineering Series.
17. A.C. Ugural, S.K. Fenster, (2003). *Advanced Strength and Applied Elasticity - 4th Edition*. Prentice Hall. ISBN-13:978-0130473929.
18. A.E. Matusевич, J.C. Massa, R.A. Mancini, (2012). Computation of Tensile Strain-Hardening Exponents through the Power-Law Relationship. *Journal of Testing and Evaluation*. pp. 1-29. doi:10.1520/JTE104226.
19. A.R. Dišić, (2018). Razvoj metodologije i uređaja za dinamičko ispitivanje materijala i zavarenih spojeva sa primenom u numeričkim proračunima konstrukcija pri velikim brzinama deformacije, doktorska disertacija, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka
20. A.V. Sergueeva, J. Zhou, B.E. Meacham, D.J. Branagan, (2009). Gage length and sample size effect on measured properties during tensile testing, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 526, No. 1-2, pp. 79-83, doi:10.1016/j.msea.2009.07.046.
21. A.Vaz-Romero, J.A. Rodríguez-Martínez, A. Arias, (2015). The deterministic nature of the fracture location in the dynamic tensile testing of steel sheets, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 86, pp. 318-335, doi:10.1016/j.ijimpeng.2015.08.005.
22. *ASM Atlas of Stress-Strain Curves*, (2002). Second edition. ISBN:0-87170-739-X.
23. *ASM Handbook*, (2000). Volume 8. Mechanical Testing and Evaluation. ISBN:0-87170-389-0.
24. ASTM E111-04 (Reapproved 2010), (2011): Standard test method for Young's modulus, tangent modulus and chord modulus, ASTM International.
25. ASTM E8/E8M-09, (2009): Standard test methods for tension testing of metallic materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org, doi: 10.1520/E0008_E0008M-09
26. B. Bousfield, (1992). *Surface Preparation and Microscopy of Materials*, Wiley, Chichester, ISBN-13: 978-0471931812.
27. B. Goshert, O.R. Terrazas, D.K. Matlock, C.J.V. Tyne, (2018). Sample edge effects on tensile properties and sheet formability, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 418, No. 012064, pp. 1-8, doi:10.1088/1757-899x/418/1/012064.
28. B. Haşçelik, R. Eren, (2016). Development of a Test Device for Measuring Tensile Properties of Fabrics, *Tekstil Ve Konfeksiyon*, Vol. 26, No. 1, pp. 12-21.
29. B. Strnadel, L.M. Hlaváč, L. Gembalová, (2013). Effect of steel structure on the declination angle in AWJ cutting, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 64, pp. 12-19, doi:10.1016/j.ijmachtools.2012.07.015.
30. B. Tadić, B. Jeremić, P. Todorović, Đ. Vukelić, U. Proso, V. Mandić, I. Budak, (2012). Efficient Workpiece Clamping by Indenting Cone-shaped Elements, *International Journal*

- of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 13, No. 10, pp. 1725-1735, doi:10.1007/s12541-012-0227-8
31. B.A. Hérouvry, P. Dupont, C.C. de Wit, (1994). A survey of models analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction, *Automatica*, Vol. 30, No. 7, pp. 1083-1138
 32. B.H. Fuentes, E.J. García, M.A.H. Garrido, (2013). Analysis of the State of Stresses and Plastic Strains during the Necking Process in Ductile Steels. *Procedia Engineering*. Vol. 63. pp. 430-437. doi:10.1016/j.proeng.2013.08.239.
 33. B.K. Choudhary, E.I. Samuel, K.B.S. Rao, S.L. Mannan, (2001). Tensile stress - strain and work hardening behaviour of 316LN austenitic stainless steel. *Materials Science and Technology*. Vol. 17. pp. 223-231. ISSN 0267 - 0836.
 34. B.R. Kirby, R.R. Preston, (1988). High temperature properties of hot-rolled. structural steels for use in fire engineering design studies. *Fire Safety Journal*. Vol. 13. No. 1. pp. 27-37. doi:10.1016/0379-7112(88)90030-6.
 35. B.S. Yilbas, (1997). The analysis of CO₂ laser cutting, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 211, No. 3, pp. 223-232, doi:10.1243/0954405971516211.
 36. B.S. Yilbas, (2001). Effect of process parameters on the kerf width during the laser cutting process, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 215, No. 10, pp. 1357-1365, doi:10.1243/0954405011519132.
 37. C.B. Hurchill, J.A. Shaw, M.A. Iadicola, (2009). Tips and tricks for characterizing shape memory alloy wire: part 2—fundamental isothermal responses, *Experimental Techniques*, Vol. 33, No. 1, pp. 51-62, , doi:10.1111/j.1747-1567.2008.00460.x.
 38. C.C. Dyson, W. Sun, C.J. Hyde, S.J. Brett, T.H. Hyde, (2016). Use of small specimen creep data in component life management: a review, *Materials Science and Technology*, Vol. 32, No. 15, pp. 1567-1581, doi:10.1080/02670836.2015.1132536.
 39. C.H. Suh, Y.C. Jung, Y.S. Kim, (2010). Effects of thickness and surface roughness on mechanical properties of aluminum sheets, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, no. 10, pp. 2091-2098, doi:10.1007/s12206-010-0707-7.
 40. C.H. Tsai, H.W. Chen, (2003). Laser cutting of thick ceramic substrates by controlled fracture technique, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 136, No. 1-3, pp. 166-173, doi:10.1016/s0924-0136(03)00134-1.
 41. C.K. Mukhopadhyay, K.K. Ray, T. Jayakumar; B. Raj, (1998). Acoustic emission from tensile deformation of unnotched and notched specimens of AISI type 304 stainless steels, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 255, No. 1-2, pp. 98-106, doi:10.1016/s0921-5093(98)00771-0.
 42. C.L. Hwang, K. Yoon, (1981). *Multiple Attribute Decision making: Methods and Applications*, Springer, Berlin
 43. C.M.A. Silva, P.A.R. Rosa, P.A.F. Martins, (2014). Innovative Testing Machines and Methodologies for the Mechanical Characterization of Materials, *Experimental Techniques*, pp. 1-13, doi:10.1111/ext.12094.

44. C.S. Oh, H.J. Lee, S.G. Ko, S.W. Kim, H.G. Ahn, (2005). Comparison of the Young's modulus of polysilicon film by tensile testing and nanoindentation, *Sensors and Actuators A*, Vol. 117, pp. 151-158, doi:10.1016/j.sna.2004.06.008.
45. C.T. Li, N.R. Langley, (1985). Improvement in Fiber Testing of High-Modulus Single-Filament Materials, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 68, No. 8, pp. C-202-C-204, doi:10.1111/j.1151-2916.1985.tb10183.x,
46. CWA 15261-2:2005 (2005). Measurement uncertainties in mechanical tests on metallic materials. The evaluation of uncertainties in tensile testing.
47. D. Anand, D.R. Kumar, (2014). Effect of Thickness and Grain Size on Flow Stress of Very Thin Brass Sheets, *Procedia Materials Science*, Vol. 6, pp. 154-160, doi:10.1016/j.mspro.2014.07.019.
48. D. Doreswamy, B. Shivamurthy, D. Anjaiah, N.Y. Sharma, (2015). An Investigation of Abrasive Water Jet Machining on Graphite/Glass/Epoxy Composite, *International Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2015, pp. 1-11, doi:10.1155/2015/627218.
49. D. Milikić, (2002). *Nekonzvencionalni postupci obrade, priručnik za studije i praksu*, Univerzitet u Novom sadu Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.
50. D. Roylance, (2001). *Mechanics of Materials*. Massachusetts Institute of Technology Cambridge. MA 02139.
51. D. Roylance, (2008). *Mechanical Properties of Materials*. Massachusetts Institute of Technology Cambridge. MA 02139.
52. D. Vukelja, A. Mišković, (1985). *Inženjerske metode optimizacije s primerima iz dobre prakse*, Građevinska knjiga, Beograd
53. D. Yao, L. Cai, C. Bao, (2016). A new approach on necking constitutive relationships of ductile materials at elevated temperatures. *Chinese Journal of Aeronautics*. Vol. 29. No. 6. pp. 1626-1634. doi:10.1016/j.cja.2016.10.011.
54. D. Zhang, (2010). *A Nano-Tensile Testing System for Studying Nanostructures inside an Electron Microscope: Design, Characterization and Application*, Thesis No. 4605, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, Swiss.
55. D.A. LaVan, (1999). Microtensile properties of weld metal, *Experimental Techniques*, Vol. 23, No. 3, pp. 31-34, doi:10.1111/j.1747-1567.1999.tb01568.x.
56. D.C. Ludwigson, (1971). Modified stress-strain relation for FCC metals and alloys. *Metallurgical Transactions*. Vol. 2. No. 10. pp. 2825-2828. doi:10.1007/bf02813258.
57. D.G. Morris, C.G. Oca, J. Chao; M.A.M. Morris, (2002). Influence of machining conditions on tensile stress and ductility of a mechanically alloyed Fe-40Al intermetallic, *Scripta Materialia*, Vol. 46, No. 12, pp. 843-850, doi:10.1016/s1359-6462(02)00063-5.
58. D.J. Celentano, E.E. Cabezas, C.M. García, (2005). Analysis of the Bridgman Procedure to Characterize the Mechanical Behavior of Materials in the Tensile Test: Experiments and Simulation. *Journal of Applied Mechanics*. Vol. 72. No. 1. pp. 149-152. doi:10.1115/1.1827243.
59. D.M. Krahmer, A. Paredes, G. Maceira, (2002). El proceso de corte láser aplicado a la manufactura de probetas planas de tracción normalizadas obtenidas a partir de chapas finas de acero galvanizadas, *Congreso Conamet/Sam Simposio Materia*, Santiago de Chile, pp 389-393, doi:10.13140/2.1.4119.2965.

60. D.M. Krahmer, R. Polvorosa, L.N.L. de Lacalle, U. Alonso-Pinillos, G. Abate, F. Riu, (2016). Alternatives for Specimen Manufacturing in Tensile Testing of Steel Plates, *Experimental Techniques*, Vol. 40, No. 6, pp. 1555-1565, doi:10.1007/s40799-016-0134-5.
61. D.M. Marsh, (1961). Micro-tensile testing machine, *Journal of Scientific Instruments*, Vol. 38.
62. D.N. Makwana, A.K. Patel, K.G. Dave, (2016). A Review of miniature specimen tensile test method of tungsten at elevated temperature. *International Journal of Engineering Development and Research (IJEDR)*. Vol. 4. No. 4. pp.132-139. ISSN:2321-9939.
63. D.P.R. Palaparti, B.K. Choudhary, T. Jayakumar, (2012). Influence of Temperature on Tensile Stress-Strain and Work Hardening Behaviour of Forged Thick Section 9Cr-1Mo Ferritic Steel. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. Vol. 65. No. 5. pp. 413-423. doi:10.1007/s12666-012-0146-5.
64. Đ. Drobñjak, (1990). *Fizička metalurgija - Fizika čvrstoće i plastičnosti 1. Tehnološko-metalurški fakultet*. Beograd.
65. E. Lucon, (2014). Testing of Small-Sized Specimens, *Comprehensive Materials Processing*, pp. 135-163, doi:10.1016/b978-0-08-096532-1.00110-2.
66. E. Mäder, C. Rothe; S.L. Gao, (2007). Commingled yarns of surface nanostructured glass and polypropylene filaments for effective composite properties. *Journal of Materials Science*, 42(19), 8062-8070. doi:10.1007/s10853-006-1481-x.
67. E. Siebel, S. Schwaigerer, (1948). On the mechanics of the tensile test (in German). *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. Vol. 19. pp. 145-152.
68. E. Voce, (1948). The Relationship between Stress and Strain for Homogeneous Deformation. *Journal of the Institute of Metals*. Vol. 74. pp. 537-562.
69. E. Voce, (1955 a). Analysis of Stress Strain Curves. *Journal of the Royal Aeronautical Society*. Vol. 59. No. 534. pp. 442. doi:10.1017/s0368393100118759.
70. E. Voce, (1955 б). Empirical Formulae for the Determination of Stress Curves. *Journal of the Royal Aeronautical Society*. Vol. 59. No. 533. pp. 362-364. doi:10.1017/s0368393100117626.
71. E.E. Cabezas, D.J. Celentano, (2004). Experimental and numerical analysis of the tensile test using sheet specimens, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 40, No. 5-6, pp. 555-575, doi:10.1016/s0168-874x(03)00096-9.
72. E.M. Rabenberg, B.J. Jaques, B.H. Sencer, F.A. Garner, P.D. Freyer, T. Okita, D.P. Butt, (2014). Mechanical behavior of AISI 304SS determined by miniature test methods after neutron irradiation to 28dpa, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 448, No. 1-3, pp. 315-324, doi:10.1016/j.jnucmat.2014.02.018.
73. EN 10002-1 (2001): *Metallic materials - Tensile testing: Part I. Method of test at ambient temperature*, European Committee for Standardization.
74. EN 10025-2:2004, (2004). *European Standard Hot rolled products of structural steels - Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels*
75. EN ISO 9513 (2012): 2012/AC:2013 CEN/TC 459/SC 1, *Metallic Materials-Calibration of Extensometers Used in uniaxial testing*.

76. EN 12163:2016, (2016). Copper and copper alloys - Rod for general purposes. European Standard. ISBN:978-0-580-67071-8.
77. EN ISO 6892-1:2019, (2019). Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature, European Committee for Standardization.
78. F. Fariba, G.H. Majzoobi, M. Ranjbaran, (2010). A new numerical technique for correction the stress-strain curve and the stress-strain distribution on neck section of the tensile specimen. *Journal of Mechanical Science and Technology*. pp. 10-10.
79. F. Zhu, P. Bai, J. Zhang, D. Lei, X. He, (2015). Measurement of true stress-strain curves and evolution of plastic zone of low carbon steel under uniaxial tension using digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*. Vol. 65. pp. 81-88. doi:10.1016/j.optlaseng.2014.06.013.
80. F. Zhu, P. Bai, Y. Gong, D. Lei, X. He, (2018). Accurate measurement of elastic modulus of specimen with initial bending using two-dimensional DIC and dual-reflector imaging technique, *Measurement*, Vol. 119, pp. 18-27, doi:10.1016/j.measurement.2018.01.043.
81. F.H. Akbary, M.J. Santofimia, J. Sietsma, (2014). Elastic Strain Measurement of Miniature Tensile Specimens, *Experimental Mechanics*, Vol. 54, pp. 165-173, doi:10.1007/s11340-013-9785-7.
82. G. La Rosa, G. Mirone, A. Risitano, (2003). Postnecking Elastoplastic Characterization: Degree of Approximation in the Bridgman Method and Properties of the Flow-Stress/True-Stress Ratio. *Metallurgical and Materials Transactions A*. Vol. 34A. pp. 615-624.
83. G. Mirone, (2004). A new model for the elastoplastic characterization and the stress-strain determination on the necking section of a tensile specimen. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 41. No. 13. pp. 3545-3564. doi:10.1016/j.ijsolstr.2004.02.011.
84. G. Mirone, P. Verleysen, R. Barbagallo, (2018). Tensile Testing of Metals: Relationship Between Macroscopic Engineering Data and Hardening Variables at The Semi-Local Scale. *International Journal of Mechanical Sciences*. pp. 1-22. doi:10.1016/j.ijmecsci.2018.09.054.
85. G. Partheepan, D.K. Sehgal, R.K. Pandey, (2005). Design and usage of a simple miniature specimen test setup for the evaluation of mechanical properties, *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, Vol. 1, No. 1, pp. 38-50, doi:10.1504/ijmmp.2005.008129.
86. G. Sainath, B.K. Choudhary, J. Christopher, E.I. Samuel, M.D. Mathew, (2015). Applicability of Voce equation for tensile flow and work hardening behaviour of P92 ferritic steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Vol. 132-133. pp. 1-9. doi:10.1016/j.ijpvp.2015.05.004.
87. G. Simons, C. Weippert, J. Dual, J. Villain, (2006). Size effects in tensile testing of thin cold rolled and annealed Cu foils, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 416, No. 1-2, pp. 290-299, doi:10.1016/j.msea.2005.10.060.
88. G. Straffelini, V. Fontanari, A. Molinari, (1999). True and apparent Young's modulus in ferrous porous alloys, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 260, No. 1-2, pp. 197-202, doi:10.1016/s0921-5093(98)00960-5.
89. G.B. Rathmayr, A. Bachmaier, R. Pippin, (2013). Development of a New Testing Procedure for Performing Tensile Tests on Specimens with Sub-Millimetre Dimensions, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 41, No. 4, pp. 1-12, doi:10.1520/JTE20120175.

90. G.B. Rathmayr, A. Bachmaier, R. Pippan, (2013). Development of a New Testing Procedure for Performing Tensile Tests on Specimens with Sub-Millimetre Dimensions, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 41, No. 4, pp. 1-12, doi:10.1520/JTE20120175.
91. G.H. Majzoobi, F. Fariba, (2014 a). A New Technique based on Strain Energy for Correction of Stress-strain Curve. *International Journal of Engineering. Transactions B: Applications*. Vol. 27. No. 8. pp. 1287-1296. doi:10.5829/idosi.ije.2014.27.08b.15.
92. G.H. Majzoobi, F. Fariba, M.K. Pipelzadeh, S.J. Hardy, (2014 б). A new approach for the correction of stress-strain curves after necking in metals. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. Vol. 50. No. 2. pp. 125-137. doi:10.1177/0309324714555384.
93. G.M. Pharr, W.C. Oliver, F.R. Brotzen, (1992). On the generality of the relationship among contact stiffness, contact area, and elastic modulus during indentation, *Journal of Materials Research*, Vol. 7, No. 3, pp. 613-617, doi:10.1557/jmr.1992.0613.
94. G.S. Radley, P.J Blanks, (1981). Dynamic measurement of Young's modulus in magnetic sheet steels, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 14, No. 5, pp. 546-549, doi:10.1088/0022-3735/14/5/005.
95. G.Z. Lomaev, (1965). Methods for determining the rigidity of universal tensile test machines, *Measurement Techniques*, Vol. 8, No. 7, pp. 617-619. doi:10.1007/bf00984065.
96. G.E. Dieter, (1986). *Mechanical Metallurgy*, third edition, McGraw-Hill Book Company, New York, ISBN 07-016890-3.
97. H. Bhadeshia, R. Honeycombe, (2006) *Steels: Microstructure and Properties*, Third edition, Elsevier Ltd., London, ISBN:10:0-7506-8084-9.
98. H. Galenkamp, H. van Wijngaarden, (1985). Determining the Von Mises stress from the neck of a tensile-test specimen. *Philips technical review*. Vol. 42. No. 1. pp. 11-19.
99. H. Hoffmann, S. Hong, (2006). Tensile Test of very thin Sheet Metal and Determination of Flow Stress Considering the Scaling Effect, *CIRP Annals*, Vol. 55, No. 1, pp. 263-266, doi:10.1016/s0007-8506(07)60412-0.
100. H. Kansal, (2016). Experimental Investigation of Properties of Polypropylene and Non-Woven Spunbond Fabric, *IOSR Journal of Polymer and Textile Engineering (IOSR-JPTE)*, e-ISSN: 2348-019X, p-ISSN: 2348-0181, Volume 3, Issue 5 (Sep. - Oct. 2016), pp 08-14, doi: 10.9790/019X-03050814.
101. H. Li, J.J. Vlassak, (2009). Determining the elastic modulus and hardness of an ultra-thin film on a substrate using nanoindentation, *Journal of Materials Research*, Vol. 24, No. 3, pp. 1114-1126, doi:10.1557/jmr.2009.0144.
102. H. Liu, Y. Shen, S. Yang, P. Zheng, L. Zhang, (2017). A comprehensive solution to miniaturized tensile testing: Specimen geometry optimization and extraction of constitutive behaviors using inverse FEM procedure, *Fusion Engineering and Design*, Vol. 121, pp. 188-197, doi:10.1016/j.fusengdes.2017.07.016.
103. H. Seo, D.G. Song, K.Y. Jhang, (2016). Measurement of Elastic Constants by Simultaneously Sensing Longitudinal and Shear Waves as an Overlapped Signal. *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*. Vol. 36. No. 2. pp. 138-148. doi:10.7779/JKSNT.2016.36.2.138.

104. H. Tao, N. Zhang, W. Tong, (2008). An iterative procedure for determining effective stress-strain curves of sheet metals. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*. Vol. 5. No. 1. pp. 13-27. doi:10.1007/s10999-008-9082-2.
105. H. Tian, D. Kang, (2003). A study on determining hardening curve for sheet metal. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 43. No. 12. pp. 1253-1257. doi:10.1016/s0890-6955(03)00132-9.
106. H.B. Motra, J. Hildebrand, A. Dimmig-Osburg, (2014). Assessment of strain measurement techniques to characterise mechanical properties of structural steel, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 17, No. 4, pp. 260-269, doi:10.1016/j.jestch.2014.07.006.
107. H.B. Sun, Y. Kaneda, M. Ohmori, F. Yoshida, (2006). Effect of Stress Concentration on Upper Yield Point in Mild Steel, *Materials Transactions*, Vol. 47, No. 1, pp. 96-100, doi:10.2320/matertrans.47.96.
108. H.C. Hyun, M. Kim, S. Bang, H. Lee, (2014). On acquiring true stress-strain curves for sheet specimens using tensile test and FE analysis based on a local necking criterion. *Journal of Materials Research*. Vol. 29. No. 05. pp. 695-707. doi:10.1557/jmr.2014.24.
109. H.D. Kweon, E.J. Heo, D.H. Lee, J.W. Kim, (2018). A methodology for determining the true stress-strain curve of SA-508 low alloy steel from a tensile test with finite element analysis. *Journal of Mechanical Science and Technology*. Vol. 32. No. 7. pp. 3137-3143. doi:10.1007/s12206-018-0616-8.
110. H.M. Sonne, (1999). Bestimmung des Elastizitätsmoduls im Zugversuch –Determination of Young's modulus in tensile testing. *TagungWerkstoffprüfung, Vortrags- und Diskussionstagung, Bad Nauheim, Friedberg, Germany*, pp. 219-230.
111. H.S. Wacharawichanant, T. Siripattanasak, (2013). Mechanical and Morphological Properties of Polypropylene/Polyoxymethylene Blends, *Advances in Chemical Engineering and Science*, Vol. 3 No. 3, pp. 202-205. doi: 10.4236/aces.2013.33026.
112. H.T. Li, B. Young, (2017). Material properties of cold-formed high strength steel at elevated temperatures. *Thin-Walled Structures*. Vol. 115. pp. 289-299. doi:10.1016/j.tws.2017.02.019.
113. H.W. Swift, (1952). Plastic instability under plane stress. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. Vol. 1. No. 1. pp. 1-18. doi:10.1016/0022-5096(52)90002-1.
114. I. Arrayago, E. Real, L. Gardner, (2015). Description of stress-strain curves for stainless steel alloys. *Materials & Design*. Vol. 87. pp. 540-552. doi:10.1016/j.matdes.2015.08.001.
115. I. Petrescu, C. Mohora, C. Ispas, (2013). The determination of young modulus for CFRP using three point bending tests at different span lengths, *University Politehnica of Bucharest, Scientific Bulletin, Series D*, Vol. 75, No. 1, pp. 121-128, ISSN 1454-2358.
116. I. Scheider, W. Brocks, A. Cornec, (2004). Procedure for the Determination of True Stress-Strain Curves from Tensile Tests with Rectangular Cross-Section Specimens. *Journal of Engineering Materials and Technology*. Vol. 126. No. 1. pp. 70-76. doi:10.1115/1.1633573.
117. J. Aldazabal, A.M. Meizoso, A. Klimpel, A. Bannister, S. Cicero, (2018). Mechanical and Microstructural Features of Plasma Cut Edges in a 15 mm Thick S460M Steel Plate, *Metals*, Vol. 8, No. 447, pp. 1-13, doi:10.3390/met8060447.

118. J. Cao, F. Li, X. Ma, Z. Sun, (2017). Tensile stress-strain behavior of metallic alloys. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. Vol. 27. No. 11. pp. 2443-2453. doi:10.1016/s1003-6326(17)60271-1.
119. J. Chen, B. Young, (2004). Mechanical properties of cold-formed steel at elevated temperatures. Proceedings of 17th international specialty conference on cold-formed steel structures. pp. 437-465.
120. J. Chen, B. Young (2006). Stress-strain curves for stainless steel at elevated temperatures. Engineering Structures. Vol. 28. No. 2. pp. 229-239. doi:10.1016/j.engstruct.2005.07.005.
121. J. Dzugan, M. Sindelarova, R. Prochazka, P. Konopik, (2016). Specimens Preparation Influence on Results of Micro-Tensile Tests, International Conference on Sustainable Energy, Environment and Information Engineering (SEEIE 2016), pp. 557-561, 10.12783/dteees/seeie2016/4686.
122. J. Gubicza; (1997). Determination of Young's Modulus from Depth Sensing Vickers Indentation Tests, Solid State Phenomena, Vol. 56, pp. 195-200, doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.56.195.
123. J. Miljojković, I. Bijelić, N. Vranić, N. Radovanović, M. Živković, (2017). Determining elastic modulus of the material by measuring the deflection of the beam loaded in bending, Tehnički Vjesnik-Technical Gazette, Vol. 24, No. 4, pp. 1227-1234, doi:10.17559/tv-20170609133537.
124. J. Nunes, (1963). Flow Stress-Strain Relationships in Tension Tests of Steel. Technical Report Watertown Arsenal Laboratories. Tr 834.2/10.
125. J. Olofsson, (2012). Microstructure-based Mechanical Behaviour in Structural Analyses of Cast Components. Licentiate thesis. Dissertation Series No. 1. School of Engineering. Jönköping University. Sweden. ISBN 978-91-87289-01-9.
126. J. Tabin, M. Prącik, (2014). Methods for identifying dynamic parameters of clip-on extensometer-specimen structure in tensile tests, Measurement, Vol. 63, pp. 176-186, doi:10.1016/j.measurement.2014.11.035.
127. J. Zhou, V.L. Tagarielli, U. Heisserer, P.T. Curtis, (2018). An Apparatus for Tensile Testing of Engineering Materials, Experimental Mechanics, Vol. 58, No. 6, pp. 941-950, doi:10.1007/s11340-018-0393-4.
128. J.A. Soares, M.L. Gipiela, S.F. Lajarin, P.V.P. Marcondes, (2013). Study of the punch-die clearance influence on the sheared edge quality of thick sheets, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 65, No. 1-4, pp. 451-457, doi:10.1007/s00170-012-4184-2.
129. J.C Pomerol, S. Barba-Romeo, (2000). Multicriteria Decision Management: Principles and Practice, Kluwer Nijhoff Publishing, Boston, USA.
130. J.D. Lord, (2002). Review of Methods and Analysis Software for the Determination of Modulus from Tensile Tests, Materials Measurement, Vol. 41.
131. J.D. Lord, M. Rides, M.S. Loveday, (2005 a). Modulus measurement methods, TENSTAND WP3 Final Report, National Physical Laboratory.
132. J.D. Lord, M.S. Loveday, M. Rides, I. McEnteggart, (2005 б). Digital tensile software evaluation, TENSTAND WP2 Final Report, National Physical Laboratory.

133. J.D. Lord, R.M. Morrell, (2006). Elastic Modulus Measurement, Good Practice Guide No. 98, National Physical Laboratory, ISSN 1744-3911.
134. J.D. Lord, R.M. Morrell, (2010 a). Elastic modulus measurement—obtaining reliable data from the tensile test, *Metrologia*, Vol. 47, pp. S41-S49, doi:10.1088/0026-1394/47/2/S05.
135. J.D. Lord, B. Roebuck, R. Morrell, T. Lube, (2010 б). 25year perspectiveAspects of strain and strength measurement in miniaturised testing for engineering metals and ceramics, *Materials Science and Technology*, Vol. 26, No. 2, pp. 127-148, doi:10.1179/026708309x1258456405201.
136. J.E. Rocher, S. Allaoui, G. Hivet, E. Blond, (2012). Experimental characterization of the tensile behavior of a polypropylene/glass 3D-fabric: from the yarn to the fabric, 4th World Conference on 3D Fabrics and their Applications, Sep 2012, Aachen, Germany. hal-00772683.
137. J.G. Poulakis, C.D. Papaspyrides, (1997). Recycling of polypropylene by the dissolution /reprecipitation technique: I. A model Study. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 20, No. 1, pp. 31-41, doi:10.1016/s0921-3449(97)01196-8.
138. J.H Kim, A. Serpantié, F. Barlat, F. Pierron, M.G. Lee, (2013). Characterization of the post-necking strain hardening behavior using the virtual fields method. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 50. No. 24. pp. 3829-3842. doi:10.1016/j.ijsolstr.2013.07.018.
139. J.H. Kim, A. Nizami, Y. Hwangbo, B. Jang, H.J. Lee, C.S. Woo, S. Hyun, T.S. Kim, (2013). Tensile testing of ultra-thin films on water surface, *Nature Communications*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-6, doi:10.1038/ncomms3520.
140. J.H. Hollomon, (1945). Tensile Deformation. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. Vol. 162. pp. 268-290.
141. J.H. Yu, B.A. McWilliams, R.P. Kaste, (2016). Digital Image Correlation Analysis and Numerical Simulation of Aluminum Alloys under Quasi-static Tension after Necking Using the Bridgman's Correction Method. *Experimental Techniques*. Vol. 40. No. 5. pp. 1359-1367. doi:10.1007/s40799-016-0140-7.
142. J.M. Antunes, J.V. Fernandes, N.A. Sakharova, M.C. Oliveira, L.F. Menezes, (2007). On the determination of the Young's modulus of thin films using indentation tests, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 44, No. 25-26, pp. 8313-8334, doi:10.1016/j.ijsolstr.2007.06.015.
143. J.M. Choung, S.R. Cho, (2008). Study on true stress correction from tensile tests. *Journal of Mechanical Science and Technology*. Vol. 22. No. 6. pp. 1039-1051. doi:10.1007/s12206-008-0302-3.
144. J.R. Davis, (2004). *Tensile testing - second edition*, ASM International, USA, ISBN:0-87170-806-X
145. J.T. Cantrell, S. Rohde, D. Damiani, R. Gurnani, L. DiSandro, J. Anton, P.G. Ifju, (2017). Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 23, No. 4, pp. 811-824, doi:10.1108/rpj-03-2016-0042.
146. K. Kumar, A. Pooleery, K. Madhusoodanan, R.N. Singh, J.K. Chakravarty, B.K. Dutta, R.K. Sinha, (2014). Use of Miniature Tensile Specimen for Measurement of Mechanical Properties, *Procedia Engineering*, Vol. 86, pp. 899 - 909, doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.112.

147. K. Kumar, A. Pooleery, K. Madhusoodanan, R.N. Singh, A. Chatterjee, B.K. Dutta, R.K. Sinha, (2016). Optimisation of thickness of miniature tensile specimens for evaluation of mechanical properties, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 675, pp. 32-43, doi:10.1016/j.msea.2016.08.032.
148. K. Piao, J.K. Lee, J.H. Kim, H.Y. Kim, K. Chung, F. Barlat, R.H. Wagoner, (2012). A sheet tension/compression test for elevated temperature, *International Journal of Plasticity*, Vol. 38, pp. 27-46, doi:10.1016/j.ijplas.2012.03.009.
149. K. Wang, D. Wang, F. Han, (2015). Effect of sample thickness on the tensile behaviors of Fe-30Mn-3Si-3Al twinning-induced plasticity steel, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 642, pp. 249-252, doi:10.1016/j.msea.2015.07.004.
150. K.B. Ronai, (1990). *Osobine i ispitivanje materijala*. Viša tehnička škola. Novi Sad.
151. K.E. Petersen, C.R. Guarnieri, (1979). Young's modulus measurements of thin films using micromechanics, *Journal of Applied Physics*, Vol. 50, No. 11, pp. 6761-6766, doi:10.1063/1.325870.
152. K.G. Samuel, P. Rodriguez, (2005). On power-law type relationships and the Ludwigson explanation for the stress-strain behaviour of AISI 316 stainless steel. *Journal of Materials Science*. Vol. 40. No. 21. pp. 5727-5731. doi:10.1007/s10853-005-1078-9.
153. K.H. Ho, S.T. Newman, (2003). State of the art electrical discharge machining (EDM), *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 13, pp. 1287-1300, doi:10.1016/s0890-6955(03)00162-7.
154. K.J.R. Rasmussen, (2003). Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 59. No. 1. pp. 47-61. doi:10.1016/s0143-974x(02)00018-4.
155. K.P. Yoon, C.L. Hwang, (1995). *Multiple Attribute decision making an introduction*, Series: Quantative Applications in the Social Science 104, Sage University Paper, Thousand Oaks, California
156. K.S. Raghavan, W.M. Jr Garrison, (2010). An investigation of the relative effects of thickness and strength on the formability of steel sheet, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 21-22, pp. 5565-5574, doi:10.1016/j.msea.2010.05.004.
157. K.S. Zhang, (1995). Fracture prediction and necking analysis. *Engineering Fracture Mechanics*. Vol. 52. No. 3. pp. 575-582. doi:10.1016/0013-7944(95)00032-q.
158. L. Bergonzi, M. Vettori, A. Pirondi, F. Moroni, F. Musiari, (2018). Numerical and experimental validation of a non-standard specimen for uniaxial tensile test, *Procedia Structural Integrity*, Vol. 12, pp. 392-403, doi:10.1016/j.prostr.2018.11.078.
159. L. Gardner, A. Insausti, K.T. Ng, M. Ashraf, (2010). Elevated temperature material properties of stainless steel alloys. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 66. No. 5. pp. 634-647. doi:10.1016/j.jcsr.2009.12.016.
160. L. Gardner, Y. Bu, P. Francis, N.R. Baddoo, K.A. Cashell, F. McCann, (2016). Elevated temperature material properties of stainless steel reinforcing bar. *Construction and Building Materials*. Vol. 114. pp. 977-997. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.04.009.
161. L. Kiesewetter, J.M. Zhang, D. Houdeau, A. Steckenborn, (1992). Determination of Young's Moduli of micromechanical thin films using the resonance method, *Sensors and Actuators A:Physical*, Vol. 35, No. 2, pp. 153-159, doi:10.1016/0924-4247(92)80154-u.

162. L. Sun, R.H. Wagoner, (2011). Complex unloading behavior: Nature of the deformation and its consistent constitutive representation, *International Journal of Plasticity*, Vol. 27, No. 7, pp. 1126-1144, doi:10.1016/j.ijplas.2010.12.003.
163. L. Twilt, (1988). Strength and deformation properties of steel at elevated temperatures: Some practical implications. *Fire Safety Journal*. Vol. 13. No. 1. pp. 9-15. doi:10.1016/0379-7112(88)90028-8.
164. L. Wang, W. Tong, (2015). Identification of post-necking strain hardening behavior of thin sheet metals from image-based surface strain data in uniaxial tension tests. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 75-76. pp. 12-31. doi:10.1016/j.ijsolstr.2015.04.038.
165. L. Woong, K. Ho-Kyung, (2013). Design and development of a miniaturised tensile testing machine, *Global Journal of Engineering Education*, Vol. 15, No. 1, pp. 48-53.
166. L. Yang, L. Lu, (2013). The influence of sample thickness on the tensile properties of pure Cu with different grain sizes, *Scripta Materialia*, Vol. 69, No. 3, pp. 242-245, doi:10.1016/j.scriptamat.2013.04.009.
167. L.A. Dobrzanski, (2002). *Fundamentals of Materials Science and Physical Metallurgy. Engineering Materials with the Fundamentals of Materials Design*, WNT, Warszawa, (in Polish).
168. L.G. Barbosa, M. Piaia, G.H. Ceni, (2017). Analysis of Impact and Tensile Properties of Recycled Polypropylene, *International Journal of Materials Engineering* 2017, 7(6): 117-120, doi: 10.5923/j.ijme.20170706.03.
169. L.N. López de Lacalle, A. Lamikiz, J.A. Sánchez, M.A. Salgado, (2004). Effects of tool deflection in the high-speed milling of inclined surfaces, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 24, No. 9-10, pp. 621-631, doi:10.1007/s00170-003-1723-x.
170. L.N. López de Lacalle, A. Lamikiz, F.J. Campa, A.F. Valdivielso, I. Etxeberria, (2009). Design and Test of a Multitooth Tool for CFRP Milling, *Journal of Composite Materials*, Vol. 43, No. 26, pp. 3275-3290, doi:10.1177/0021998309345354.
171. L.P. Mikkelsen, (1999). Necking in rectangular tensile bars approximated by a 2-D gradient dependent plasticity model. *European Journal of Mechanics - A/Solids*. Vol. 18. No. 5. pp. 805-818. doi:10.1016/s0997-7538(99)00113-8.
172. L.V. Raulea, A.M. Goijaerts, L.E. Govaert, F.P.T. Baaijens, (2001). Size effects in the processing of thin metal sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 115, No. 1, pp. 44-48, doi:10.1016/s0924-0136(01)00770-1.
173. M. Calmunger, G. Chai, R. Eriksson, S. Johansson, J.J. Moverare, (2017). Characterization of Austenitic Stainless Steels Deformed at Elevated Temperature. *Metallurgical and Materials Transactions A*. Vol. 48. No. 10. pp. 4525-4538. doi:10.1007/s11661-017-4212-9.
174. M. Gromada, G. Mishuris, A. Öchsner, (2007). An attempt to improve the evaluation of mechanical material properties from the Axisymmetric Tensile Test. *Israel Journal of Chemistry*. Vol. 47. No. 3-4. pp. 329-335. doi:10.1560/ijc.47.3-4.329.
175. M. Gromada, G. Mishuris, A. Öchsner, (2010). On the Evaluation of Mechanical Properties from the Axisymmetric Tensile Test. *Archives of Metallurgy and Materials*. Vol. 55. No. 1. pp. 325-330.

176. M. Gromada, G. Mishuris, A. Öchsner, (2011). Correction Formulae for the Stress Distribution in Round Tensile Specimens at Neck Presence. Springer Briefs in Applied Sciences and Technology. Computational Mechanics. pp. 1-90. doi: 10.1007/978-3-642-22134-7.
177. M. Grzenda, A. Bustillo, (2013). The evolutionary development of roughness prediction models, Applied Soft Computing, Vol. 13, No. 5, pp. 2913-2922, doi:10.1016/j.asoc.2012.03.070.
178. M. Haddad, R. Zitoune, H. Bougherara, F. Eyma, B. Castanié, (2014). Study of trimming damages of CFRP structures in function of the machining processes and their impact on the mechanical behaviour, Composites Part B: Engineering, Vol. 57, pp. 136-143, doi:10.1016/j.compositesb.2013.09.051.
179. M. Harničárová, J. Zajac, A. Stoić, (2010). Comparison of different material cutting technologies in terms of their impact on the cutting quality of structural steel, Tehnički vjesnik, Vol. 17, No. 3, pp. 371-376, ISSN 1330-3651.
180. M. Haseli, M. Layeghi, H.Z. Hosseinabadi, (2019). Evaluation of Modulus of Elasticity of Date Palm Sandwich Panels Using Ultrasonic Wave Velocity and experimental Models, Measurement, Vol. 149, 107016, pp. 1-9, doi:10.1016/j.measurement.2019.107016.
181. M. Jaroniek, (2016). Mathematical and Experimental Analysis Tension of Steel in Bi-Polar Coordinates. Mechanics and Mechanical Engineering. Vol. 20. No. 4. pp. 467-488.
182. M. Joun, J.G. Eom, M.C. Lee, (2008). A new method for acquiring true stress-strain curves over a large range of strains using a tensile test and finite element method. Mechanics of Materials. Vol. 40. No. 7. pp. 586-593. doi:10.1016/j.mechmat.2007.11.006.
183. M. Jovanović, D. Adamović, V. Lazić, N. Ratković, (2003). Mašinski materijali, univerzitetski udžbenik, Mašinski fakultet u Kragujevcu, ISBN 86-80581-55-0, CIP 66.017/.018 (075.8), 539.2/.6(075.8), Kragujevac
184. M. Kamaya, M. Kawakubo, (2011). A procedure for determining the true stress-strain curve over a large range of strains using digital image correlation and finite element analysis. Mechanics of Materials. Vol. 43. No. 5. pp. 243-253. doi:10.1016/j.mechmat.2011.02.007.
185. M. Kamaya, M. Kawakubo, (2014). True stress-strain curves of cold worked stainless steel over a large range of strains. Journal of Nuclear Materials. Vol. 451. No. 1-3. pp. 264-275. doi:10.1016/j.jnucmat.2014.04.006.
186. M. Kamaya, Y. Kitsunai, M. Koshiishi, (2015). True stress-strain curve acquisition for irradiated stainless steel including the range exceeding necking strain. Journal of Nuclear Materials. Vol. 465. pp. 316-325. doi:10.1016/j.jnucmat.2015.05.027.
187. M. Khadyko, S. Dumoulin, T. Børvik, O.S. Hopperstad, (2014). An experimental-numerical method to determine the work-hardening of anisotropic ductile materials at large strains. International Journal of Mechanical Sciences. Vol. 88. pp. 25-36. doi:10.1016/j.ijmecsci.2014.07.001.
188. M. Klein, A. Hadrboletz, B. Weiss, G. Khatibi, (2001). The “size effect” on the stress-strain, fatigue and fracture properties of thin metallic foils, Materials Science and Engineering: A, Vol. 319-321, pp. 924-928, doi:10.1016/s0921-5093(01)01043-7.

189. M. Mirmomeni, A. Heidarpour, X.L. Zhao, C.R. Hutchinson, J.A. Packer, C. Wu, (2015). Mechanical properties of partially damaged structural steel induced by high strain rate loading at elevated temperatures - An experimental investigation. *International Journal of Impact Engineering*. Vol. 76. pp. 178-188. doi:10.1016/j.ijimpeng.2014.10.001.
190. M. Ognjanović, (1990). *Metodika konstruisanja - I izdanje*, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd
191. M. Oruč, F. Begovac, I. Vitez, R. Sunulahpašić, (2008). *Čelik i čelični liv - podjela i označavanje*, Fakultet za metalurgiju i materijale, Zenica, BiH
192. M. Plančak, D. Vilotić, V. Vujović, I. Trbijević, P. Skakun, M. Milutinović, (1997). *Praktikum laboratorijskih vežbi iz tehnologije plastičnosti*. Univerzitet u Novom Sadu Fakultet tehničkih nauka. Novi Sad.
193. M. Rund, J. Volák, M. Šindelářová, (2015). Small Size Specimens Methods for Evaluation of Mechanical Properties, *Advanced Materials Research*, Vol. 1127, pp. 1-8, doi:10.4028/www.scientific.net/amr.1127.1.
194. M. Saje, (1979). Necking of a cylindrical bar in tension. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 15. No. 9. pp. 731-742. doi:10.1016/0020-7683(79)90070-2.
195. M. Yasunaga, Y. Funatsu, S. Kojima, K. Otsuka, T. Suzuki, (1983). Measurement of elastic constants. *Scripta Metallurgica*. Vol. 17. No. 9. pp. 1091-1094. doi:10.1016/0036-9748(83)90460-x.
196. M. Zrida, H. Laurent, V. Grolleau, G. Rio, M. Khelif, D. Guines, ... C. Bradai, (2010). High-speed tensile tests on a polypropylene material. *Polymer Testing*, 29(6), 685-692. doi:10.1016/j.polymertesting.2010.05.007
197. M.A. Hamstad, P.P. Gillis, (1966). Effective Strain Rates in Low-Speed Uniaxial Tension Tests, *Materials Research and Standards*, Vol. 6, No. 11, pp. 569-573.
198. M.A. Kobliska, M.B. Zeković, (1979). *Tehnologija materijala u rudarstvu*, drugo dopunjeno izdanje. Rudarsko geoloski fakultet, Beograd.
199. M.B. Zeković, P.D. Trifunović, (1987). *Tehnologija materijala u rudarstvu - Praktikum*. Rudarsko-geološki fakultet. Beograd.
200. M.M. Raj, H.V. Patel, L.M. Raj, N.K. Patel, (2013). Studies on Mechanical Properties of Recycled Polypropylene Blended with Virgin Polypropylene, *International Journal of Science Inventions Today*, Vol. 2, No. 3, pp. 194-203.
201. M.T. Göğüş, A. Cabiroğlu, T. Ekmekyapar, M. Özakça, (2014). Effect of Specimen Preparation Methods for Tension Test on Design of Cold-Formed Steel Members, *Proc. of the Second Intl. Conf. on Advances In Civil, Structural and Environmental Engineering- ACSEE 2014*, pp. 126-130, doi:10.15224/ 978-1-63248-030-9-26.
202. M.Z. Siddiqui, F. Tariq, N. Naz, M.F. Ahmed, (2012). Determination of Young's Modulus of Metallic and Composite Materials by Digital Image Correlation, *Journal of Space Technology*, Vol. 1, No. 1.
203. N. Parveen, G.V.S. Murthy, (2011). Determination of elastic modulus in nickel alloy from ultrasonic measurements, *Bulletin of Material Science*, Vol. 34, No. 2, pp. 323-326, doi:10.1007/s12034-011-0070-z.
204. N. Tsuchida; T. Inoue; K. Enami, (2012). Estimations of the True Stress and True Strain until Just before Fracture by the Stepwise Tensile Test and Bridgman Equation for

- Various Metals and Alloys. *Materials Transactions*. Vol. 53. No. 1. pp. 133-139. doi:10.2320/matertrans.md201112.
205. N.A. Bin Sukindar, M.K.A. Bin Mohd Ariffin, B.T.H.T. Bin Baharudin, C.N.A. Binti Jaafar, M.I.S. Bin Ismail, (2017). Analysis on the impact process parameters on tensile strength using 3D printer repetier-host software, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 12, No. 10, pp. 3341-3346, ISSN 1819-6608.
206. N.D. Kankanamge, M. Mahendran, (2011). Mechanical properties of cold-formed steels at elevated temperatures. *Thin-Walled Structures*. Vol. 49. No. 1. pp. 26-44. doi:10.1016/j.tws.2010.08.004.
207. N.E. Dowling, (2013). *Mechanical behavior of materials. Engineering Methods for Deformation. Fracture. and Fatigue. Fourth Edition.* England. ISBN13:978-0-273-76455-7.
208. N.F. Panayotou, R.J. Puigh, E.K. Opperman, (1981). Miniature specimen tensile data for high energy neutron source experiments, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 104, pp. 1523-1526, doi:10.1016/0022-3115(82)90816-9.
209. N.J.S. Gorst, S.J. Williamson, P.F. Pallett, L.A. Clark, (2003). *Friction in temporary works*, HSE Books
210. N.K. Gupta, B.P. Ambasht, (1982). An experimental investigation of tensile deformation of round bars, *Mechanics of Materials*, Vol. 1, No. 3, pp. 219-228, doi:10.1016/0167-6636(82)90015-1.
211. N.N. Davidenkov, N.I. Spiridonova, (1947). Mechanical methods of testing. Analysis of the state of stress in the neck of a tension test specimen. *Proceedings-American society for testing and materials*. Vol. 46. pp. 1147-1158.
212. N.N. Malinin, J. Rzyzsko, (1981). *Mechanics of Materials (in Polish)*. Polish Scientific Publishers PWN. Warsaw.
213. O. Ancelet, P. Matheron, (2010). Development of a New Measurement System for Tensile Testing, *ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Conference: Parts A-B*, Vol, 6, pp 1-9, doi:10.1115/pvp2010-25667.
214. O.J. Akinribide, A.K. Ogunkoya, I.M. Momoh, O.D. Ogundare, B.E. AttahDaniel, S.O.O. Olusunle, (2013). Design and Development of Grip for Circular Test Piece Inuniversal Tensile Testing Machine, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, Vol. 1, pp. 331-335, doi:10.4236/jmmce.2013.16050.
215. O.N. Pierron, D.A. Koss, A.T. Motta, (2003). Tensile specimen geometry and the constitutive behavior of Zircaloy-4, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 312, No. 2-3, pp. 257-261, doi:10.1016/s0022-3115(02)01554-4.
216. P. Bogusz, A. Popławski, A. Morka, T. Nizgoda, (2012). Evaluation of True Stress in Engineering Materials Using Optical Deformation Measurement Methods. *Journal of KONES Powertrain and Transport*. Vol. 19. No. 4. pp. 1-13. doi:10.5604/12314005.1138307.
217. P. Kadarno, K.I. Mori, Y. Abe, T. Abe, (2014). Punching process including thickening of hole edge for improvement of fatigue strength of ultra-high strength steel sheet, *Manufacturing Review*, Vol. 1, No. 4, pp. 1-12, doi:10.1051/mfreview/2014003.

218. P. Löschner, K. Jarosz, P. Niesłony, (2016). Investigation of the Effect of Cutting Speed on Surface Quality in Abrasive Water Jet Cutting of 316L Stainless Steel, *Procedia Engineering*, Vol. 149, pp. 276-282, doi:10.1016/j.proeng.2016.06.667.
219. P. Ludwik, (1909). *Elements der Technologischen Mechanik*. Verlag Von Julius Springer. 3rd Edition. Vol. 32. Springer. Leipzig.
220. P. Matic, G.C. Kirby, M.I. Jolles, (1988). The Relation of Tensile Specimen Size and Geometry Effects to Unique Constitutive Parameters for Ductile Materials, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 417, No. 1853, pp. 309-333, doi:10.1098/rspa.1988.0063.
221. P. Trubitz, B. Rehmer, G. Pusch, (2004). Die Ermittlung elastischer Konstanten von Gusseisenwerkstoffen, *Tagung Werkstoffprüfung*, Neu-Ulm, Germany, pp. 267-272.
222. P.H. Hou, T.Y. Chen, (2005). An automatic tensile test measurement system for miniature specimens, *Experimental Techniques*, Vol. 29, No. 4, pp. 32-36, doi:10.1111/j.1747-1567.2005.tb00228.x.
223. P.J.M. Janssen, T.H. de Keijser, M.G.D. Geers, (2006). An experimental assessment of grain size effects in the uniaxial straining of thin Al sheet with a few grains across the thickness, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 419, No. 1-2, pp. 238-248, doi:10.1016/j.msea.2005.12.029.
224. P.P. Gillis, J.J. Gilman, (1965 a). Dynamical Dislocation Theory of Crystal Plasticity. II. Easy Glide and Strain Hardening, *Journal of Applied Physics*, Vol. 36, No. 11, pp. 3380-3386, doi:10.1063/1.1702999.
225. P.P. Gillis, J.J. Gilman, (1965 b). Dynamical Dislocation Theory of Crystal Plasticity. I. The Yield Stress, *Journal of Applied Physics*, Vol. 36, No. 11, pp. 3370-3380, doi:10.1063/1.1702998.
226. P.W. Bridgman, (1964). *Studies in Large Plastic Flow and Fracture with special emphasis on the effects of hydrostatic pressure*. Harvard University Press. Cambridge. Massachusetts.
227. Q.M. Wang, L.E. Cross, (1998). Determination of Young's modulus of the reduced layer of a piezoelectric RAINBOW actuator, *Journal of Applied Physics*, Vol. 83, No. 10, pp. 5358-5363, doi:10.1063/1.367364.
228. Q.S Bai, K. Cheng, B. He, Y.C. Liang, (2012). Design of a novel tensile testing device and its application in tensile testing experiments on copper micro wires, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 226, No. 9, pp. 1594-1600, doi:10.1177/0954405412454058.
229. R. Dias, D. José, O.C. Guimarães, M.R. Nascimento, C.A. Costa, C.L. de Oliveira, G.C. de Andrade, M.B.A. Vasques Pacheco, (2019). Study of the Technical Feasibility of the Use of Polypropylene Residue in Composites for Automotive Industry, *Plastics in the Environment*, doi:10.5772/intechopen.81147.
230. R. Srinivasan, C.S. Hartley, B.B. Raju, J. Clave, (1982). Measurement of neck development in tensile testing using projection moire. *Optical Engineering*. Vol. 21. No. 4. pp. 655 -662.
231. R.D. Sulamet-Ariobimo, J.W: Soedarsono, T. Sukarnoto, A. Rustandi, Y. Mujalis, D. Prayitno, (2016). Tensile properties analysis of AA1100 aluminium and SS400 steel using different JIS tensile standard specimen, *Journal of Applied Research and Technology*, Vol. 14, No. 2, pp. 148-153, doi:10.1016/j.jart.2016.03.006.

232. R.K. Desu, H.N. Krishnamurthy, A. Balu, A.K. Gupta, S.K. Singh, (2016). Mechanical properties of Austenitic Stainless Steel 304L and 316L at elevated temperatures. *Journal of Materials Research and Technology*. Vol. 5. No. 1. pp. 13-20. doi:10.1016/j.jmrt.2015.04.001.
233. R.K. Nutor, N.K. Adomako, Y.Z. Fang, (2017). Using the Hollomon Model to Predict Strain-Hardening in Metals. *American Journal of Materials Synthesis and Processing*. Vol. 2. No. 1. pp. 1-4. doi:10.11648/j.ajmsp.20170201.11.
234. R.L. Klueh, (1985). Miniature tensile test specimens for fusion reactor irradiation studies, *Nuclear Engineering and Design. Fusion*, Vol. 2, No. 3, pp. 407-416, doi:10.1016/0167-899x(85)90028-x.
235. R.M. Molak, M.E. Kartal, Z. Pakiela, K.J. Kurzydowski, (2016). The effect of specimen size and surface conditions on the local mechanical properties of 14MoV6 ferritic-pearlitic steel, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 651, pp. 810-821, doi:10.1016/j.msea.2015.11.037.
236. S. Baharuddin, I.Yani, (2018). Implementation of Design and Development Tensile Testing Machine for Application in Soft Material, *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, Vol. 5, No. 12, pp. 9263-9267, ISSN:2458-9403.
237. S. Hertelé, W. De Waele, R. Denys, (2011). A generic stress-strain model for metallic materials with two-stage strain hardening behaviour. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. Vol. 46. No. 3. pp. 519-531. doi:10.1016/j.ijnonlinmec.2010.12.004.
238. S. Jovičić, N. Marjanović, (2011). Osnovi konstruisanja, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac
239. S. Kostić, A. Košarac, V. Luković, J. Miljojković, (2019). Theory reviews - hardware and software support for testing material on specimens of the small cross section, *Tribology in Industry*, Vol. 41, No. 1, pp. 109-114, doi:10.24874/ti.2019.41.01.12, ISSN:0354-8996.
240. S. Kostić, J. Miljojković, G. Šimunović, Đ. Vukelić, B. Tadić, (2021). Uncertainty in the determination of elastic modulus by tensile testing, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Available online 14 May 2021, In Press, Corrected Proof, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.05.002>
241. S. Ledworuski, M.J.D. Ell; H.J. Kühn, (2000). Den Elastizitätsmodul sicher bestimmen. Voraussetzungen für die Kraft - und Dehnungsmessung im Zugversuch, eng. Problems of reliable determination of Young modulus in mechanical materials testing, *MP Materialprüfung*, Vol. 42, No. 4, pp. 109-113, ISSN:0025-5300.
242. S. Münstermann, Y. Feng, W. Bleck, (2014). Influencing parameters on elastic modulus of steels, *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 53, No. 3, pp. 264-273, doi:10.1179/1879139514y.0000000127.
243. S. Nag, P. Sardar, A. Jain, A. Himanshu, D.K. Mondal, (2014). Correlation between ferrite grain size, microstructure and tensile properties of 0.17wt% carbon steel with traces of microalloying elements, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 597, pp. 253-263, doi:10.1016/j.msea.2013.12.073.
244. S. Rešković, (2014). Teorija oblikovanja deformiranjem. Sveučilište u Zagrebu. Metalurški fakultet. Sisak

245. S. Sahin, P. Yayla, (2005). Effects of testing parameters on the mechanical properties of polypropylene random copolymer. *Polymer Testing*, 24(5), 613-619. doi:10.1016/j.polymertesting.2005.03.002
246. S. Seitzl, P. Pokorný, P. Miarka, J. Klusák, Z. Kala, L. Kunz, (2020). Comparison of fatigue crack propagation behaviour in two steel grades S235, S355 and a steel from old crane way, *MATEC Web of Conferences* 310, 00034, SPACE 2019, doi.org/10.1051/matecconf/202031000034.
247. S. Suttner, M. Merklein, (2017). A new approach for the determination of the linear elastic modulus from uniaxial tensile tests of sheet metals, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 241, pp. 64-72, doi:10.1016/j.jmatprotec.2016.10.024.
248. S.E. Jones, P.P. Gillis, (1984). Analysis of a Plane Strain Neck in a Flat Sheet. *Mechanics of Materials*. Vol. 3. pp. 35-40.
249. S.K. Paul, S. Roy, S. Sivaprasad, S. Tarafder, (2018). A Simplified Procedure to Determine Post-necking True Stress-Strain Curve from Uniaxial Tensile Test of Round Metallic Specimen Using DIC. *Journal of Materials Engineering and Performance*. Vol. 27. pp. 4893-4899. doi:10.1007/s11665-018-3566-5.
250. S.K. Satya, P.S.R. Sreekanth, (2020). An experimental study on recycled polypropylene and high-density polyethylene and evaluation of their mechanical properties, *Materials Today: Proceedings*, Article in press, doi:10.1016/j.matpr.2020.01.259.
251. S.S. Kim, H.J. Lee, H.W. Lee, N.K. Lee, C.S. Han, J.H. Hwang, (2005). Development and Verification of PZT Actuating Micro Tensile Tester for Optically Functional Materials, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol. 3, No. 3, pp. 477-485, ISSN:1598-6446.
252. S.S. Lee, U.S. Min, B. Ahn, (1998). Elastic constants determination of thin cold-rolled stainless steels by dynamic elastic modulus measurements, *Journal of Material Science*, Vol. 33, pp. 687-692, doi:10.1023/a:1004385611382.
253. S.X. Li, G.R. Cui, (2007). Dependence of strength, elongation, and toughness on grain size in metallic structural materials, *Journal of Applied Physics*, Vol. 101, No. 8, pp. 083525-083525-6, doi:10.1063/1.2720184.
254. S.Y. Yang, W. Tong, (2009). A Finite Element Analysis of a Tapered Flat Sheet Tensile Specimen. *Experimental Mechanics*. Vol. 49. No. 2. pp. 317-330. doi:10.1007/s11340-009-9241-x.
255. SRPS EN ISO 6892-3:2016, (2016). Metalni materijali- Ispitivanje zatezanjem - Deo 3: Metoda ispitivanja na niskim temperaturama. Ovaj standard je identičan sa EN ISO 6892-3:2015 CEN/TC 459/SC 1 i ISO 6892-3:2015 ISO/TC 164/SC 1. Institut za standardizaciju Srbije.
256. SRPS EN ISO 6892-2:2018, (2018). Metalni materijali - Ispitivanje zatezanjem - Deo 2: Metoda ispitivanja na povišenoj temperaturi. Ovaj standard je identičan sa EN ISO 6892-2:2018 CEN/TC 459/SC 1 2018 i ISO 6892-2:2018 ISO/TC 164/SC 1. Institut za standardizaciju Srbije.
257. SRPS EN ISO 6892-1:2020, (2020). Metalni materijali — Ispitivanje zatezanjem — Deo 1: Metoda ispitivanja na sobnoj temperaturi, Ovaj standard je identičan sa EN ISO 6892-1:2019 CEN/TC 459/SC 1 i ISO 6892-1:2019 ISO/TC 164/SC 1, Institut za standardizaciju Srbije.

258. T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indol, (2002). Svojstva i primjena materijala, Udžbenici sveučilišta u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje
259. T. Fülöp, W.A. Brekelmans, M.G.D. Geers, (2006). Size effects from grain statistics in ultra-thin metal sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 174, No. 1-3, pp. 233-238, doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.01.006.
260. T. Klemensø, E. Lund, B.F. Sørensen, (2007). Optimal Shape of Thin Tensile Test Specimen, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 90, No. 6, pp. 1827-1835, doi:10.1111/j.1551-2916.2007.01538.x.
261. T. Kwaaitaal, A.J.G. Schoofs, (1979). Determination of Young's Modulus or Poisson's Ratio Using Eddy Currents, *Experimental Mechanics*, Vol. 19, No. 12, pp. 450-455, doi:10.1007/bf02326049.
262. T. Yang, J. Xiong, H. Chen, (2015). Effect of process parameters on tensile strength in plasma-MIG hybrid welding for 2219 aluminum alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 84, No. 9-12, pp. 2413-2421, doi:10.1007/s00170-015-7901-9.
263. T.G.F. Gray, A. McCombe, (1992). Influence of specimen dimension and grip in tensile testing steel to EN 10 002, *Journal Iron Steel Making*, Vol. 19, pp. 405-409.
264. T.L. Saaty, (2013). The modern science of multicriteria decision making and its practical applications: The AHP/ANP approach. *Operations Research*, Vol. 61, No. 5, pp. 1101-1118
265. T.N. Goh, H.M. Shang, (1982). Effects of shape and size of tensile specimens on the stress-strain relationship of sheet-metal, *Journal of Mechanical Working Technology*, Vol. 7, No. 1, pp. 23-37, doi:10.1016/0378-3804(82)90092-4.
266. T.P. Haker, (1998). *The Art and Science of Decision Making: The Analytic Hierarchy Process*, University of Pennsylvania, USA
267. U.S. Dixit, S.N. Joshi, J.P. Davim, (2011). Incorporation of material behavior in modeling of metal forming and machining processes: A review, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 7, pp. 3655-3670, doi:10.1016/j.matdes.2011.03.049.
268. V. Kostić, (2018). Istraživanje konstrukciono-tribološkig parametara kugličnih ležaja sa kosim dodirom tipa ZKLF sa aspekta optimalne osnovne funkcije - doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Niš
269. V. Tvergaard, (1993). Necking in tensile bars with rectangular cross-section. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Vol. 103. No. 1-2. pp. 273-290. doi:10.1016/0045-7825(93)90049-4.
270. V.G. Osipov, E.I. Lyafer, (1971). Effect of sheet-specimen geometry on plasticity and the deformation curve, *Strength of Materials*, Vol. 3, No. 8, pp. 974-980, doi:10.1007/bf01527661.
271. V.L. Popov, (2010). *Coulomb's Law of Friction*. In: *Contact Mechanics and Friction*. Springer, Berlin, Heidelberg, doi.org/10.1007/978-3-642-10803-7_10
272. W. Cai, M.A. Morovat, M.D. Engelhardt, (2017). True stress-strain curves for ASTM A992 steel for fracture simulation at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 139. pp. 272-279. doi:10.1016/j.jcsr.2017.09.024.

273. W. Gabauer, (2000). The Determination of Uncertainties in Tensile Testing, UNCERT Manual of Codes of Practice for the Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Materials, Code of Practice No. 07, Austria.
274. W. Lins, G. Kaindl, H. Peterlik, K. Kromp, (1999). A novel resonant beam technique to determine the elastic moduli in dependence on orientation and temperature up to 2000°C. *Review of Scientific Instruments*. Vol. 70. No. 7. pp. 3052-3058. doi:10.1063/1.1149867.
275. W. Montero, R. Farag, V. Diaz, M. Ramirez, B.L. Boada, (2010). Uncertainties Associated with Strain-Measuring Systems Using Resistance Strain Gauges, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 46, No. 1, pp. 1-13, doi:10.1243/03093247jsa661.
276. W. Ramberg, W.R. Osgood, (1943). Description of stress-strain curves by three parameters. National Advisory Committee for Aeronautics. Technical note No.902. Washington.
277. W. Szczepinski, (1978). *Mechanics of plastic flow* (in Polish).(Polish Scientific Publishers PWN. Warsaw.
278. W. Szczepinski, (1984). *Experimental methods of solid mechanics* (in Polish). Polish Scientific Publishers PWN. Warsaw.
279. W. Wang, B. Liu, V. Kodur, (2013). Effect of Temperature on Strength and Elastic Modulus of High-Strength Steel. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 25. No. 2. pp. 174-182. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000600.
280. W.C. Oliver, G.M. Pharr, (2004). Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology, *Journal of Materials Research*, Vol. 19, No. 01, pp. 3-20, doi:10.1557/jmr.2004.19.1.3.
281. W.D. Callister Jr., D.G. Rethwisch, (2010). *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc, USA, ISBN-13: 978-0470419977.
282. W.J. Yuan, Z.L. Zhang, Y.J. Su, L.J. Qiao, W.Y. Chu, (2012). Influence of specimen thickness with rectangular cross-section on the tensile properties of structural steels, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 532, pp. 601-605, doi:10.1016/j.msea.2011.11.021.
283. W.J. Yuan, F. Zhou, Z.L. Zhang, Y.J. Su, L.J. Qiao, W.Y. Chu, (2013). An analysis on necking effect and stress distribution in round cross-section specimens of pure copper with different diameters, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 561, pp. 183-190, doi:10.1016/j.msea.2012.10.077.
284. X. Sun, A. Soulami, K.S. Choi, O. Guzman, W. Chen, (2012). Effects of sample geometry and loading rate on tensile ductility of TRIP800 steel, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 541, pp. 1-7, doi:10.1016/j.msea.2011.12.115.
285. Y. Kohno, A. Kohyama, M.L. Hamilton, T. Hirose, Y. Katoh, F.A. Garner, (2000). Specimen size effects on the tensile properties of JPCA and JFMS, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 283-287, pp. 1014-1017, doi:10.1016/s0022-3115(00)00245-2.
286. Y. Ling, (1996). Uniaxial True Stress-Strain after Necking. *AMP Journal of Technology*. Vol. 5. pp. 37-48.
287. Y. Wang, S. Xu, S. Ren, H. Wang, (2016). An Experimental-Numerical Combined Method to Determine the True Constitutive Relation of Tensile Specimens after Necking.

- Advances in Materials Science and Engineering. Vol. 2016. pp. 1-12. doi:10.1155/2016/6015752.
288. Y. Zhou, P.K. Mallick, (2002). Effects of Temperature and Strain Rate on the Tensile Behavior of Unfilled and Talc-Filled Polypropylene. Part I: Experiments, Polymer Engineering and Science, December 2002, Vol. 42, No. 72
289. Y.C. Chao, D.S. Liu, (2003). Gold wire and solder joint microforce testing using microforce tester, Experimental Techniques, Vol. 27, No. 5, pp. 37-40, doi:10.1111/j.1747-1567.2003.tb00128.x.
290. Y.H. Zhao, Y.Z. Guo, Q. Wei, A.M. Dangelewicz, C. Xu, Y.T. Zhu, T.G. Langdon, Y.Z. Zhou, E.J. Lavernia, (2008). Influence of specimen dimensions on the tensile behavior of ultrafine-grained Cu, Scripta Materialia, Vol. 59, No. 6, pp. 627-630, doi:10.1016/j.scriptamat.2008.05.031.
291. Y.H. Zhao, Y.Z. Guo, Q. Wei, T.D. Topping, A.M. Dangelewicz, Y.T. Zhu, T.G. Langdon, E.J. Lavernia, (2009). Influence of specimen dimensions and strain measurement methods on tensile stress-strain curves, Materials Science and Engineering: A, Vol. 525, No. 1-2, pp. 68-77, doi:10.1016/j.msea.2009.06.031.
292. Y.Y. Deryugin, N. Antipina, (2015). Analytical Description of Plastic Deformation Distribution in the Neck of a Flat Tensile Specimen. Mechanics. Materials Science & Engineering Journal. pp. 1-9. ISSN 2412-5954.
293. Y.Y. Kim, (2017). Young's modulus measurement of a silicon nitride thin-film using an ultrasonically actuated microcantilever, Measurement, Vol. 115, pp. 133-138, doi:10.1016/j.measurement.2017.10.029.
294. Z. Chen, U. Gandhi, J. Lee, R.H. Wagoner, (2016). Variation and consistency of Young's modulus in steel, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 227, pp. 227-243, doi:10.1016/j.jmatprotec.2015.08.024.
295. Z. Ezzouine, A. Nakheli, (2016). Development of a Measuring Sensory System Based on LabVIEW for Determining Elastic Properties of Solid Materials, International Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 6, No. 5, pp. 2096-2105, doi:10.11591/ijece.v6i5.9608.
296. Z. Ma, H. Zhao, H. Huang, L. Zhang, K. Wang, X. Zhou, (2015). A novel tensile device for in situ scanning electron microscope mechanical testing, Experimental Techniques, Vol. 39, pp. 3-11, doi:10.1111/j.1747-1567.2012.00868.x.
297. Z.C. Ma, H.W. Zhao, K.T. Wang, X.Q. Zhou, X.L. Hu, S. Lu, H.B. Cheng, (2013). Note: Investigation on the influences of gripping methods on elastic modulus by a miniature tensile device and in situ verification, Review of Scientific Instruments, Vol. 84, No. 6, pp. 066102-1-066102-3, doi:10.1063/1.4808374.
298. Z.L. Petrosyan, (1967). Stresses in the neck smallest cross-section of a plate specimen in tension. Izv. Vuzov. Mashinostroenie. No. 7. pp. 54-57.
299. Z.L. Zhang, M. Hauge, J. Ødegård, C. Thaulow, (1999). Determining material true stress-strain curve from tensile specimens with rectangular cross-section. International Journal of Solids and Structures. Vol. 36. No. 23. pp. 3497-3516. doi:10.1016/s0020-7683(98)00153-x.
300. Z.L. Zhang, J. Ødegård, O.P. Søvik, C. Thaulow, (2001 a). A study on determining true stress-strain curve for anisotropic materials with rectangular tensile bars. International

- Journal of Solids and Structures. Vol. 38. No. 26-27. pp. 4489-4505. doi:10.1016/s0020-7683(00)00302-4.
301. Z.L. Zhang, J. Ødegård, O.P. Søvik, (2001 6). Determining true stress-strain curve for isotropic and anisotropic materials with rectangular tensile bars: method and verifications. Computational Materials Science. Vol. 20. No. 1. pp. 77-85. doi:10.1016/s0927-0256(00)00128-2.
302. <https://www.tecquipment.com/universal-testing-machine>, приступљено 18.07.2019.
303. <https://www.tec-science.com/material-science/material-testing/tensile-test/>, приступљено 08.06.2019.

ПРИЛОГ 1

АНАЛИТИЧКО РЕШЕЊЕ ИЗДУЖЕЊА ЕПРУВЕТЕ КРУЖНОГ ПОПРЕЧНОГ ПРЕСЕКА У ЗОНИ РАДИЈУСА ПРИ ИСПИТИВАЊУ ЗАТЕЗАЊЕМ (ПОГЛАВЉЕ РАДА 4.3.1)

Епрувета за испитивање затезањем може се поделити у пет зона: мерна (паралелна) зона Δl_1 , две зоне радијуса Δl_2 и две зоне за хватање епрувете Δl_3 , слика 4.6.

Издужење у зони радијуса епрувете може се написати:

$$\Delta l_2 = \frac{4 \cdot F}{E \cdot \pi} \int_{x=0}^{x=R} \frac{dx}{\left[b_0^2 + 4b_0R + 8R^2 - \sqrt{R^2 - x^2}(4b_0 + 8R) - 4x^2 \right]} \quad (4.35)$$

При чему је интеграл I_0 дат следећим изразом:

$$I_0 = \int_0^R \frac{dx}{\left[b_0^2 + 4b_0R + 8R^2 - \sqrt{R^2 - x^2}(4b_0 + 8R) - 4x^2 \right]} \quad (1)$$

Решавање интеграла I_0 почиње увођењем смене из израза (2):

$$\begin{aligned} x &= R \sin t \rightarrow \sin t = x/R \rightarrow t = \sin^{-1} x/R \\ dx &= R \cos t \cdot dt \end{aligned} \quad (2)$$

$$R^2 - x^2 = R^2 - R^2 \sin^2 t = R^2 \cos^2 t \rightarrow \sqrt{R^2 - x^2} = R \cos t$$

Смена се уводи у интеграл на следећи начин:

$$\begin{aligned} I_0 &= \int_{t_1}^{t_2} \frac{R \cos t \cdot dt}{b_0^2 + 4b_0R + 8R^2 - R \cos t (4b_0 + 8R) - 4R^2 \sin^2 t} \\ I_0 &= R \int_{t_1}^{t_2} \frac{\cos t \cdot dt}{b_0^2 + 4b_0R + 4R^2 + 4R^2(1 - \sin^2 t) - 4R \cos t (b_0 + 2R)} \end{aligned} \quad (3)$$

$$I_0 = R \int_{t_1}^{t_2} \frac{\cos t \cdot dt}{b_0^2 + 4b_0R + 4R^2 + 4R^2 \cos^2 t - 4R \cos t (b_0 + 2R)}$$

За даље решавање уводе се нове смене:

$$m = \tan \frac{t}{2} \rightarrow t = 2 \cdot \tan^{-1} m \rightarrow dt = \frac{2}{1+m^2} dm$$

$$\cos t = \frac{1-m^2}{1+m^2}$$
(4)

Добија се:

$$I_0 = R \int_{m_1}^{m_2} \frac{\frac{1-m^2}{1+m^2} \cdot \frac{2}{1+m^2} dm}{b_0^2 + 4b_0R + 4R^2 + 4R^2 \left(\frac{1-m^2}{1+m^2} \right)^2 - 4R \frac{1-m^2}{1+m^2} (b_0 + 2R)}$$
(5)

$$I_0 = R \int_{m_1}^{m_2} \frac{\frac{2(1-m^2)}{(1+m^2)^2} \cdot dm}{\frac{(b_0 + 2R)^2(1+m^2)^2 + 4R^2(1-m^2)^2 - 4R(b_0 + 2R)(1-m^2)(1+m^2)}{(1+m^2)^2}}$$

$$I_0 = 2R \int_{m_1}^{m_2} \frac{(1-m^2) \cdot dm}{b_0^2 + 2b_0m^2 + b_0^2m^4 + 8b_0Rm^2 + 4b_0Rm^4 + 16R^2m^4 + 4Rb_0m^4}$$

$$I_0 = 2R \int_{m_1}^{m_2} \frac{(1-m^2) \cdot dm}{b_0^2 + m^2(2b_0^2 + 8b_0R) + m^4(b_0^2 + 8b_0R + 16R^2)}$$

$$I_0 = 2R \int_{m_1}^{m_2} \frac{(1-m^2) \cdot dm}{b_0^2 + 2b_0m^2(b_0 + 4R) + m^4(b_0 + 4R)^2}$$

$$I_0 = 2R \int_{m_1}^{m_2} \frac{(1-m^2) \cdot dm}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]^2}$$

Интеграл I_0 се може написати као разлика два интеграла I_1 и I_2 :

$$I_0 = 2R \int_{m_1}^{m_2} \frac{dm}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]^2} - 2R \int_{m_1}^{m_2} \frac{m^2 \cdot dm}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]^2}$$
(6)

$$I_0 = I_1 - I_2$$

Интеграл I_1 и I_2 решавају посебно, почев од интеграла I_2 .

$$I_2 = 2R \int_{m_1}^{m_2} \frac{m^2 \cdot dm}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]^2} = 2R \int_{m_1}^{m_2} \frac{m \cdot m \cdot dm}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]^2}$$
(7)

Интеграл се решава парцијалном интеграцијом:

$$m = u \rightarrow dm = du$$

$$\frac{m \cdot dm}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]^2} = dv \quad (8)$$

$$d[b_0 + m^2(b_0 + 4R)] = 2(b_0 + 4R) m \cdot dm$$

$$\frac{2(b_0 + 4R) \cdot m \cdot dm}{2(b_0 + 4R) \cdot [b_0 + m^2(b_0 + 4R)]^2} = dv$$

Интеграле се обе стране, како би се добила величину v :

$$\frac{1}{2(b_0 + 4R)} \int_{m_1}^{m_2} \frac{d[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]^2} = \int dv$$

$$\frac{1}{2(b_0 + 4R)} \cdot \frac{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]^{-1}}{-1} = v \quad (9)$$

$$- \frac{1}{2(b_0 + 4R)} \cdot \frac{1}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]} = v$$

Добијени изрази (8) и (9) се замењују у интеграл I_2 :

$$I_2 = u \cdot v - \int_{m_1}^{m_2} v \, du \quad (10)$$

$$I_2 = -2R \frac{m}{2(b_0 + 4R)} \cdot \frac{1}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]} \Big|_{m_1}^{m_2} + 2R \int_{m_1}^{m_2} \frac{1}{2(b_0 + 4R)} \frac{dm}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]}$$

$$I_2 = -\frac{m}{(b_0 + 4R)} \cdot \frac{R}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]} \Big|_{m_1}^{m_2} + R \int_{m_1}^{m_2} \frac{1}{(b_0 + 4R)} \cdot \frac{1}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]} dm$$

$$I_2 = -\frac{m}{(b_0 + 4R)} \cdot \frac{R}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]} \Big|_{m_1}^{m_2} + \frac{R}{(b_0 + 4R)} \int_{m_1}^{m_2} \frac{1}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]} dm$$

$$I_2 = -\frac{m}{(b_0 + 4R)} \cdot \frac{R}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]} \Big|_{m_1}^{m_2} + \frac{R}{(b_0 + 4R)} \int_{m_1}^{m_2} \frac{\frac{1}{b_0}}{\frac{b_0}{b_0} + \frac{b_0 + 4R}{b_0} m^2} dm$$

$$I_2 = -\frac{m}{(b_0 + 4R)} \cdot \frac{R}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]} \Big|_{m_1}^{m_2} + \frac{R}{b_0(b_0 + 4R)} \int_{m_1}^{m_2} \frac{dm}{1 + \frac{b_0 + 4R}{b_0} m^2}$$

Из горњег израза може се издвојити интеграл I_3 :

$$I_3 = \int_{m_1}^{m_2} \frac{dm}{1 + \frac{b_0 + 4R}{b_0} m^2} \quad (11)$$

Уводи се смена како би се дошло до решења интеграла I_3 :

$$n = m \sqrt{\frac{b_0 + 4R}{b_0}} \rightarrow dn = \sqrt{\frac{b_0 + 4R}{b_0}} dm \rightarrow dm = \sqrt{\frac{b_0}{b_0 + 4R}} dn \quad (12)$$

Па је тако:

$$I_3 = \int_{n_1}^{n_2} \frac{\sqrt{\frac{b_0}{b_0 + 4R}} dn}{1 + n^2} = \sqrt{\frac{b_0}{b_0 + 4R}} \cdot \tan^{-1} n \Big|_{n_1}^{n_2} \quad (13)$$

Односно:

$$I_3 = \sqrt{\frac{b_0}{b_0 + 4R}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0 + 4R}{b_0}} \cdot m \Big|_{m_1}^{m_2} \quad (14)$$

Решење интеграла I_3 враћа се у интеграл I_2 и добија се:

$$I_2 = - \frac{m}{(b_0 + 4R)} \cdot \frac{R}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]} \Big|_{m_1}^{m_2} + \frac{R}{b_0(b_0 + 4R)} \sqrt{\frac{b_0}{b_0 + 4R}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0 + 4R}{b_0}} \cdot m \Big|_{m_1}^{m_2}$$

$$I_2 = - \frac{m}{(b_0 + 4R)} \cdot \frac{R}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]} \Big|_{m_1}^{m_2} + \frac{R}{\sqrt{b_0}(b_0 + 4R)^{\frac{3}{2}}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0 + 4R}{b_0}} \cdot m \Big|_{m_1}^{m_2}$$

$$I_2 = - \frac{\tan \frac{t}{2}}{(b_0 + 4R)} \cdot \frac{R}{[b_0 + \tan^2 \frac{t}{2} (b_0 + 4R)]} \Big|_{t_1}^{t_2} + \frac{R}{\sqrt{b_0}(b_0 + 4R)^{\frac{3}{2}}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0 + 4R}{b_0}} \cdot \tan \frac{t}{2} \Big|_{t_1}^{t_2}$$

$$I_2 = - \frac{\tan \frac{\sin^{-1} x/R}{2}}{(b_0 + 4R)} \cdot \frac{R}{[b_0 + \tan^2 \frac{\sin^{-1} x/R}{2} (b_0 + 4R)]} \Big|_0^R + \frac{R}{\sqrt{b_0}(b_0 + 4R)^{\frac{3}{2}}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0 + 4R}{b_0}} \cdot \tan \frac{\sin^{-1} x/R}{2} \Big|_0^R$$

Заменом граница добија се:

$$I_2 = - \frac{\tan \frac{\pi}{4}}{(b_0 + 4R)} \cdot \frac{R}{\left[b_0 + \tan^2 \frac{\pi}{4} (b_0 + 4R) \right]} + \frac{R}{\sqrt{b_0} (b_0 + 4R)^{\frac{3}{2}}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0 + 4R}{b_0}} \cdot \tan \frac{\pi}{4}$$

Решење интеграла I_2 је:

$$I_2 = - \frac{R}{(b_0 + 4R)[b_0 + (b_0 + 4R)]} + \frac{R}{\sqrt{b_0} (b_0 + 4R)^{\frac{3}{2}}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0 + 4R}{b_0}} \quad (15)$$

Решава се интеграл I_1 из израза (6):

$$I_1 = 2R \int_{m_1}^{m_2} \frac{dm}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]^2} \quad (16)$$

Интеграл I_1 се помножи и подели са b_0 и на тај начин своди на већ решавани облик интеграла:

$$I_1 = \frac{2R}{b_0} \int_{m_1}^{m_2} \frac{b_0 \cdot dm}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]^2}$$

$$I_1 = \frac{2R}{b_0} \int_{m_1}^{m_2} \frac{b_0 + (b_0 + 4R) m^2 - (b_0 + 4R) m^2}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]^2} dm \quad (17)$$

$$I_1 = \frac{2R}{b_0} \int_{m_1}^{m_2} \frac{b_0 + (b_0 + 4R) m^2}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]^2} dm - \frac{2R}{b_0} \int_{m_1}^{m_2} \frac{(b_0 + 4R) m^2}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]^2} dm$$

Из горњег израза се добија:

$$I_1 = \frac{2R}{b_0} \int_{m_1}^{m_2} \frac{dm}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]} - \frac{2R(b_0 + 4R)}{b_0} \int_{m_1}^{m_2} \frac{m^2 \cdot dm}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]^2} \quad (18)$$

Добијени су облици интеграла који имају решења, I_3 из израза (11) и I_2 из израза (7), односно:

$$I_1 = \frac{2R}{b_0^2} \int_{m_1}^{m_2} \frac{dm}{1 + \frac{b_0 + 4R}{b_0} m^2} - \frac{2R(b_0 + 4R)}{b_0} \int_{m_1}^{m_2} \frac{m^2 \cdot dm}{[b_0 + m^2(b_0 + 4R)]^2} \quad (19)$$

$$I_1 = \frac{2R}{b_0^2} \cdot I_3 - \frac{(b_0 + 4R)}{b_0} \cdot I_2$$

Ако применимо решења интеграла I_3 из израза (14) и интеграла I_2 из израза (15) добија се решење за интеграл I_1 :

$$I_1 = \frac{2R}{b_0^2} \sqrt{\frac{b_0}{b_0+4R}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0+4R}{b_0}} \cdot m \Big|_{m_1}^{m_2} - \frac{(b_0+4R)}{b_0} \cdot \left[-\frac{R}{(b_0+4R)[b_0+(b_0+4R)]} + \frac{R}{\sqrt{b_0}(b_0+4R)^{\frac{3}{2}}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0+4R}{b_0}} \right] \quad (20)$$

Враћањем смена и граница у почетни интеграл I_1 добија се:

$$I_1 = \frac{2R}{b_0^2} \sqrt{\frac{b_0}{b_0+4R}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0+4R}{b_0}} \cdot \tan \frac{\sin^{-1} x/R}{2} \Big|_0^R + \frac{(b_0+4R)}{b_0} \cdot \frac{R}{(b_0+4R)[b_0+(b_0+4R)]} - \frac{(b_0+4R)}{b_0} \cdot \frac{R}{\sqrt{b_0}(b_0+4R)^{\frac{3}{2}}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0+4R}{b_0}} \quad (21)$$

Након скраћивања следи:

$$I_1 = \frac{2R}{b_0^2} \sqrt{\frac{b_0}{b_0+4R}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0+4R}{b_0}} + \frac{R}{b_0[b_0+(b_0+4R)]} - \frac{R(b_0+4R)}{b_0^{\frac{3}{2}}(b_0+4R)^{\frac{3}{2}}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0+4R}{b_0}}$$

$$I_1 = \frac{2R}{b_0^2} \sqrt{\frac{b_0}{b_0+4R}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0+4R}{b_0}} + \frac{R}{b_0[b_0+(b_0+4R)]} - \frac{R}{b_0^{\frac{3}{2}}(b_0+4R)^{\frac{1}{2}}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0+4R}{b_0}}$$

$$I_1 = \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0+4R}{b_0}} \left(\frac{2R}{b_0^2} \sqrt{\frac{b_0}{b_0+4R}} - \frac{R}{b_0^{\frac{3}{2}}(b_0+4R)^{\frac{1}{2}}} \right) + \frac{R}{b_0[b_0+(b_0+4R)]} \quad (22)$$

$$I_1 = \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0+4R}{b_0}} \left(\frac{2R}{b_0^{\frac{3}{2}}(b_0+4R)^{\frac{1}{2}}} - \frac{R}{b_0^{\frac{3}{2}}(b_0+4R)^{\frac{1}{2}}} \right) + \frac{R}{b_0[b_0+(b_0+4R)]}$$

$$I_1 = \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0+4R}{b_0}} \cdot \frac{R}{b_0^{\frac{3}{2}}(b_0+4R)^{\frac{1}{2}}} + \frac{R}{b_0[b_0+(b_0+4R)]}$$

Коначно решење интеграла I_1 може се написати као:

$$I_1 = \frac{R}{b_0^{\frac{3}{2}} \sqrt{b_0+4R}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0+4R}{b_0}} + \frac{R}{b_0[b_0+(b_0+4R)]} \quad (23)$$

Враћањем добијених решења интеграла I_1 , израз (23), и I_2 , израз (15), у израз (6) следи коначно решење траженог интеграла $I_0 = I_1 - I_2$:

$$I_0 = \frac{R}{b_0^{\frac{3}{2}}\sqrt{b_0+4R}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0+4R}{b_0}} + \frac{R}{b_0[b_0+(b_0+4R)]} - \left[\frac{R}{(b_0+4R)[b_0+(b_0+4R)]} + \frac{R}{\sqrt{b_0}(b_0+4R)^{\frac{3}{2}}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0+4R}{b_0}} \right]$$

$$I_0 = \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0+4R}{b_0}} \left[\frac{R}{b_0^{\frac{3}{2}}\sqrt{b_0+4R}} - \frac{R}{\sqrt{b_0}(b_0+4R)^{\frac{3}{2}}} \right] + \frac{R}{b_0[b_0+(b_0+4R)]} + \frac{R}{(b_0+4R)[b_0+(b_0+4R)]} \quad (24)$$

$$I_0 = \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0+4R}{b_0}} \left[\frac{R(b_0+4R) - Rb_0}{b_0^{\frac{3}{2}}(b_0+4R)^{\frac{3}{2}}} \right] + \frac{R}{b_0[b_0+(b_0+4R)]} + \frac{R}{(b_0+4R)[b_0+(b_0+4R)]}$$

Тако да је I_0 :

$$I_0 = \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0+4R}{b_0}} \left[\frac{4R^2}{b_0^{\frac{3}{2}}(b_0+4R)^{\frac{3}{2}}} \right] + \frac{R}{b_0[b_0+(b_0+4R)]} + \frac{R}{(b_0+4R)[b_0+(b_0+4R)]} \quad (25)$$

Односно:

$$I_0 = \frac{4R^2}{b_0^{\frac{3}{2}}(b_0+4R)^{\frac{3}{2}}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0+4R}{b_0}} + \frac{R}{b_0[b_0+(b_0+4R)]} + \frac{R}{(b_0+4R)[b_0+(b_0+4R)]} \quad (26)$$

АНАЛИТИЧКО РЕШЕЊЕ ИЗДУЖЕЊА ЕПРУВЕТЕ ПРАВОУГАОНОГ ПОПРЕЧНОГ ПРЕСЕКА У ЗОНИ РАДИЈУСА ПРИ ИСПИТИВАЊУ ЗАТЕЗАЊЕМ (ПОГЛАВЉЕ РАДА 4.3.2)

Епрувета за испитивање затезањем може се поделити у пет зона: мерна (паралелна) зона Δ_1 , две зоне радијуса Δ_2 и две зоне за хватање епрувете Δ_3 , слика 4.8.

Издужење у зони радијуса епрувете може се написати:

$$\Delta_2 = \frac{F}{E \cdot h} \int_{x=0}^{x=R} \frac{dx}{\left[b_0 + 2 \left(R - \sqrt{R^2 - x^2} \right) \right]} \quad (4.49)$$

При чему је интеграл I_0 дат следећим изразом:

$$I_0 = \int_{x=0}^{x=R} \frac{dx}{\left[b_0 + 2 \left(R - \sqrt{R^2 - x^2} \right) \right]} \quad (27)$$

Решавање интеграла I_0 почиње увођењем замене из израза (28):

$$\begin{aligned} x = R \sin t &\rightarrow \sin t = x/R \rightarrow t = \sin^{-1} x/R \\ dx &= R \cos t \cdot dt \end{aligned} \quad (28)$$

Тако да се добија:

$$\begin{aligned} I_0 &= \int_{t_1}^{t_2} \frac{R \cos t \cdot dt}{b_0 + 2R - 2\sqrt{R^2 - R^2 \sin^2 t}} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{R \cos t \cdot dt}{b_0 + 2R - 2\sqrt{R^2(1 - \sin^2 t)}} \\ I_0 &= \int_{t_1}^{t_2} \frac{R \cos t \cdot dt}{b_0 + 2R - 2R \cos t} = -\frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} \frac{-2R \cos t \cdot dt}{b_0 + 2R - 2R \cos t} \\ I_0 &= -\frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} \frac{(b_0 + 2R - 2R \cos t) - (b_0 + 2R)}{b_0 + 2R - 2R \cos t} dt \end{aligned} \quad (29)$$

Интеграл I_0 из израза (29) се може написати као збир интеграла I_1 и I_2 , тако да се добија израз (30):

$$\begin{aligned} I_0 &= -\frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} \frac{b_0 + 2R - 2R \cos t}{b_0 + 2R - 2R \cos t} dt + \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} \frac{b_0 + 2R}{b_0 + 2R - 2R \cos t} dt \\ I_0 &= I_1 + I_2 \end{aligned} \quad (30)$$

Интеграл I_1 се може представити изразом:

$$I_1 = -\frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} dt = -\frac{1}{2} \cdot t \Big|_{t_1}^{t_2} \quad (31)$$

Решавање интеграла I_1 врши се поновном заменом уведених смена и граница из израза (28):

$$\begin{aligned} I_1 &= -\frac{1}{2} \cdot t \Big|_{t_1}^{t_2} = -\frac{1}{2} \cdot \sin^{-1} \frac{x}{R} \Big|_0^R = -\frac{1}{2} \cdot \sin^{-1} \frac{R}{R} + \frac{1}{2} \cdot \sin^{-1} \frac{0}{R} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{2} \\ I_1 &= -\frac{\pi}{4} \end{aligned} \quad (32)$$

Потребно је решити интеграл I_2 :

$$I_2 = \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} \frac{b_0 + 2R}{b_0 + 2R - 2R \cos t} dt = \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{\frac{b_0 + 2R - 2R \cos t}{b_0 + 2R}} \quad (33)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{1 - \frac{2R \cos t}{b_0 + 2R}}$$

Уводи се нова смена:

$$\cos t = \frac{\cos t}{1} = \frac{\cos 2 \frac{t}{2}}{1} = \frac{\cos^2 \frac{t}{2} - \sin^2 \frac{t}{2}}{\cos^2 \frac{t}{2} + \sin^2 \frac{t}{2}} \quad (34)$$

Ако се израз (34) подели са $\cos^2 \frac{t}{2}$ добија се:

$$\cos t = \frac{1 - \tan^2 \frac{t}{2}}{1 + \tan^2 \frac{t}{2}} = \frac{1 - m^2}{1 + m^2} \quad (35)$$

При чему је:

$$m = \tan \frac{t}{2} \rightarrow t = 2 \cdot \tan^{-1} m \rightarrow dt = \frac{2}{1 + m^2} dm \quad (36)$$

Након уведених смена добија се интеграл I_2 у облику израза (37):

$$I_2 = \frac{1}{2} \int_{m_1}^{m_2} \frac{1}{1 - \frac{2R}{b_0 + 2R} \cdot \frac{1 - m^2}{1 + m^2}} \cdot \frac{2}{1 + m^2} dm \quad (37)$$

Даље следи:

$$I_2 = \frac{1}{2} \int_{m_1}^{m_2} \frac{1}{\frac{(b_0 + 2R)(1 + m^2) - 2R(1 - m^2)}{(b_0 + 2R)(1 + m^2)}} \cdot \frac{2}{1 + m^2} dm$$

$$I_2 = \frac{2}{2} \int_{m_1}^{m_2} \frac{b_0 + 2R}{(1 + m^2) \cdot b_0 + (1 + m^2) \cdot 2R - 2R(1 - m^2)} dm \quad (38)$$

$$I_2 = (b_0 + 2R) \int_{m_1}^{m_2} \frac{dm}{(1 + m^2) \cdot b_0 + 2R + 2R \cdot m^2 - 2R + 2R \cdot m^2}$$

$$I_2 = (b_0 + 2R) \int_{m_1}^{m_2} \frac{dm}{b_0 + b_0 \cdot m^2 + 4R \cdot m^2}$$

$$I_2 = (b_0 + 2R) \int_{m_1}^{m_2} \frac{dm}{b_0 + m^2(b_0 + 4R)}$$

$$I_2 = (b_0 + 2R) \int_{m_1}^{m_2} \frac{\frac{dm}{b_0}}{1 + \frac{m^2(b_0 + 4R)}{b_0}}$$

Уводи се нова смена:

$$n = m \sqrt{\frac{b_0 + 4R}{b_0}} \rightarrow dn = \sqrt{\frac{b_0 + 4R}{b_0}} dm \rightarrow dm = \sqrt{\frac{b_0}{b_0 + 4R}} dn \quad (39)$$

На основу чега се добија:

$$I_2 = \frac{(b_0 + 2R)}{b_0} \int_{n_1}^{n_2} \frac{\sqrt{\frac{b_0}{b_0 + 4R}} dn}{1 + n^2}$$

$$I_2 = \frac{(b_0 + 2R)}{b_0} \cdot \frac{\sqrt{b_0}}{\sqrt{b_0 + 4R}} \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{1 + n^2} \quad (40)$$

$$I_2 = \frac{(b_0 + 2R)}{\sqrt{b_0} \cdot \sqrt{b_0 + 4R}} \cdot \tan^{-1} n$$

За решавање интеграла I_2 вратиће се све уведене смene и границе, па се добија:

$$I_2 = \frac{(b_0 + 2R)}{\sqrt{b_0} \cdot \sqrt{b_0 + 4R}} \cdot \tan^{-1} n = \frac{(b_0 + 2R)}{\sqrt{b_0} \cdot \sqrt{b_0 + 4R}} \cdot \tan^{-1} m \sqrt{\frac{b_0 + 4R}{b_0}}$$

$$I_2 = \frac{(b_0 + 2R)}{\sqrt{b_0} \cdot \sqrt{b_0 + 4R}} \cdot \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{b_0 + 4R}{b_0}} \cdot \tan \frac{t}{2} \right] \quad (41)$$

$$I_2 = \frac{(b_0 + 2R)}{\sqrt{b_0} \cdot \sqrt{b_0 + 4R}} \cdot \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{b_0 + 4R}{b_0}} \cdot \tan \frac{\sin^{-1} x/R}{2} \right] \Bigg|_0^R$$

Решење интеграла I_2 по изразу (42) добија се решавањем одређеног интеграла по задатим границама из израза (41), а на основу израза (43):

$$I_2 = \frac{(b_0 + 2R)}{\sqrt{b_0} \cdot \sqrt{b_0 + 4R}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0 + 4R}{b_0}} \quad (42)$$

Јер је:

$$\sin^{-1} 1 = \frac{\pi}{2} \rightarrow \tan \frac{\pi}{4} = 1 \quad (43)$$

$$\sin^{-1} 0 = 0$$

На крају, на основу израза (30) добија се решење интеграла I_0 , заменом добијених решења интеграла I_1 из израза (32) и I_2 из израза (42):

$$I_0 = I_1 + I_2 = -\frac{\pi}{4} + \frac{(b_0 + 2R)}{\sqrt{b_0} \cdot \sqrt{b_0 + 4R}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{b_0 + 4R}{b_0}} \quad (44)$$

БИОГРАФИЈА

Соња Костић је рођена у Крагујевцу, 25.08.1971. године. Завршила је основну школу „Светозар Марковић“ у Крагујевцу, потом је средњошколско образовање стекла у „Првој крагујевачкој гимназији“. Академске студије је уписала школске 1990/1991. на Машинском факултету у Крагујевцу, а дана 31.01.1996. дипломира са општим успехом 8,58 (осам и 58/100) на смеру Машинске конструкције и механизација. Последипломске академске студије је уписала школске 1996/1997. на Машинском факултету у Крагујевцу, које је завршила са просечном оценом 9,80 (девет и 80/100). На истом факултету је одбранила магистарски рад 2005. године. Докторске академске студије машинског инжењерства је уписала школске 2016/2017. на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу. Просечна оцена на докторским академским студијама је 10 (десет).

Током последипломских студија, у периоду 1996-1999. је била стипендиста Министарства за науку и технологију Републике Србије, учествовала на пројектима, стекла звање истраживач сарадник и била сарадник у настави на Машинском факултету у Крагујевцу. У Институту за аутомобиле Крагујевац је радила као Пројектант I у периоду 1998-2005., а након тога као Истраживач са научним звањем истраживач сарадник, у периоду од 2005-2008. У Форми Идеале Крагујевац, на позицији Менаџера набавке и Руководиоца службе набавке, радила је у периоду од 2008-2017. Од 2017. и даље ради у Академији струковних студија Шумадија, одсек Крагујевац, као предавач у области Привредног инжењерства - машинства.

Аутор је или коаутор више од тридесет научноистраживачких радова, међу којима се истиче рад објављен у часопису индексиран у SCI бази, где је кандидат први аутор на раду објављеном као резултат истраживања у оквиру докторске дисертације, као и рад објављен у часопису међународног значаја верификованог посебном одлуком, такође као резултат истраживања у оквиру докторске дисертације.

ИЗЈАВА АУТОРА О ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ја, Соња Костић, изјављујем да докторска дисертација под насловом:

РАЗВОЈ И ОПТИМИЗАЦИЈА ЛАБОРАТОРИЈСКЕ КИДАЛИЦЕ НАМЕЊЕНЕ ИСПИТИВАЊИМА МАТЕРИЈАЛА СА АСПЕКТА МИНИМИЗАЦИЈЕ ГРЕШАКА МЕРЕЊА И ЦЕНЕ КОШТАЊА

која је одобрена на Факултету инжењерских наука, Универзитета у Крагујевцу представља *оригинално ауторско дело* настало као резултат *сопственог истраживачког рада*.

Овом Изјавом такође потврђујем:

- да сам *једини аутор* наведене докторске дисертације,
- да у наведеној докторској дисертацији *нисам извршила повреду* ауторског нити другог права интелектуалне својине других лица,
- да умножени примерак докторске дисертације у штампаној и електронској форми у чијем се прилогу налази ова Изјава садржи докторску дисертацију истоветну одбрањеној докторској дисертацији.

У Крагујевцу, 20.08.2021. године,



потпис аутора

ИЗЈАВА АУТОРА О ИСКОРИШЋАВАЊУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ја, Соња Костић,

Дозвољавам

Не дозвољавам

Универзитетској библиотеци у Крагујевцу да начини два трајна умножена примерка у електронској форми докторске дисертације под насловом:

РАЗВОЈ И ОПТИМИЗАЦИЈА ЛАБОРАТОРИЈСКЕ КИДАЛИЦЕ НАМЕЊЕНЕ ИСПИТИВАЊИМА МАТЕРИЈАЛА СА АСПЕКТА МИНИМИЗАЦИЈЕ ГРЕШАКА МЕРЕЊА И ЦЕНЕ КОШТАЊА

која је одобрена на Факултету инжењерских наука, Универзитета у Крагујевцу, и то у целини, као и да по један примерак тако умножене докторске дисертације учини трајно доступним јавности путем дигиталног репозиторијума Универзитета у Крагујевцу и централног репозиторијума надлежног министарства, тако да припадници јавности могу начинити трајне умножене примерке у електронској форми наведене докторске дисертације путем *преузимања*.

Овом Изјавом такође

Дозвољавам

Не дозвољавам¹

¹ Уколико аутор изабере да не дозволи припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од Creative Commons лиценци, то не искључује право припадника јавности да наведену докторску дисертацију користе у складу са одредбама Закона о ауторском и сродним правима.

припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од следећих *Creative Commons* лиценци:

- 1) Ауторство
- 2) Ауторство - делити под истим условима
- ③ Ауторство - без прерада
- 4) Ауторство - некомерцијално
- 5) Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима
- 6) Ауторство - некомерцијално - без прерада²

У Крагујевцу, 20.08.2021. године,



потпис аутора

² Молимо ауторе који су изабрали да дозволе припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци да заокруже једну од понуђених лиценци. Детаљан садржај наведених лиценци доступан је на: <http://creativecommons.org.rs>