

Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука

E-mail: dekan@fink.rs

Др Проф. др Слободан Савић

Датум: 30.05.2023. године

Поштовани,

На основу Вашег захтева број: 01-01/864-15 од 23. 03. 2023. године за потврду оцене техничког решења под називом **Мала лабораториска кидалица за испитивање механичких карактеристика материјала затезањем**, чији су аутори: др Владимир Кочовић, доцент, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, др Соња Костић, професор струковних студија, Академија струковних студија Шумадија, Одсек Крагујевац, Александар Петровић, развојни сарадник – истраживач, Институт "Михајло Пупин", Београд, др Ђорђе Вукелић, редовни професор, Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду и Бранко Тадић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу (2018) примењује се од 2018. на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу. Тражена категорија Ново техничко решење примењено на националном нивоу (М82)

Обавештавам Вас следеће:

Након прибављених мишљења о наведеном техничком решењу чланови МНО за машинство и индустријски софтвер су их, на седници одржаној 31.01.2023. године, разматрали и сачинили предлог да техничко решење под називом **Мала лабораториска кидалица за испитивање механичких карактеристика материјала затезањем**, чији су аутори: др Владимир Кочовић, доцент, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, др Соња Костић, професор струковних студија, Академија струковних студија Шумадија, Одсек Крагујевац, Александар Петровић, развојни сарадник – истраживач, Институт "Михајло Пупин", Београд, др Ђорђе Вукелић, редовни професор, Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду и Бранко Тадић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу (2018) примењује се од 2018. на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу.. **ИСПУЊАВА** све услове предвиђене Правилником о стицању истраживачких и научних звања („Службени гласник РС”, бр. 159/20 и и 14/23) за доделу категорије М82 - Ново техничко решење примењено на националном нивоу.

Предлог се доставља НИТРА РС ради процене и прихватања истог.

Председник МНО

за машинство и индустријски софтвер



Проф. др Зоран Миљковић



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
Факултет инжењерских наука
Број: 01-1/864-15
23.03.2023. године
Крагујевац

На предлог Катедре за производно машинство (број 01-1/801 од 10.03.2023. године) и захтева доц. др Владимира Кочовића (број 01-1/693 од 03.03.2023. године) а на основу чланова 1 и 3. став 5. Правилника о стицању истраживачких и научних звања (Сл. гл. РС бр. 159/2020 и 14/2023) и члана 173 Статута Факултета инжењерских наука у Крагујевцу (број 01-1/932 од 01.04.2021. године – пречишћен текст и број 01-1/1638-7 од 27.05.2022. год.), Наставно-научно веће Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, на седници одржаној 23.03.2023. године, донело је

ОДЛУКУ

- I Усваја се пријава техничког решења под насловом: **„Мала лабораторијска кидалица за испитивање механичких карактеристика материјала затезањем“**, чију су аутори: др Владимир Кочовић, доцент, др Соња Костић, професор струковних студија, Александар Петровић, развојни сарадник - истраживач, др Ђорђе Вукелић, редовни професор и др Бранко Тадић, редовни професор.
- II Техничко решење се упућује Матичном одбору за машинство и индустријски софтвер.

Одлуку доставити:

- Матичном одбору Министарства
- Ауторима
- Архиви



ДЕКАН ФАКУЛТЕТА ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА

Др Слободан Савић, редовни професор

Бр. 01-1/2023

03.03. 2023 год.

КРАГУЈЕВАЦ

Већу Катедре за Производно машинство

Наставно научно већу Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

У складу са одредбама важећег Правилника о поступку, начину вредновања и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача подносим

ЗАХТЕВ

За пријаву техничког решења под називом „Мала лабораторијска кидалица за испитивање механичких карактеристика материјала затезањем“, које припада категорији М82 – Ново техничко решење примењено на националном нивоу.

Аутори техничког решења су:

др Владимир Кочовић, доцент (Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу);

др Соња Костић, професор струковних студија (Академија струковних студија Шумадија, Одсек Крагујевац);

Александар Петровић, развојни сарадник – истраживач (Институт "Михајло Пупин", Београд);

др Ђорђе Вукелић, редовни професор (Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду);

др Бранко Тадић, редовни професор (Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу).

У прилогу достављам:

1. Документацију предложеног техничког решења
2. Списак раније прихваћених техничких решења за све ауторе
3. Техничку документацију техничког решења
4. Рад публикован у часопису Engineering Science and Technology, an International Journal; (M21)
5. Уговор о пословно техничкој сарадњи
6. Потврду о продаји и рачун
7. Потврду о коришћењу
8. CD са свим наведеним документима.

Крагујевац,

03.03.2023.

Подносилац захтева:



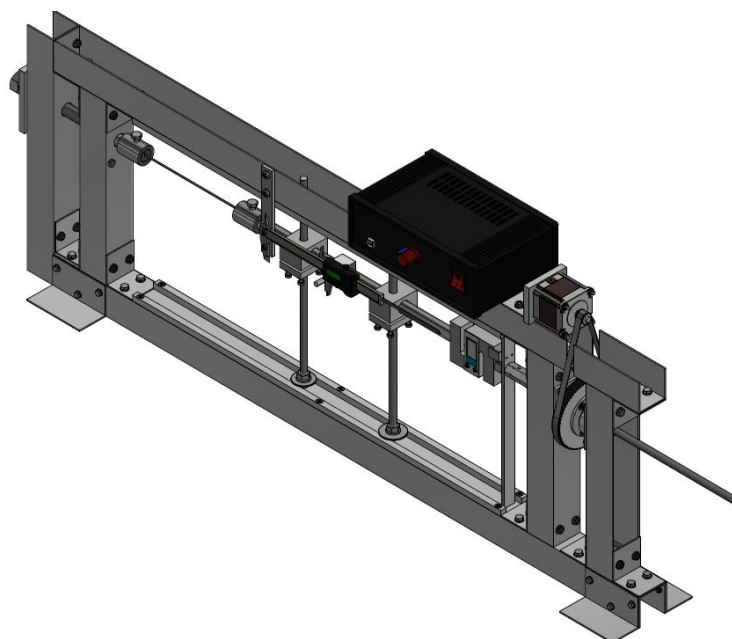
Др Владимир Кочовић, доцент

ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА
УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ

ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ

M82 Ново техничко решење примењено на националном нивоу

МАЛА ЛАБОРАТОРИЈСКА КИДАЛИЦА ЗА ИСПИТИВАЊЕ МЕХАНИЧКИХ КАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИЈАЛА ЗАТЕЗАЊЕМ



АУТОРИ
др Владимир Кочовић, доцент
др Соња Костић, професор струковних студија
Александар Петровић, развојни сарадник-истраживач
др Ђорђе Вукелић, редовни професор
др Бранко Тадић, редовни професор

Крагујевац, 2023.

Подаци о техничком решењу

Врста техничког решења	M82 – Ново техничко решење примењено на националном нивоу
Аутори техничког решења	др Владимир Кочовић, доцент ¹ др Соња Костић, професор струковних студија ² Александар Петровић, развојни сарадник - истраживач ³ др Ђорђе Вукелић, редовни професор ⁴ др Бранко Тадић, редовни професор ¹ ¹ Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу ² Академија струковних студија Шумадија, Одсек Крагујевац ³ Институт "Михајло Пупин", Београд ⁴ Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду
Назив техничког решења	Мала лабораторијска кидалица за испитивање механичких карактеристика материјала затезањем
Кључне речи	Мала, лабораторијска кидалица; Модул еластичности; Механичке карактеристике материјала; Попустљивост
Наручилац техничког решења	СЗР Машинг Драгослава Стефановића 34, Крагујевац
Корисник техничког решења	Академија Струковних Студија Шумадија, Одсек Трстеник
Година израде техничког решења	2018.
Година када је почело да се примењује техничко решење	2018.
Верификација резултата	Резултати решења су објављени у раду Sonja Kostić, Jasmina Miljojković, Goran Šimunović, Đorđe Vukelić, Branko Tadić, (2022) Uncertainty in the determination of elastic modulus by tensile testing, Engineering Science and Technology, an International Journal, Volume 25, 100998, https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.05.002 , ISSN 2215-0986 који је верификован и публикован у врхунском међународном часопису, категорије M21
Ко је прихватио техничко решење	Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу
Начин коришћења техничког решења	Уређај и развијена метода се примењују за експериментално одређивање механичких карактеристика материјала у едукативне и истраживачке сврхе, као и у индустрији
Област на коју се техничко решење односи	Испитивање механичких карактеристика материјала затезањем

1. ОБЛАСТ НА КОЈУ СЕ ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ ОДНОСИ

Најраширенија и најједноставнија метода која се користи за испитивање механичких особина материјала је испитивање материјала затезањем, где се узорак (епрувета) 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 (епрувета) 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 челустима за прихват различитих облика и величина епрувета металних и неметалних материјала.

Поред тога, развој науке и технологије показао је јасан тренд примене нових, скупих 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.

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. Испитиване су танке превлаке и влакна. Уређај се базира на равнотежи примењеног торзионог оптерећења и телескопског система за мерење издужења. D.A. LaVan (1999) је приказао уређај за испитивање затезањем челичних узорака малих попречних пресека, где се прихват и позиционирање узорака у стезне главе врши вијцима. Испитиване су механичке особине металних материјала са завареним спојевима, узимајући у обзир и правце сечења узорака из исте табле. Деформације су мерене ласерским системом. Механичка својства на неким локацијама унутар вара могу значајно варирати у односу на правац сечења. Z. Ma и коаутори (2015) су развили уређај за испитивање материјала затезањем уз скенирање електронским микроскопом. Померање покретне стезне чељусти уређаја бележи се бесконтактним ласерским сензором са брзим одзивом и добром резолуцијом. Како би се избегла попустљивост и како узорак не би проклизавао у зони прихвата епрувете, за стезање узорка су користили округли вијак са прецизним левим и десним навојем. Добијени резултати за узорке материјала од конструктивног челика и бакра су поређени са резултатима из литературе и показали су одлична поклапања. Y.C. Chao и D.S. Liu (2003) су пројектовали уређај за испитивање златне жице при малим оптерећењима, која се задају DC-сервомотором (*енг.* Direction of Current Flow). За мерење издужења коришћен је екстензиометар тачности 1 микрометра. Посебна пажња посвећена је припреми узорка како би се спречило евентуално оштећење узорка, његово клизање и олакшало поравнање узорка и осе задавања оптерећења. 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. Мале лабораторијске кидалице за испитивање узорака малих попречних пресека који за систем мерења силе и издужења користе пиезоелектрични актуатор PZT (*енг.* Piezoelectric actuator)

пројектовали су разни истраживачи [P.H. Ноу, 2005; S.S. Kim, 2005; Q.S. Bai, 2012]. P.H. Ноу (2005) истиче да су овакви уређаји давали поуздане и тачне резултате испитивања, уз контролу истезања стезних челоусти системом дигиталног микроскопа [P.H. Ноу, 2005], развојем одговарајуће методе на бази инверзне функције [S.S. Kim, 2005] или дизајном флексибилне шарке за PZT актуатор [Q.S. Bai, 2012]. Узорци су позиционирани у системе стезних челоусти ослањањем на рамена.

Два узорка исте величине, различитих материјала, испитивани су на затезање на уређају који су пројектовали S. Baharuddin и I.Yani (2018). Узорак у зони хватања има отвор кроз који пролази чивија која га повезује са стезном челоусти уређаја. Поред узорака, методом коначних елемената, испитивани су и витални делови конструкције, као што су зоне хватања узорка клиновима у стезним челоустима како би се избегло проклизавање, као и стезне челоусти. Z. Ezzouine и A. Nakheli (2016) су користили сопствени уређај за испитивање узорка затезањем уз примену софтвера LabVIEW за прикупљање и анализу података и електромагнетног сензора за мерење издужења тачности 10-3 $\mu\text{m}/\text{mv}$. Добијени резултати модула еластичности и затезне чврстоће су били задовољавајући, при чему су аутори нагласили да ће у будућности развијати уређај са побољшаном тачношћу. B. Haşçelik и R. Eren (2016) дизајнирали су хоризонтални уређај за испитивање затезањем узорака од текстила. Због проклизавања између узорака тканине и стезне челоусти, као и савијања покретне стезне челоусти и механичке несавршености конструкције уређаја, аутори врше оптимизацију уређаја, постављањем меког материјала са високим коефицијентом трења на површине стезних челоусти како би се спречило клизање између узорака тканине и стезних површина, као и укрућивање покретне стезне челоусти, тако да су се добијени резултати приближили резултатима испитивања на конвенционалним кидалицама.

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 уз помоћ вијка. Добијени резултати су поређени са резултатима добијеним на конвенционалним уређајима и показали су задовољавајућу тачност [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, који се стеже у главама уређаја. Приказани су резултати механичких карактеристика на узорцима од легура алуминијума са задовољавајућом тачношћу. 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.

По подацима којима располажу аутори овог техничког решења нема иницијативе других истраживача за пројектовањем и дизајном оваквих уређаја у земљи и окружењу.

2. ПРОБЛЕМ КОЈИ СЕ ТЕХНИЧКИМ РЕШЕЊЕМ РЕШАВА

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. Анализиране су попустљивости у свим критичним зонама конструкције, са посебним освртом на попустљивост која се јавља у стезним чељустима уређаја, што за последицу има грешке у мерењу издужења и силе затезања. Новим начином прихвата и позиционирања епрувете у стезне чељусту могуће је минимизирати грешке мерења издужења приликом испитивања [S. Kostić, 2022]. Дакле, добијање поузданих и тачних резултата испитивања у директној је спрези са одговарајућом крутошћу уређаја, где су могуће попустљивости подсклопова минимизирани.

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 Хooke-овог закона могуће је извршити процену неизвесности мерења модула еластичности и аналитичким путем одредити 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 [S. Kostić, 2022].

Код узорака малих димензија мерење деформације се врши на основу мерења померања стезне чељусту уређаја за испитивање затезањем, при чему је измерено издужење укључило и издужење зоне радијуса епрувете и издужење прихватног дела епрувете у стезној чељусту 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 [S. Kostić, 2019].

3. СТАЊЕ РЕШЕНОСТИ ПРОБЛЕМА У СВЕТУ

У уводном поглављу је наглашена потреба за развојем и пројектовањем малих лабораторијских кидалица, са аспекта минимизације грешака мерења и цене коштања. Приказан је кратак преглед достигнућа у свету, као и проблеми са којима се најчешће срећу истраживачи у овој области. Они који највише утичу на тачност и поузданост мерења су крутост неконвенционалних уређаја, попустљивост која се јавља у виталним деловима конструкције (посебно у зонама прихвата узорака), правилан избор мерне инструментације и одређивање мерне несигурности измерених величина, као и оптимална геометрија узорка за испитивање [Т. Klemens, 2007; К. Kumar, 2016; Н. Liua, 2017].

Грешке мерења приликом испитивања материјала затезањем могу настати уколико узорак није добро позициониран у зонама прихвата уређаја (стезне чељусту). 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. 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 руковоаца. Центрираност узорка је битна због обезбеђења чистог затезања. На центрираност узорка може утицати рам уређаја за испитивање, стезне чељусти и модел прихвата узорка, као и сам узорак. Ексцентричност узорка може изазвати грешке у мерењу оптерећења услед појаве сила савијања. 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 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%) [A. Mucsi, 2013 a].

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, као и пнеуматским системом, где се пренос оптерећења изводи трењем. 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.B. Sun, 2006]. У пракси то значи да је могуће добити скоро дупло веће вредности горње тачке напона течења у односу на доњу. 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 [H.B. Sun, 2006]. 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.

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. 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, 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 слободним ослањањем крајева за прихват узорака или везом вијцима кроз отвор на проширеном делу епрувете [G.B. Rathmayr, 2013; K. Kumar, 2014].

Утицај мерне инструментације на исходе мерења биће сагледане кроз мерење модула еластичности испитивањем затезањем на неконвенционалним кидалицама, јер је то величина која се одређује при јако малим еластичним деформацијама узорака, при релативно малим силама затезања. Мерење деформације у зони еластичности је изазов за све истраживаче.

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. При испитивању затезањем, грешке у мерењу модула еластичности веће су од грешака које се јављају при мерењу осталих механичких својстава материјала [J.D. Lord, 2005 а и 2005 б, 2006]. У овом тренутку не постоје стандардно дефинисане доње и горње границе понашања материјала у еластичном подручју. 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 и горњу границу, која зависи од затезне чврстоће материјала. Теоријско стандардно одступање модула еластичности је $\pm 5\%$ [S. Suttner,

2017]. 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. Аутори [S. Suttner, 2017] у свом раду дају израз за прецизније одређивање горње границе линеарног еластичног понашања у зависности од материјала.

Један од начина мерења издужења узорка код конвенционалних машина 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 несигурности 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 [Н.В. Motra, 2014]. 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]. Н.В. Motra и коаутори (2014) су у свом раду упоредили технике мерења деформације помоћу мерних трака, екстензометра и мерењем померања стезне главе. Закључак је да се за мерење модула еластичности, односно деформација у пољу еластичности могу користити и мерне траке и екстензиометри, јер дају поуздане резултате, док се мерење померања стезне главе показало као метода са високим расипањем резултата мерења деформација. S. Adamczak и коаутори (2012) објашњавају да када се испитивање материјала затезањем спроводи уређајем са екстензометром, грешка појединачног мерења вредности деформације одговара граничној грешци тог инструмента. Ако се испитивање врши на уређају без екстензометра, резултат мерења деформације садржи систематску грешку која је резултат еластичне деформације компонената универзалне машине за испитивање. Ову систематску грешку треба узети у обзир у облику исправке.

Као што је већ наглашено, код узорака малих попречних пресека и димензија, највећи проблем приликом испитивања затезањем представља тачно мерење еластичне деформације. Код стандардних узорака еластична деформација се са највећом тачношћу одређује уз помоћ екстензиометара, али код нестандардних узорака 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 (eng. Digital Image Correlation), 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].

Данас није могуће квантитативно изразити било који резултат мерења без одређене сумње у његову тачну вредност. Недостатак знања о факторима који утичу на мерење (случајни и систематски фактори) довео нас је до израза као што је мерна неизвесност. Свако мерење је изложено различитим утицајима и сметњама било да произилазе из случајних или систематских ефеката, обично из оба. Према објављеном водичу за изражавање неизвесности у мерењу GUM (eng. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement), први пут објављен 1993 и уређен 2008 [BIPM, 1993; JCGM, 2008] сумња у резултат мерења је неизвесност. Извори велике неизвесности за одређивање модул 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 процес испитивања (напон и брзина деформације, систем прикупљања података, брзина прикупљања података, софтвер) [S. Tarafder, 2004]. Познавање квантитативних ефеката појединачних величина на резултат испитивања побољшава поузданост поступка испитивања. Да би се поједноставили прорачуни неизвесности мерења, пожељно је прегруписати 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 процењених величина (нпр. Модул еластичности) [W. Gabauer, 2000]. Извори неизвесности су углавном типа

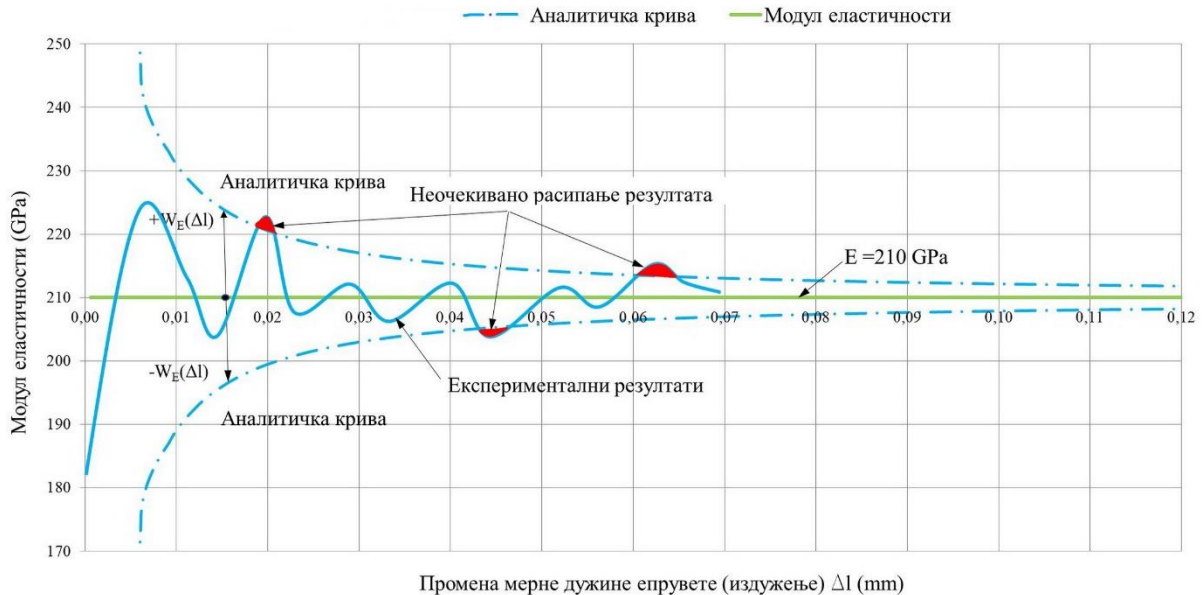
Б, с обзиром да се они могу квантификовати на основу података доступних а priori, попут сертификата о калибрацији, података произвођача или процене стручњака. М. Soy и М. Lus (2018) врше поређење неизвесности мерења типа А и Б у испитивању затезања металних материјала на собној температури, где предност дају Тип А јер даје тачније резултате од типа неизвесности Б. Резултати неизвесности типа Б су биле веће за све групе узорака. Процена мерне неизвесности за одређени модул еластичности може се извршити према CWA 15261–2 или према EN ISO 6892-1:2019.

4. СУШТИНА ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

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. Унапређењем начина прихвата и стегања узорка за испитивање у стезним чељустима мале лабораторијске кидалице значајно је смањено неконтролисано померање, што је повећало поузданост и тачност мерења механичких карактеристика материјала. Развој мале лабораторијске кидалице до финалног производа је прошао кроз три значајна развојна решења, која су подразумевала постављање и остварење нових захтева, како у погледу поузданости и тачности резултата испитивања материјала, тако и у погледу технологичности и ергономичности уређаја.

Коришћењем Hooke-овог закона, који узима у обзир геометријске карактеристике узорка материјала који се испитује и тачност мерне инструментације (мерење силе и издужења), могуће је аналитичким путем одредити криве неизвесности мерења модула еластичности. Те криве представљају граничне вредности очекиваних расипања експериментално одређених вредности модула еластичности. На тај начин може се извршити процена неизвесности мерења модула еластичности, слика 1. Свако

одступање резултата добијених експерименталним путем од вредности унутар аналитичких кривих, представља неочекивано расипање настало као последица неких других фактора који утичу на процес испитивања материјала [S. Kostić, 2022].

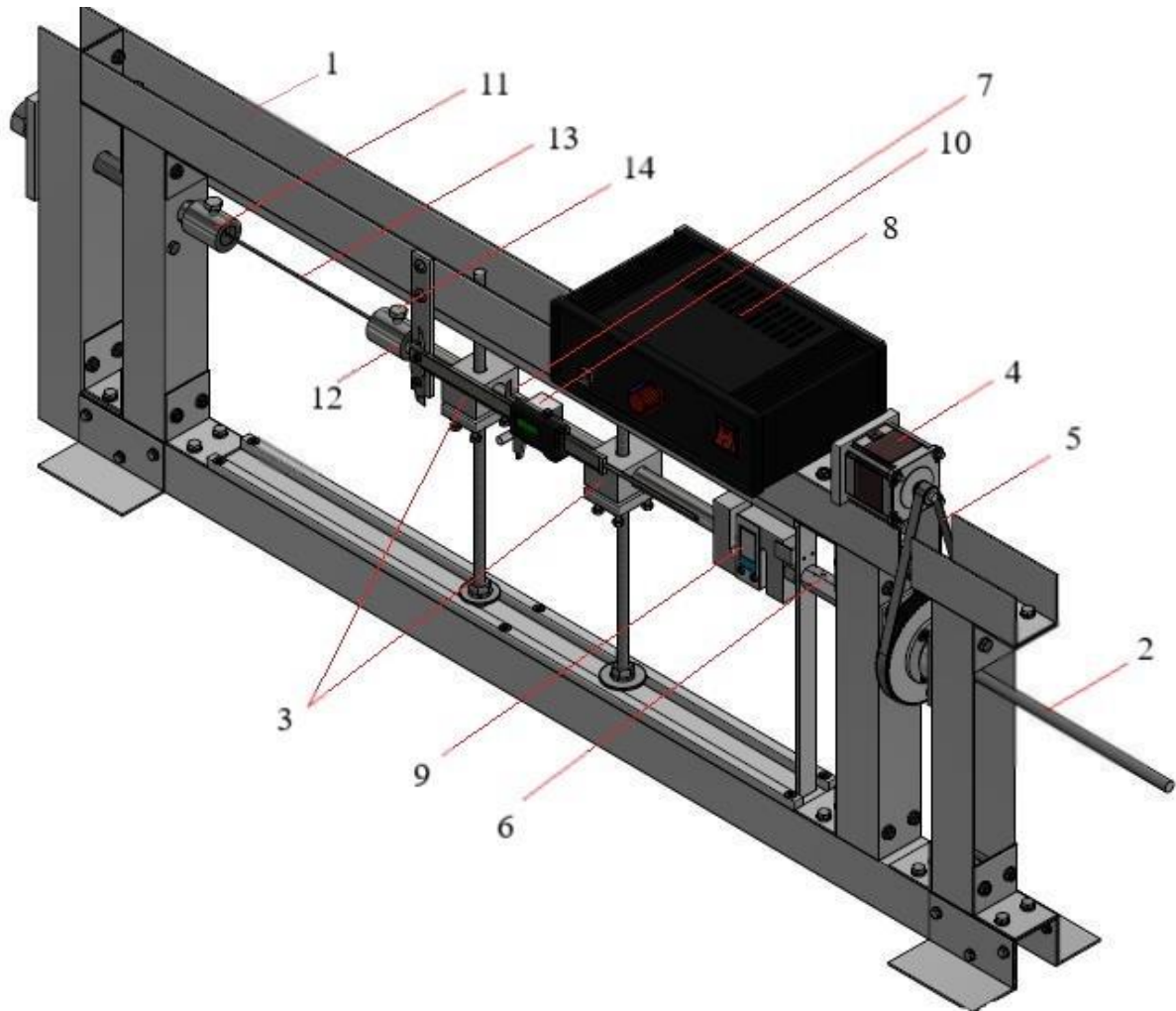


Слика 1. Неочекивано расипање измереног модула еластичности; горња и доња аналитичка крива

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]. 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.

5. ДЕТАЉАН ОПИС ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

За потребе испитивања материјала пројектован је и развијен уређај за испитивање материјала затезањем, мала лабораторијска кидалица, слика 2.



Слика 2. Уређај за испитивање материјала затезањем

Конструкцију кидалице чине целине:

- Носећа конструкција кидалице (1) је израђена од крутих алуминијумских профила, који су спојени растављивом везом. Прихватни елемент - стабилна лева стезна чељуст је фиксирана за оба вертикална стуба како би се укупна сила затезања поделила на две једнаке силе и на тај начин умањили напони и еластичне деформације вертикалног стуба. У циљу смањења концентрације напона у вертикалним стубовима, њихова веза са непомичном стезном чељусти изведена је преко челичних плоча велике крутости, које повећавају површину дејства силе и умањују еластичне деформације конструкције.

- Систем за центрирање и вођење по оси затезања (2) решен је преко линеарних лежајева (3) који су смештени у кућиштима, која се могу подешавати по све три осе. На овај начин су отпорне силе, силе трења, које се могу јавити услед непоклапања оса лежајева и осе покретне чељусти, значајно умањене. То потврђују резултати мерења сила трења при кретању покретне чељусти без епрувете.
- Погонски систем кидалице чини корачни мотор „Nema 23“ (4), који задаје кружно кретање зупчастој ременици T5 (5) која је упресована на осовину мотора. Обртно кретање се преноси на већу зупчасту ременицу. Преносни однос 1:6 обезбеђује смањење брзине затезања и смањење обртног момента мотора. Навојни спој ременице и завојног вретена (6) кружно кретање ременице претвара у линеарно кретање завојног вретена.
- Четврти систем кидалице чине граничници положаја (7). Положај индуктивних сензора дефинише граничне положаје - положај за позиционирање и стезање узорка за испитивање и крајњи положај, који дефинише и ограничава максимални пређени пут покретне чељусти у циљу сречавања оштећења уређаја.
- Засебан систем чини пратећа електроника, која је смештена у кутији (8), а састоји се од контролера (који је USB каблом преко com porta повезан са рачунаром, при чему развијена апликација прикупља и обрађује податке силе и издужења у реалном времену), потенциометра и AD конвертора (који конвертује и допрема податке контролеру).
- Мерни систем се састоји из помичног кљунастог мерила (10) са опсегом померања од 150 mm, тачности 0,01 mm, и динамометра типа „S“ (9), који ради у опсегу сила до 2000 N, тачности 0.6 N.

Управљачка јединица (8) се напојним каблом повезује на мрежни напон 220 V (50 KHz). Активирањем прекидача на задњој страни управљачке јединице активира се исправљач смештен унутар управљачке јединице који прилагођава напон потрошачима мерног, погонског и управљачког система (12 V и 5 V), тако да је цео систем управљања безбедан за руковање. Епрувета за испитивање материјала (13) се позиционира и прихвата у стезне чељусти. Врши се притезање епрувете преко чаура са вијцима (14). Десна стезна чељуст кидалице (12) се поставља у почетни положај (лева чељуст кидалице (11) је непомична).

Уз помоћ прекидача на предњој страни управљачке јединице активира се погон кидалице, односно корачни мотор. Корачни мотор врши затезање покретне чељусти у процесу испитивања или враћање чељусти 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. 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.

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 развијеног и имплементираног 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.

Пројектовање и развој мале лабораторијске кидалице са слике 2. текло је кроз више фаза и неколико верзија решења. Уређај је првобитно 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, унапређење конструкционог решења односило се на већи степен задовољења захтева

технологичности, ергономичности и поузданости (једноставије руковање, резултати испитивања са мањом неизвесношћу мерења, прикупљање података уз помоћ рачунара, смањење буке, побољшање улежиштења навојног вретена, смањење трења клизања, повећање крутости, развој новог решења прихвата епрувете у стезне чељусти, развој софтвера за прикупљање и обраду података). Таква 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, од учила за едукацију студената постао лабораторијски уређај за испитивање материјала и истраживање у овој области.

Три развојна решења мале лабораторијске кидалице, са основним захтевима које је уређај морао да задовољи, су приказана на слици 3.



Слика 3. Приказ развојних решења, три варијанте мале лабораторијске кидалице

Код првобитног решења уређаја-кидалице, приказаног на слици 3, развојно решење 1, затезање епрувете вршено је ручно преко специјално израђене навртке великог пречника. Издужење је мерено помичним кљунастим мерилом, а сила затезања дигиталним динамометром. Очитавање резултата вршено је ручно. Друга развојно решење уређаја, слика 3, унапређено је аутоматским управљањем, где се сила затезања задавала погоном корачног мотора преко управљачке јединице за регулацију брзине и смера кретања покретне чељусти. Епрувета се слободно ослањала у стезне чељусти својим крајевима за причвршћивање. Систем аквизије података је аутоматизован уз помоћ централне управљачке јединице, која је повезана са рачунаром. Побољшањем везе улежиштења преносника, положаја и вођења навојног вретена, смањено је трење које је узроковало велике паразитне силе које су утицале на тачност резултата мерења, што је приказано на слици 3, као треће развојно решење уређаја. Како би се избегло трење клизања, постављена су два линеарна куглична лежаја, за које је карактеристичан

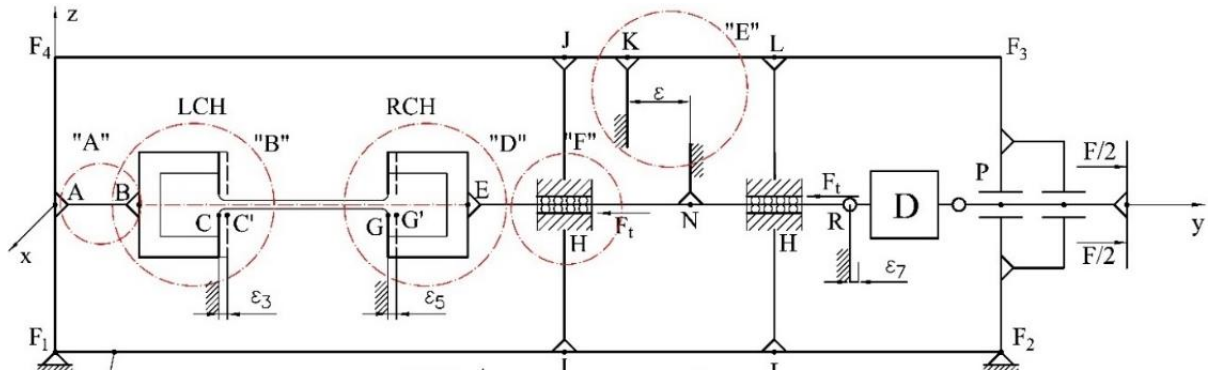
веома мали коефицијент трења [В.А. Hélouvry, 1994]. Лежаји се ослањају у четири тачке, па је положај подесив у простору по све три осе x , y и z , чиме се обезбеђује и саосност, односно центричност и минимизира тај узрок грешке. Као најекономичније решење за проблем улежиштења навојног вретена изабрани су конусни ваљкасти лежаји [V. Kostić, 2018]. Уз постојање већ описане могућности подешавања саосности лежаја, улежиштењем навојног вретена је генерално решен проблем саосности испитиваног узорка и правца силе затезања. Прихват епрувете у стезне чељусти се вршио њеним слободним ослањањем крајева за причвршћивање. Изглед дијаграма сила-издужење односно напон-деформација добијених испитивањем затезањем на три варијанте мале лабораторијске кидалице, приказане су на слици 4.



Слика 4. Приказ дијаграма сила-издужење односно напон-деформација добијених испитивањем затезањем на три развојна решења мале лабораторијске кидалице

Захтеви који су постављени пред последњу верзију мале лабораторијске кидалице са слике 2. су били: имплементација сензора положаја, имплементација софтвера за аутоматску обраду података, неизвесност мерења $\leq 1.6\%$, побољшање крутости уређаја, побољшање система за прихват и притезање епрувете у стезне чељусти.

Попустљивости подсклопова и елемената конструкције кидалице битно утиче 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, слика 5.



Слика 5. Шематски приказ кидалице

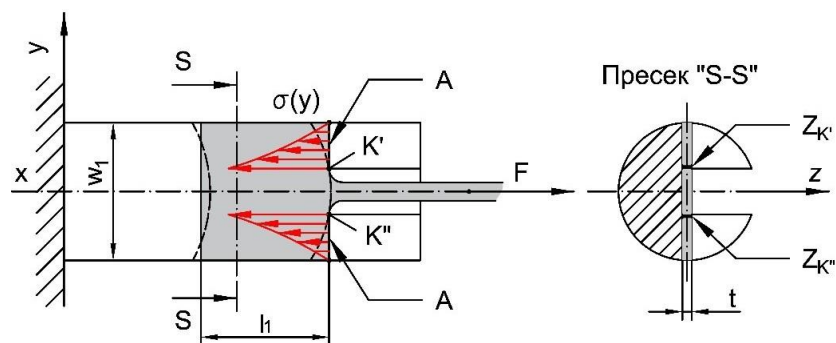
Попустљивости у одређеним зонама конструкције кидалице у директној су вези са грешкама мерења померања и сврставају се у грешке услед:

- попустљивости носеће конструкције (рама) кидалице (тачке F_1 F_2 F_3 F_4),
- 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).

Грешке мерења везане за попустљивости одређених целина (подскопова) могуће је у великој мери свести на минималну вредност техничко-технолошким мерама и оптимизацијом решења. Критичне зоне са аспекта попустљивости и грешака мерења представљају зоне контакта испитиваног узорка (епрувете) са левом LCH и десном чељусти RCH, слика 5. 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 [B. Tadić, 2012]. У суштини, један од кључних узрока настанка значајних грешака одређивања механичких карактеристика материјала, посебно модула еластичности, јесте неконтролисани део померања, који током

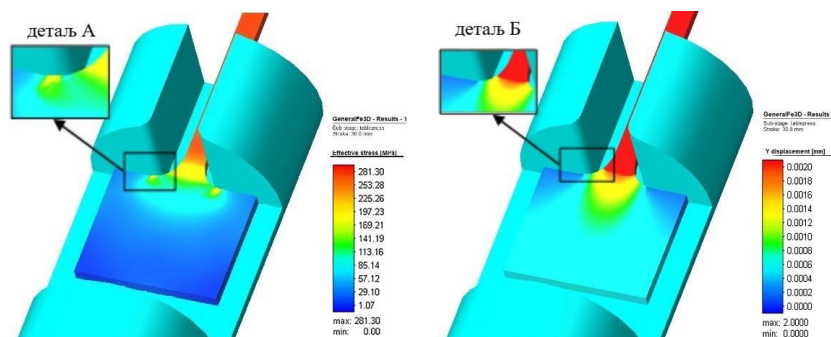
затезања узорка настаје у самом контакту епрувете и стезних чељусти. Без обзира што је систем, статички посматрано, у равнотежи, напони који се јављају на самим површинама контакта морају изазвати одређени ниво померања, који је у директној вези са нивоом силе затезања [V.L. Rorov, 2010]. Проблеми попустљивости 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 контактнoг притиска (напона) који се јавља између належућих површина епрувете са левом и десном чељусти. Ако се део епрувете већег попречног пресека ослања на деловима леве и десне чељусти, грешка настаје због сложенoг напонско-деформациoног стања, претежно у самој зони контакта између епрувете и чељусти и не постоји начин да се вредност настале грешке експериментално квантификује.

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 6), што је у складу са литературним наводима [C.T. Li, 1985; J.R. Davis, 2004; A. Mucsi, 2013; G.B. Rathmayr, 2013; L. Woong, 2013; K. Kumar, 2014]. Укупна контактна површина епрувете А, приказана на слици 6, 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 чељусти имати сразмерно мање вредности. Максимални напони у овом случају јављају се по дебљини епрувете t (оса z) у зонама $Z_{K'}$ и $Z_{K''}$ у околини тачака K' и K'' .



Слика 6. Систем позиционирања и прихвата епрувете: слободно ослоњена епрувета на уређају

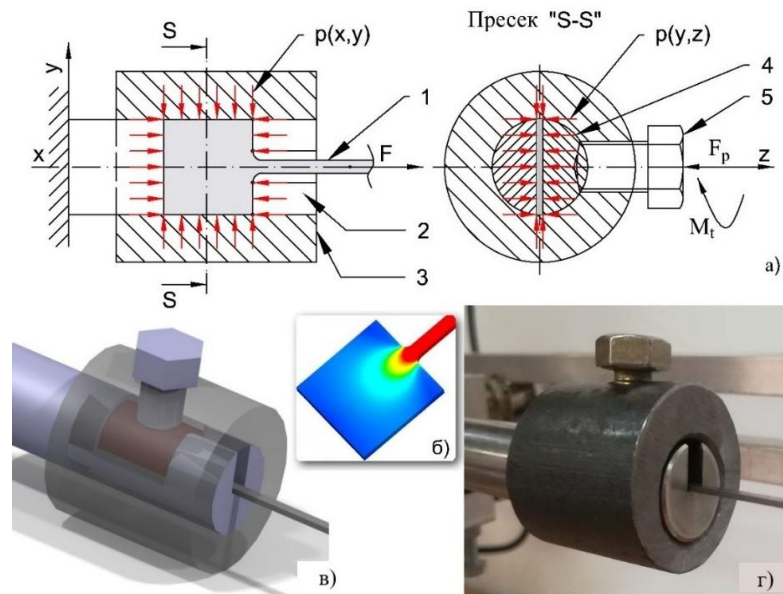
При дејству силе затезања F на наведеним контактним површинама делују напони притиска и долази до сабијања елементарних делића материјала епрувете у самој зони контакта, при чему је максимална концентрација напона на деловима Z_K' и Z_K'' . Због велике концентрације напона на контактної површини епрувете настаће и одређена померања епрувете у стезној челусти. 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 челусти. Претпостављено поље напона $\sigma(y)$ у потпуности одговара облику епрувете деформисане при овом начину базирања у стезним челустима, 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 7. 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 7. 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 поменутих зонама (слика 7, 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 челусти, 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 8, у највећој мери елиминисало је грешке попустљивости у зонама контакта епрувете и стезних чељусти. 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.



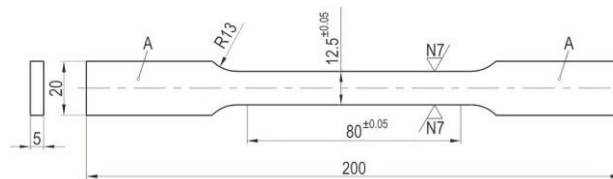
Слика 8. Систем позиционирања и стезања епрувете: а) шематски приказ, б) ФЕ померање, в) 3D модел и г) фотографски приказ

Слика 8. 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 чељусти) (2), чаура (3), полуцилиндрични стезни елемент (4), и вијак (5). Попустљивост се разматра само у контактної зони између узорка и леве стезне чељусти 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 чељусти и равнотежу сила по оси затезања и у правцима нормалним на осу затезања. Оваквом шемом стезања, епрувета је у стезним чељустима изложена свестраном притиску по свим осама и представља „заробљени“ део материјала који при дејству силе затезања

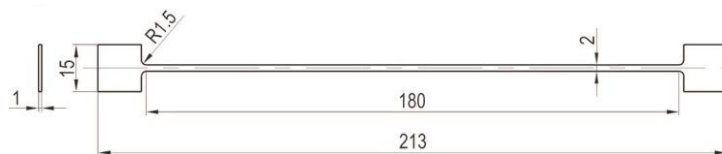
има веома повољну расподелу поља напона и деформација и минималну попустљивост у зони контакта. На слици 8.б) приказан је и детаљ анализе коначним елементима (FEA), који указује на веома повољну расподелу и мале вредности померања у контактним зонама, која не превазилазе вредности од 2 μm .

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.

Епрувета која се користи за испитивање материјала на малој лабораторијској кидалици разликује по облику и геометријским параметрима од стандардних епрувета које се користе код конвенционалних кидалица. На сликама 9. и 10. приказани су облици стандардне епрувете од лима и нестандартне епрувете од лима, која се користи као узорак код мале, лабораторијске кидалице за испитивање материјала затезањем.



Слика 9. Облик и геометријске карактеристике епрувете за испитивање затезањем за конвенционалне кидалице



Слика 10. Облик и геометријске карактеристике епрувете за испитивање затезањем за мале, лабораторијске кидалице

Модул еластичности се може одредити из Нооке-овог закона. 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 [R.J. Moffat, 1988; J.P. Holman, 2011; GUM].

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

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.

Претходни израз (1) се одговарајућим трансформацијама детаљно описаним у [S. Kostić, 2022], може написати у функцији само једне текуће променљиве, тј. тренутног издужења Δl :

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

Претходни израз суштински дефинише аналитичке границе неизвесности модула еластичности у односу на референтне вредности E рачунате према Нооке-овом закону, односно интервал у коме се са датом вероватноћом налази права вредност мерене величине, израз (2). 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:

$$E_{\text{EXP}} = E \pm W_E(\Delta l) \quad (3)$$

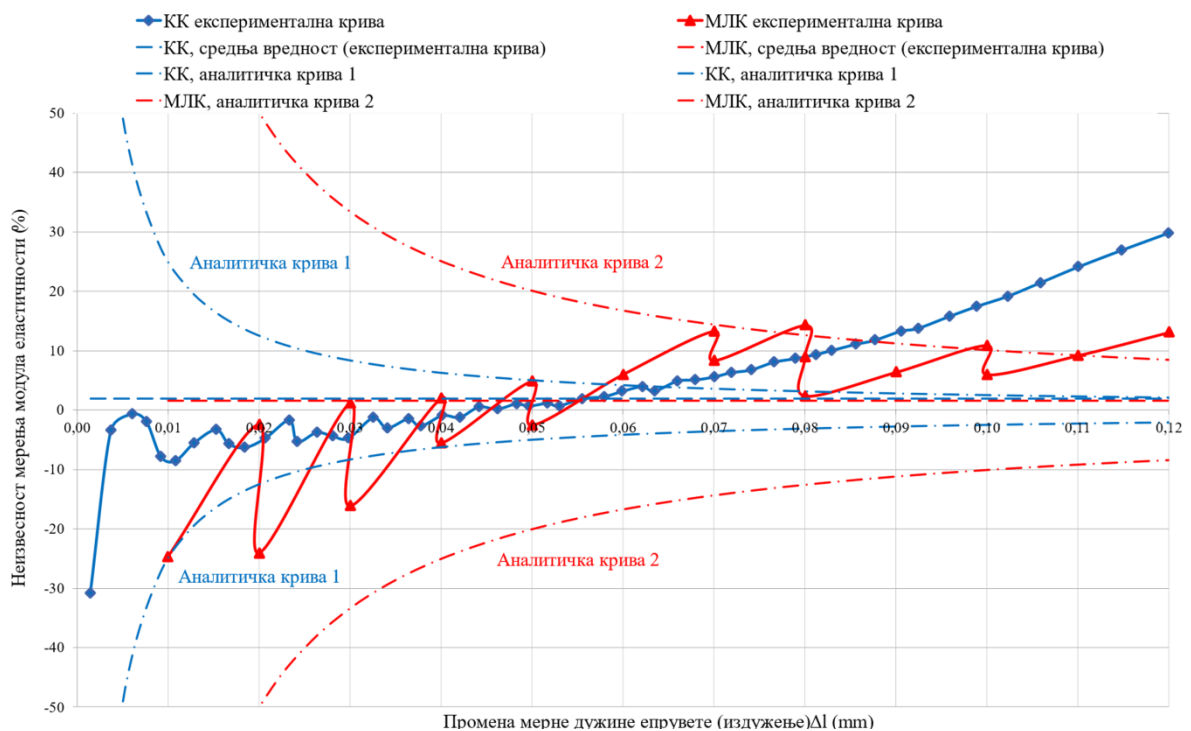
На слици 1. приказан је пример аналитичких кривих неизвесности модула еластичности $W_E(\Delta l)$, на основу израза (2) и (3), са референтном вредношћу модула еластичности за испитивани материјал (на примеру $E = 210 \text{ GPa}$) као асимптотом кривих, као и један од могућих случајева експериментално одређених вредности модула еластичности $E_{\text{EXP}}(\Delta l)$.

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 (2) и (3). Због преосталих систематских грешака границе поузданости средње вредности се проширују.

За верификацију резултата мерења приликом испитивања затезањем на малој лабораторијској кидалици коришћени су резултати добијени на конвенционалној

кидалици, при чему су епрувете имале геометријске карактеристике дате на сликама 9 и 10. Материјал епрувета је челик S355J2. Испитивања су рађена у условима које приписује стандард SRPS EN ISO 6892-1:2020. Резултати испитивања су дати на слици 11.

Аналитичке криве 1, 2 (слика 11) 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, 2022]. Средња вредност неизвесности модула еластичности за малу лабораторијску кидалицу МЛК износи 1.56% (црвена испрекидана линија, слика 11), док је средња вредност неизвесности модула еластичности за конвенционалну кидалицу са екстензиометром КК 1.97% (плава испрекидана линија, слика 11). Мерење издужења је 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, 2022].



Слика 11. Дијаграмски приказ неизвесности модула еластичности, за материјале испитиване на конвенционалној кидалици КК и малој лабораторијској кидалици МЛК, у области малих издужења

На кривама са слике 11, 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, 2022]. 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.

6. ЗАКЉУЧАК

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 подскопова уређаја и на већину се могло утицати адекватним техничко-технолошким решењем. Попустљивост која се јављала у контакту епрувете и зоне прихвата стезне чељусти 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 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 екстензиомером.

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 подскопова кидалице и отварају широк простор за истраживања и коришћење, како у едукативне и истраживачке сврхе, тако и за испитивање различитих материјала у индустрији.

6. ЛИТЕРАТУРА

1. 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, <http://dx.doi.org/10.13189/ujme.2013.010401>
2. 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, <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2012.11.036>

3. 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, <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2009.07.046>
4. 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
5. 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.
6. 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, <http://dx.doi.org/10.1007/s12541-012-0227-8>
7. B.A. H elouvry, 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
8. BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, International Organization for Standardization, Geneva First Edition, 1993, ISBN 92-67-10188-9 (BSI Equivalent: BSI PD 6461: 1995, Vocabulary of Metrology, Part 3. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. BSI), London, 1995.
9. 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, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1985.tb10183.x>
10. CWA 15261-2:2005: Measurement uncertainties in mechanical tests on metallic materials. The evaluation of uncertainties in tensile testing, 2005.
11. D.A. LaVan, (1999). Microtensile properties of weld metal, *Experimental Techniques*, Vol. 23, No. 3, pp. 31-34, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1747-1567.1999.tb01568.x>
12. D.M. Marsh, (1961). Micro-tensile testing machine, *Journal of Scientific Instruments*, Vol. 38.
13. EN 10002-1 (2001): Metallic materials - Tensile testing: Part I. Method of test at ambient temperature, European Committee for Standardization
14. EN ISO 6892-1:2019, (2019). Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature, European Committee for Standardization
15. F.H. Akbary, M.J. Santofimia, J. Sietsma, (2014). Elastic Strain Measurement of Miniature Tensile Specimens, *Experimental Mechanics*, Vol. 54, pp. 165-173, <http://dx.doi.org/10.1007/s11340-013-9785-7>
16. 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, <http://dx.doi.org/10.1504/ijmmp.2005.008129>
17. 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, <http://dx.doi.org/10.1520/JTE20120175>
 18. H. Liua, Y. Shena, S. Yangc, P. Zhengc, 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* 121, pp. 188–197, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.07.016>
 19. 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, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2014.07.006>
 20. 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, <http://dx.doi.org/10.2320/matertrans.47.96>
 21. 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.
 22. J. Kazakeviciute, J.P. Rouse, D.S.A, De Focatiis, C.J. Hyde, (2019). The development of a novel technique for small ring specimen tensile testing, *Theor. Appl. Fract. Mech.* 99, pp. 131–139, <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.11.016>
 23. J.D. Lord, M. Rides, M.S. Loveday, (2005 a). Modulus measurement methods, *TENSTAND WP3 Final Report*, National Physical Laboratory.
 24. J.D. Lord, M.S. Loveday, M. Rides, I. McEnteggart, (2005 б). Digital tensile software evaluation, *TENSTAND WP2 Final Report*, National Physical Laboratory.
 25. J.D. Lord, R.M. Morrell, (2006). *Elastic Modulus Measurement, Good Practice Guide No. 98*, National Physical Laboratory, ISSN 1744-3911.
 26. J.P. Holman, *Experimental Methods for Engineers*, 8th Edition, McGraw-hill Series in Mechanical Engineering, New York, 2011.
 27. J.R. Davis, (2004). *Tensile testing - second edition*, ASM International, USA, ISBN:0-87170-806-X
 28. Joint Committee for Guides in Meteorology. *Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of uncertainty in measurement. JCGM 100:2008.*
 29. 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&Engineering A* 675, pp. 32–43, <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2016.08.032>

30. K. Kumar, A. Pooleery, K. Madhusoodanan, R.N. Singh, J.K. Chakravartty, B.K. Dutta, R.K. Sinha, (2014). Use of Miniature Tensile Specimen for Measurement of Mechanical Properties, *Procedia Engineering*, Vol. 86, pp. 899 - 909, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.112>
31. L. Bergonzi, M. Vettori, A. Pironi, 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, <http://dx.doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.078>
32. 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.
33. M. Soy, M. Lus, (2018). Comparison of A and B Type Measurement Uncertainties in Tensile Testing of Metallic Materials at Ambient Temperature, *Int. J. Nat. Eng. Sci.* 12, pp. 46–55.
34. 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, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1747-1567.2005.tb00228.x>
35. 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, <http://dx.doi.org/10.1177/0954405412454058>
36. R.J. Moffat, (1988). Describing the uncertainties in experimental results, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 1 3–17. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(88\)90043-X](https://doi.org/10.1016/0894-1777(88)90043-X)
37. S. Adamczak, J. Bochnia, C. Kundera, (2012). Stress and strain measurements in static tensile tests, *Metrol. Meas. Syst.* 19, pp. 531–540, <https://doi.org/10.2478/v10178-012-0046-3>
38. 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
39. 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, <http://dx.doi.org/10.24874/ti.2019.41.01.12>
40. S. Kostić, J. Miljojković, G. Šimunović, Đ. Vukelić, B. Tadić, (2022). Uncertainty in the determination of elastic modulus by tensile testing, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 25, 100998, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.05.002>
41. 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,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.10.024>
42. S. Tarafder, K.K. Gupta, (2004). Estimation of Uncertainty in Mechanical Testing, Paper published in Study Material of Refresher Course on ISO/IEC 17025 Standards Organised by NABL and CGCRI, Kolkata
 43. 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.
 44. 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.
 45. T. Klemens, (2007). Optimal Shape of Thin Tensile Test Specimen, J. Am. Ceram. Soc., Vol. 90, No. 6, pp. 1827–1835, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1551-2916.2007.01538.x>
 46. 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.
 47. V. Kostić, (2018). Istraživanje konstrukciono-tribološkig parametara kugličnih ležaja sa kosim dodirom tipa ZKLF sa aspekta optimalne osnovne funkcije - doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Niš
 48. V.L. Popov, (2010). Coulomb’s Law of Friction. In: Contact Mechanics and Friction. Springer, Berlin, Heidelberg, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-10803-7_10
 49. 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.
 50. 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, <http://dx.doi.org/10.1243/03093247jsa661>
 51. 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, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1747-1567.2003.tb00128.x>
 52. 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, <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2009.06.031>
 53. Z. Ezzouine, A. Nakheli, (2016). Development of a Measuring Sensory System Based on LabVIEW for Determining Elastic Proprieties of Solid Materials, International

Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 6, No. 5, pp. 2096-2105,
<http://dx.doi.org/10.11591/ijece.v6i5.9608>

54. 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, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1747-1567.2012.00868.x>

Прилози

уз пријаву Техничког решења категорије M82,

под називом „МАЛА ЛАБОРАТОРИЈСКА КИДАЛИЦА ЗА ИСПИТИВАЊЕ
МЕХАНИЧКИХ КАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИЈАЛА ЗАТЕЗАЊЕМ“,

чији су аутори: др Владимир Кочовић, др Соња Костић, Александар Петровић, др Ђорђе
Вукелић, др Бранко Тадић

достављају се следећи прилози:

Прилог 1 - Списак раније прихваћених техничких решења

Прилог 2 - Техничка документација техничког решења

Прилог 3 - Рад објављен у часопису *Engineering Science and Technology, an International Journal*; (M21)

Прилог 4 - Уговор о пословно техничкој сарадњи

Прилог 5 - Потврда о продаји и рачун

Прилог 6 - Потврда о коришћењу

Прилог 1. Списак раније прихваћених техничких решења

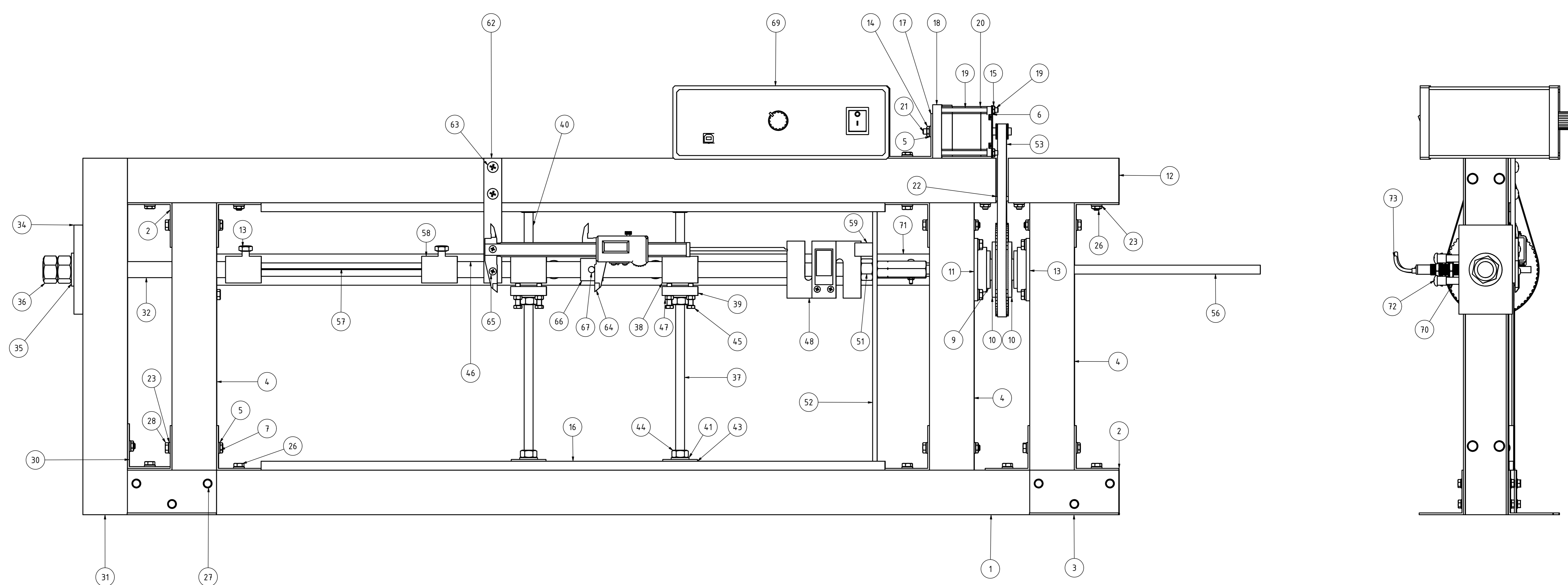
- Аутор др **Владимир Кочовић** има следећа раније прихваћена техничка решења:
 - Категорија М84 (Битно побољшано техничко решење на националном нивоу):
 1. Ранђеловић С., Вукелић Ђ., Тодоровић П., **Кочовић В.**, Богдановић Б., Ивановић Л., Тадић Б.: Оптимизација процеса завршне обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде на основу дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде, 2015.
 2. Тадић Б., Ранђеловић С., Тодоровић П., Вукелић Ђ., **Кочовић В.**, Богдановић Б., Јеремић М.: Крути алат намењен за завршну обраду метала котрљањем куглице, 2015.
 - Категорија М85 (Ново техничко решење у фази реализације):
 1. Вукелић Ђ., Живковић М., Миљојковић Ј., **Кочовић В.**, Будак И.: Уређај за испитивање апсорпције воде дрвених радних предмета, 2017.
- Аутор др **Ђорђе Вукелић** има следећа раније прихваћена техничка решења:
 - Категорија М82 (Ново техничко решење примењено на националном нивоу):
 1. Будак И., Тадић Б., Јеремић Б., **Вукелић Ђ.**, Миљанић Д., Тодоровић П., Ходолич Ј., Индустијски прототип уређаја за испитивање статичке попустљивости и носивости споја елемената за стезање и радног предмета, 2012.
 2. Шокац М., Будак И., Јаковљевић Ж., **Вукелић Ђ.**, Сантоши Ж., Програмски систем за сегментацију снимака генерисаних применом компјутеризоване томографије, 2020.
 - Категорија М83 (Битно побољшано техничко решење на међународном нивоу):
 1. Тадић Б., Бабић М., Митровић С., Лазић М., **Вукелић Ђ.**, Универзални трибометар, 2010.
 2. Ходолич Ј., Тадић Б., **Вукелић Ђ.**, Ново експериментално постројење за савијање танкозидних цеви применом топлоте генерисане трењем, 2011.
 3. Тадић Б., **Вукелић Ђ.**, Тодоровић П., Јеремић Б., Мачужић И., Богдановић Б., Ново експериментално постројење за одређивање динамичке попустљивости стезних и ослоних елемената прибора, 2013.
 - Категорија М84 (Битно побољшано техничко решење на националном нивоу):
 1. **Вукелић Ђ.**, Тадић Б., Ходолич Ј., Митровић Ј., Симеуновић Н.: Специјални модуларни систем стезних прибора за обрадни центар ХУРЦО-500, 2011.
 2. Ранђеловић С., **Вукелић Ђ.**, Тодоровић П., Кочовић В., Богдановић Б., Ивановић Л., Тадић Б.: Оптимизација процеса завршне обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде на основу дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде, 2015.

3. Тадић Б., Ранђеловић С., Тодоровић П., **Вукелић Ђ.**, Кочовић В., Богдановић Б., Јеремић М.: Крути алат намењен за завршну обраду метала котрљањем куглице, 2015.
- Категорија М85 (Ново техничко решење у фази реализације):
 1. Тадић Б., Марјановић Н., **Вукелић Ђ.**, Галовић С.: Уређај за остваривање екстремно високих притисака, 2007 .
 2. Сантоши Ж., Будак И., Трифковић Б., Шокац М., **Вукелић Ђ.**, Хаџистевић М., Ходолич Ј.: Нова метода за аквизицију геометријских података у денталној протетици на бази блиско-предметне фотограметрије, 2015.
 3. Агарски Б., Будак И., Срђевић Б., **Вукелић Ђ.**, Илић Мићуновић М., Ходолич Ј.: Програмски систем за интелигентну вишекритеријумску анализу производа и процеса, 2015.
 4. **Вукелић Ђ.**, Живковић М., Миљојковић Ј., Кочовић В., Будак И.: Уређај за испитивање апсорпције воде дрвених радних предмета, 2017.
 - Аутор др **Бранко Тадић** има следећа раније прихваћена техничка решења:
 - Категорија М82 (Ново техничко решење примењено на националном нивоу):
 1. Будак И., **Тадић Б.**, Јеремић Б., Вукелић Ђ., Миљанић Д., Тодоровић П., Ходолич Ј., Индустијски прототип уређаја за испитивање статичке попустљивости и носивости споја елемената за стезање и радног предмета, 2012.
 - Категорија М83 (Битно побољшано техничко решење на међународном нивоу):
 1. **Тадић Б.**, Бабић М., Митровић С., Лазић М., Вукелић Ђ., Универзални трибометар, 2010.
 2. Ходолич Ј., **Тадић Б.**, Вукелић Ђ., Ново експериментално постројење за савијање танкозидних цеви применом топлоте генерисане трећем, 2011.
 3. **Тадић Б.**, Вукелић Ђ., Тодоровић П., Јеремић Б., Мачужић И., Богдановић Б., Ново експериментално постројење за одређивање динамичке попустљивости стезних и ослоних елемената прибора, 2013.
 - Категорија М84 (Битно побољшано техничко решење на националном нивоу):
 1. Бобић И., Бабић М., Митровић С., Венцл А., Бобић Б., **Тадић Б.**, Керамички лонац електроотпорне пећи за извођење компокастинг поступка, 2008.
 2. Бобић И., Бобић Б., Бабић М., Митровић С., Венцл А., **Тадић Б.**, Електрична метода за контролу реолошког наношења полуочврслих растопа основних легура и композита при извођењу рео/компокастинг поступка, 2009.
 3. Вукелић Ђ., **Тадић Б.**, Ходолич Ј., Митровић Ј., Симеуновић Н.: Специјални модуларни систем стезних прибора за обрадни центар ХУРЦО-500, 2011.
 4. Ранђеловић С., Вукелић Ђ., Тодоровић П., Кочовић В., Богдановић Б., Ивановић Л., **Тадић Б.**: Оптимизација процеса завршне обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде на основу дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде, 2015.

5. **Тадих Б.**, Ранђеловић С., Тодоровић П., Вукелић Ђ., Кочовић В., Богдановић Б., Јеремии М.: Крути алат намењен за завршну обраду метала котрљањем куглице, 2015.
- Категорија М85 (Ново техничко решење у фази реализације):
 1. **Тадих Б.**, Ивковић Б., Развој трибометра ТПД-93, 1993.
 2. **Тадих Б.**, Ивковић Б., Развој трибометра ТПД-96, 1996.
 3. **Тадих Б.**, Развој машине за обликовање крајева лукова танкозидних цев, 2000.
 4. **Тадих Б.**, Ивковић Б., Тодоровић П., Развој трибометра ТПД-2000, 2000.
 5. **Тадих Б.**, Митровић Р., Развој машине за савијање танкозидних цеви, 2000.
 6. **Тадих Б.**, Реализована конструкција лаке нумеричке машине за обраду дрвета, пластике и осталих неметалних материјала, 2004.
 7. **Тадих Б.**, Марјановић Н., Вукелић Ђ., Галовић С.: Уређај за остваривање екстремно високих притисака, 2007.
 8. **Тадих Б.**, Бабић М., Митровић С., Тодоровић П., Бобић И., Заједнички мерни систем за универзални трибометар-триболошки мерни центар, ТР 05, Лабораторија за трибологију Машинског факултета у Крагујевцу, Машински факултет, 2010.

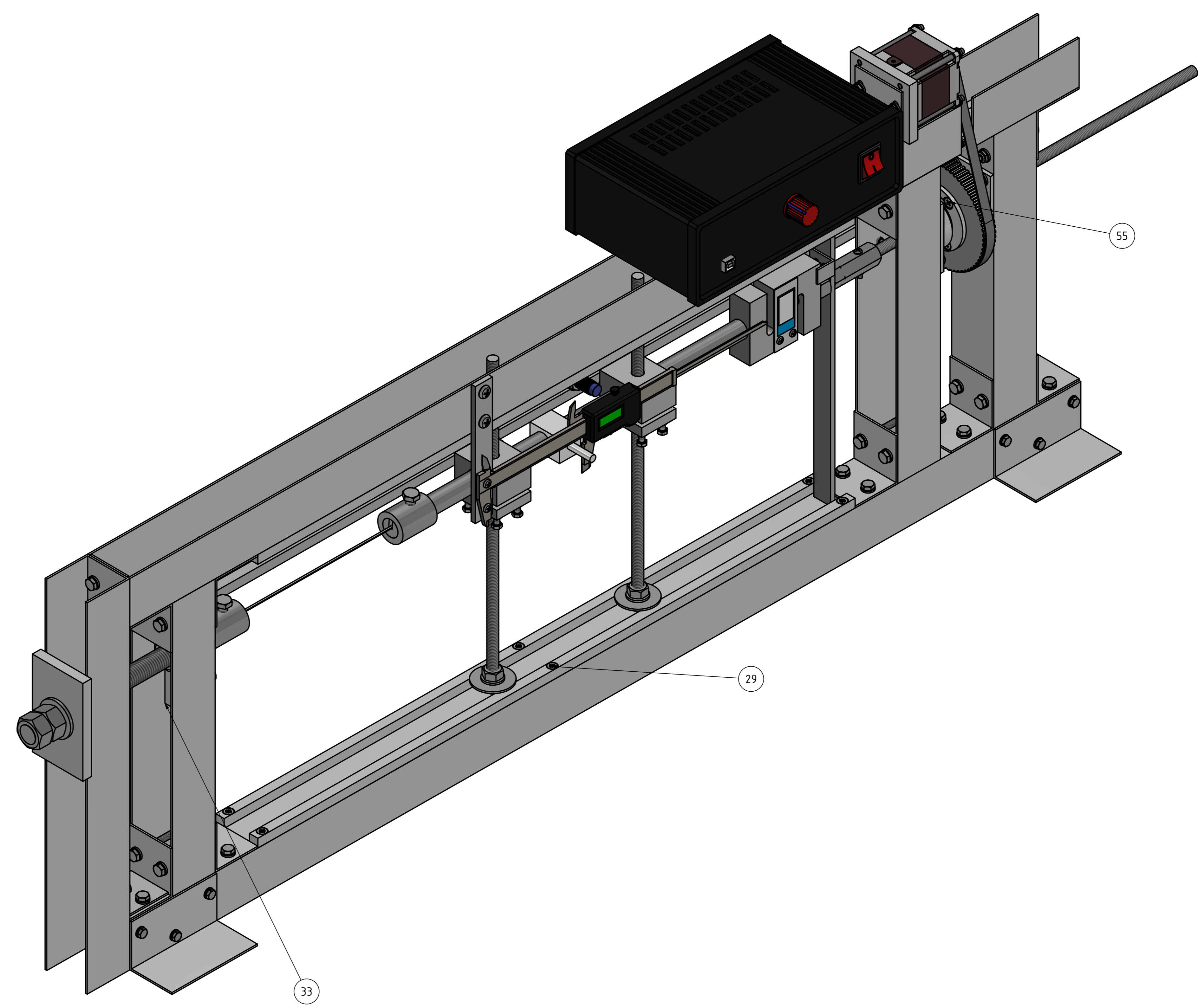
Аутори др **Соња Костић** и **Александар Петровић** немају раније прихваћена техничка решења.

Прилог 2 - Техничка документација техничког решења

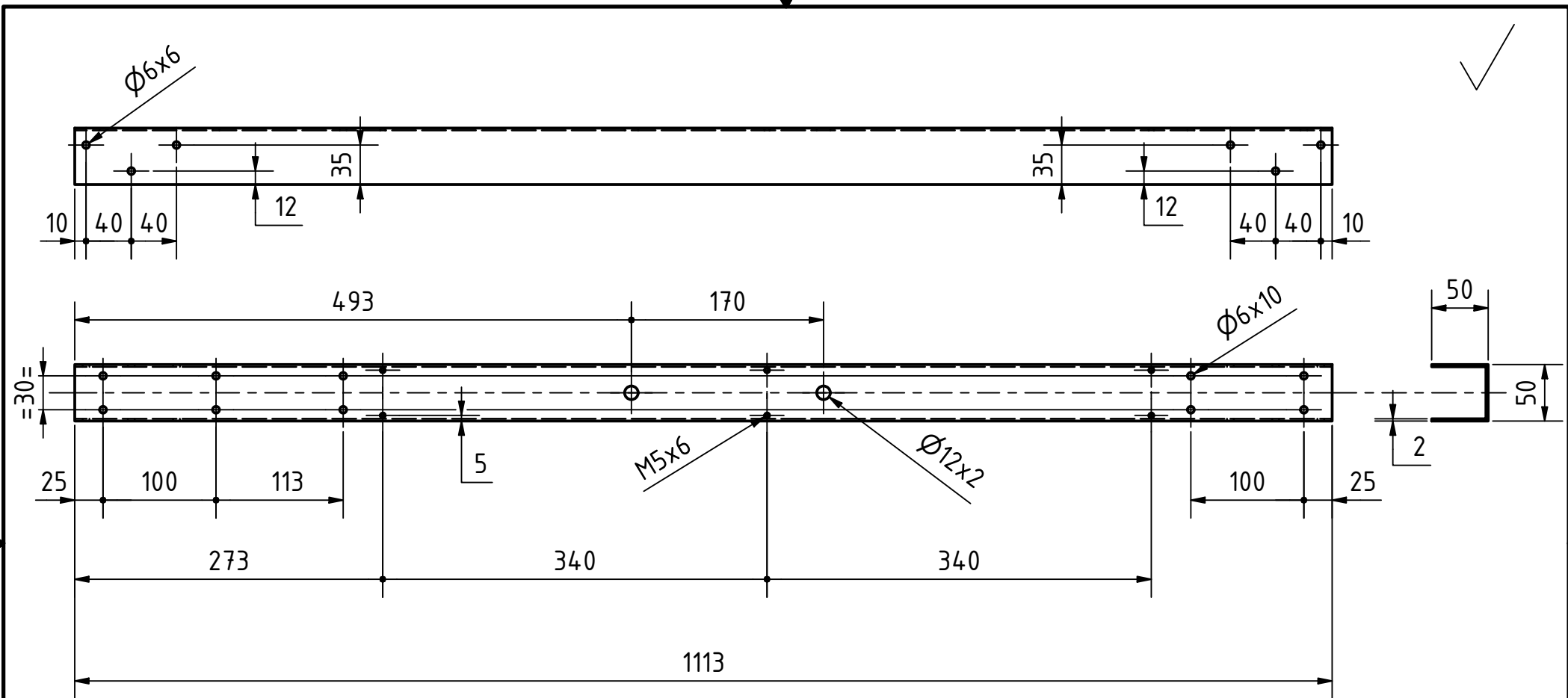


LISTA DELOVA

pozicija	Količina	Naziv
1	1	Donja horizontala
2	9	L profil spojnica
3	4	L profil oslonac
4	3	Vertikalna 2
5	18	DIN 126 - 6.6
6	10	DIN 126 - 5.5
7	14	DIN 439 - M6
8	3	DIN 439 - M5
9	2	DIN 720 - 32302 - 15 x 42 x 18.25
10	2	Veza remenice i ležaja
11	2	Kučiste ležaja
12	1	Gornja horizontala
13	2	DIN EN 24017 M8x20.1
14	33	ISO 4035 - M6
15	6	ISO 4035 - M5
16	4	Bočni graničnik
17	1	Nosač motora deo 1
18	1	Nosač motora deo 2
19	4	Navojna šipka - motor
20	1	Koračni motor
21	2	JIS B 1177 Cup Point - M6 x 20
22	1	Element za vezu gornje horizontale
23	104	DIN 125 - A 6.4
24	4	ISO 4017 - M6 x 16
25	13	DIN 125 - A 5.3
26	30	ISO 4017 - M6 x 12
27	12	ISO 4017 - M5 x 10
28	14	ISO 4017 - M6 x 60
29	12	KS B 1023 - A M 5 x 12 - Z
30	2	L profil uži
31	1	Vertikalna 1
32	1	Nepomična čeljust
33	1	Ploča 1
34	1	Ploča 2
35	1	DIN 125 - A 21
36	4	ISO 4032 - M18
37	2	Navojna šipka - nosač linearnog ležaja
38	2	Kučiste linearnog ležaja
39	2	Ploča za podešavanje ose ležaja
40	2	Navojna šipka kraća
41	4	DIN 125 - A 10.5
42	6	DIN 125 - A 13
43	2	Washer JB/T 87-1994 1 15-63
44	10	ISO 4032 - M10
45	8	ISO 4017 - M5 x 25
46	1	Pokretna čeljust
47	8	ISO 4032 - M5
48	1	Dinamometar
50	1	Navojna šipka dinamometar
51	1	AS 1252 - M12
52	1	Element za blokadu obrtanja
53	1	Prenosnik
54	2	AS 1427 - M5 x 8
55	4	PN-86/M-82208 - M 5 x 8 H
56	1	Navojno vreteno sa spojnicom
57	1	Epruveta 200mm
58	2	Čaura za stezanje epruvete
59	1	Blotirač
60	2	ISO 7045 - M3 x 6 - 4.8 - Z
61	2	AS 1427 - M3.5 x 5
62	1	Nosač pomičnog kljunastog merila
63	4	AS 1427 - M6 x 8
64	1	Pomično kljunasto merilo
65	2	AS 1427 - M4 x 8
66	1	Pokretni element
67	1	Reper
68	1	L profil upravljačka jedinica
69	1	Upravljačka jedinica
70	4	Odstožnik
71	2	Nosač senzora položaja
72	4	AS 1427 - M6 x 35
73	2	Senzor položaja

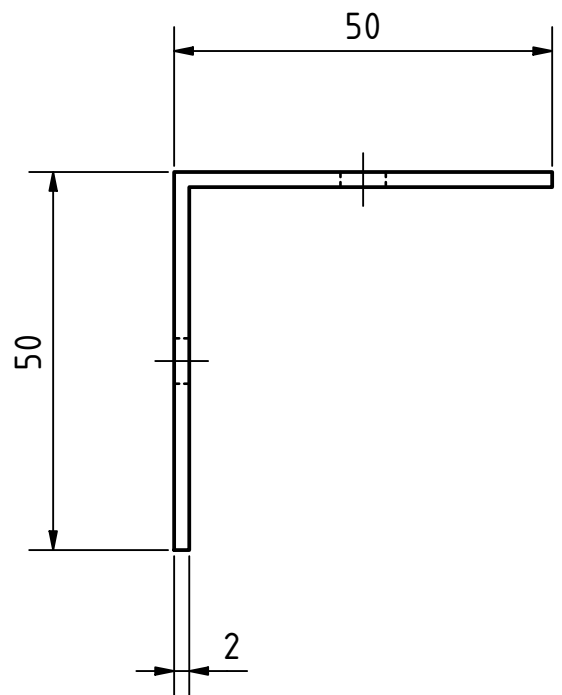
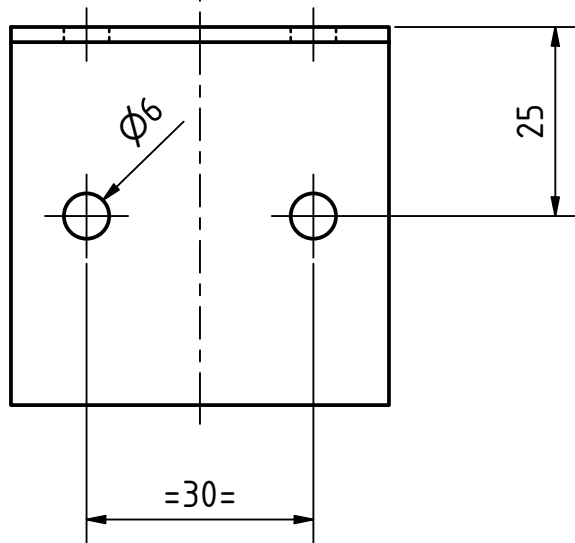
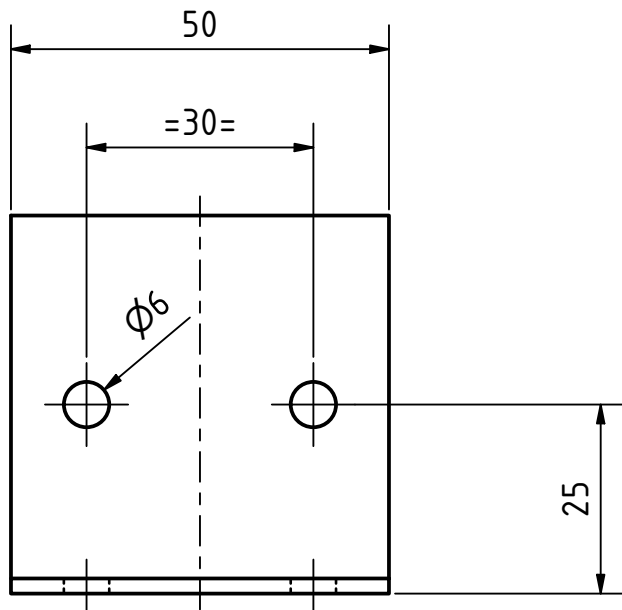


Komada: 1		Razmera: 1 : 2	
Ime	Titul	Ime	Titul
Dizajnirao	Projezio	Projezio	Projezio
Čekovao	Stručni Tajnik		
Crtao			
Fakultet inženjerskih nauka		Kidalica	
Stran	Ukupno	Šifra	Šifra



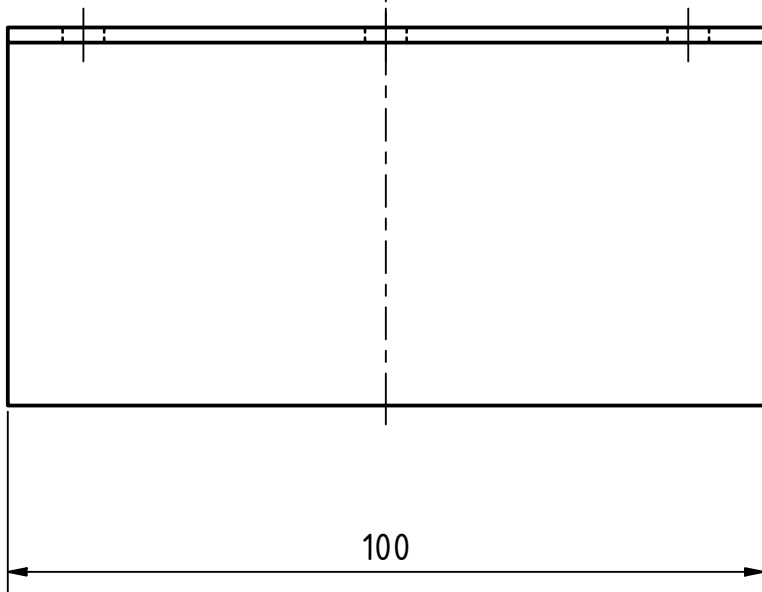
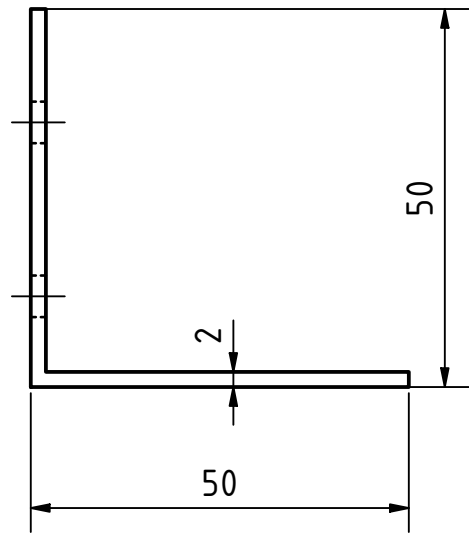
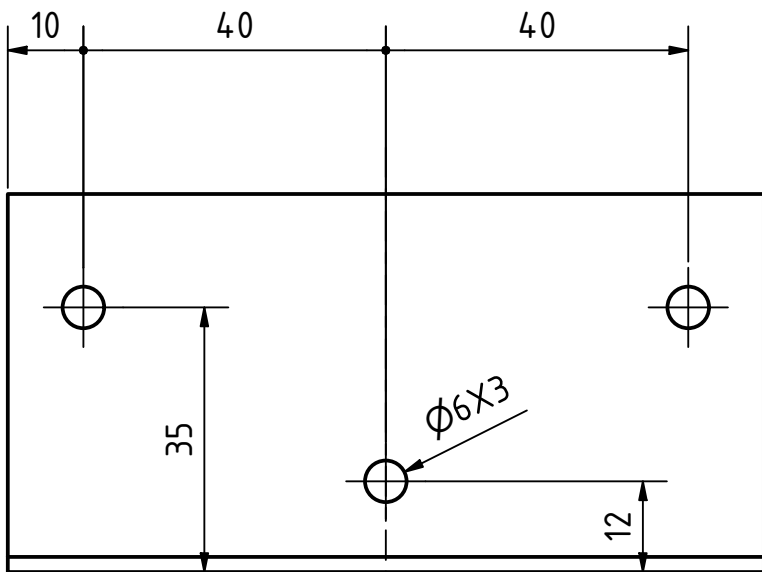
Napomena: Sve oštre ivice oboriti 0.5mm

		Materijal: AL		Razmera: 1 : 5	
		Komada: 1			
				<h1>Pozicija 1</h1>	
				<h2>Donja horizontala</h2>	
				1	
				A4	
State	Changes	Date	Name		



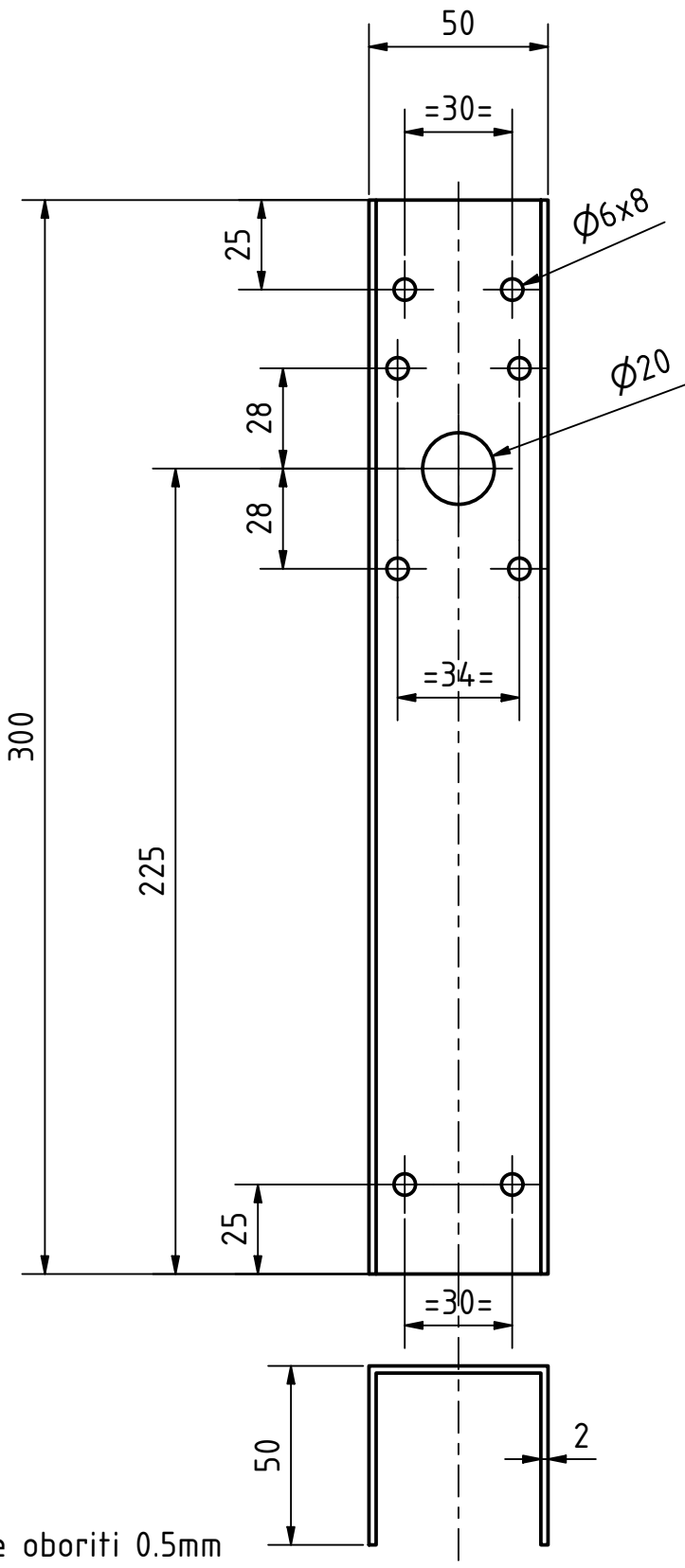
Napomena: Sve oštne ivice oboriti 0.5mm

			Materijal: AL		Razmera: 1 : 1	
			Komada: 9			
			Date	Name		
			Drawn	Vladimir Kočović		
			Checked	Branko Tadić		
			Standard			
					<h1>Pozicija 2</h1>	
					L profil spojnica	
					1	
					A4	
State	Changes	Date	Name			



Napomena: Sve oštne ivice oboriti 0.5mm

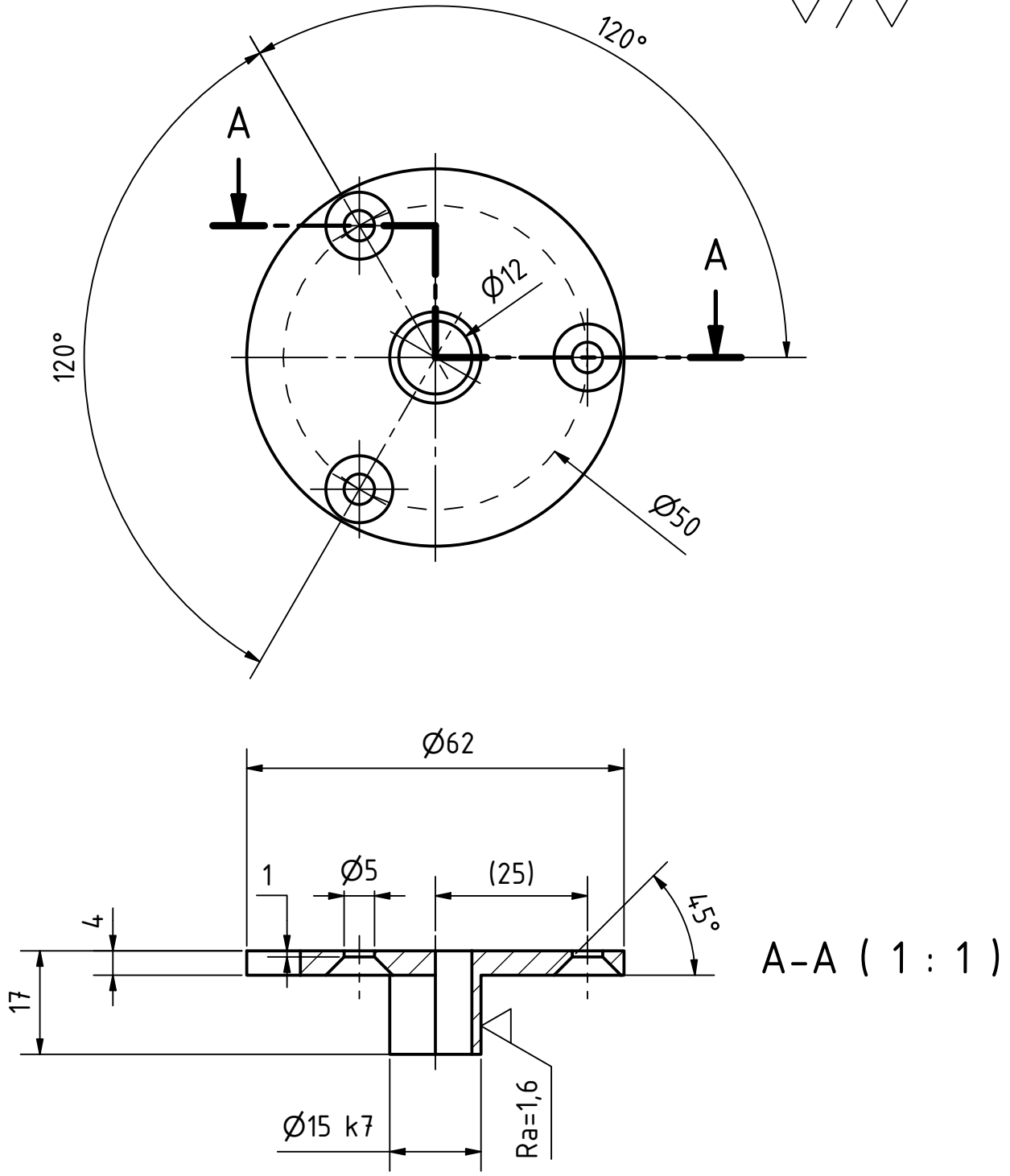
				Materijal: AL		Razmera 1 : 1	
				Komada: 4			
				Date	Name	<h1>Pozicija 3</h1>	
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
				L profil oslonac			1
							A4
Stafa	Changes	Date	Name				



Napomena:
Sve oštre ivice oboriti 0.5mm

				Materijal: AL		Razmera 1 : 2	
				Komada: 3			
				Date	Name	<h1>Pozicija 4</h1>	
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
				Vertikalna 2			1
							A4
Stafa	Changes	Date	Name				

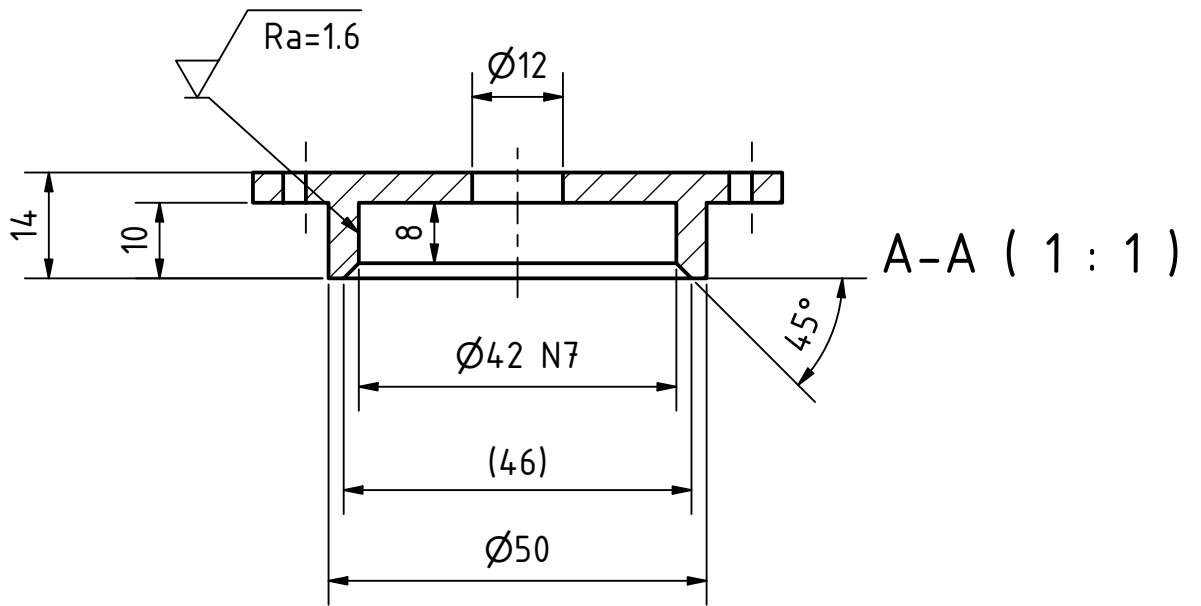
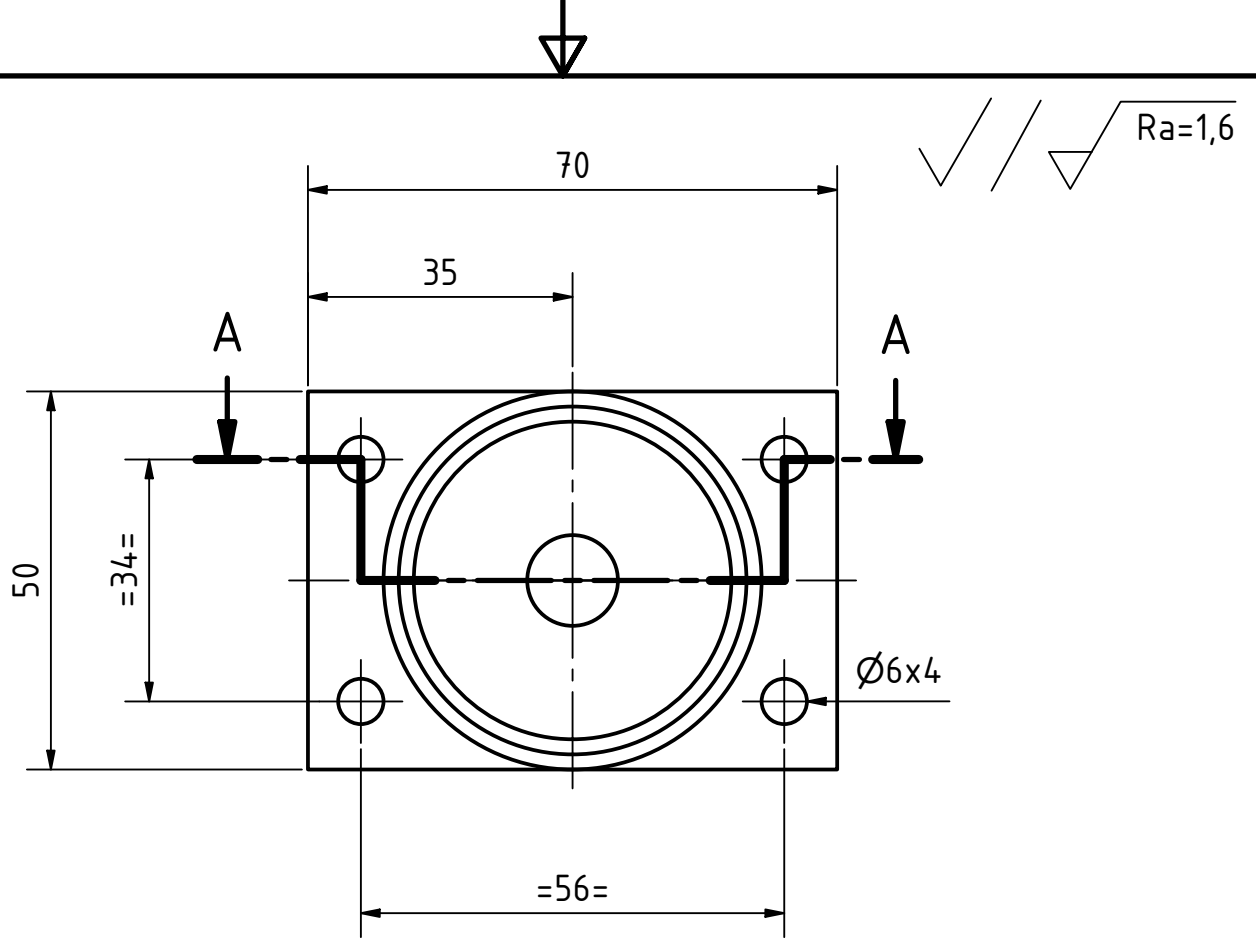
✓/✓ Ra=1,6



A-A (1 : 1)

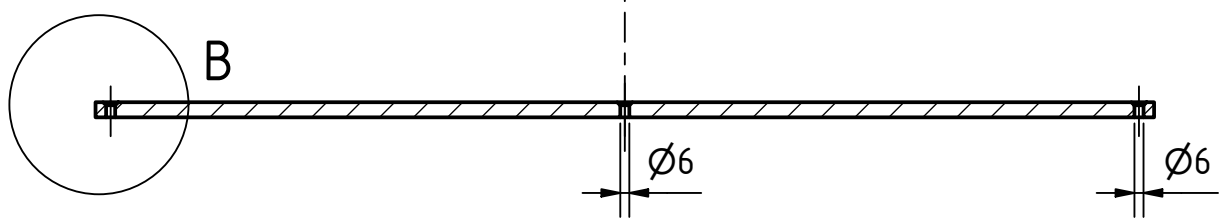
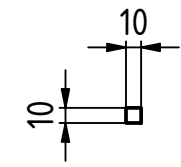
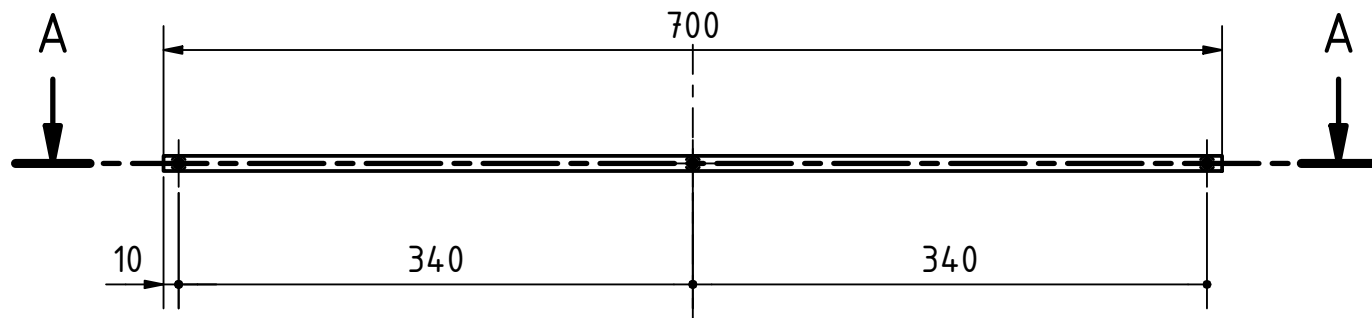
Napomena: Sve oštne ivice oboriti 0.5mm

				Materijal: Č		Razmera: 1 : 1	
				Komada: 2			
				Date	Name	<h1>Pozicija 10</h1>	
			Drawn		Vladimir Kočović		
			Checked		Branko Tadić		
			Standard				
				Veza remenice i ležaja			1
							A4
Stafe	Changes	Date	Name				



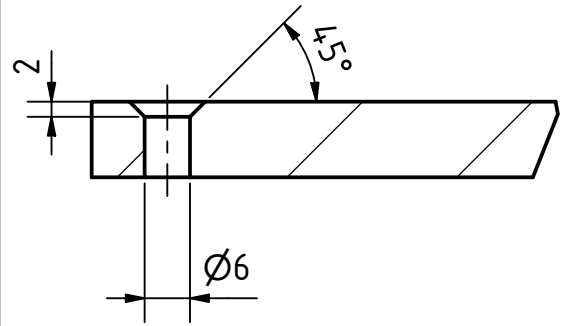
Napomena: Sve oštre ivice oboriti 0.5mm

				Materijal: Č		Razmera 1 : 1	
				Komada: 2			
				Date	Name	<h1>Pozicija 11</h1>	
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
				Kućište ležaja			1
							A4
Stafa	Changes	Date	Name				



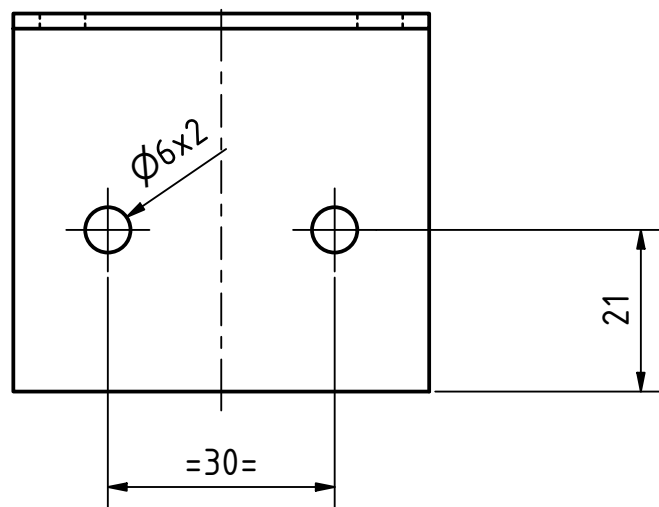
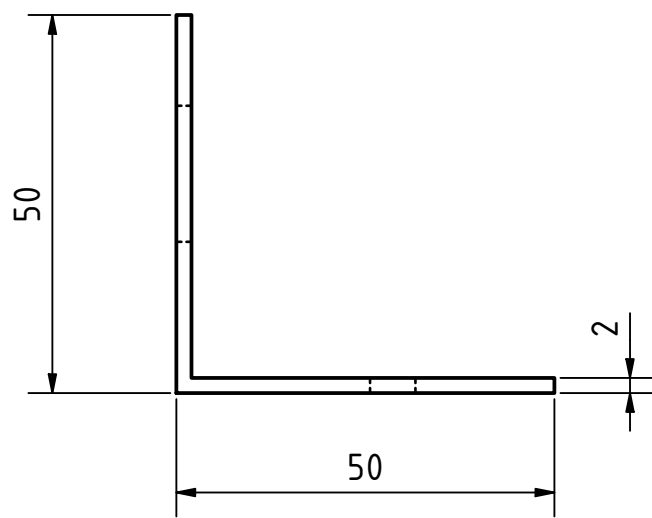
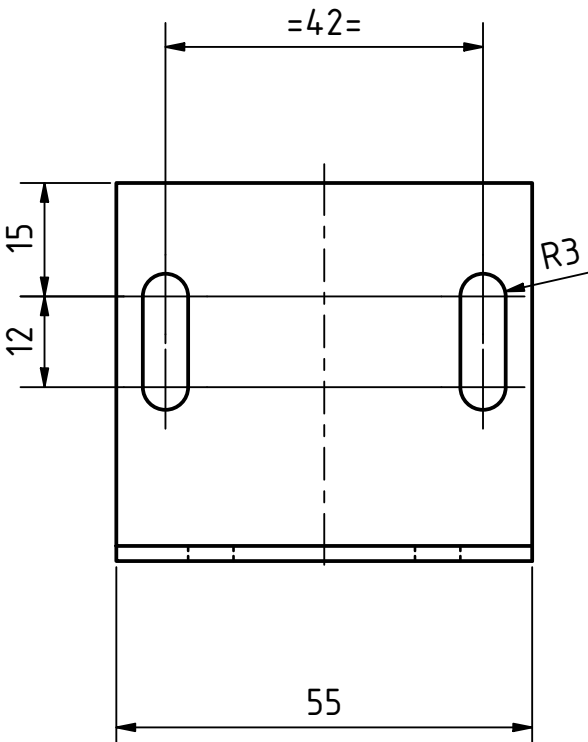
A-A (1 : 5)

B (1 : 1)



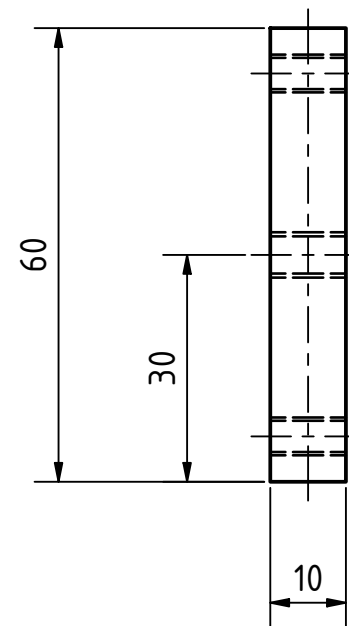
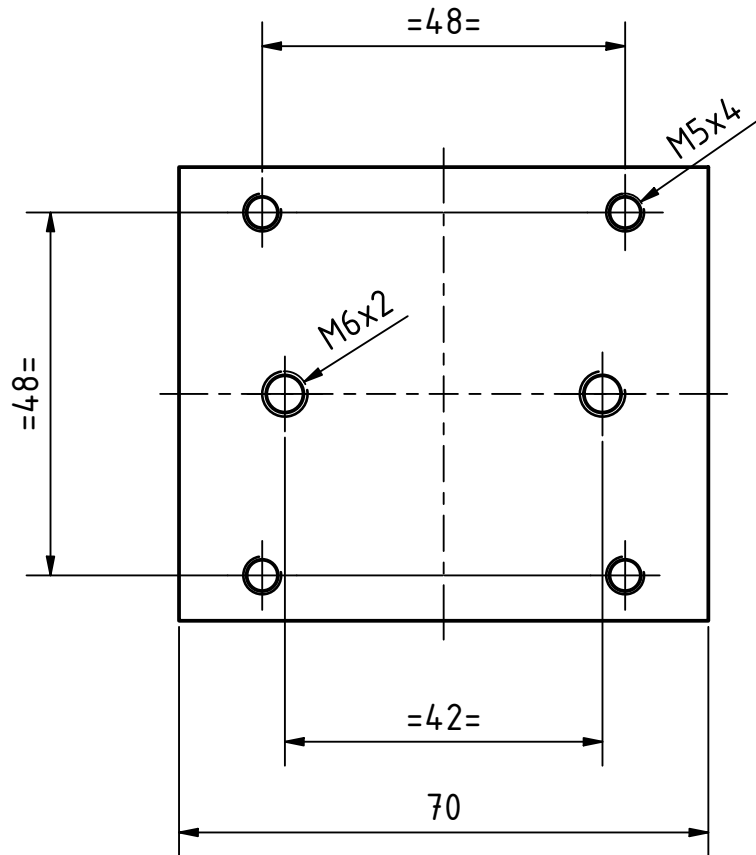
				Materijal: AL		Razmera 1 : 5		
				Komada: 4				
				Date	Name			
				Drawn	Vladimir Kočović			
				Checked	Branko Tadić			
				Standard				
				<h1>Pozicija 16</h1>				
				Bočni graničnik				1
								A4
State	Changes	Date	Name					





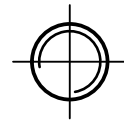
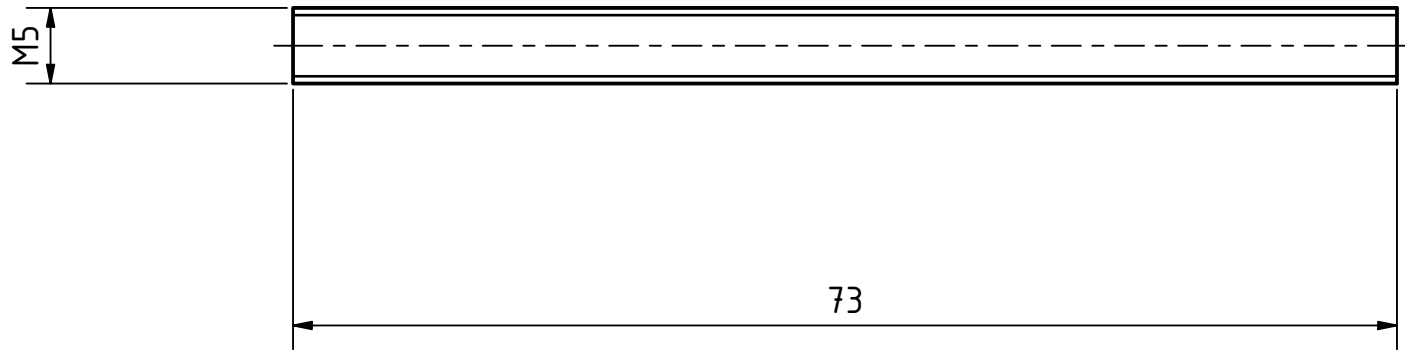
Napomena: Sve oštre ivice oboriti 0.5mm

				Materijal: AL		Razmera 1 : 1	
				Komada: 1			
				Date	Name	<h1>Pozicija 17</h1>	
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
				Nosач motora deo 1			1
							A4
State	Changes	Date	Name				



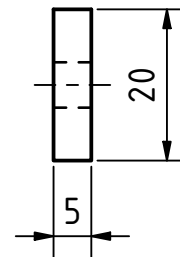
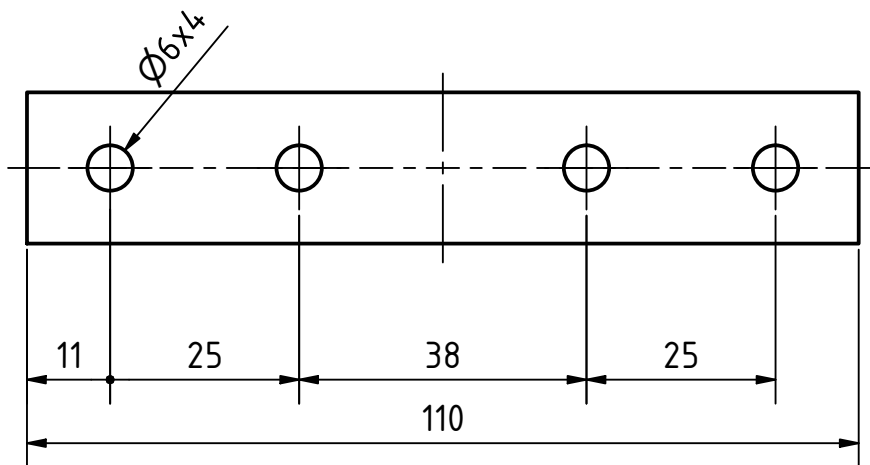
Napomena: Sve oštre ivice oboriti 0.5mm

				Materijal: AL		Razmera 1 : 1		
				Komada: 1				
				Date	Name			
				Drawn	Vladimir Kočović			
				Checked	Branko Tadić			
				Standard				
				Pozicija: 18				
				Nosač motora deo 2				1
								A4
State	Changes	Date	Name					



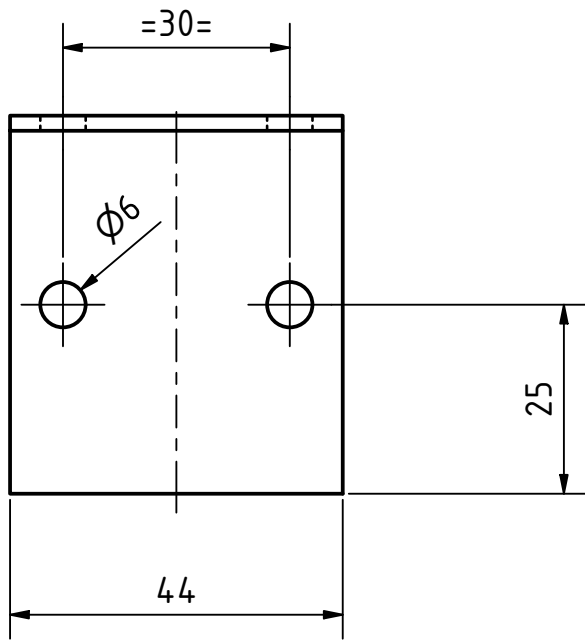
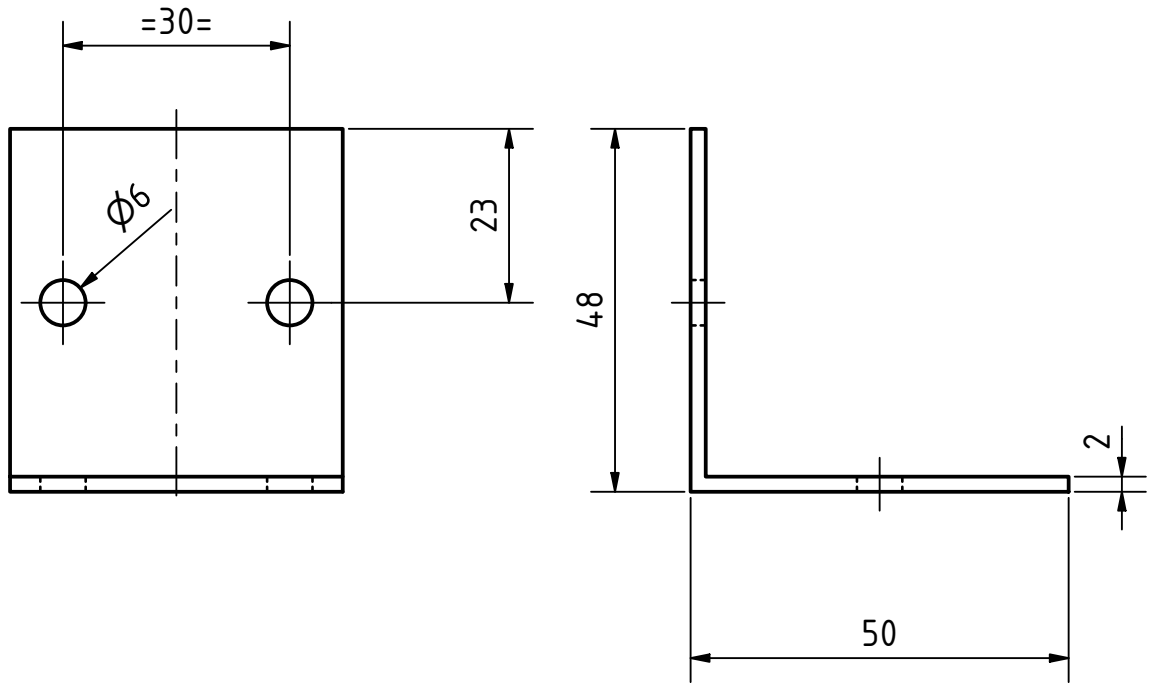
				Materijal: Č		Razmera 2 : 1	
				Komada: 4			
				Date	Name		
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
				<h1>Pozicija 19</h1>			
				Navojna šipka - motor			
				1			
				A4			
State	Changes	Date	Name				





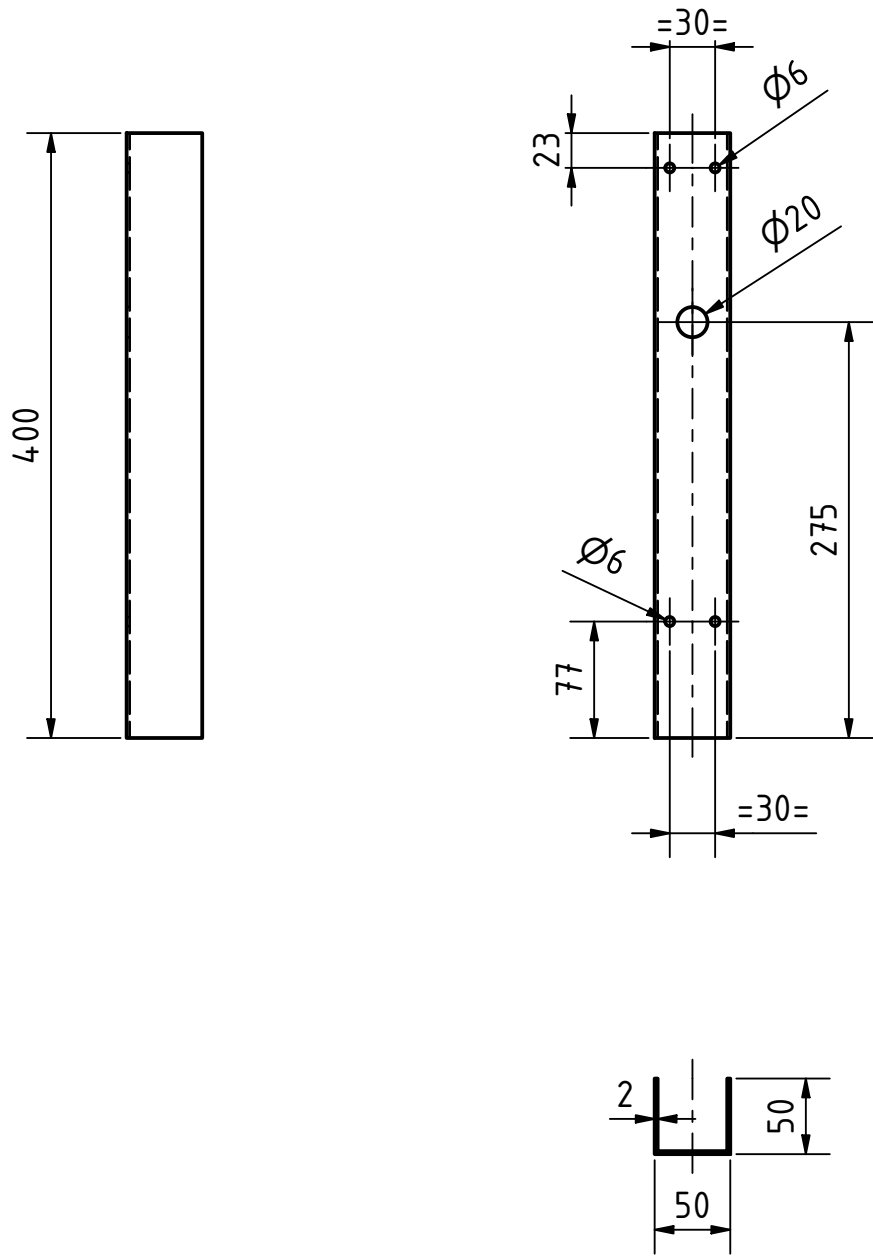
Napomena: Sve oštre ivice oboriti 0.5mm

				Materijal: Č		Razmera: 1 : 1	
				Komada: 1			
				Date	Name		
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
				<h1>Pozicija 22</h1>			
				Element za vezu g. h.			
				1			
				A4			
State	Changes	Date	Name				



Napomena: Sve oštre ivice oboriti 0.5mm

				Materijal: AL		Razmera 1 : 1	
				Komada: 4			
				Date	Name	<h1>Pozicija 30</h1>	
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
				L profil uži			1
							A4
State	Changes	Date	Name				



Napomena: Sve oštre ivice oboriti 0.5mm

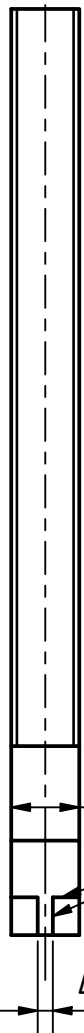
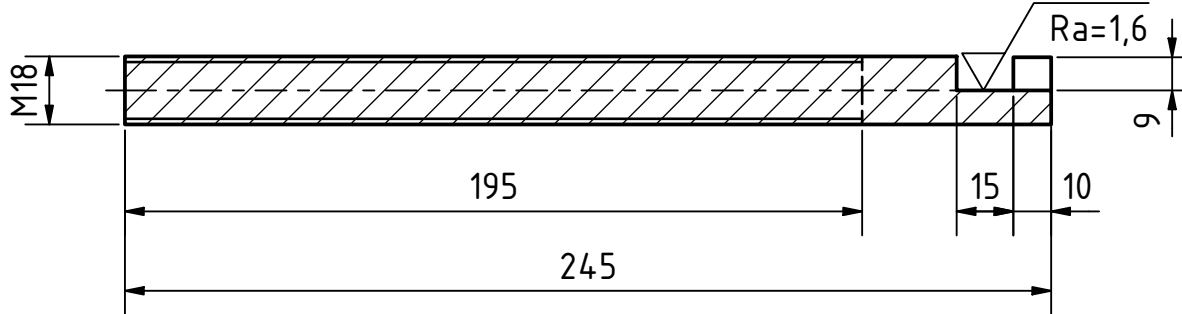
				Materijal: AL		Razmera 1 : 5	
				Komada: 1			
				Date	Name	<h1>Pozicija 31</h1>	
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
				Vertikalna 1			1
							A4
State	Changes	Date	Name				

A

A

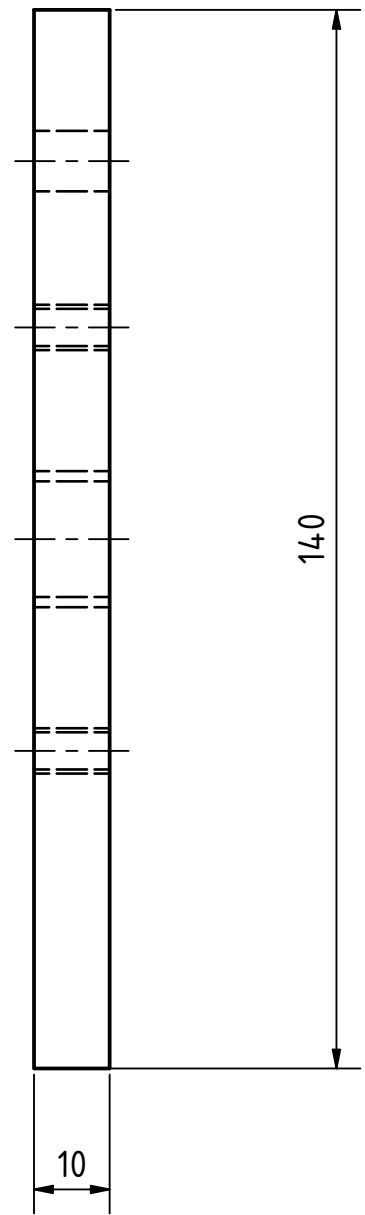
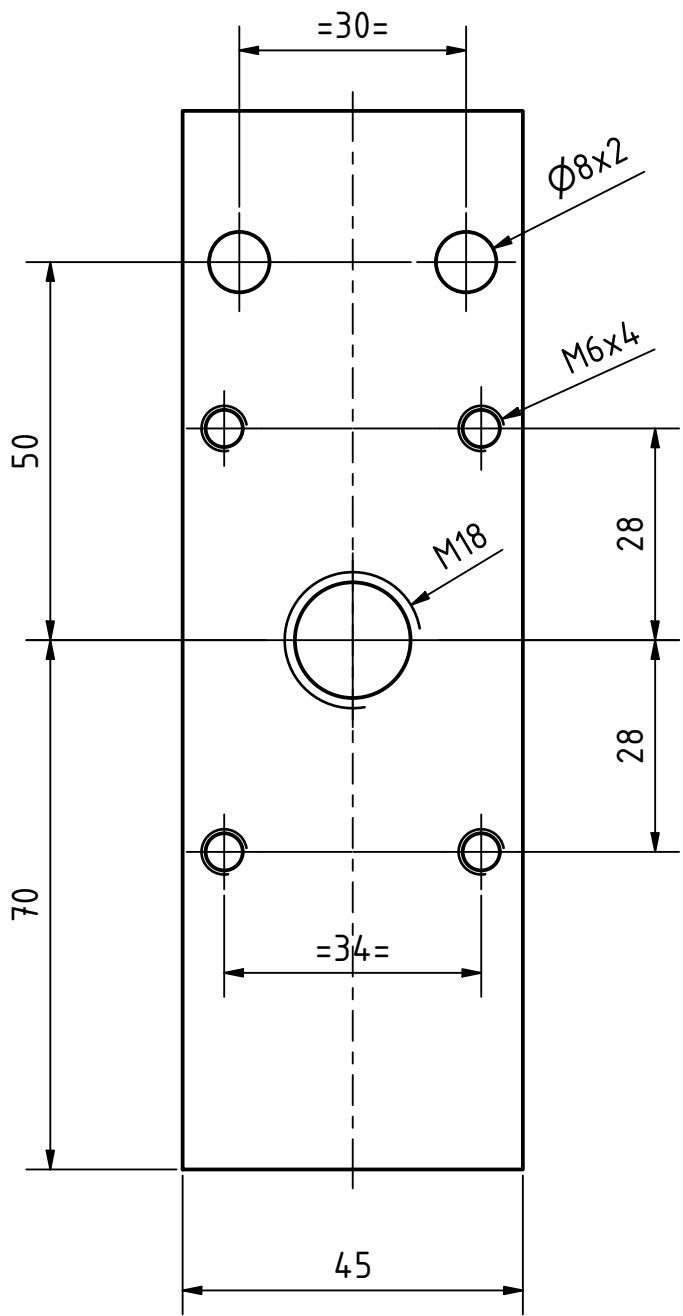
A-A (1 : 2)

✓ / ✓ / ✓ Ra=1,6



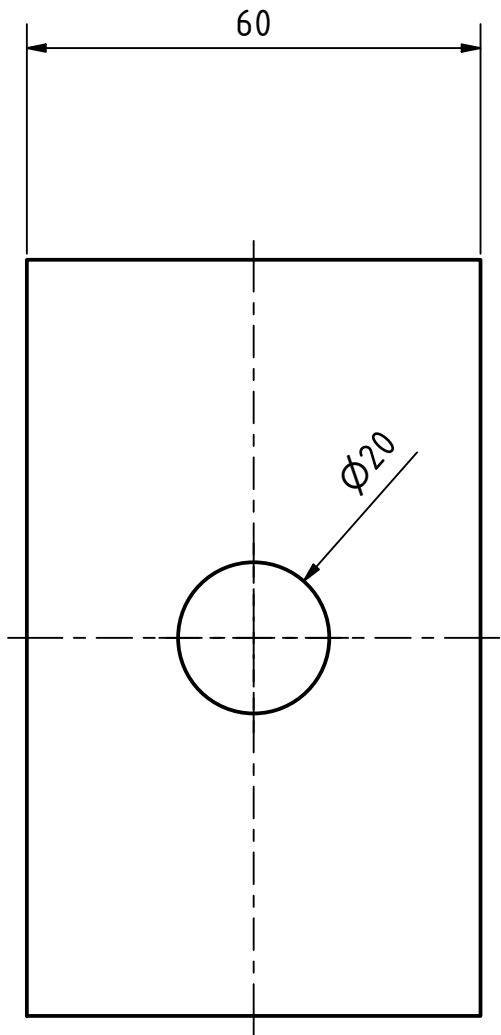
Napomena: Sve oštre ivice oboriti 0.5mm

				Materijal: Č		Razmera 1 : 2	
				Komada: 1			
				Date	Name		
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
				Pozicija 32			
				Nepomična čeljust			
				1			
				A4			
State	Changes	Date	Name				



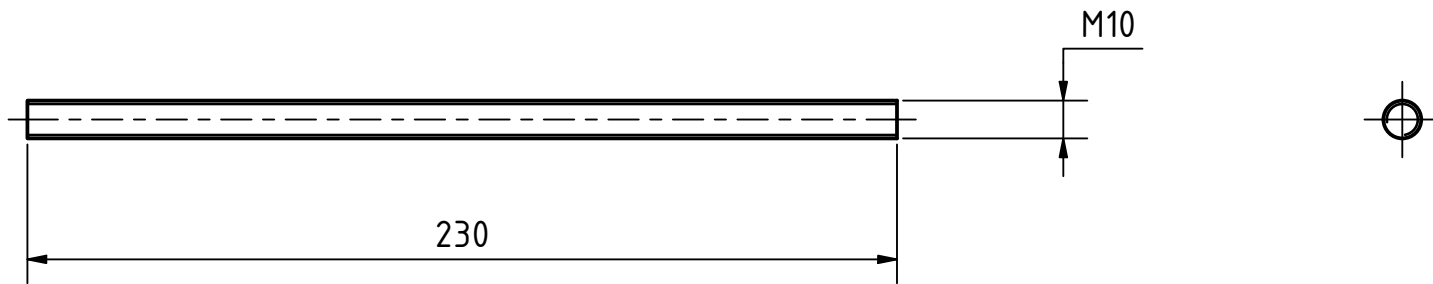
Napomena: Sve oštre ivice oboriti 0.5mm

				Materijal: Č		Razmera 1 : 1		
				Komada: 1				
				Date	Name	Pozicija 33		
				Drawn	Vladimir Kočović			
				Checked	Branko Tadić			
				Standard				
				Ploča 1				1
								A4
Stafa	Changes	Date	Name					



Napomena: Sve oštre ivice oboriti 0.5mm

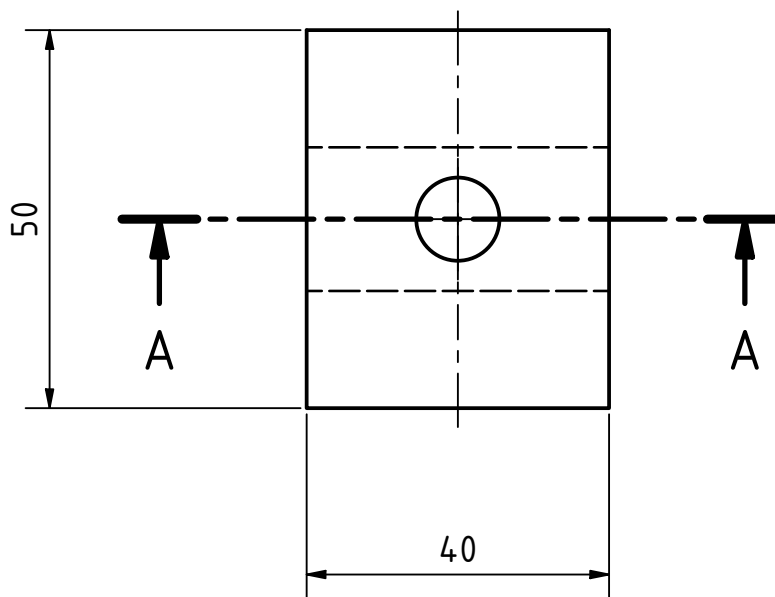
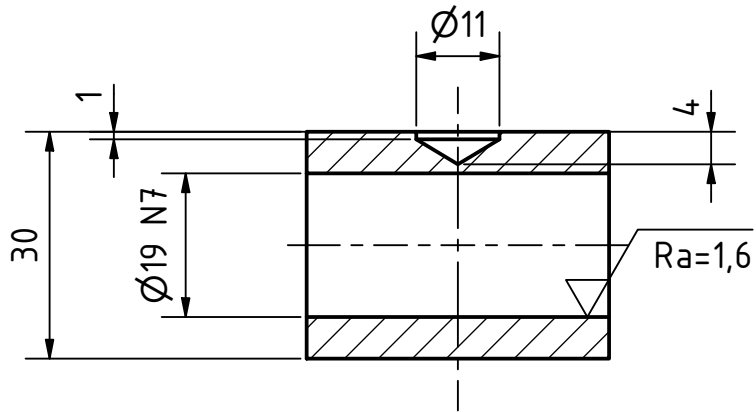
				Materijal: Č		Razmera 1 : 1	
				Komada: 1			
				Date	Name	Pozicija 34	
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
				Ploča 2			1
							A4
Stafa	Changes	Date	Name				



				Materijal: Č		Razmera 1 : 2	
				Komada: 2			
				Date	Name	<h1>Pozicija 37</h1>	
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
						Navojna šipka nosač l. 1	
State	Changes	Date	Name				

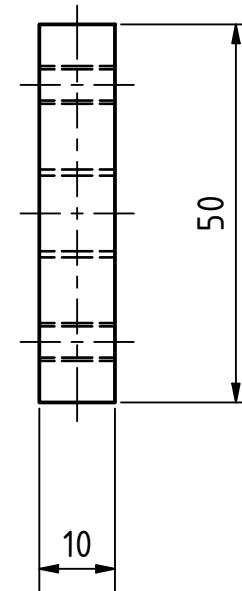
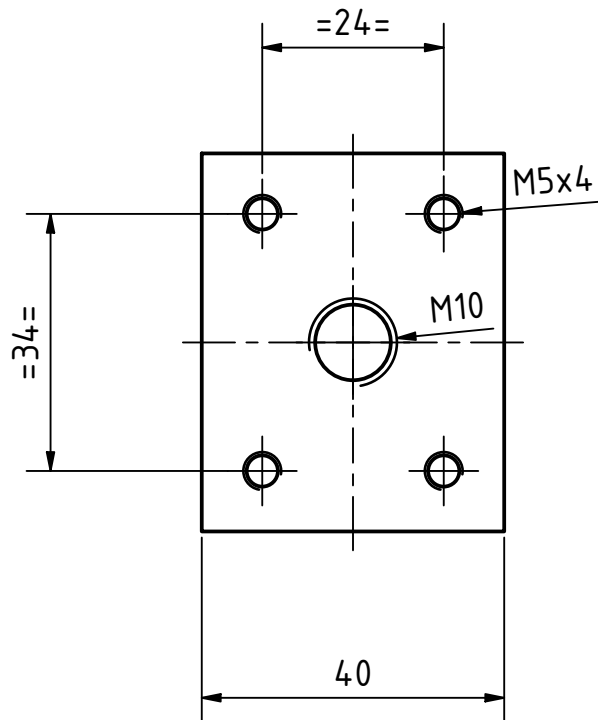
✓ Ra=1,6

A-A (1 : 1)



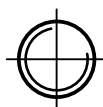
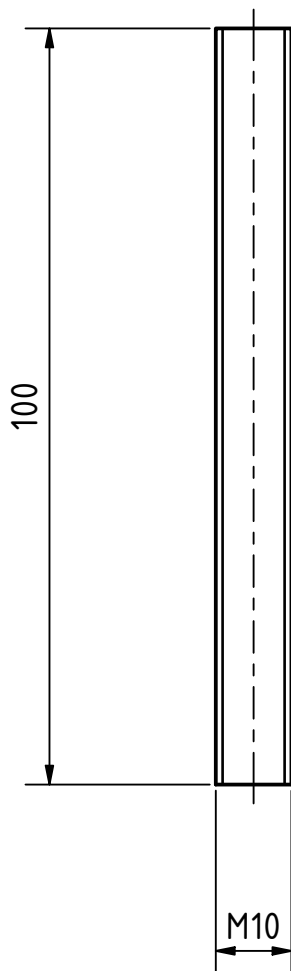
Napomena: Sve oštne ivice oboriti 0.5mm

			Materijal: AL		Razmera 1 : 1	
			Komada: 2			
			Date	Name	Pozicija: 38	
			Drawn	Vladimir Kočović		
			Checked	Branko Tadić		
			Standard			
			Kućište linearnog ležaja			1
						A4
Stafe	Changes	Date	Name			



Napomena: Sve oštre ivice oboriti 0.5mm

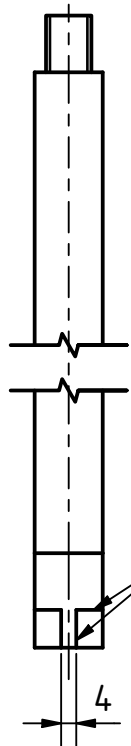
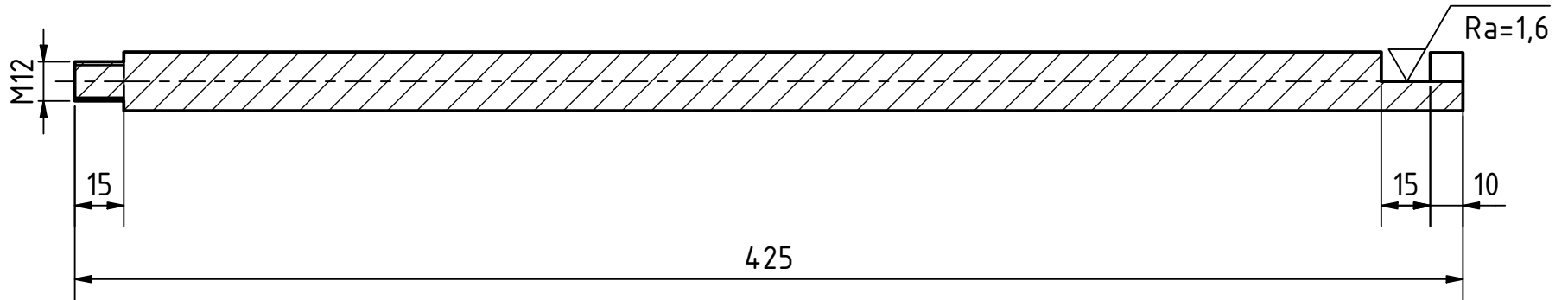
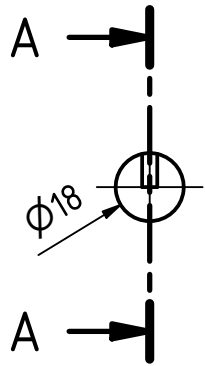
				Materijal: Č		Razmera 1 : 1	
				Komada: 2			
				Date	Name		
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
				Pozicija 39			
				Ploča za podešavanje o.			
				1			
				A4			
State	Changes	Date	Name				



				Materijal: Č		Razmera 1 : 1	
				Komada: 2			
				Date	Name	Pozicija 40	
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
						Navojna šipka kraća	
						1	A4
Stafa	Changes	Date	Name				

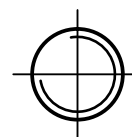
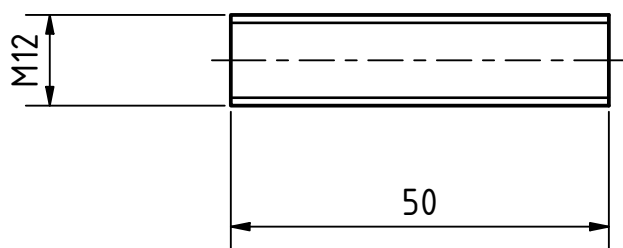
✓ / ✓ / ✓ Ra=1,6

A-A (1 : 2)



Napomena: Sve oštre ivice oboriti 0.5mm

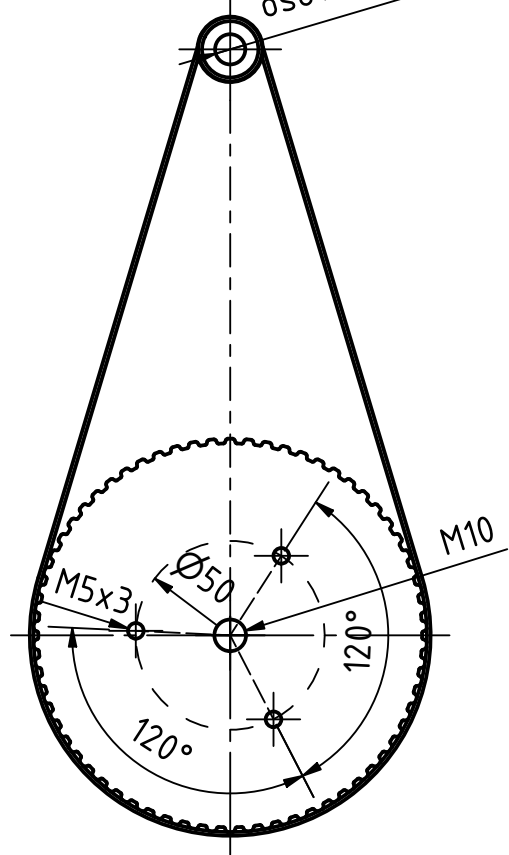
				Materijal: Č		Razmera 1 : 2	
				Komada: 1			
				Date	Name		
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
				Pozicija 46			
				Pokretna čeljust			
				1			
				A4			
State	Changes	Date	Name				



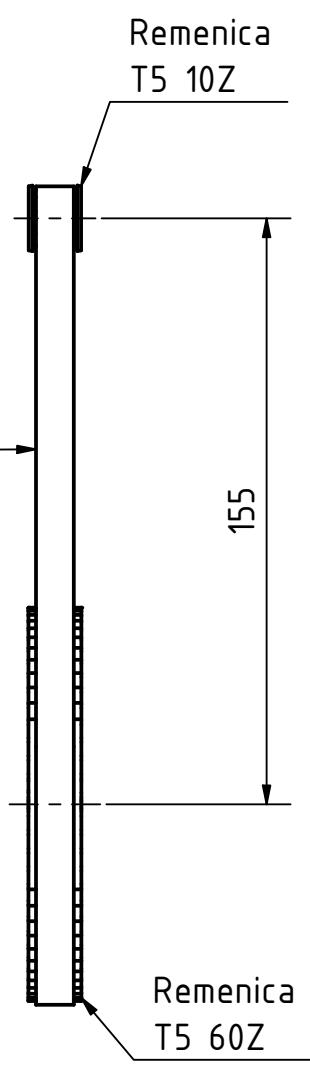
				Materijal: Č		Razmera 1 : 1	
				Komada: 1			
				Date	Name	Pozicija 50	
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
						Navojna šipka dinamom.	
						1	A4
State	Changes	Date	Name				



Čvrsto naleganje sa
osovinom koračnog motora



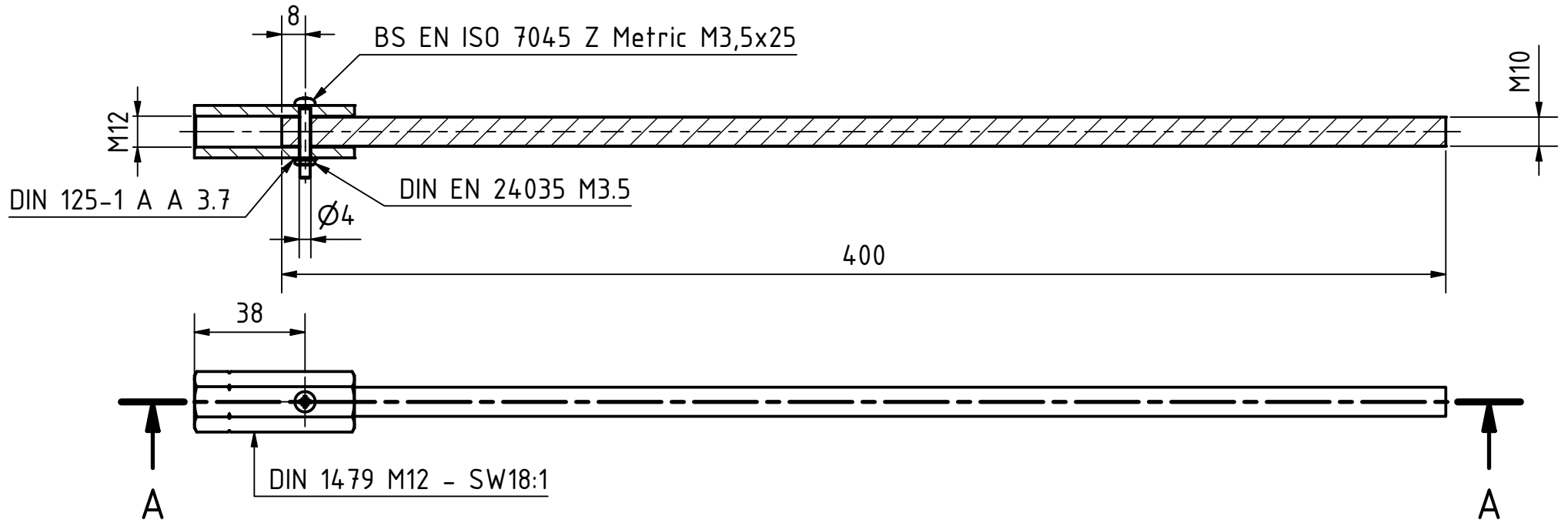
Remen T5 10mm



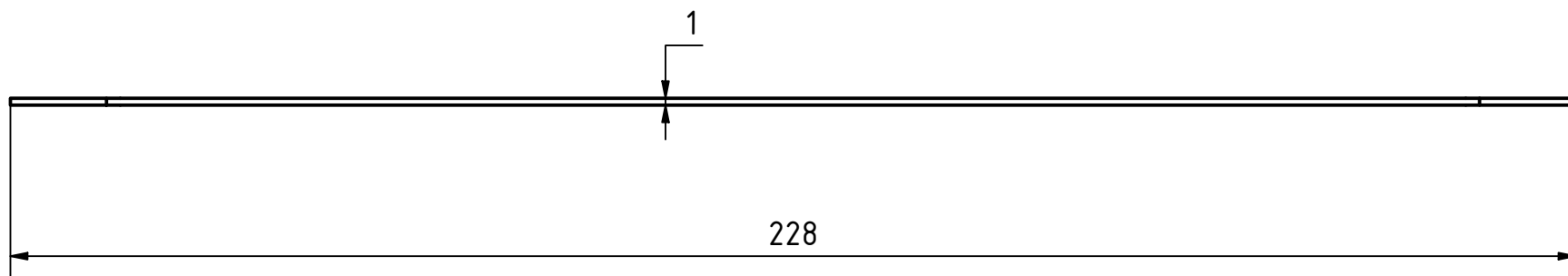
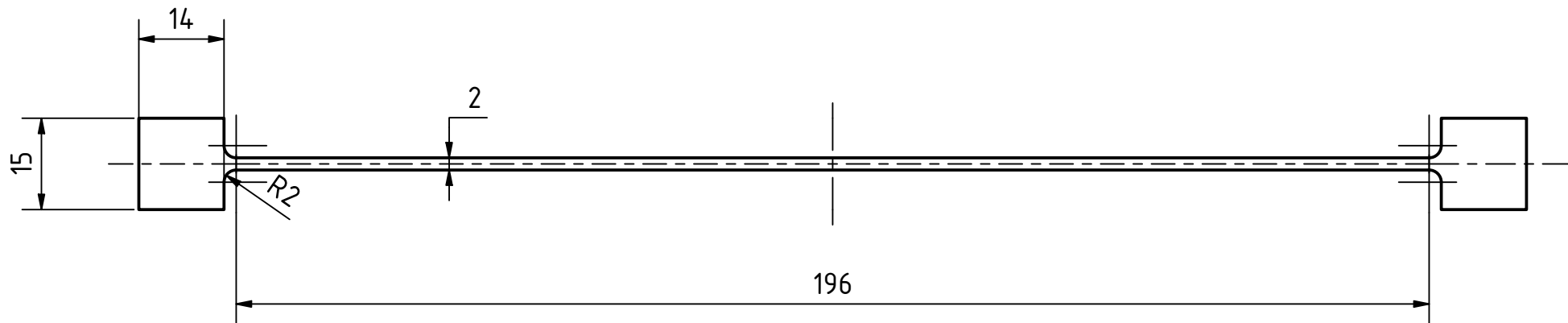
Napomena: Navoji M5 i M10 su prolazni

						Razmera 1 : 2	
						Komada: 1	
				Date	Name	<h1>Pozicija 53</h1>	
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
						Prenosnik	
						1	
						A4	
State	Changes	Date	Name				

A-A (1 : 2)

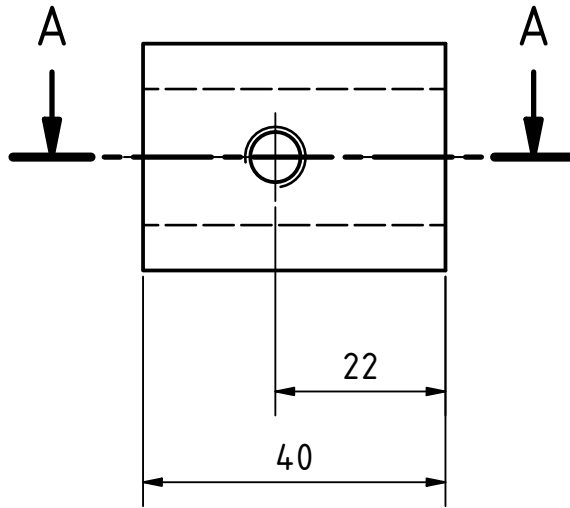


						Razmera 1 : 2	
						Komada: 1	
				Date	Name	Pozicija 56	
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
						Navojno vreteno sa spoj.	
						1	A4
State	Changes	Date	Name				

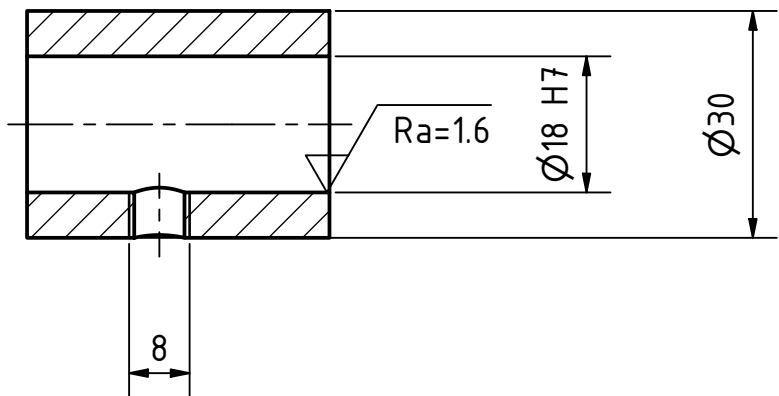


						Razmera: 1 : 1	
						<h1>Pozicija 57</h1>	
				Date	Name		
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
						Epruveta 200mm	
						1	
						A4	
State	Changes	Date	Name				

✓ / / ✓ Ra=1.6

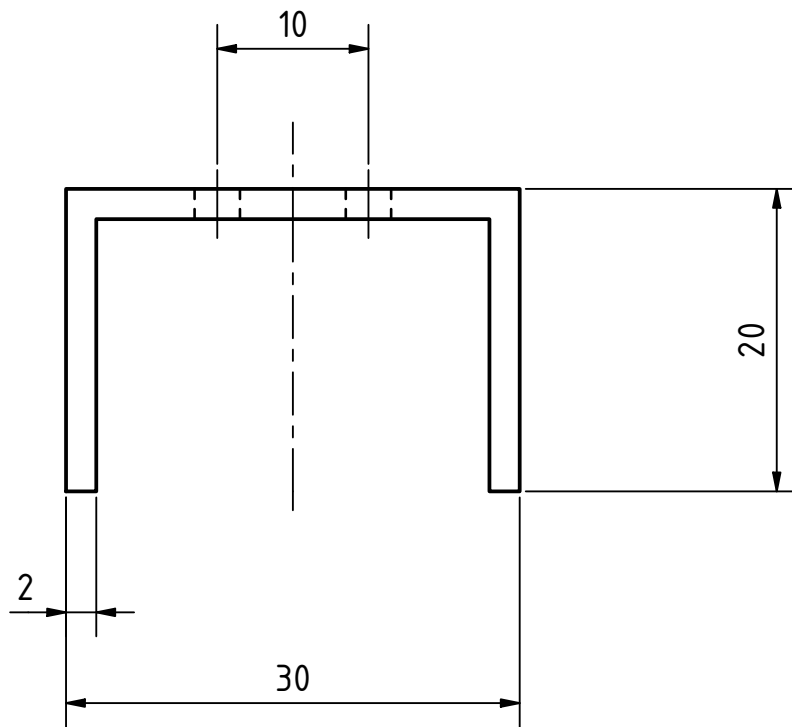
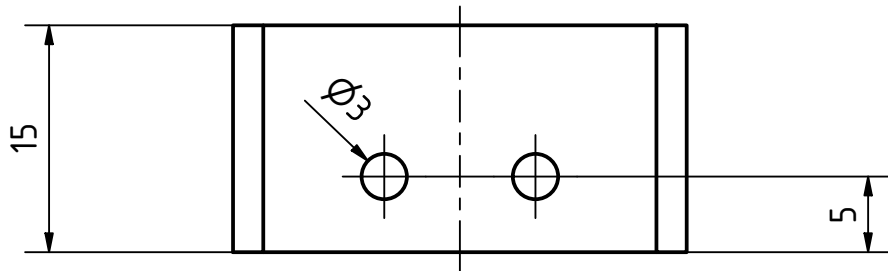


A-A (1 : 1)



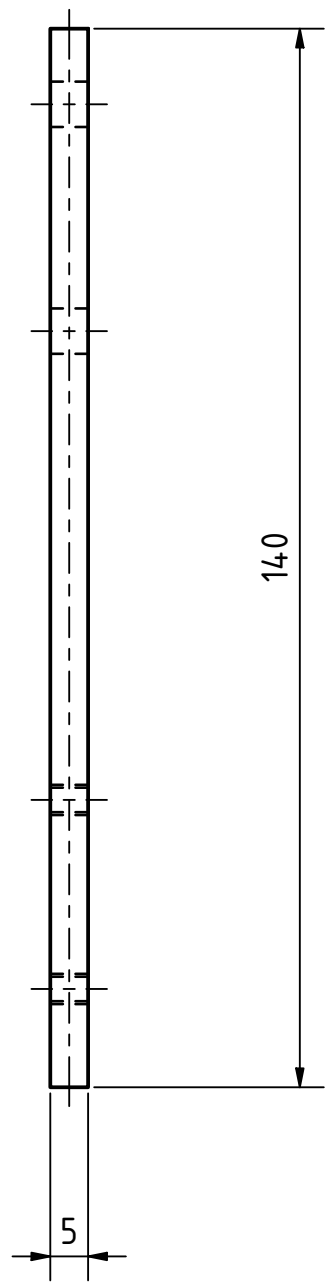
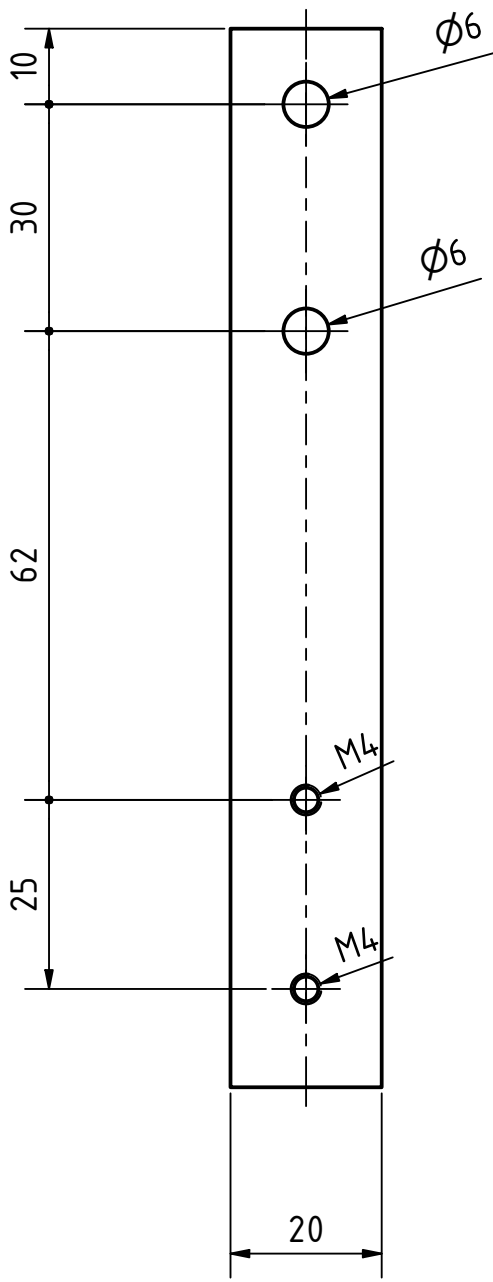
Napomena: Sve oštne ivice oboriti 0.5mm

				Materijal: Č		Razmera 1 : 1	
				Komada: 2			
				Date	Name	<h1>Pozicija 58</h1>	
			Drawn	Vladimir Kočović			
			Checked	Branko Tadić			
			Standard				
				Čaura za stezanje epruvete			1 A4
State	Changes	Date	Name				



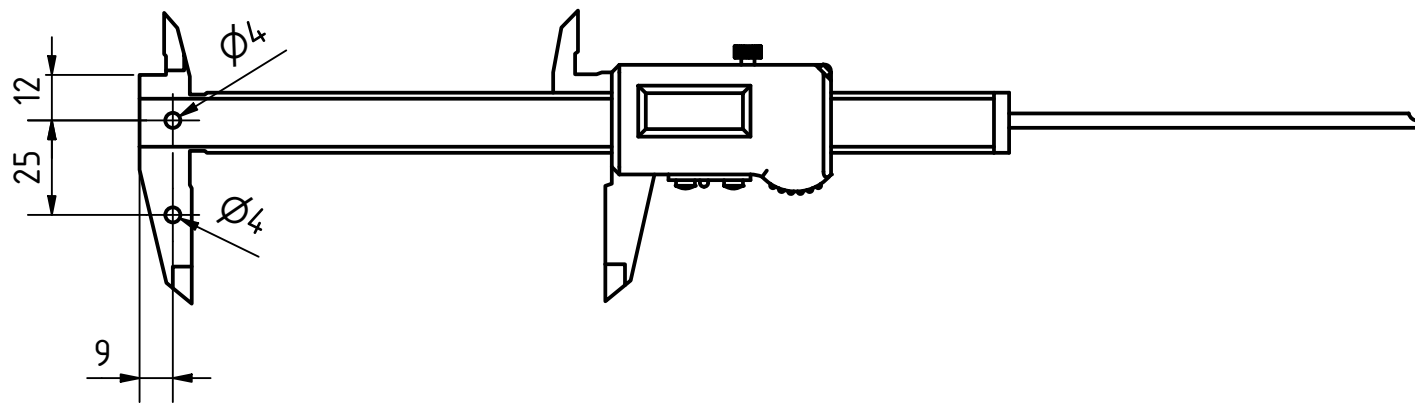
Napomena: Sve oštre ivice oboriti 0.5mm

				Materijal: Č		Razmera 2 : 1	
				Komada: 1			
				Date	Name	<h1>Pozicija 59</h1>	
			Drawn	Vladimir Kočović			
			Checked	Branko Tadić			
			Standard				
				Blokirač			1
							A4
State	Changes	Date	Name				



Napomena: Sve oštne ivice oboriti 0.5mm

				Materijal: AL		Razmera 1 : 1	
				Komada: 1			
				Date	Name	<h1>Pozicija 62</h1>	
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
				<h2>Nosač p. k. merila</h2>			
State	Changes	Date	Name				

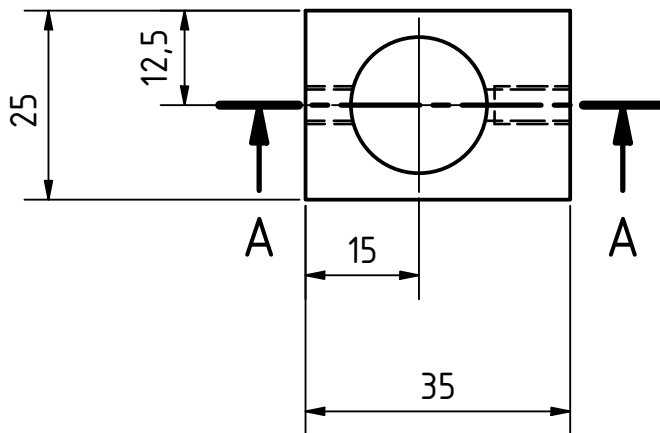
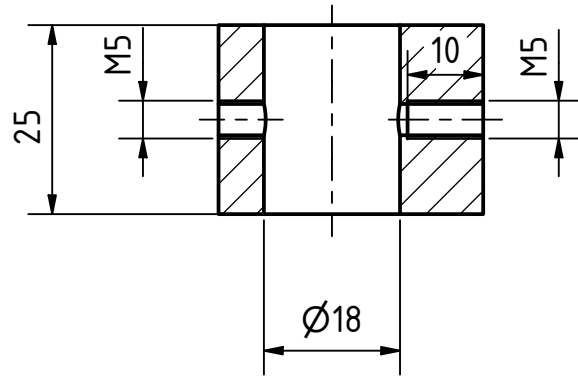


Napomena: Na pomičnom kljunastom merilu izbušiti rupe $\text{Ø}4$ prema dokumentaciji

						Razmera: 1 : 2	
						Komada: 1	
				Date	Name	Pozicija 64	
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
						Pomično kljunasto merilo	
						1	A4
State	Changes	Date	Name				

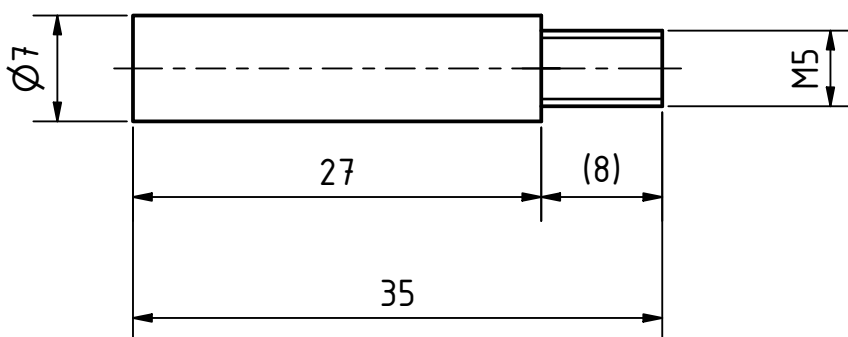
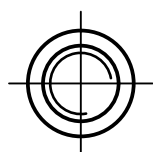


A-A (1 : 1)



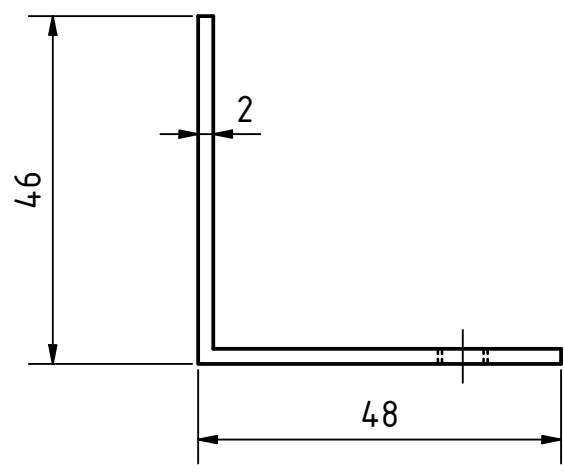
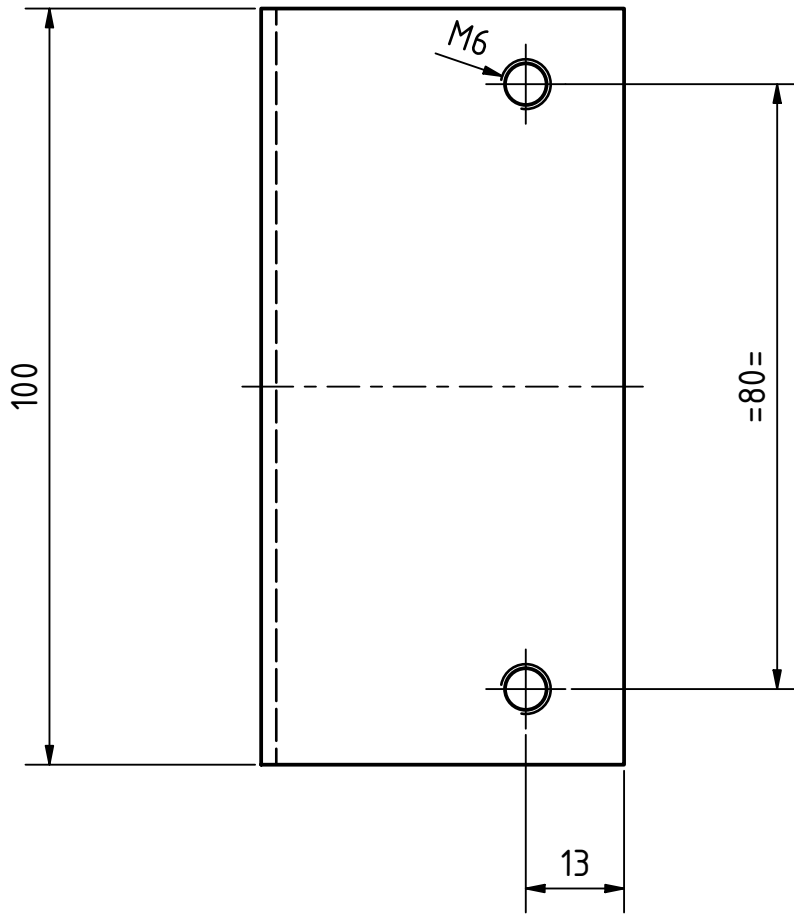
Napomena: Sve oštre ivice oboriti 0.5mm

				Materijal: AL		Razmera 1 : 1	
				Komada: 1			
				Date	Name	<h1>Pozicija 66</h1>	
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
				Pokretni element			1
							A4
Stafa	Changes	Date	Name				



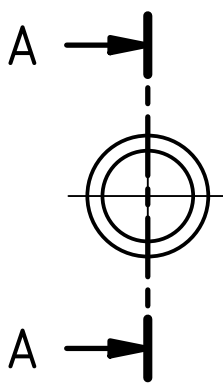
Napomena: Sve oštne ivice oboriti 0.5mm

				Materijal: AL		Razmera 2 : 1	
				Komada: 1			
				Date	Name	Pozicija 67	
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
						Reper	
						1	
						A4	
State	Changes	Date	Name				

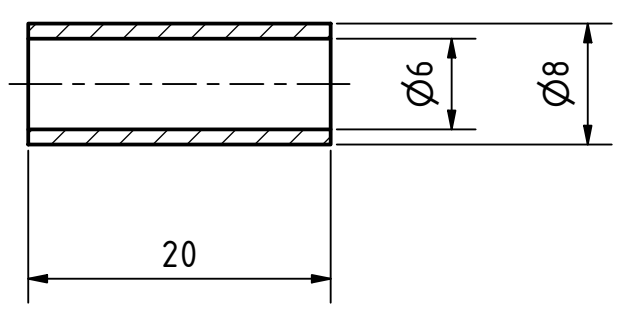


Napomena: Sve oštre ivice oboriti 0.5mm

				Materijal: AL		Razmera 1 : 1		
				Komada: 1				
				Date	Name	<h1>Pozicija 68</h1>		
				Drawn	Vladimir Kočović			
				Checked	Branko Tadić			
				Standard				
							L profil upravljačka j.	1
								A4
State	Changes	Date	Name					



A-A (2 : 1)

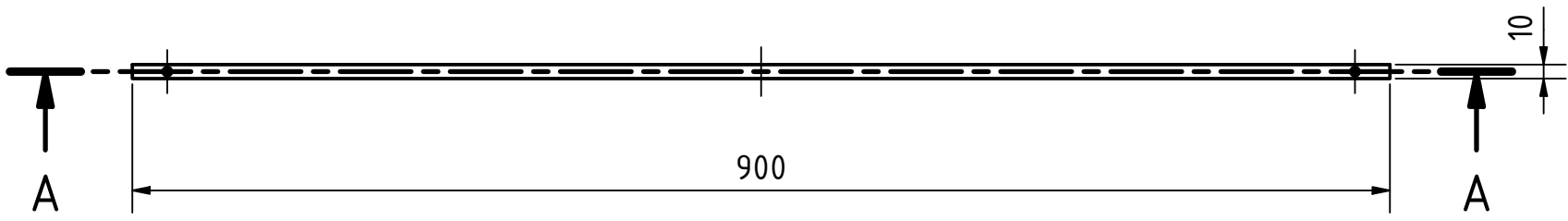
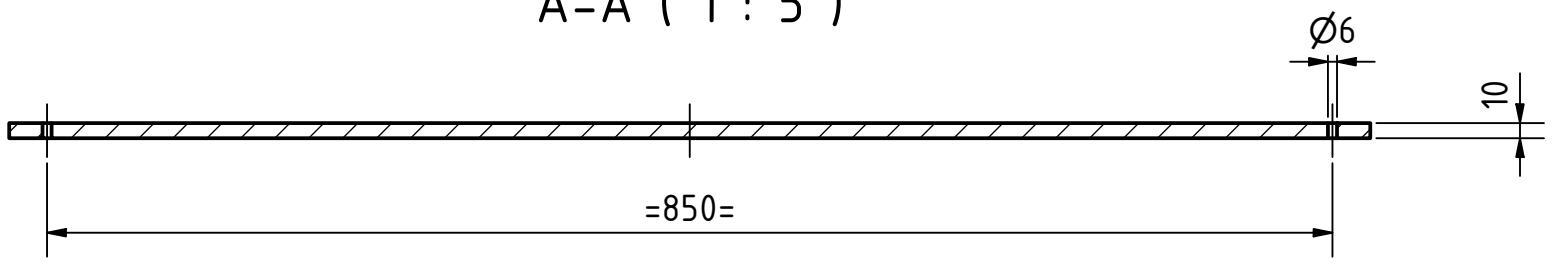


Napomena: Sve oštne ivice oboriti 0.5mm

				Materijal: AL		Razmera 2 : 1	
				Komada: 4			
				Date	Name	Pozicija 70	
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
						Odstojnik	
						1	
						A4	
State	Changes	Date	Name				



A-A (1 : 5)



Napomena: Sve oštre ivice obraditi 0.5mm

				Materijal: AL		Razmera 1 : 5	
				Komada: 2			
				Date	Name	<h1>Pozicija 71</h1>	
				Drawn	Vladimir Kočović		
				Checked	Branko Tadić		
				Standard			
						Nosač senzora položaja	
						1 A4	
State	Changes	Date	Name				



Прилог 3 - Рад објављен у часопису Engineering Science and Technology, an International Journal; (M21)

HOSTED BY



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering Science and Technology, an International Journal

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jestch

Full Length Article

Uncertainty in the determination of elastic modulus by tensile testing

Sonja Kostic^a, Jasmina Milojkovic^b, Goran Simunovic^c, Djordje Vukelic^{d,*}, Branko Tadic^b^aAcademy of Professional Studies Sumadija, Department in Kragujevac, Kosovska 8, 34000 Kragujevac, Serbia^bUniversity of Kragujevac, Faculty of Engineering, Sestre Janjic 6, 34000 Kragujevac, Serbia^cUniversity of Slavonki Brod, Mechanical Engineering Faculty in Slavonki Brod, Trg Ivane Brlic Mazuranic 2, 35000 Slavonki Brod, Croatia^dUniversity of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 January 2021

Revised 23 April 2021

Accepted 3 May 2021

Available online 14 May 2021

Keywords:

Elastic modulus

Tensile testing

Uncertainty

ABSTRACT

The paper presents the results of theoretical and experimental research related to the uncertainty in the elastic modulus measurement on different types of tensile testing devices and their comparison. Factors that affect the uncertainty in the measurement of 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.

© 2021 Karabuk University. Publishing services by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introduction

The elastic modulus is an important characteristic of the material, and its value is one of the primary input parameters for the design of constructions and material quality control. The value of the elastic modulus can be experimentally determined by applying various direct and indirect methods. Through the application of the direct methods, the elastic modulus is determined based on the longitudinal and transverse deformations and the effects that directly depend on them. Indirect methods are based on the determination of other elastic constants such as shear modulus and bulk modulus. Also called inverse methods, indirect methods are based both on experiments and models and a minimization procedure for the identification of the parameters. Inverse methods based on both dynamic experimental data and Finite Element Model Updating (FEMU) can also be considered a powerful method [1]. Indirect test methods are simpler, more economical, less time-consuming, and more adaptable to the industrial application [1,2]. Errors in modulus measurement by dynamic methods are small, typically of the order of $\pm 1\%$ [1]. Bucciarelli et al. [3] used an effective and reliable non-destructive method based on sound waves to measure the elastic modulus. A procedure was proposed to reduce the errors and uncertainties in the measurements for high acoustic reflective materials such as composite or polymeric materials. An

error of only 2% was achieved when comparing the elastic modulus results with those obtained by tensile testing [3]. Nunn [4] proposes a simple way to determine the elastic modulus by measuring the speed of sound. He points out that the analysis of uncertainties leads to the identification of the main contributor to the overall uncertainty, which further leads to the improvement of the experiment. At low strain rates, values of the elastic modulus are between the values obtained through the Monotonic Uniaxial Compression Test (MUCT) and the values obtained using Monotonic Uniaxial Tension Test (MUTT) and Indirect Tensile Test (ITT). The authors prefer the ITT method because it is more cost-efficient and easier to handle than MUTT [5]. Oliver and Pharr [6] introduced the method for measuring hardness and elastic modulus by instrumented indentation techniques. Their method has been widely adopted and it was improved over time [7,8]. To obtain more realistic uncertainties of the elastic modulus determined through nanoindentation tests, Coorevits et al. [9] implemented the basis of the virtual machine concept, which is commonly used in coordinate measuring machines. According to their results, the most relevant sources of uncertainty are related to the calibration procedure, particularly to the elastic modulus of the calibration material and the estimation of the contact depth; however, the relevance of the uncertainties is system-dependent. Cagliero et al. [10] proposed a new model for the measurement of elastic modulus by the instrumented indentation in the macro range. To evaluate contact stiffness, which is necessary for the elastic modulus estimation, they used a nonlinear regression procedure instead of linear extrapolation method (LEM) and power-

* Corresponding author.

E-mail address: vukelic@uns.ac.rs (D. Vukelic).

Peer review under responsibility of Karabuk University.

law method (PLM). The three methods were then compared using the uncertainty evaluation according to GUM. The results have shown that the only significant contributor to the uncertainty was the measurement reproducibility. When PLM was used, uncertainty intervals were about two times wider than the intervals obtained using two other methods, mainly because the significant uncertainty was associated with the evaluation of the last depth value of the unloading curve. LEM was compatible with the method proposed by the authors. Ali et al. [11] used regression analysis and an artificial neural network model to analyze correlations between hardness and mechanical characteristics of the material. By increasing the percentage of silicon in certain alloys, they obtained higher values of hardness and mechanical characteristics, while the elongation had a decreasing trend.

Even though the values of the elastic modulus obtained by tensile testing exhibit greater variations and scatter than the results of dynamic measurements, the elastic modulus is often determined through the application of tensile testing. Relevant standards for tensile testing are EN 10002-1 [12], ASTM E8 / E8M-09 [13], and EN ISO 6892-1 [14].

The standards mentioned above primarily focus on determining the stress-strain curve, whereas the zone of the elastic deformations often makes only a small part of the complete curve.

In tensile testing, the errors in the elastic modulus measurement are higher than the errors that occur in the measurement of other mechanical properties of the material [2]. At the present moment, there are no standard-defined lower and upper limits of material behavior in the elastic area.

Sonne [15] proposes four different methods to determine the lower and upper limits of the elastic region. The simplest and most common method uses the constant lower limit σ_{min} and the constant upper limit σ_{max} , dependent on the tensile strength of the material TS.

The theoretical standard deviation of the elastic modulus from uniaxial tensile tests of sheet metals is $\pm 5\%$ [15]. The deviation can be even higher, depending on the testing device, the subjective assessment made by the user, and the detection frequency of measured values. Therefore, the measurement accuracy is one of the essential preconditions for achieving reliable results when determining the elastic modulus. The authors in [16] provide an expression for a more precise determination of the upper limit of linear elastic behavior depending on the material.

The measurement of the specimen elongation is often done by using strain gauges, as they are inexpensive, of appropriate accuracy, and easy to use. However, the biggest problem is their joint, particularly if the specimen has a small cross-section. Furthermore, the measurement errors are caused by several sources of errors, which were discussed in detail by Montero et al. [17]. The most reliable measurement of the specimen elongation can be achieved by using extensometers of various accuracy classes [18].

When using small specimens, the stress in the elastic region can be accurately calculated based on the force recorded on the device during the tensile testing, while the accurate measurement of the elastic deformation remains a challenge [18,19]. However, when specimens have a small mass and small volume, the application of extensometers is difficult. Instead of extensometers, two alternative methods can be used to determine the elastic deformation of small specimens. The first method uses Digital Image Correlation (DIC) [20–22]. The second method is based on the measurement of the displacement of the clamping head. This method does not require additional equipment and data processing. However, the stiffness of the testing device has a significant effect on the measurement of the specimen elongation. The data on the specimen's deformation contains the sum of all displacements made in the direction of the tensile force, which is difficult to be determined experimentally [18,23,24].

After comparing different measurement techniques, Motra et al. [18] concluded that strain gauges and extensometers provide reliable results when used in the measurement of the deformation in the elastic region, while the method based on the measurement of the displacement of the clamping head has high variability in the strain measurement.

As stated by Adamczak et al. [25], when tensile testing is performed on a device with an extensometer, the error in the deformation measurement corresponds to the limiting error of the measuring instrument. Usually, an extensometer is used to measure small deformations. If the test is performed on a device without an extensometer, the result of the deformation measurement will contain a systematic error resulting from the elastic deformation of the components of the universal test machine. This systematic error should be considered in the form of a correction.

According to Silva [26], the measurement uncertainty associated with the use of an extensometer represents a variation of 59% to 73% of the total uncertainty, depending on the cross-section of the test sample. Such verification relies upon the assumption that the extensometer was previously subjected to a tensile test to determine its actual effective capacity.

Today, it is not possible to quantify any measurement result without a certain doubt about its accurate value. Each measurement is exposed to different influences and disturbances, whether they are caused by random or systematic factors, usually by both. It is the lack of knowledge about factors influencing the measurement that led to the formulation of expressions such as measurement uncertainty.

According to the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), first published in 1993 and edited in 2008 [27,28], the doubt in the measurement results is the uncertainty. The most influential sources of high uncertainty in the determination of the elastic modulus of metallic materials via tensile testing are test system (dimension measurement device, gauge determination system, extensometer type, alignment system, test machine stiffness, force measurement accuracy, extensometer accuracy) and test procedure (stress and strain rate, data acquisition system, data acquisition rate, testing software) [29–31]. The knowledge of the quantitative effects of each quantity on the test result improves the reliability of the test procedure.

Gabauer [32] considers it advisable to regroup the significant sources affecting the tensile testing results to simplify the uncertainty calculations and recommends the following categories: uncertainty due to errors in the measurement of cross-sectional area, uncertainty due to errors in the force measurement, uncertainty due to errors in the displacement measurement and uncertainty due to evaluated quantities (e.g. Young's modulus). Sources of uncertainties are mostly of Type B, since they can be quantified from data available a priori, like calibration certificate, manufacturer's information, or an expert's estimation. Soy and Lus [33] compared the uncertainties of Type A and Type B in tensile tests of metallic materials at ambient temperature and found that Type A gives more accurate results than Type B. The results of Type B uncertainty were higher for all sample groups.

The authors of this paper will pay special attention to random errors, especially those caused by the imperfections of the measuring instrumentation, provided that the test conditions and test procedures do not change during all tests.

The estimation of the measurement uncertainty for a determined elastic modulus can be done according to CWA 15261-2 [34] or according to [14]. The estimation of the measurement uncertainty according to [34] is based on absolute values. The estimation of the measurement uncertainty according to ISO 6892-1 is based on relative estimations [14]. However, the aim of this research was not only the estimation of the measurement uncertainty. In contrast to previous investigations, this research focused

on analyzing the problems related to acquiring accurate elastic modulus measurement results on a small laboratory tensile testing device. Those results were compared with results obtained on a conventional tensile testing device with an extensometer. The aim was to identify influencing factors and predict the conditions that need to be met for the uncertainty in the elastic modulus to be within acceptable limits. That can be achieved if the analytical limits of the uncertainty in the elastic modulus measurement, i.e., the limits of the acceptable measurement uncertainty, are determined. Furthermore, the aim was to define relative uncertainties in the elastic modulus measurements performed on different types of tensile testing devices and to use the obtained values to compare the experimental results to the reference value of the elastic modulus. The paper focuses on the measurement uncertainty caused by the imperfection of the measuring instrumentation under the test conditions as described in this paper.

2. Theoretical considerations

The problems in obtaining accurate values of the elastic modulus on tensile testing devices occur due to a large number of factors. In addition to the accuracy of the measuring instrumentation, the compliance of subassemblies of the testing device has a significant effect as well.

Based on Hooke's law, which is related to the area of elastic deformations, the elastic modulus can be determined by using the following equation:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F \cdot l_0}{A_0 \cdot \Delta l} \quad (1)$$

where E is the elastic modulus, σ is the stress, ε is the strain, F is the tensile force applied during the test, l_0 is the initial gauge length of the test specimen, A_0 is the initial cross-sectional area of the test specimen, $\Delta l = l - l_0$ is the change in the gauge length, l is the current gauge length of the test specimen.

Based on the previous equation, it can be concluded that the elastic modulus is a function of the quantities mentioned above, which can be written as follows:

$$E = f(F, l_0, A_0, \Delta l) \quad (2)$$

We wish to estimate the uncertainty in the calculated result of E based on the uncertainties in the primary measurements. The uncertainty in the elastic modulus W_E can be expressed as follows [35,36]:

$$W_E = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial f}{\partial F} \right)^2 \cdot W_F^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial l_0} \right)^2 \cdot W_{l_0}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial A_0} \right)^2 \cdot W_{A_0}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \Delta l} \right)^2 \cdot W_{\Delta l}^2 \right]} \quad (3)$$

where W_F , W_{l_0} , W_{A_0} , $W_{\Delta l}$ are the uncertainties in the independent variables from equation (2), while the partial derivatives represent sensitivity coefficients $C_{\Delta F}$, C_{l_0} , C_{A_0} , $C_{\Delta l}$, respectively.

After the differentiation of the function f in equation (3), the equation defining the overall uncertainty in the elastic modulus has the following form:

$$W_E = \sqrt{\left[\left(\frac{l_0}{A_0 \cdot \Delta l} \right)^2 \cdot W_F^2 + \left(\frac{F}{A_0 \cdot \Delta l} \right)^2 \cdot W_{l_0}^2 + \left(\frac{-F \cdot l_0}{A_0^2 \cdot \Delta l} \right)^2 \cdot W_{A_0}^2 + \left(\frac{-F \cdot l_0}{A_0 \cdot \Delta l^2} \right)^2 \cdot W_{\Delta l}^2 \right]} \quad (4)$$

Using equation (1), we can substitute the expressions placed inside the parenthesis in equation (4) as follows:

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

and get the final equation for the calculation of the uncertainty in the elastic modulus:

$$W_E = E \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{F} \right)^2 \cdot W_F^2 + \left(\frac{1}{l_0} \right)^2 \cdot W_{l_0}^2 + \left(\frac{-1}{A_0} \right)^2 \cdot W_{A_0}^2 + \left(\frac{-1}{\Delta l} \right)^2 \cdot W_{\Delta l}^2} \quad (5)$$

From equation (5), it can be concluded that the uncertainty in the elastic modulus within the elastic region depends on the magnitude of the tensile force, the geometric parameters of the test specimen, and the elongation (Δl). Considering that the quantities mentioned above change during the measurement process (the force increases, the elongation increases), it can be concluded that the uncertainty in the elastic modulus value will vary as well.

Equation (5) can be written as:

$$W_E = E \cdot \delta \quad (6)$$

where δ is the overall measurement uncertainty, as the function of the quantities measured during the tensile testing:

$$\delta = \sqrt{\left(\frac{1}{F} \right)^2 \cdot W_F^2 + \left(\frac{1}{l_0} \right)^2 \cdot W_{l_0}^2 + \left(\frac{-1}{A_0} \right)^2 \cdot W_{A_0}^2 + \left(\frac{-1}{\Delta l} \right)^2 \cdot W_{\Delta l}^2} \quad (7)$$

or:

$$\delta = \sqrt{\delta(F)^2 + \delta(l_0)^2 + \delta(A_0)^2 + \delta(\Delta l)^2} \quad (8)$$

where $\delta(F)$, $\delta(l_0)$, $\delta(A_0)$ and $\delta(\Delta l)$ are measurement uncertainties, as functions of the force (F), the initial gauge length (l_0), the initial cross-sectional area of the test specimen (A_0), and the elongation (Δl), respectively. Measurement uncertainty, as the function of $\delta(F)$, $\delta(l_0)$, $\delta(A_0)$ and $\delta(\Delta l)$, is affected by the changes in values of quantities F , l_0 , A_0 and Δl during the testing.

From the equations (7) and (8) it can be concluded that the measurement uncertainty δ tends to zero when quantities F , l_0 , A_0 and Δl tend to infinity, whereas their measurement uncertainties W_F , W_{l_0} , W_{A_0} and $W_{\Delta l}$ have finite, small values.

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \delta = \lim_{\substack{F \rightarrow \infty \\ l_0 \rightarrow \infty \\ A_0 \rightarrow \infty \\ \Delta l \rightarrow \infty}} \sqrt{\delta(F)^2 + \delta(l_0)^2 + \delta(A_0)^2 + \delta(\Delta l)^2} \quad (9)$$

The previous statement indicates the possibility of minimizing the overall measurement uncertainty δ through the selection of suitable specimen geometry. However, the options for minimizing the overall uncertainty (δ) are limited due to the compliance of certain subassemblies of the device. This problem is related to the maximum value of the tensile force that is transferred from the specimen to the clamping zones (grips) and the entire structure of the device as well.

Although the ISO Guide [27] is the key reference guidance document about the measurement uncertainty, there are other publications [32,37-39] that could be consulted as well. When determining the uncertainty in the elastic modulus experimentally, one can use the B-type method, the statistical A-type method based on the arithmetic means for a series of measurements or both methods to get the combined uncertainty.

Let us observe the measurement uncertainties $\delta(F)$, $\delta(l_0)$, $\delta(A_0)$ and $\delta(\Delta l)$ from the equation (9), using as an example a steel specimen whose elastic modulus is $E = 210\text{GPa}$. The specimen has a rectangular cross-section, $A_0 = 2\text{mm}^2$ (width of the specimen $w = 2\text{mm}$, and thickness of the specimen $t = 1\text{mm}$). The initial gauge length of the specimen is $l_0 = 180\text{mm}$. The maximum tensile force in the elastic region is $F = 300\text{N}$. According to equation (1), the achieved elongation is $\Delta l = 0.1285\text{mm}$.

Sources of uncertainties are mostly of Type B since they can be quantified from data available a priori, like the accuracy of the load cell from calibration certificate [27,40]. According to the load cell calibration certificate, uncertainty is 0.22%, that is, $W_F = 0.6N$, where the measuring range of the dynamometer is 0–300 N, and a rectangular distribution was used. The measurement uncertainty as a function of force $\delta(F)$ will be:

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

There is another way to calculate the uncertainty in the measurement of the force. Major factors that affect the total uncertainty in the measurement of the force include uncertainty attributable to the dynamometer, zero adjustment of the force measuring part, possible misalignment of the force applied, ambient temperature during the test, and load application rate. The uncertainty in the measurement of the force within the range of elastic deformations could be calculated by using the following equation [39]:

$$W_F = \sqrt{W^2(F_{max}) + W^2(F_{min})} \quad (11)$$

where $W(F_{max})$ and $W(F_{min})$ are the uncertainties in the measurement of the force, closest to the value of force within the range of elastic deformations. Those uncertainties can be calculated as follows:

$$W(F_{max}) = \frac{u_{lc} \cdot F_{max}}{\sqrt{3}}, W(F_{min}) = \frac{u_{lc} \cdot F_{min}}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

where u_{lc} is the uncertainty in the measurement of the force, attributable to the load cell. The higher of the two values of the uncertainty, whether it was obtained from (10) or (12), will be adopted for further calculations.

From the aspect of the influence of W_{l_0} on the uncertainty in elastic modulus W_E , the initial length of the specimen l_0 , is a less influential quantity. If a caliper for measuring l_0 has an accuracy of 0.2 mm, and if we use a rectangular distribution [27,32], W_{l_0} will be 0.1mm and $\delta(l_0)$ will be:

$$\delta(l_0) = \frac{1}{l_0} \cdot W_{l_0} = \frac{1}{180} \cdot 0.1 = 5.5 \cdot 10^{-4} \quad (13)$$

The size of the cross-sectional area of the specimen A_0 is an influential quantity, especially when it comes to specimens of a small cross-section. For a test specimen of rectangular cross-section, the original area is given in terms of its width and thickness by $A_0 = w \cdot t$. The dimensions were measured with a digital caliper. Measurement uncertainties of the instruments were taken from their calibration certificates. The expanded uncertainty of the digital caliper was 0.02 mm, so its standard uncertainty was 0.01 mm. The uncertainty in A_0 can be calculated using the equation for combined uncertainty [27,38]:

$$W_{A_0} = \sqrt{\left(\frac{\partial A_0}{\partial w}\right)^2 W_w^2 + \left(\frac{\partial A_0}{\partial t}\right)^2 W_t^2} = \sqrt{t^2 W_w^2 + w^2 W_t^2} \quad (14)$$

where the uncertainties in the width and the thickness measurement W_w and W_t are both equal to 0.01 mm. In the observed case, based on equation (14), the uncertainty in the measurement of the specimen cross-sectional area is $W_{A_0} = 0.03\text{mm}^2$, so the uncertainty $\delta(A_0)$ will be:

$$\delta(A_0) = \frac{1}{A_0} \cdot W_{A_0} = \frac{1}{2} \cdot 0.03 = 1.5 \cdot 10^{-2} \quad (15)$$

For determining the uncertainties in the width and the thickness measurement, both A and B types can be used. The higher of those two values will be used for further calculations, as given in the following equation [39]:

$$W_W = 1.11 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2}{n(n-1)}} \quad (16)$$

where \bar{w} is the mean value of the specimen width based on n measurements, with the t-Student distribution for a confidence level of 68.27%.

The uncertainties in the measurement of the upper Δl_{max} and lower Δl_{min} level of elongation in relation to the elongation in the elastic region, determined based on the accuracy class of the longitudinal extensometer or some other strain measurement technique, with use of the B-type method (the rectangular distribution):

$$W_{\Delta l} = \sqrt{W^2(\Delta l_{max}) + W^2(\Delta l_{min})} \quad (17)$$

$$W(\Delta l_{max}) = \frac{u_{elon} \cdot \Delta l_{max}}{\sqrt{3}}, W(\Delta l_{min}) = \frac{u_{elon} \cdot \Delta l_{min}}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

where u_{elon} is the uncertainty due to the accuracy class of applied extensometer or other strain measurement instruments.

In the observed case, based on the accuracy class of the strain measurement instruments, the uncertainty in elongation measurement $W_{\Delta l}$ is 1.17 μm , so the uncertainty as a function of the specimen elongation $\delta(\Delta l)$ will be:

$$\delta(\Delta l) = \frac{1}{\Delta l} \cdot W_{\Delta l} = \frac{1}{0.1285} \cdot 1.17 \cdot 10^{-3} = 9.1 \cdot 10^{-3} \quad (19)$$

Variable quantities are F and Δl . Input quantities (l_0 , A_0) are known and the uncertainties attributable to the measuring instrumentation (W_F , W_{l_0} , W_{A_0} and $W_{\Delta l}$) were determined. If the elongation Δl is calculated based on the equation (1) as follows:

$$\Delta l = \frac{F \cdot l_0}{A_0 \cdot E} \quad (20)$$

and then included in the equation (5), we get the equation for calculation of W_E as a function of only one variable quantity:

$$W_E(\Delta l) = \frac{E}{\sqrt{\left(\frac{l_0}{E \cdot A_0}\right)^2 \cdot W_F^2 + \left(\frac{\Delta l}{l_0}\right)^2 \cdot W_{l_0}^2 + \left(\frac{\Delta l}{A_0}\right)^2 \cdot W_{A_0}^2 + W_{\Delta l}^2}} \quad (21)$$

The previous equation defines the analytical limits of the uncertainty in the elastic modulus measurement in relation to its reference values E calculated using equation (1). That is, we can claim with a certain probability that the true values of the measured will be within the interval defined by equation (21). This uncertainty corresponds to plus or minus one standard deviation on the normal distribution law representing the studied quantity. The combined uncertainty has an associated confidence level of 68.27%. That means that experimentally determined values of the elastic modulus should be within the following limits:

$$E_{exp} = E \pm W_E(\Delta l) \quad (22)$$

Fig. 1 gives an example of experimentally determined values of the elastic modulus $E_{exp}(\Delta l)$ as well as the analytical curves of the uncertainty in the elastic modulus $W_E(\Delta l)$, determined using equations (21) and (22). The asymptote of the curves is based on the reference value of the elastic modulus for the tested material (in this case $E = 210\text{GPa}$).

Analytical curves determined using equation (21) can be considered the limits of the expected scattering of the results. The results outside the analytical curves represent an unexpected scattering of measured values (red areas in Fig. 1), considering that the

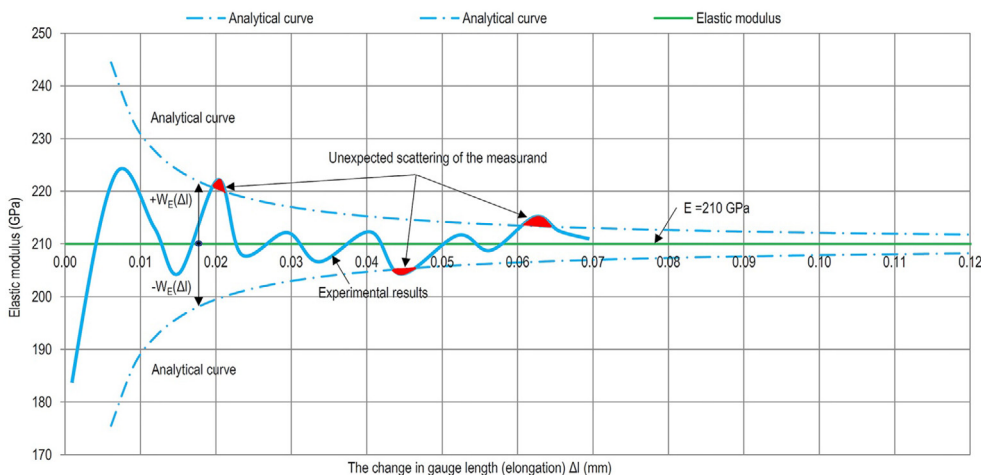


Fig. 1. Unexpected scattering of the elastic modulus values; upper and lower analytical curves.

measurement uncertainty included both the uncertainties caused by the specimen geometry and the uncertainties attributable to the imperfections of the measuring instrumentation. This indicates that the scattering of the results is a consequence of some other factors affecting the testing process.

The distribution of the measurement results around the mean value is influenced exclusively by random errors, assuming that the systematic errors have been corrected during the calibration process. However, a complete correction of all systematic errors is rarely possible. These remaining systematic errors cause the final measurement results always to have a higher level of uncertainty than equations (21) and (22) indicate. Due to the remaining systematic errors, the confidence level for the mean value is expanded.

3. Materials and methods

The investigation was conducted on specimen made of low-carbon steel S355J2 whose chemical composition is: $\leq 0.22\%$ C, $\leq 0.55\%$ Si, $\leq 1.6\%$ Mn, $\leq 0.025\%$ P, $\leq 0.025\%$ S, $\leq 0.55\%$ Cu and $\leq 0.47\%$ CEV. The mechanical and physical characteristics of low-carbon steel S355J2 are: elastic modulus = 210 GPa, hardness = 185 HV, tensile strength = 510–680 MPa, yield strength = 355 MPa, Poisson ratio = 0.3 and density = 7.8 g/cm³.

Experimental investigations on material S355J2 were conducted both on a conventional tensile testing device (CTTD) with an extensometer and a small laboratory tensile testing device (SLTTD). The work is restricted to tests performed at ambient temperatures 23 ± 2 °C, with a digital acquisition of load and displacement. The tests are assumed to run continuously without interruptions on specimens with uniform gauge lengths, and the procedure is restricted to tests performed under axial loading conditions. The experiments were performed in accordance with the standard EN ISO 6892-1:2019 [14].

More information on CTTD: load cell class 1, 100 kN nom. capacity, extensometer class 0.5, system 1:5 mm nom. capacity, system 2:60 mm nom. capacity. The crosshead speed rate was 2.5 mm/min on both devices. SLTTD has load cell 2 kN nom. capacity; elongation measurement is based on the displacement of the clamping head. The specimens' thickness and width are measured with an accuracy of ± 10 μm .

Five S355J2 specimens were tested on each device. Their shapes are given in Fig. 2. For assessing the uncertainty, only the results of one test were considered for each device, i.e. the results closest to the mean value of five series of measurements. Standard speci-

mens for CTTD have the original gauge length of 80 mm. The original gauge length is 180 mm for SLTTD. Both specimen types have the tolerance of shape of ± 0.05 mm, the parallelism of ± 0.1 mm, and the surface aspect $R_z < 6.3$ μm , in compliance with the standard [32]. During the tests, the force and the elongation were measured.

4. Shape and geometric parameters of the test specimen

The standard test specimens (Fig. 2a) used on conventional tensile testing devices are clamped by the grips of the device along the grip sections A-A. The tensile force is transferred from the test specimen to the grips by friction forces acting on A-A surfaces. In cases of such transfer of load, significant compliance occurs in the contact zone between the grips and the specimen [41,42].

One of the key causes of significant errors in the determination of the elastic modulus is the uncontrolled part of the displacement, which occurs in the contact zone between the specimen and the grips. Even though the system is in static equilibrium, the shear stresses that occur on contact surfaces must cause a certain level of displacement directly related to the level of tensile force [43].

Considering the literature sources [44–49] and the results presented in this paper, the shape of a specimen shoulder like the one shown in Fig. 2b provides more accurate results in the elastic modulus measurement. The grip holding the left side of the test specimen is stationary, while the right grip moves during the test in the direction of tensile force.

To achieve smaller values of the contact pressure (stress), the contact surface of the specimen should be significantly larger than the cross-sectional area.

During the development of SLTTD, several solutions for the clamping system were designed and tested, in order to minimize the uncontrolled part of the displacement (compliance in the contact zone). The first solution was based on a freely supported test specimen (Fig. 3). The total contact surface A (Fig. 3) was 10 mm², which is five times larger than the initial cross-sectional area of the gauge section $A_0 = 2$ mm². However, this does not mean that the stresses and deformations in the contact zone between the test specimen and the clamping grips will have proportionally lower values. In this case, the maximum through-thickness stresses (z -axis) occur in zones $Z_{K'}$ and $Z_{K''}$ around points K' and K'' .

Under the action of tensile force F on the aforementioned contact surfaces, elementary particles of the material are compressed and the maximum concentration of compressive stresses is in zones $Z_{K'}$ and $Z_{K''}$. Due to the high concentration of stress on con-

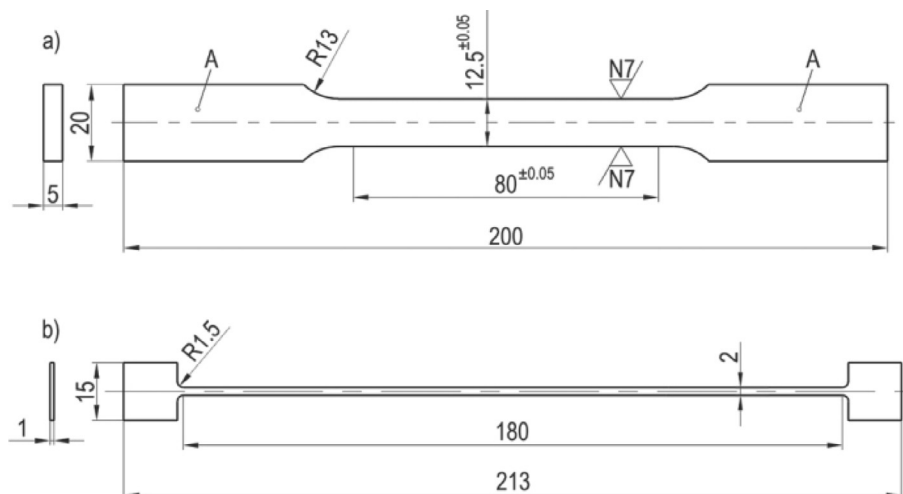


Fig. 2. Shapes of S355J2 specimens for tensile testing on a) CTTD, b) SLTTD.

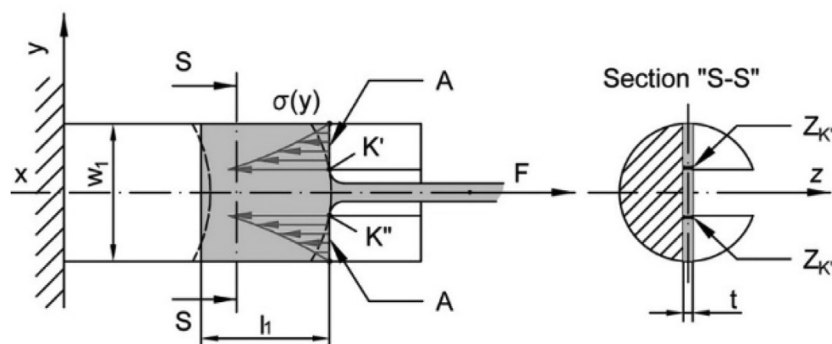


Fig. 3. The clamping system: freely supported test specimen on SLTTD.

tact surfaces, certain displacement of the gripped end will occur as well. Since it is not possible to quantify that displacement separately, it is included in the overall elongation of the gauge section during the measurement process. It means that this measurement error occurs as a direct consequence of compliance in the contact zone. The assumed stress field $\sigma(y)$ fully corresponds to the shape of the deformed specimen tested by using this clamping system, which was confirmed by the experiments as well. In the considered case, the uncontrolled part of the displacement significantly affects the values of the experimentally determined elastic modulus.

The final design of the clamping system (Fig. 4) minimizes the errors caused by the compliance in the contact zones between the test specimen and the grips. The idea was to prevent the displacement of grip ends along all axes. When using the proposed clamping system and the test specimen with previously described geometry, the complete grip section of the specimen could be considered as the part of the material which is “confined” within the grips, while the grips could be considered as a rigid body.

Fig. 4 includes a schematic representation, a 3D model, and a photograph of the clamping system, with assembly elements and characteristic zones. The elements of the clamping system are: test specimen (1), grip (2), bushing (3), half-cylinder clamping element (4), and bolt (5). The compliance is considered only in the contact zone between the specimen and the left grips. The test specimen (1) is placed in the grip (2) and clamped by element (4). The bushing (3) and the bolt (5) are placed over the grip. The cylindrical side of the element (4) corresponds to the shape of the bushing. The assembly of those elements is realized with a small clearance between them.

After the tightening of the bolt, the geometric parameters of the test specimen and the clamping elements ensure the alignment of the left and right grips, as well as the balance of forces in the directions perpendicular to the tensile axis (y-axis).

With the proposed clamping system, the test specimen is exposed to pressure along all axes. Affected by tensile force, the gripped part of the specimen is “confined”, and it has a favorable distribution of stress and strain fields, with minimal compliance in the contact zone. Fig. 4b also includes a detail of the finite element analysis (FEA), which confirms the favorable stress distribution and small displacement in the contact zones, not greater than 2 μm .

It should be emphasized that the design of the proposed clamping system must comply with several technological requirements related to the tolerances and the achievement of a light press fit between the test specimen and element (2) along the dimension l_1 , as well as between the specimen and the bushing along the dimension w_1 . An adequate clamping of the specimen must be achieved as well, by using the bolt (5) and the clamping element (4). The performed FEA and the results of conducted experiments confirmed the effects of the proposed clamping system.

5. Results

5.1. Simulated calculation of the uncertainty in the determination of the elastic modulus

The uncertainty in the determination of the elastic modulus can be calculated using equation (5). Quantities F and Δl are variable

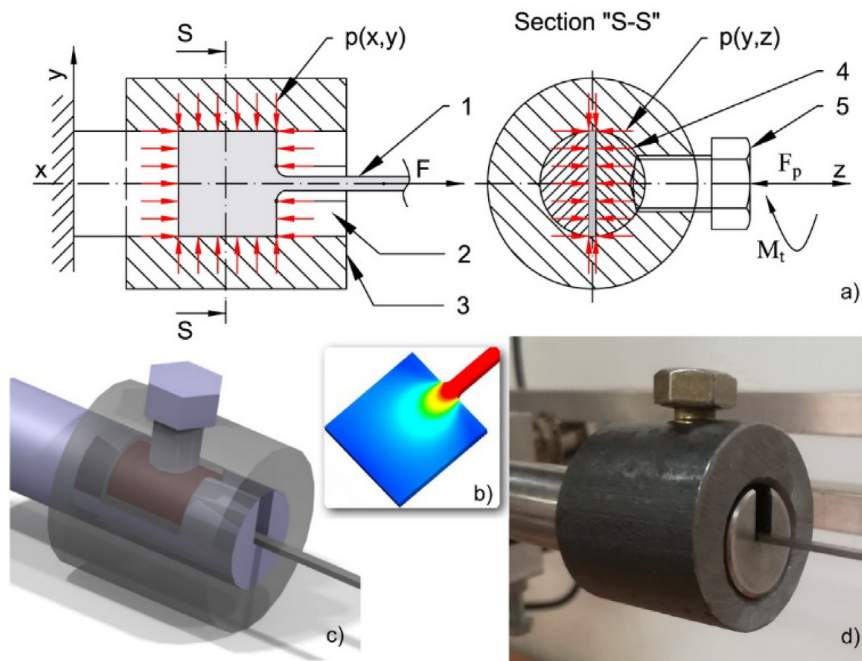


Fig. 4. The clamping system: a) schematic representation, b) FEA - displacement, c) 3D model, d) photograph.

during the test. Values of the quantity F are given within the range of the tensile force in the area of elastic deformations. The specimen elongation is calculated using equation (20).

The data necessary for the simulated calculation of the uncertainty are provided in Table 1. The uncertainty in the elastic modulus as a function of force and elongation is given in Fig. 5. The calculation was performed in software Statistica, based on parameters given in Table 1. For the given test conditions (Table 1), the dependences of the uncertainty in the elastic modulus upon the tensile force and the elongation exhibit an identical trend, regardless of the device type (Fig. 5). The uncertainty in the elastic modulus is higher in the area of low values of forces and elongations, which is a consequence of errors in the measurement process and imperfections of the measuring instrumentation. At higher levels of tensile forces and higher elongation values, the measurement uncertainty is less affected by the imperfection of the measuring instrumentation.

5.2. Experimental research

Tensile testing was performed on CTTD with an extensometer and SLTTD. The experimental values of the elastic modulus E_{exp} were determined by using equation (1), based on the measured values of forces and elongations, for the known specimen geometry (Table 1 and Fig. 2). Comparative diagrams of relative uncertainties in the determination of the elastic modulus are given in Fig. 6.

The experimentally obtained values of the elastic modulus E_{exp} deviate from the known reference values of the elastic modulus

Table 1
Input data for the simulated calculation of the uncertainty in the elastic modulus for two different types of tensile testing devices.

Type of the tensile testing device	Conventional with extensometer	Small laboratory
Test specimen material	S355J2 ($E = 210$ GPa)	
The geometry of the test specimen	$l_0 = 80$ mm, $A_0 = 62.5$ mm ² (Fig. 2a)	$l_0 = 180$ mm, $A_0 = 2$ mm ² (Fig. 2b)
Tensile force range (N)	0–21500	0–600

in a positive or negative direction. That means that, at a certain range of forces and elongations E_{exp} can be larger or smaller than the reference value of the elastic modulus.

Acceptable limits of the uncertainty in the elastic modulus (analytical curves 1 and 2, Fig. 6) were determined using equation (21), for all performed experiments. According to equation (21), considering the specimen's geometry and the imperfections of the measuring instrumentation, the uncertainty in the elastic modulus can vary in both a positive and negative direction. Acceptable limits of those variations are determined by the analytical curves given in Fig. 6.

It is reasonable to make an estimation of the uncertainty associated with the test methods, as it may help to identify which experimental parameters or aspects of the test contribute the most to the measurement uncertainty. The force, the cross-sectional area, and the dimensions of the specimen are measured to a high degree of accuracy to ensure an accurate calculation of stress-strain.

Table 2 shows an uncertainty budget calculation for the measurement of elastic modulus on both devices. According to this calculation, the largest contributing factor to the uncertainty in the measurement of elastic modulus is the uncertainty of the cross-sectional area.

The mean values of the uncertainties in the elastic modulus measurements are 1.56% on SLTTD (red dashed line, Fig. 6) and 1.97% on CTTD with an extensometer (blue dashed line, Fig. 6).

Analytical curves 1 and 2 (Fig. 6) represent the limits of the “expected” scattering of the results, considering that the results inside the curves are the uncertainties of the measuring instrumentation. The results outside the analytical curves represent an unexpected scattering of the uncertainty in the elastic modulus. These uncertainties are caused by factors that cannot be associated with the imperfections of the measuring instrumentation.

The mean values of the uncertainties in the measurement of the elastic modulus are provided in Fig. 7. The uncertainty in the elastic modulus measurement performed on SLTTD is 206.7 GPa, which deviates from the reference value of the elastic modulus by 1.56%. On CTTD, the mean value of the elastic modulus measurement

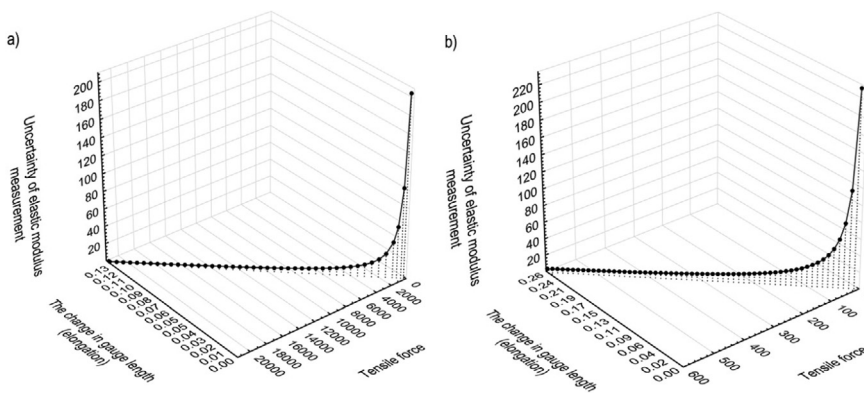


Fig. 5. The dependence of the uncertainty in the elastic modulus upon the tensile force and the elongation for a) CTTD with extensometer, b) SLTTD.

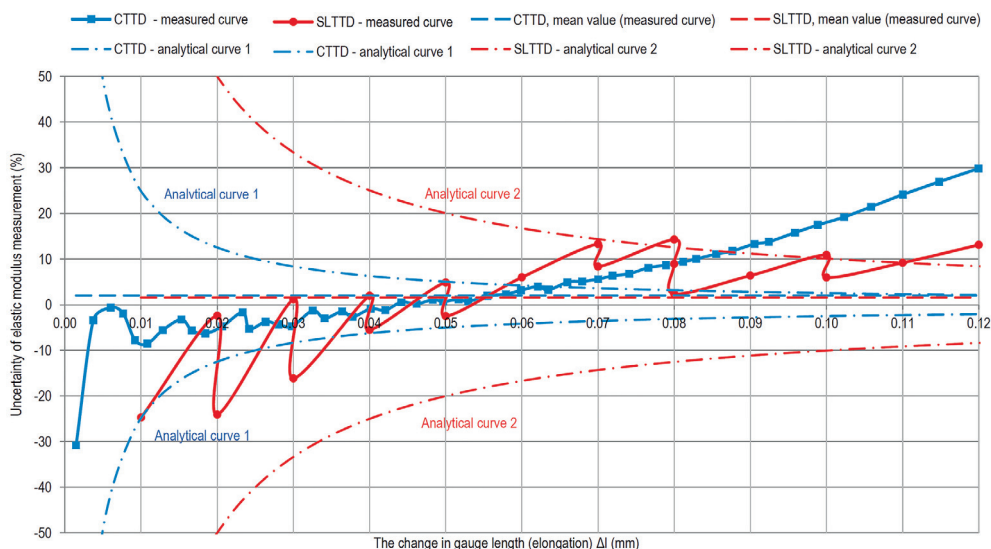


Fig. 6. Diagram of the uncertainty in the elastic modulus in the area of small elongations based on tests performed on CTTD and SLTTD.

Table 2
Uncertainty budget for the determination of the elastic modulus on SLTTD and CTTD.

Tensile testing device	Value of the evaluated quantity	Value of the uncertainty	Sensitivity coefficient	Contribution to the standard uncertainty
SLTTD	$w = 1.99\text{mm}$	$W_w = 0.01\text{mm}$	$c_w = t = 1\text{mm}$	$1.00 \cdot 10^{-2}$
	$t = 1\text{mm}$	$W_t = 0.01\text{mm}$	$c_t = w = 1.99\text{mm}$	$1.99 \cdot 10^{-2}$
	$A_0 = 1.99\text{mm}^2$	$W_{A_0} = 0.03\text{mm}^2$	$c_{A_0} = 0.5\text{mm}^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$
	$l_0 = 180\text{mm}$	$W_{l_0} = 0.1\text{mm}$	$c_{l_0} = 5.5 \cdot 10^{-3}\text{mm}^{-1}$	$5.50 \cdot 10^{-4}$
	$\Delta l = 0.125\text{mm}$	$W_{\Delta l} = 1.17 \cdot 10^{-3}\text{mm}$	$c_{\Delta l} = 8\text{mm}^{-1}$	$9.36 \cdot 10^{-3}$
	$F = 299.1\text{N}$	$W_{\Delta F} = 0.53\text{N}$	$c_{\Delta F} = 3.3 \cdot 10^{-3}\text{N}^{-1}$	$1.75 \cdot 10^{-3}$
	$E = 206.7\text{GPa}$	$W_E = \pm 3.3\text{GPa} = \pm 1.6\%$		
CTTD	$w = 12.4\text{mm}$	$W_w = 0.01\text{mm}$	$c_w = t = 4.99\text{mm}$	$4.99 \cdot 10^{-2}$
	$t = 4.99\text{mm}$	$W_t = 0.01\text{mm}$	$c_t = w = 12.4\text{mm}$	$12.4 \cdot 10^{-2}$
	$A_0 = 61.88\text{mm}^2$	$W_{A_0} = 0.15\text{mm}^2$	$c_{A_0} = 0.02\text{mm}^{-2}$	$0.3 \cdot 10^{-2}$
	$l_0 = 80\text{mm}$	$W_{l_0} = 0.1\text{mm}$	$c_{l_0} = 12.5 \cdot 10^{-3}\text{mm}^{-1}$	$1.25 \cdot 10^{-3}$
	$\Delta l = 0.1275\text{mm}$	$W_{\Delta l} = 2.60 \cdot 10^{-4}\text{mm}$	$c_{\Delta l} = 7.84\text{mm}^{-1}$	$1.22 \cdot 10^{-3}$
	$F = 21551\text{N}$	$W_{\Delta F} = 175.9\text{N}$	$c_{\Delta F} = 4.6 \cdot 10^{-5}\text{N}^{-1}$	$8.09 \cdot 10^{-3}$
	$E = 205.8\text{GPa}$	$W_E = \pm 1.8\text{GPa} = \pm 0.9\%$		

uncertainty of 205.8 GPa deviates from the reference value of the elastic modulus by 1.97%. From the aspect of probability, the mean value of the measured elastic modulus represents the most probable event, i.e. the mathematical expectation. Therefore, when considering the mean values as the most probable results of the measurement, SLTTD has an advantage over CTTD.

The scatter of the results around the mean value is ± 3.3 GPa or 1.6% for SLTTD and ± 1.8 GPa or 0.9% for CTTD. The greater scattering of the results (the uncertainty) for SLTTD is primarily a consequence of greater partial uncertainty related to the measurement of elongation, which is $1.17 \cdot 10^{-3}$ mm for SLTTD and $2.60 \cdot 10^{-4}$ for CTTD. These partial uncertainties affected the overall uncertainties

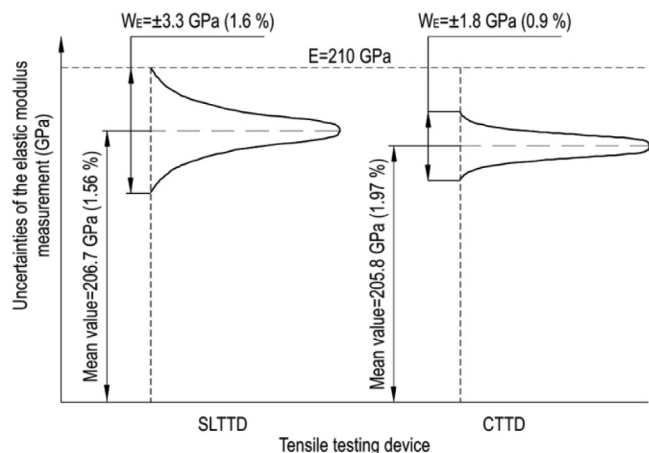


Fig. 7. Uncertainties of the elastic modulus measurement for two types of tensile testing devices.

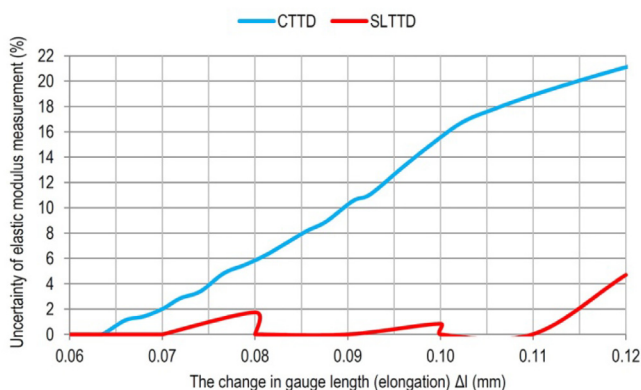


Fig. 8. Relative uncertainties in the determination of the elastic modulus, which are not caused by the imperfections of the measuring instrumentation.

to the greatest extent, bearing in mind that the accuracy of the linear encoder on SLTTD is 0.01 mm, while the accuracy of the linear encoder of the extensometer on CTTD is 0.001 mm.

Fig. 8 shows the relative uncertainties (in %) in the experimental determination of the elastic modulus, which are not caused by the imperfections of the instrumentation used to measure F , l_0 , A_0 and Δl .

Furthermore, to verify the proposed methodology, the measurement uncertainty was calculated according to [14,34]. For SLTTD, the calculated uncertainty in the elastic modulus was 1.9% according to [34], and 3.2% according to [14], for a 95% confidence level. For CTTD, the calculated uncertainty in the elastic modulus was 1.3% according to [34], and 1.8% according to [14], for a 95% confidence level. The results of the uncertainty calculated according to [14] are close to the results obtained in this research. That validates the proposed methodology. Slightly higher measurement uncertainty for SLTTD results from the number of data pairs in the elastic region of deformation measurement.

6. Discussion

Figs. 6 and 8 indicate that in the area of elastic deformations and small elongations (up to 0.06 mm), at relatively low levels of the tensile force, measurement uncertainties caused by the imperfections of the measuring instrumentation are predominant, both on SLTTD and CTTD. However, the results of the elastic modulus

measurement on SLTTD are more scattered due to the lower accuracy of the elongation measurement (0.01 mm). That is also the reason why there are no registered data in the region of the elongations of less than 0.01 mm. In the area of elongations greater than 0.06 mm, changes in relative uncertainties of the elastic modulus exhibit an identical trend, regardless of the device type. Those uncertainties are not caused only by the imperfections of the measuring instrumentation, but also by the compliance in the subsystems of the device, especially in the contact zone between the test specimen and the grips.

The problem of compliance is particularly emphasized when the test specimen is clamped around its circumference. In that case, the tensile force is transferred through the friction force which occurs in the contact zone between the grips and the gripped end of the specimen. The real values of the specimen elongation in the elastic region are small (of the order of a few tenths of a millimeter). Therefore, the compliance in the contact zone of the order of a few hundredths of a millimeter produces a significant uncertainty in the elastic modulus measurement. The uncertainty in the elastic modulus caused by the imperfections of the measuring instrumentation is predominant in the area of small displacements and at low tensile forces, while the influence of the compliance predominates at higher tensile forces.

When using SLTTD, the problem of compliance is manageable, as the stiffness of the entire structure can be increased by changing the properties of the compliant segments. Also, the tests can be performed at relatively low values of tensile forces, using test specimens of a smaller cross-section. The selection of the appropriate gripping system can also decrease the measurement uncertainty. In order to minimize the uncertainty in the elastic modulus measurement, it is significant to select the optimal geometric parameters for the specimen. Testing of specimens with a greater gauge length and a smaller cross-section provides more accurate results at any stress level in the elastic region.

The experimental results (Fig. 6) indicate that the mean values of the uncertainties in the elastic modulus measurements on SLTTD (1.56%) and CTTD with an extensometer (1.97%) have close values, even though the accuracy of the elongation measurement was 1 μm on the CTTD and 10 μm on SLTTD.

Figs. 6 and 8 indicate that the results obtained on CTTD begin to exhibit an unexpected scattering when the elongation reaches 0.064 mm, even though the elongation limit in the elastic region is 0.13 mm for the given test conditions. For elongations greater than 0.064 mm, results of the elastic modulus measurement deviate from 0% to 20% (Fig. 8) from the reference values given in ISO and ASTM standards.

At the same time, in the entire elastic region, the results obtained on SLTTD do not deviate more than 5% from the reference values of the elastic modulus for the tested material.

7. Conclusion

Based on the analysis of literature sources, theoretical considerations, and the results of experimental research provided in the paper, the following conclusions can be reached:

Small unconventional laboratory tensile testing devices have a considerable number of advantages over conventional testing devices, from a theoretical, technical, technological, and especially economic aspect. They can be applied very efficiently in both education and research.

The uncertainty in the elastic modulus measurement is caused by the imperfection of the measuring instrumentation and the compliance of certain subassemblies of the device, especially the compliance of the gripping system.

The results of the theoretical analysis presented in this paper confirmed the influence of the size and tolerance of the specimen's geometric parameters as well as the influence of the imperfections of the measuring instruments on the expected, analytically determined measurement uncertainty. The most probable scattering of the values of the elastic modulus determined by tensile testing was confirmed as well.

The results of experimental research conducted on a small laboratory tensile testing device are in agreement with the theoretical considerations on the uncertainty in the determination of the elastic modulus.

The authors consider that the theoretical basis of the proposed method for the evaluation of the uncertainty in the elastic modulus measurement can be efficiently implemented in many indirect methods. Indirect methods are based on different parameters. Therefore, the influence trends of the parameters associated with the particular indirect method, i.e., the analytical or regression functions defining the dependence of the elastic modulus upon the influential parameters, should be analyzed. Statistical methods can then be used to determine the measurement uncertainties for each of the influential parameters.

Future research will be focused on the quantification of errors caused by the compliance of certain subassemblies of the device. Those errors occur at higher levels of tensile forces and belong to the category of systematic errors.

The authors consider that small laboratory tensile testing devices enable the elimination of systematic errors caused by the compliance of subassemblies and open a wide range of possibilities for future research related to the improvement of their performance and the expansion of the scope of their application.

CRediT authorship contribution statement

Sonja Kostic: Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Writing - original draft, Visualization. **Jasmina Milojkovic:** Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Writing - original draft, Visualization. **Goran Simunovic:** Software, Validation, Formal analysis, Resources, Writing - review & editing. **Djordje Vukelic:** Methodology, Validation, Resources, Writing - original draft, Writing - review & editing. **Branko Tadic:** Conceptualization, Resources, Writing - review & editing, Supervision.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

Research presented in this paper was supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia.

References

- [1] R. Viala, V. Placet, S. Cogan, Identification of the anisotropic elastic and damping properties of complex shape composite parts using an inverse method based on finite element model updating and 3D velocity fields measurements (FEMU-3DFV): application to bio-based composite violin soundboards, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 106 (2018) 91–103, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.12.018>.
- [2] J.D. Lord, R.M. Morrell, Elastic Modulus Measurement, Good Practice Guide No. 98, National Physical Laboratory, 2006.
- [3] F. Bucciarelli, G.P. Malfense Fierro, M. Zarrelli, M. Meo, A non-destructive method for evaluation of the out of plane elastic modulus of porous and composite materials, *Appl. Compos. Mater.* 26 (3) (2019) 871–896, <https://doi.org/10.1007/s10443-018-9754-5>.
- [4] J. Nunn, Measuring Young's modulus the easy way, and tracing the effects of measurement uncertainties, *Phys. Educ.* 50 (5) (2015) 538–547, <https://doi.org/10.1088/0031-9120/50/5/538>.
- [5] F.P. Pramesti, M.R. Poot, M.F.C. Van de Ven, A.A.A. Molenaar, Determining stiffness modulus by means of different mechanical testing, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 615 (2019), <https://doi.org/10.1088/1757-899x/615/1/012132>.
- [6] W.C. Oliver, G.M. Pharr, An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments, *J. Mater. Res.* 7 (6) (1992) 1564–1583, <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>.
- [7] W.C. Oliver, G.M. Pharr, Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology, *J. Mater. Res.* 19 (1) (2004) 3–20, <https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3>.
- [8] D.J. Shuman, A.L.M. Costa, M.S. Andrade, Calculating the elastic modulus from nanoindentation and microindentation reload curves, *Mater. Charact.* 58 (4) (2007) 380–389, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.06.005>.
- [9] T. Coorevits, S. Kossman, D. Chicot, F. Hennebelle, A. Montagne, A. Iost, Virtual machine concept applied to uncertainties estimation in instrumented indentation testing, *J. Mater. Res.* 34 (14) (2019) 2501–2516, <https://doi.org/10.1557/jmr.2019.203>.
- [10] R. Cagliero, G. Barbato, G. Maizza, G. Genta, Measurement of elastic modulus by instrumented indentation in the macro-range: Uncertainty evaluation, *Int. J. Mech. Sci.* 101–102 (2015) 161–169, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.07.030>.
- [11] M. Mahmoud Ali, A.N.M. Omran, M. Abd-El-Hakeem Mohamed, Prediction of the correlations between hardness and tensile properties of aluminium-silicon alloys produced by various modifiers and grain refiners using regression analysis and an artificial neural network model, *Eng. Sci. Technol. Int. J.* 24 (1) (2021) 105–111, <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2020.12.010>.
- [12] EN 10002-1: Metallic materials - Tensile testing: Part 1. Method of test at ambient temperature, European Committee for Standardization, 2001.
- [13] ASTM E8, E8M-09, Standard Test Methods For Tension Testing Of Metallic Materials, ASTM International, 2010.
- [14] EN ISO 6892-1:2019, Metallic Materials - Tensile Testing - Part 1: Method Of Test At Room Temperature, European Committee for Standardization, 2019.
- [15] H.M. Sonne, Bestimmung des Elastizitätsmoduls im Zugversuch – Determination of Young's modulus in tensile testing. Tagung Werkstoffprüfung, Vortrags- und Diskussionstagung, Bad Nauheim, Friedberg, Germany, 219–230, 1999.
- [16] S. Suttner, M. Merklein, A new approach for the determination of the linear elastic modulus from uniaxial tensile tests of sheet metals, *J. Mater. Process. Technol.* 241 (2017) 64–72, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.10.024>.
- [17] W. Montero, R. Farag, V. Díaz, M. Ramirez, B.L. Boada, Uncertainties associated with strain-measuring systems using resistance strain gauges, *J. Strain. Anal. Eng. Des.* 46 (1) (2011) 1–13, <https://doi.org/10.1243/03093247JSA661>.
- [18] H.B. Motra, J. Hildebrand, A. Dimmig-Osburg, Assessment of strain measurement techniques to characterise mechanical properties of structural steel, *Eng. Sci. Technol. Int. J.* 17 (4) (2014) 260–269, <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2014.07.006>.
- [19] J. Kazakeviciute, J.P. Rouse, D.S.A. De Focatiis, C.J. Hyde, The development of a novel technique for small ring specimen tensile testing, *Theor. Appl. Fract. Mech.* 99 (2019) 131–139, <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.11.016>.
- [20] J.T. Cantrell, S. Rohde, D. Damiani, R. Gurnani, L. DiSandro, J. Anton, A. Young, A. Jerez, D. Steinbach, C. Kroese, P.G. Ifju, Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts, *Rapid Prototyp. J.* 23 (4) (2017) 811–824, <https://doi.org/10.1088/RPJ-03-2016-0042>.
- [21] F. Zhu, P. Bai, Y. Gong, D. Lei, X. He, Accurate measurement of elastic modulus of test specimen with initial bending using two-dimensional DIC and dual-reflector imaging technique, *Measurement* 119 (2018) 18–27, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.01.043>.
- [22] J. Donnini, G. Lancioni, G. Chiappini, V. Corinaldesi, Uniaxial tensile behavior of ultra-high performance fiber-reinforced concrete (Uhpfrc): experiments and modeling, *Compos. Struct.* 258 (2021) 113433, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113433>.
- [23] Z.C. Ma, H.W. Zhao, K.T. Wang, X.Q. Zhou, X.L. Hu, S. Lu, H.B. Cheng, Note: Investigation on the influences of gripping methods on elastic modulus by a miniature tensile device and in situ verification, *Rev. Sci. Instrum.* 84 (6) (2013), <https://doi.org/10.1063/1.4808374>. 066102-1-066102-3.
- [24] F. Hajy Akbary, M.J. Santofimia, J. Sietsma, Elastic strain measurement of miniature tensile specimens, *Experiment. Mech.* 54 (2) (2014) 165–173, <https://doi.org/10.1007/s11340-013-9785-7>.
- [25] S. Adamczak, J. Bochnia, C. Kundera, Stress and strain measurements in static tensile tests, *Metro. Meas. Syst.* 19 (2012) 531–540, <https://doi.org/10.2478/v10178-012-0046-3>.
- [26] L.R.O. Silva, Evaluation of the Uncertainty of Measurement of Mechanical Properties on the Tensile Testing, *Simpósio de Metrologia, Rio de Janeiro, 2004*.
- [27] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, International Organization for Standardization, Geneva First Edition, 1993, ISBN 92-67-10188-9 (BSI Equivalent: BSI PD 6461: 1995, Vocabulary of Metrology, Part 3. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. BSI), London, 1995.
- [28] Joint Committee for Guides in Metrology. Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of uncertainty in measurement. JCGM 100:2008.

- [29] S. Tarafder, K.K. Gupta, Estimation of Uncertainty in Mechanical Testing, Paper published in Study Material of Refresher Course on ISO/IEC 17025 Standards Organised by NABL and CGCRI, Kolkata, 2004.
- [30] F. Baciú, A. Rusu-Casandra, S.D. Pastrama, Low strain rate testing of tensile properties of steel, *Mater. Today* 32 (2020) 128–132, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.469>.
- [31] B. Zhao, W. Chen, Rate-dependent mechanical properties and elastic modulus of ETFE foils used in inflated forming of transparency air-inflated cushion membrane structures, *Eng. Struct.* 227 (2021) 111404, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111404>.
- [32] W. Gabauer, 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, 2000.
- [33] M. Soy, M. Lus, Comparison of A and B Type measurement uncertainties in tensile testing of metallic materials at ambient temperature, *Int. J. Nat. Eng. Sci.* 12 (2018) 46–55.
- [34] CWA 15261-2:2005: Measurement uncertainties in mechanical tests on metallic materials. The evaluation of uncertainties in tensile testing, 2005.
- [35] R.J. Moffat, Describing the uncertainties in experimental results, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 1 (1) (1988) 3–17, [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(88\)90043-X](https://doi.org/10.1016/0894-1777(88)90043-X).
- [36] J.P. Holman, *Experimental Methods for Engineers*, 8th ed., McGraw-hill Series in Mechanical Engineering, New York, 2011.
- [37] S. Bell, *A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement*, NPL Measurement Good Practice Guide No 11, 1999.
- [38] F.A. Kandil, UNCERT Manual of Codes of Practice for the Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Materials, Manual, National Physical Laboratory, United Kingdom, 2000.
- [39] S. Kłysz, J. Lisiecki, Selected problems of measurement uncertainty – Part 2, *Tech. Sci.* 11 (2008) 265–276, <https://doi.org/10.2478/v10022-008-0019-7>.
- [40] J.D. Lord, R.M. Morrell, Elastic modulus measurement—obtaining reliable data from the tensile test, *Metrologia* 47 (2) (2010) S41–S49, <https://doi.org/10.1088/0026-1394/47/2/S05>.
- [41] B. Tadic, D. Vukelic, D. Miljanic, B. Bogdanovic, I. Macuzic, I. Budak, P. Todorovic, Model testing of fixture-workpiece interface compliance in dynamic conditions, *J. Manuf. Syst.* 33 (1) (2014) 76–83, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.05.004>.
- [42] D. Vukelic, B. Tadic, B. Bogdanovic, P. Todorovic, Using pre-processing and indenting of contact interface to improve fixture clamping efficiency, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 104 (1-4) (2019) 179–194, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03845-5>.
- [43] V.L. Popov, *Coulomb's law of friction, Contact Mechanics and Friction*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10803-7_10.
- [44] C.T. Li, N.R. Langley, Improvement in fiber testing of high-modulus single-filament materials, *J. Am. Ceram. Soc.* 68 (8) (1985) C-202–C-204, <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1985.tb10183.x>.
- [45] J.R. Davis, *Tensile Testing*, 2nd Edition, ASM International, 2004.
- [46] A. Mucsi, Effect of gripping system on the measured upper yield strength estimated by tensile tests, *Measurement*. 46 (5) (2013) 1663–1670, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.11.036>.
- [47] G.B. Rathmayr, A. Bachmaier, R. Pippin, Development of a new testing procedure for performing tensile tests on test specimens with sub-millimetre dimensions, *J. Test. Eval.* 41 (2013) 1–12, <https://doi.org/10.1520/JTE20120175>.
- [48] L. Woong, K. Ho-Kyung, Design and development of a miniaturised tensile testing machine, *Glob. J. Eng. Educ.* 15 (2013) 48–53.
- [49] K. Kumar, A. Pooleery, K. Madhusoodanan, R.N. Singh, J.K. Chakravarty, B.K. Dutta, R.K. Sinha, Use of miniature tensile test specimen for measurement of mechanical properties, *Procedia Eng.* 86 (2014) 899–909, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.112>.

Прилог 4 - Уговор о пословно техничкој сарадњи

1. SZR Mašing sa adresom Dragoslava Stefanovića 34, 34000 Kragujevac koju zastupa vlasnik Živadin Pavlović, dipl.maš.inž. (u daljem tekstu Mašing) i
2. FAKULTET INŽENJERSKIH NAUKA UNIVERZITETA U KRAGUJEVCU sa adresom Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac koga zastupa dekan Prof.dr Dobrica Milovanović, dipl. maš. inž. (u daljem tekstu Fakultet).

Zaključuju dana 14.11.2018. godine, u Kragujevcu

САМОСТАЛНА ЗАНАТСКА
"МАШИЊ" **"Т"**
Број / 071/18
Дана 14.11.2018 год.
КРАГУЈЕВАЦ

UGOVOR o poslovno tehničkoj saradnji

ФАКУЛТЕТ ИНЖЕНЈЕРСКИХ НАУКА
УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

бр. 011/4312

14.11.2018 год.
КРАГУЈЕВАЦ

Član 1

Predmet ovog ugovora je uspostavljanje zajedničke poslovno tehničke saradnje na razvoju ispitivanju, proizvodnji, promociji i prodaji školskih i fakultetskih učila iz oblasti tehnike.

Član 2

Obaveze Fakulteta odnosno Centra za revitalizaciju industrijskih sistema i Centra za terotehnologiju su:

- o Razvoj i ispitivanje funkcionalnog modela i prototipa učila,
- o Verifikacija svakog tipa učila sa aspekta funkcionalnosti i bezbednosti,
- o Završna kontrola svakog prototipa učila i
- o Naučno stručna promocija učila.

Član 3

Obaveze Mašinga su:

- o Finansiranje proizvodnje učila,
- o Izrada tehničke dokumentacije učila prema idejnim rešenjima koja dostavlja Fakultet - Centar za revitalizaciju industrijskih sistema i Centar za terotehnologiju,
- o Montaža i ispitivanje funkcionalnosti učila i
- o Plasman i distribucija - prodaja učila.

Član 4

Mašing za svako prodato učilo uplaćuje Fakultetu (Centru za revitalizaciju industrijskih sistema i Centru za terotehnologiju) iznos od 10 % (deset procenata u šta je uključen i PDV) od vrednosti cene prodaje učila i ustupa Fakultetu po jedan primerak od svakog razvijenog učila bez finansijske nadoknade.

Član 5

Ispred Fakulteta inženjerskih nauka u Kragujevcu na svakom tipu učila u svim aktivnostima iz člana 2 ravnopravno učestvuju Centar za revitalizaciju industrijskih sistema kojim rukovodi upravnik Prof. dr Milan Erić, dipl.maš.inž. i Centar za terotehnologiju kojim rukovodi upravnik Prof. dr Ivan Mačužić, dipl.maš.inž.

Član 6

Fakultet odnosno Centar za revitalizaciju industrijskih sistema i Centar za terotehnologiju zadržavaju kompletna autorska prava za svako razvijeno učilo koje će proizvoditi SZR Mašing.

Član 7

Ugovorne strane su obavezne da sve podatke koji su im saopšteni ili koje na drugi način saznaju u izvršenju ovog ugovora čuvaju kao poslovnu tajnu.

Član 8

Ovaj ugovor se zaključuje na vremenski period od 5 (pet) godina, s tim što se isti može produžiti nakon isteka vremena od 5 (pet) godina, ako za to postoji obostrani interes i potreba među ugovornim stranama.

Član 9

Ovaj ugovor se može menjati i dopunjavati samo uz pisanu saglasnost ugovornih strana.

Član 10

Obe ugovorne strane se u svemu obavezuju po ovom ugovoru i nastoje da sve sporove, ako do njih dođe, reše sporazumno i u tom cilju mogu formirati arbitražnu komisiju. Ako i pored toga nije moguće rešiti spor između ugovarača nadležan je Trgovinski sud u Kragujevcu.

Član 11

Ovaj ugovor je sačinjen u 4 (četiri) istovetna primeraka, od kojih svaka ugovorna strana zadržava po 2 (dva).



Прилог 5 - Потврда о продаји и рачун



PROIZVODNJA, REMONT I POPRAVKA MAŠINA, UREĐAJA I ALATA

Dragoslava Stefanovića 34,

34000 Kragujevac

Tel./Fax: + 381 (034) 383-118: 30-20-30

e-mail: masing@ptt.rs; www.masing.rs

Matični broj: 52254795; PIB: 101509043

Tekući račun: 160-24499-08

POTVRDA

Da je SZR Mašing iz Kragujevca dana 19.11.2018. godine prodao Visokoj tehničkoj školi strukovnih studija iz Trstenika **UREĐAJ ZA ISPITIVANJE MATERIJALA ZATEZANJEM – KIDALICU.**

Potvrda se izdaje u svrhu prijave tehničkog rešenja.

Kragujevac
23.02.2023.



02193

СТРУКОВНИХ СТУДИЈА
Број 106/2018-02

22.11.2018 год.

37240 TRSTENIK

PROIZVODNJA, REMONT I POPRAVKA MAŠINA, UREĐAJA I ALATA

SAMOSTALNA ZANATSKA RADNJA

MAŠING

ŽIVADIN PAVLOVIĆ PREDUZETNIK



Dragoslava Stefanovića 34, Kragujevac
Tel./Fax: + 381 (034) 383-118: 30-20-30

e-mail: masing@ptt.rs; www.masing.rs

Matični broj: 52254795

Tekući račun: 160-24499-08

PIB: 101509043

RAČUN br. 140/18

Datum izdavanja: 19.11.2018.

Mesto izdavanja: Kragujevac

Datum prometa: 19.11.2018.

Visoka tehnička mašinska škola
strukovnih studija
Radoja Krstića 19
37240 Trstenik
PIB 101305752

Otpremnica br. 745/18 od: 19.11.2018.

R.br.	NAZIV ROBE - USLUGE	J. mere	Količina	Cena dinara	Iznos dinara
	Učila za:				
1.	Određivanje Hukovog dijagrama za metalne i nemetalne materijale, ispitivanje materijala na istezanje (kidalica) i određivanje krutosti opruga	kom	1		
2.	Demonstriranje termičkog širenja materijala na povećanim temperaturama	kom	1		
3.	Određivanje zemljinog ubrzanja i proveru drugog Njutnovog zakona	kom	1		
	Svega neto:				
	PDV 20%				
	Svega za uplatu:				
	Slovima: tristotinepedesetvehiljadeosamstotinadin ara				
	Napomena: Učila su razvijena i testirana u Centru za revitalizaciju industrijskih sistema i Centru za terotehnologiju Fakulteta inženjerskih nauka u Kragujevcu				

Fakturisao: *[Signature]* 1060



Direktor: *[Signature]*

Račun je plativ u roku od pet dana od prijema. Posle ovog roka zaračunava se kamata. Reklamacije se primaju u roku od jednog dana od prijema robe-usluga. U slučaju spora nadležan je Trgovinski sud u Kragujevcu.

Прилог 6 - Потврда о коришћењу

Академија струковних студија Шумадија, Одсек Трстеник

Радоја Крстића 19

37240 Трстеник

Број: 84/2023-07

24.02.2023.

ПОТВРДА

Висока техничка машинска школа струковних студија Трстеник је 19.11.2018. године по рачуну бр. 140/18 купила малу лабораторијску кидалицу за испитивање материјала затезањем од СЗР Машинг-а из Крагујевца.

Овим се потврђује да се кидалица користи у едукативне и истраживачке сврхе, као уређај за испитивање материјала затезањем у Академији струковних студија Шумадија, Одсек Трстеник.



Проф. катедре за машинско и
индустријско инжењерство

M. Karuћ
др. Марина Карић, проф. с. с