

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Војна академија Универзитета одбране у Београду



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Пројектили и упаљачи

Предмет: Мерење и управљање

Број индекса: 505/2011

Стефан В. Ђурић

**Експериментална испитивања попустљивости
контакта еластомера и челика при дејству
тангенцијалне динамичке силе**

дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Петар Тодоровић

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог дипломског рада на тему „Експериментална испитивања попустљивости контакта еластомера и челика при дејству тангенцијалне динамичке силе“ биће анализирани добијени резултати испитаних узорка полиуретана коришћених као стезни алат, како би се кроз поређење добијених вредности утврдило који од три узорка има најбоље карактеристике. Ова експериментална испитивања имају за циљ повећање поузданости и носивости тангенцијално оптерећеног контакта еластомера и челика, тачније смањење њихове попустљивости при што мањем дејству нормалне силе.

За реализацију овог експеримента претходно је развијена мерна инструментација неопходна како би се кроз комплексна испитивања добили што тачнији резултати, и дошло до одређених побољшања која су применљива у реалном систему.

Препоручена структура рада:

1. Уводна разматрања
2. Теоријска разматрања попустљивости тангенцијално оптерећеног контакта
3. Експериментална испитивања
4. Статистичка анализа и обрада података мерења
5. Закључак
6. Литература

Крагујевац, 27. 09.2015.

Ментор:

Проф. Др Петар Тодоровић

Садржај

1. Уводна разматрања	6
1.1 Развој полимерних материјала и њихова подела	6
1.2 Еластомери и њихова примена у индустрији	6
1.2.1 Полиуретан	7
1.3 Појам крутости и попустљивости	8
2. Теоријска разматрања попустљивости тангенцијално оптерећеног контакта	9
2.1 Повећање поузданости и носивости тангенцијално оптерећених веза	9
2.2 Динамичка носивост и попустљивост веза елемената прибора и радног предмета	10
2.3 Практичне мере за повећање динамичке издржљивости	11
3. Експериментална испитивања	12
3.1 Материјали испитиваних узорака	14
3.1.1 Први узорак који представља радни предмет	14
3.1.2 Други узорак који представља стезни елемент	14
3.2 Мерна инструментација коришћена приликом испитивања попустљивости у динамичким условима оптерећења	16
3.3 Резултати мерења динамичких испитивања три врсте „ <i>fibroflex-a</i> ”	19
4. Статистичка анализа и обрада података мерења	31
4.1 Графички приказ односа тангенцијалне силе и померања	31
4.1.1 Први испитани узорак полиуретана црвене боје	31
4.1.2 Други испитани узорак полиуретана зелене боје	31
4.1.3 Трећи испитани узорак полиуретана жуте боје	32
5. Закључак	34
6. Литература	35

Резиме

Експериментална испитивања попустљивости за основни циљ имају остваривање што веће носивости и поузданости контакта стезног алата и предмета обраде, како би се дејством што мање нормалне силе постигла већа носивост контатка, односно смањила попустљивост. Као стезни алат у овом експерименту коришћен је узорак израђен од полиуретана, док је радни предмет била челична призматична плочица. Како би се тачност добијених резултата повећала и омогућио приступ комплекснијим испитивањима, развијена је специјална мерна инструментација неопходна за извођење овог експеримента.

Кључне речи: попустљивост, носивост, стезни алат, радни предмет, полиуретан.

Abstract

Experimental tests of compliance for the basic purpose have the realization of greater capacity and reliability of contact of the clamping tool and work piece, in order to minimize the influence of normal force achieve higher capacity contact or reduced compliance. As the clamping tool in this experiment, we used a sample made of polyurethane, while the work piece was a steel prismatic plate. In order to increase the accuracy of the results and provide access to more complex tests, developed a special measurement instrumentation necessary to perform this experiment.

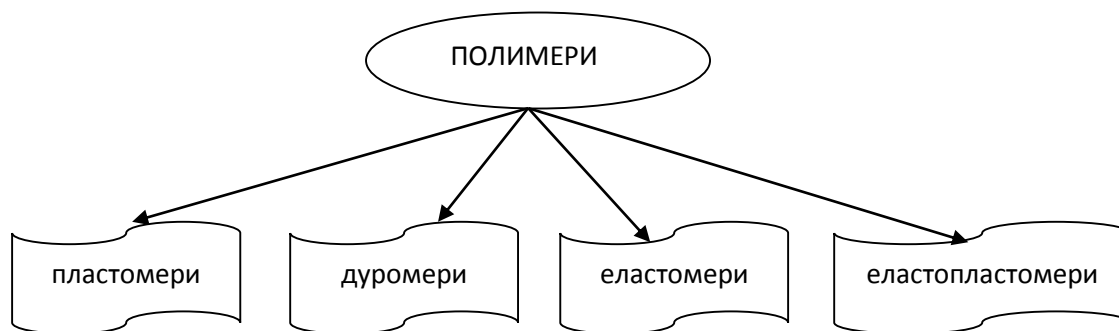
Keywords: compliance, indulgence capacity, clamping tool, work piece, polyurethane.

1. Уводна разматрања

1.1 Развој полимерних материјала и њихова подела

Захваљујући могућности испуњења најразличитијих захтева, полимерни материјали налазе примену у практично свим областима људске делатности. Развој хемијске индустрије последњих година прошлог века, посебно у области полимерних материјала довео је до развоја читавог низа нових производа и масовне производње различитих материјала специфичних механичких и других карактеристика.

Полимерни материјали имају веома разноврсну структуру што представља основне проблеме при анализи утицаја полазних сировина и технолошких параметара на њихове карактеристике. Да би се ови утицаји одредили, потребно је познавање хемијских, механичких, термичких, електричних и других својстава пластичних маса, што подразумева обимна истраживања као и усавршавање метода за истраживања. Полимери се деле на пластомере, дуромере, еластомере, еластопластомере (приказано на слици 1.1). [1]



Слика 1.1 Подела полимера

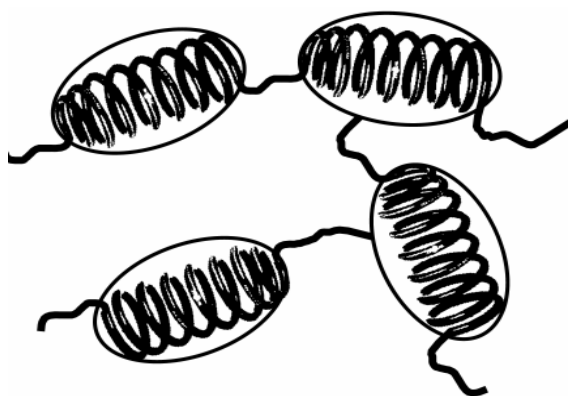
1.2 Еластомери и њихова примена у индустрији

Еластомери, феноменолошки дефинисани, обухватају све полимерне материјале који се лако деформишу у великом износу, под дејством малих напона, а по престанку њиховог дејства брзо се враћају у првобитан облик. Овим је обухваћена растресита ковалентна просторна мрежа каучука чији сегменти врше термичка конформациона кретања-што је типична гума, као и каучуци који нису ковалентно умрежени али имају блок-кополимерну структуру, тако да крути блокови граде својом асоцијацијом умрежења, а меки блокови обезбеђују гумолику еластичност. То су тзв. термоеластични еластомери. Поред њих, овом дефиницијом су обухваћени још неки нови гумасти материјали специјалне структуре.

Савремено инжењерство полимерних материјала пружа могућности да се неки типични нееластомерни полимери, тј полимери различити од каучука преведу у материјале са својствима гуме, нпр. стереорегуларни, висококристалични полипропилен у виду влакана погодним механичким третманом може се превести у систем са великим уделом аморфне фазе по запремини, која је ипак просторно фиксирана-учвршћена (“умрежена” – физичким

силама) заосталом кристалном фазом. При томе, термин вулканизат задржава се за оне врсте гуме које имају растреситу ковалентну просторну мрежу гипких ланаца на собној температури, добијену поступком вулканизације, односно хемијског умрежавања.

Посебан значај нови материјали на бази полимера добијају применом у машинској, аутомобилској, авио и космичкој индустрији, електротехници, телекомуникацијама.



Еластомери (природни и синтетички каучуци, силикони, полиуретани) на собној се температури могу истезати најмање до двоструке изворне дужине и тренутно се враћају у почетну дужину након престанка деловања спољашње силе.

Макромолекули еластомера слични су опрузи, приказано на слици 1.2, па те кљупчасте структуре подлежу истезању до 100% њихове почетне дужине. [2]

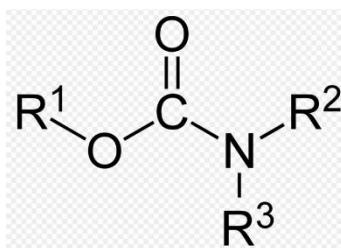
Слика 1.2 Шематски приказ еластомера

Постоји само мали број макромолекуларних материјала са високом еластичношћу. Да би материјал био високо еластичан, међумолекуларне везе не смеју бити прејаке и не смеју се формирати кристална зрна.

Проналаском веома јаких, стабилних и трајних композитних материјала, топлотно издржљивих арамидних влакана, високоеластичних еластомера и биокompatibilних материјала, крајем 20-ог века учињен је значајан напредак у индустрији полимера. Због широке примене ових материјала, њихов обим производње значајно премашује производњу свих метала заједно. Једна од њихових предности је ниска цена и мала специфична тежина. [1,3]

1.2.1 Полиуретан

Полиуретан спада у групу еластомера, који је у овом раду коришћен за експериментална испитивања попустљивости контакта еластомера и челика при дејству тангенцијалне динамичке силе. Овај полимер састоји се од ланаца органских јединица спојених карбамат везама. Карбамат везе представљају сродне функционалне групе, које се још називају уретанима. Хемијска структура карбамата дата је на слици 1.3.



Слика 1.3 Хемијска структура карбамата

Полиуретани настају комбиновањем два дво-или више функционалних мономера. Једна група садржи два или више изоцијаната, док друга садржи две или више хидроксилне групе. Наведени еластомер одликују следеће карактеристике:

- отпорност на хабање и абразију,
- отпорност на сечење и цепање,
- отпорност на удар,
- широк распон тврдоћа,
- висок капацитет носивости (око пет пута већи од гуме),
- отпорност на ниске температуре,
- широк температурни опсег примене : од -65 °C до 155 °C.

Одликују га савитљивост и велика отпорност на удар. [4]

1.3 Појам крутости и попустљивости

Прорачун машинских делова и конструкција најчешће је заснован на прорачуну чврстоће, али је често неопходно да машински делови, склопови и конструкције задовоље и неке друге критеријуме.

Пре свега се мисли на захтеве крутости и попустљивости, као и отпорности на трење и хабање.

Крутост је способност конструкције и њених делова да се у одређеним условима оптерећења и напона супростави како еластичним тако и пластичним деформацијама. Појава нежељених деформација може настати много пре достизања критичне вредности напона при којима настаје разарање материјала. Према томе, у многим случајевима радна способност је одређена крутошћу конструкције пре него чврстоћом. Недовољна крутост изазива недозвољене деформације и попустљивост што може изазвати грешке приликом дејства спољашњих сила.

Уколико постоји више међусобно спрегнутих делова и склопова у један систем може доћи до појаве смањења укупне крутости, поготово ако се јаве зазори у налегањима појединих делова у вези.

Посебно треба нагласити важност појма крутости код обрадних система, јер од крутости система алатна машина-стезни алат-радни предмет зависи тачност израде. Код конструкција у ракетној и авио индустрији где се тежи смањењу укупне масе крутост игра веома значајну улогу. [5,6]

2. Теоријска разматрања попустљивости тангенцијално оптерећеног контакта

2.1 Повећање поузданости и носивости тангенцијално оптерећених веза

Поузданост представља вероватноћу да неки систем обавља своју основну наменску функцију у предвиђеном временском интервалу, под дејством задатих оптерећења. Носивост контакта везана је како за статичко и динамичко оптерећење које контакт у одређеним условима може да издржи тако и за поузданост везе. Услови остваривања контакта везани су за одговарајућа ограничења која могу бити веома комплексне природе.

Тангенцијална оптерећења контакта која настају приликом дејства спољашњих сила у већини случајева се уравнотежавају преко сила трења. Силе трења се јављају између површина у контакту и представљају резултанту производа тангенцијалних напона и елементарних контактних површина. У зони контакта површина елемената услед дејства спољашњег оптерећења долази до одређених померања, тачније попустљивости у правцу и смеру дејства вектора резултанте силе спољашњег оптерећења. Величина тих померања зависи од великог броја фактора:

- макро и микро геометрије контактних површина,
- механичких карактеристика елемената веза,
- нивоа и расподеле нормалних и тангенцијалних напона у контакту.

Померање елемената у контакту приликом дејства спољашњег оптерећења резултат је попустљивости зоне контакта стезног алата и предмета обраде. Уколико посматрамо везу између контакта стезног алата и предмета обраде, величина померања радног предмета током трајања процеса обраде резањем, настала је као резултат попустљивости зоне контакта елемента за стезање и радног предмета и попустљивости између радног предмета и елемента за позиционирање између осталог зависи од величине силе резања. Овакво померање може да доведе до појаве грешке приликом обраде предмета иако је са гледишта макро геометрије систем у равнотежи. Ако услед попустљивости контакта дође до прекорачења вредности дозвољене толеранције предмет постаје неупотребљив.

Код преноса спољашњег оптерећења преко силе трења, поузданост се обично креће у широким границама. У реалним техничким системима долази до проблема, јер је веома тешко остварити поуздану везу преко силе трења без обезбеђења високих нормалних напона у зони контакта. Обезбеђивање оваквих услова код веза које се често растављају доводи до озбиљног проблема.

Истраживања у овој области теже ка проналажењу могућности остваривања што веће поузданости и носивости уз што мање оптерећење нормалних сила. [6,7]

2.2 Динамичка носивост и попустљивост веза елемената прибора и радног предмета

При базирању и стезању предмет обраде се доводи у контакт са елементима прибора за позиционирање и стезање. Ови елементи, теоријски гледано остварују контакт по површинама „линијама“ и „тачкама“ односно реалним равним површинама и елементарним површинама формираним око одговарајућих контактних линија и тачака. У току трајања процеса обраде силе и моменти резања преносе се са алата на предмет обраде, тело прибора, елементе за позиционирање и стезање, постоље прибора и радни сто машине. Приликом преноса оптерећења у већини случајева са аспекта носивости и попустљивости веза контакта предмета обраде са елементима за стезање и позиционирање је најосетљивија. Код појединих конструкција значајнији удео у укупној попустљивости могу имати и остали елементи прибора који учествују у ланцу преноса оптерећења.

Крутост је дефинисана као однос силе и померања што је дато у следећем обрасцу:

$c = \frac{F}{z}$, где у овом случају F -представља силу а z – померање до којег долази услед дејства силе.

Попустљивост представља реципрочну вредност крутости:

$p = \frac{1}{c} = \frac{z}{F}$, где c – представља крутост, z – померање до којег долази услед дејства силе и F -представља силу.

Постоји велики број израза који дефинишу крутост одређених елемената. Неки од примера су крутост греде, крутост опруге, крутост аксијално оптерећеног штапа. Од великог броја елемената захтевају се високе вредности крутости, односно мале вредности попустљивости. Веза сваког елемента има одређену попустљивост при чему ниво попустљивости зависи од бројних фактора, на које утичу спољашња оптерећења, конкретно силе и моменати резања, као и од карактеристика саме везе. [6]

Отпори кретању делова у спреси, познатији као силе трења морају бити посебно разматрани при изради шеме оптерећења контрукције, тачније у прорачуну покретних делова.

При додиру два покретна дела као отпор кретању јавља се сила трења чији интензитет по Кулоновом закону може бити изражен следећим изразом:

$F_{\mu} = \mu F_n$, где је μ -коэффициент трења, F_{μ} -сила која делује нормално на површину. Коэффициент трења највише зависи од врсте материјала делова који су у контакту, храпавости додирних површина и начина подмазивања тих површина. Вредности коэффициента крећу се у широким границама и тачније се могу одредити само експрименталним методама.

Приликом трења између спрегнутих цилиндричних површина дејство нормалне силе није равномерно по површини. У овом случају момент трења дат је следећим изразом:

$M\mu = \mu_{sr} F_n r$, где је у изразу μ_{sr} – средњи коефицијент трења, r - полупречник цилиндра.

Гледано са аспекта функционалности система, трење машинских делова је непожељна појава, јер има за последицу додатно оптерећивање машинских делова, што доводи до губитка механичке енергије која се претвара у топлотну и настају оштећења. [5]

2.3 Практичне мере за повећање динамичке издржљивости

При реалним условима рада, због сложености појединих утицаја, прорачун динамичке издржљивости и динамичког степена сигурности на бази редуковане динамичке издржљивости често није довољно поуздан. Сходно томе, за скупе и сложене делове и склопове неопходно је извршити одређена испитивања у лабораторијским условима рада. Често је неопходно познавати и применити практичне мере за смањење променљивих оптерећења и напона као и технолошке конструкционе мере за повећање динамичке издржљивости.

Практичне мере за смањење променљивих оптерећења и напона су:

- повећање еластичности веза склопова,
- амортизација оптерећења и напона,
- повећање тачности израде,
- правилан распоред ослонаца и оптерећења.

Повећање еластичности делова у правцу дејства оптерећења и напона врши се увођењем еластичних веза између склопова и веза који примају и преносе таква оптерећења. Смањење променљивих оптерећења и напона може се остварити и повећањем тачности израде машинских делова и њихових ослонаца.

Конструкцијске мере повећања динамичке издржљивости углавном се састоје у томе да се формира такав облик дела и склопа који ће повољно утицати на смањење концентрације напона на критичним местима. [5,6]

3. Експериментална испитивања

Када су у питању истраживања у области динамичког понашања контакта елемената за стезање и радног предмета, односно тангенцијалне носивости и попустљивости контакта, експериментална истраживања у области оптимизације макро и микро геометрије елемената за стезање, према досадашњим анализама немају универзални карактер. Углавном се истраживања у овој области односе на анализу динамичког понашања склопа прибора. Имајући у виду да се испитивања врше у таквим условима, дубља анализа динамичког понашања одређеног контакта између елемената за стезање и радног предмета није могућа. Сходно томе, да би се детаљнија испитивања динамичког понашања и оптимизација елемената прибора обавила, неопходно је поседовати одговарајућу мерну инструментацију.

Када су прибори у питању, веома чест случај је да се силе резања и силе трења које настају на контактима елемената за стезање са радним предметом међусобно уравнотежавају. На слици 3.1 приказан је радни предмет (WP) који је подешен преко два елемента за базирање (S_1 и S_2) и базиран је у близини неке тачке на правцу AB . У овом случају радни предмет је за базну површину стегнут силом стезања F_s . У току трајања процеса на радни предмет делује динамичка сила резања $F(t)$. Сила резања $F(t)$ је функција времена и у општем случају може дејствовати у било којој тачки радног предмета. Сила резања може бити различитог интензитета, правца и смера. То значи да на елементима за базирање долази до појаве нормалних реакција (F_{n1} и F_{n2}) и тангенцијалне силе (F_{t1} и F_{t2}) познатије као силе трења. Приликом дејства силе резања $F(t)$ у назначеном правцу (приказано на слици 3.1), долази до одређене попустљивости веза између елемената за базирање (S_1 и S_2) и радног предмета, без обзира на величину силе $F(t)$. Ова појава настаје из односа који постоји између напона и деформације. Величина попустљивости χ , у општем случају је функција великог броја параметара у следећем облику:

$$\chi = f [F(t), \varphi, F_{n1}, F_{n2}, M_{w1}, M_{w2}, M_{s1}, M_{s2}, G, K]$$

где су:

$F(t)$ – сила резања,

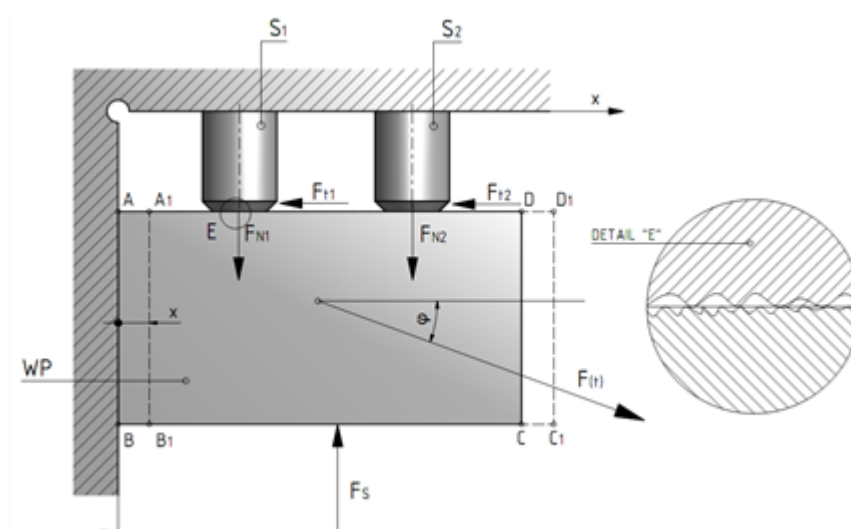
F_{n1} и F_{n2} – нормалне реакције силе на елементима за базирање,

M_{w1} и M_{w2} – скуп параметара који дефинишу механичке и термичке карактеристике материјала радног предмета,

M_{s1} и M_{s2} – скуп параметара који дефинишу механичке и термичке карактеристике материјала елемената за базирање,

G – скуп параметара који дефинишу макро и микро геометрију елемената за базирање и радног предмета у зонама њиховог контакта,

K – остали услови контакта, као што су обрада без или са применом средства за хлађење и подмазивање, грешке и остали параметри.



Слика 3.1 Шематски приказ попустљивости контакта између елемената прибора и радног предмета

Имајући у виду велики број параметара који утичу на попустљивост контакта, датих претходним изразом, попустљивост контакта x могуће је једино одредити експерименталним испитивањима.

Посебно треба водити рачуна о томе да је попустљивост између елемената за стезање и радног предмета у директној вези са грешкама израде радног предмета. Ако је $x \geq T$, где је T дозвољена толеранција одступања неке функционалне коте у односу на базирање AB , доћи ће до појаве недозвољене грешке израде радног предмета. [6,8]

Овим експерименталним истраживањем обухваћена су мерења носивости, тангенцијалне силе F_t и попустљивости контакта x , елемента за стезање и испитиваних узорака који симулирају радни предмет. Као предмет обраде коришћена је призматична челична плочица, док је стезни алат у овом експрменту био полиуретански еластомер специјалних особина „fibroflex“.

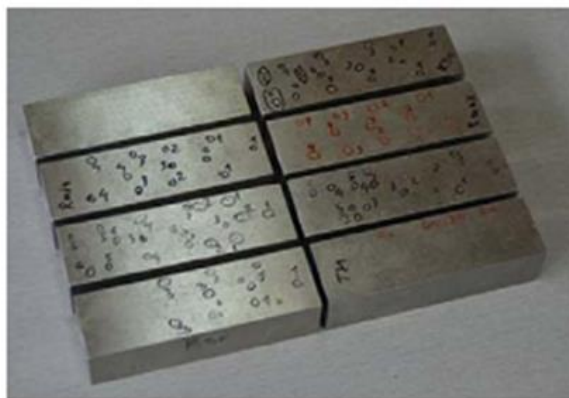
3.1 Материјали испитиваних узорака

3.1.1 Први узорак који представља радни предмет

Експериментална истраживања изведена су на призматичним радним предметима израђеним од челика *C45E* у жареном стању затезне чврстоће 710 MPa и тврдоће 208 HB . Призматични узорак у експерименту симулира радни предмет. Хемијски састав челика је следећи:

- Угљеник (C) 0,44%,
- Силицијум (Si) 0,18%,
- Манган (Mn) 0,27%,

Радни предмет је димензија $25 \times 30 \times 50\text{ mm}$ (слика 3.2).



Слика 3.2 Приказ узорака-радних предмета.

3.1.2 Други узорак који представља стезни елемент

Други узорак на коме су реализована експериментална испитивања су дискови *fibroflex-a*. *Fibroflex* је полиуретански полимер врло специјалних особина. Неке од најзначајнијих особина су одлична еластична својства, дуг радни век када се правилно користи, отпорност на сечење и цепање, добра инертност на све врсте мазива која се користе у току обрадних процеса. [9,10]

Полиуретани се примењују код следећих типова оптерећења:

- код високих динамичких оптерећења,
- код абразивних хабања,
- код контакта са врућом водом.

Користи се за различите позиције у индустрији и карактерише га веома низак коефицијент унутрашњег трења, што му даје посебну предност у примени за израду повратних опруга на алатима за хладно обликовање и сечење метала. Постоје четири различите врсте, које најлакше препознајемо по карактеристичној боји (црвена, зелена, жута, плава).

Испитивања су реализована са три врсте *fibroflex-a* чије се карактеристике међусобно разликују. На слици 3.3 приказани су испитани узорци.



Слика 3.3 Три узорка *fibroflex-a* различитих карактеристика

У наредним табелама (табела 3.1 -3.2) биће приказани подаци о механичким и термичким особинама испитаних узорака *fibroflex-a* који се налазе на претходној слици.

Табела 3.1 Подаци о механичким карактеристикама

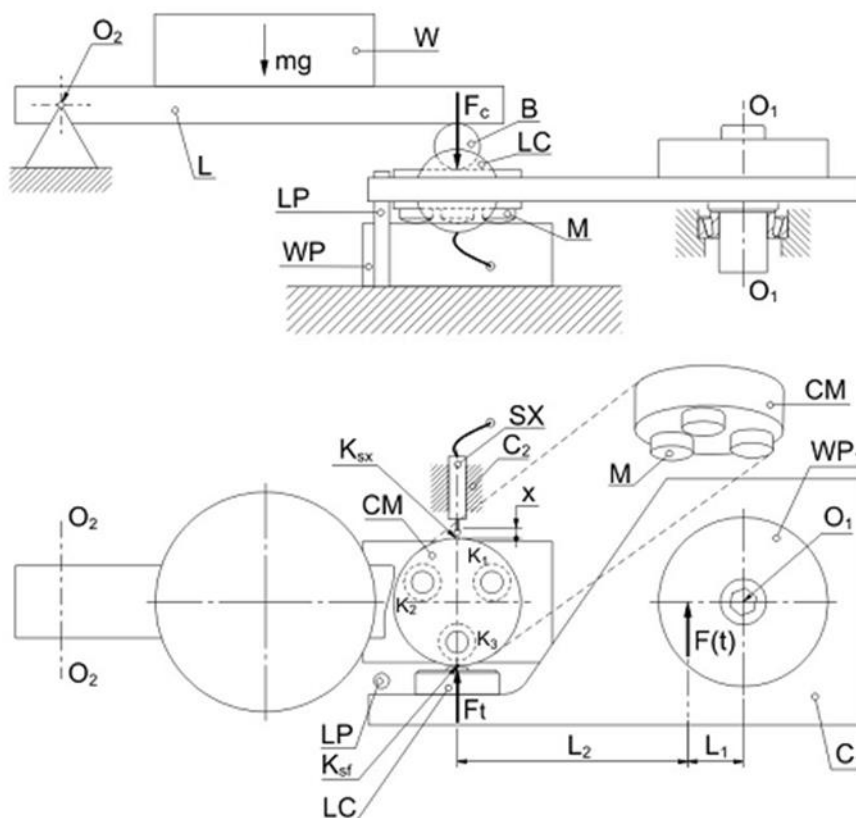
	Јединица	црвени	зелени	жути
Густина	g/cm ³	1,08	1,10	1,13
Модул еластичности	N/cm ²	2300	4900	7700
Затезна чврстоћа	N/cm ²	2100	3150	4300
Издужење до прекида	%	80±3	90±2	96±1
Тврдоћа по Шору	-	-	40±3	50±3

Табела 3.1 Подаци о термичким карактеристикама

	Јединица	црвени	зелени	жути
Термичка кондуктивност	W/m*K	0,137	0,132	0,124
Коефицијент линеарног ширења	1/°C			
од -35° до 0° C		2,28x10 ⁻⁴	2,57 x10 ⁻⁴	2,28 x10 ⁻⁴
од 0 до 25° C		1,92 x10 ⁻⁴	1,82 x10 ⁻⁴	1,60 x10 ⁻⁴
Од 25°до 100° C		1,98 x10 ⁻⁴	1,71 x10 ⁻⁴	1,60 x10 ⁻⁴
Од 100° до 150° C		1,74 x10 ⁻⁴	1,62 x10 ⁻⁴	1,24 x10 ⁻⁴

3.2 Мерна instrumentacija korišćena pri likom ispitivanja popustljivosti u dinamičkim uslovima opterećenja

На слици 3.4 приказана је шема уређаја који је намењен за испитивања попустљивости контакта елемената за стезање и радног предмета.



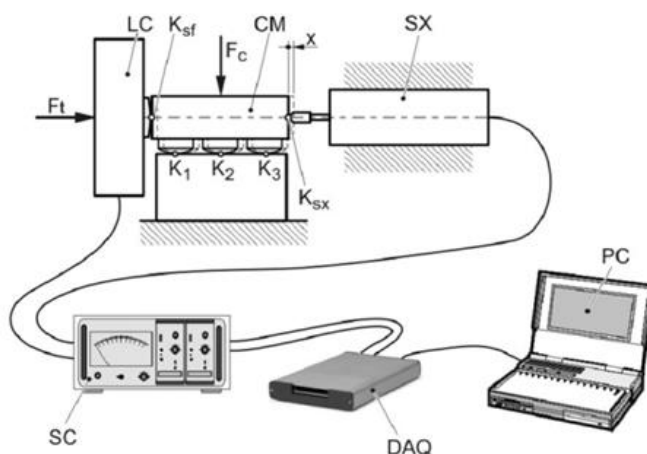
Слика 3.4 Шематски приказ мерне инструментације за мерење динамичке попустљивости контакта између елемената за стежање и радног предмета

Узорак елемента за стезање M , који је претходно причвршћен у носачу CM постављен је је на узорак WP који симулира радни предмет. Контакт између ових узорка остварује се у околинама тачака K_1, K_2, K_3 . Елемент у три тачке обезбеђује равномерну расподелу оптерећења између појединих елемената. Контакт узорака може се обезбедити и у околини одређених линија или по одређеној површини, што зависи од макро геометрије узорка. Преко носача CM и куглице B врши се оптерећење контакта. Оптерећење контакта врши се преко полужног механизма L и баждарених тегова W . Тангенцијално оптерећење контакта Ft , тј део силе резања $F(t)$, остварује се преко мерне ћелије осетљиве на притисну силу LC која је смештена на носачу C_1 на којем је причвршћен узорак који се обрађује WP_1 . Носач C_1 се може обртати око осе O_1-O_1 . У зависности од тачке дејства силе резања $F(t)$ тј. величина L_1 и L_2 део силе резања $F(t)$ преноси се преко LC на носач CM у тачки Ksf . Померање носача CM односно узорка M региструје се преко померања сензора SX који се налази у носачу C_2 . Приликом померања узорка M који симулира елемент за стезање, у

односу на узорак WP који симулира радни предмет куглица B се котрља по носачу CM . Грешка мерења настаје као последица нерегистроване вредности силе трења котрљања куглице B по носачу CM и као последица трења котрљања у лежају полуге L (оса обртања O_2-O_2). С обзиром на значајно мање вредности коефицијента трења котрљања у односу на трење клизања произилази да укупна грешка мерења не прелази 1%. При том треба нагласити да се при конструкцији уређаја водило рачуна да се ова грешка сведе на минимум. [6]

На слици 3.5 приказана је пратећа мерна инструментација коју чине:

- Мерна ћелија (LC) осетљива на притисну силу, са мерним опсегом $1100N$, која мери тангенцијалну силу F_t пропорционалну сили резања $F(t)$,
- Индуктивног давача померања (SX) са мерним опсегом $\pm 1mm$ и одступањем осетљивости мањим од $\pm 1\%$. Калибрација индуктивног давача померања је пре почетка мерења урађена на алатном микроскопу $UIM-21$ са грешком читавања померања $1\mu m$,
- Двоканалног кондиционера сигнала (SC) који врши обраду сигнала са мерне ћелије (LC) и индуктивног давача померања (SX),
- Осмоканалног модула са симултаним семповањем са шеснаестобитном резолуцијом за аквизицију (дискретизацију) сигнала (DAQ). Модул је коришћен за дискретизацију сигнала мерне ћелије (LC) и са индуктивног давача померања (SX).



Слика 3.5 Пратећа мерна инструментација за одређивање динамичке попустљивости контакта између елемената за стезање и радног предмета

Уређај који је приказан представља најважнији предуслов за комплекснија испитивања у области анализе и оптимизације елемената за стезање са аспекта њихове попустљивости. Највеће предности овог уређаја, које су кључ за успешна експериментална испитивања су:

- Контакт F оптерећен је реалном силом која настаје при процесу резања у производњи. Узорак WP_1 израђен је од материјала који испуњава одређене захтеве потребне приликом испитивања и на њега се преноси сила глодањем или бушењем. Параметри режима резања и резни алати са којима се изводи процес обраде резањем се такође могу изабрати према потребама испитивања,
- Узорак WP који симулира радни предмет и узорак M који симулира елемент за стезање може бити било којих карактеристика када су у питању геометрија, микрогеометрија и материјал,
- Контактни парови су знатно ниже цене у односу на цене комплетног прибора. Треба узети у обзир ову чињеницу с обзиром да постоји огроман простор могућих варијација параметара утицајних на попустљивост контакта,
- Приликом обраде могу а и не морају бити присутна средства за хлађење и подмазивање.

Највећа предност, коју свакако треба истаћи је чињеница да омогућава детаљнију динамичку анализу конкретног типа контакта елемента за стезање са радним предметом, при чему се апсолутно елиминишу утицаји осталих елемената прибора, што омогућава поређење одабраних типова контакта, њихову оптимизацију и отвара пут ка налажењу поузданих решења поменутих елемената у смислу смањења попустљивости контакта. [6]

На слици 3.6 приказан је уређај намењен за моделска испитивања динамичке попустљивости елемената за стезање и радног предмета.



Слика 3.6 Уређај за моделска испитивања динамичке попустљивости контакта између елемената за стезање и радног предмета

3.3 Резултати мерења динамичких испитивања три врсте „*fibroflex-a*”

Експрименталним испитивањима обухваћена су мерења и испитивања различитих врста „*fibroflex-a*“. Анализа добијених резултата налази се у наредним табелама. У табелама су приказане вредности различитих сила стезања F_n , средње вредности динамичке тангенцијалне силе F_{sr} , дисперзија средње вредности тангенцијалне силе $SD(F)$, дисперзија средње вредности померања $SD(x)$ и померање односно попустљивост контакта x_{sr} .

Силе стезања F_n се крећу у интервалима од $278N$ до $631,2N$, и при свакој од датих вредности силе стезања, машинском обрадом завојном бургијом пречника $12mm$ варирањем брзине помоћног кретања симулирано је више вредности динамичких тангенцијалних сила. Број обраата завојне бургије износи $600\ RPM$.

На фотографијама су дати испитивани узорци различитих механичких и термичких карактеристика, затим њихове вредности у табелама за различите вредности дејства сила, након чега је дата упоредна анализа три „*fibroflex-a*“ при дејству исте нормалне силе и графички приказ односа тангенцијалних сила F_{sr} и померања x .

Први од три узорка на којима је реализован експеримент дат је на слици 3.7 а резултати мерења налазе се у табели 3.3.



Слика 3.7 Примерак који се испитује према претходно датим вредностима

Табела 3.3 Резултати мерења попустљивости споја елемента за стезање и одређеног радног предмета

Датотека	Ter [kg]	F_n [N]	f [mm/min]	F_{sr} [N]	SD(F) [N]	Померање, x_{sr} [μ m]	SD(x) [μ m]
црвени1	100	631,2	30	29,12	2,68	38,42	3,02
црвени2	100	631,2	60	52,34	4,61	63,30	4,75
црвени3	100	631,2	90	73,84	6,08	85,59	6,76
црвени4	100	631,2	120	95,27	8,42	106,66	9,22
црвени5	100	631,2	150	110,57	8,22	121,13	8,26
црвени6	80	513,5	30	29,55	3,27	37,66	3,40
црвени7	80	513,5	60	51,87	4,87	62,77	4,53
црвени8	80	513,5	90	73,18	6,41	84,06	6,23
црвени9	80	513,5	120	93,30	7,29	100,94	7,87
црвени10	80	513,5	150	109,60	9,69	119,31	10,16
црвени11	60	395,8	30	28,07	2,74	35,86	2,26
црвени12	60	395,8	60	51,65	5,57	61,56	6,49
црвени13	60	395,8	90	72,59	6,93	83,32	7,71
црвени14	60	395,8	120	92,23	7,67	99,42	9,20
црвени15	60	395,8	150	112,67	10,63	125,76	11,77
црвени16	40	278,0	30	26,85	3,16	34,30	2,62
црвени17	40	278,0	60	50,96	4,42	60,94	4,56
црвени18	40	278,0	90	73,63	7,40	85,57	9,19
црвени19	40	278,0	120	94,72	7,99	107,46	9,74
црвени20	40	278,0	150	109,67	8,95	112,31	8,92

Други узорак испитан у току овог експримента налази се на слици 3.8, док се резултати мерења налазе у табели 3.4.



Слика 3.8 Примерак који се испитује према претходно датим вредностима

Табела 3.4 Резултати мерења попустљивости споја елемента за стезање и одређеног радног предмета

Датотека	Ter[kg]	F_n [N]	f [mm/min]	F_{sr} [N]	SD(F) [N]	Померање , x_{sr} [μm]	SD(x) [μm]
зелени1	100	631,2	30	28,42	3,00	90,93	7,23
зелени2	100	631,2	60	50,09	4,48	155,14	10,17
зелени3	100	631,2	90	71,29	6,61	209,66	15,94
зелени4	100	631,2	120	92,51	10,39	261,94	28,03
зелени5	100	631,2	150	112,15	11,86	331,38	31,42
зелени6	80	513,5	30	27,46	3,03	76,25	6,88
зелени7	80	513,5	60	49,96	4,71	128,05	10,86
зелени8	80	513,5	90	72,27	7,62	202,17	22,75
зелени9	80	513,5	120	92,75	8,94	261,48	24,03
зелени10	80	513,5	150	111,57	12,14	332,89	36,25
зелени11	60	395,8	30	27,19	3,16	73,69	6,65
зелени12	60	395,8	60	49,27	5,26	115,40	11,72
зелени13	60	395,8	90	70,03	7,55	170,94	18,85
зелени14	60	395,8	120	92,73	7,94	227,60	19,17
зелени15	60	395,8	150	111,85	11,85	305,55	31,13
зелени16	40	278,0	30	27,44	3,18	60,79	5,20
зелени17	40	278,0	60	49,01	5,01	101,37	10,73
зелени18	40	278,0	90	69,78	7,04	149,99	17,02
зелени19	40	278,0	120	94,49	10,79	226,63	35,77
зелени20	40	278,0	150	112,24	11,16	312,60	43,94

Последњи од три испитана узорка налази се на слици 3.9 а резултати мерења у табели 3.5.

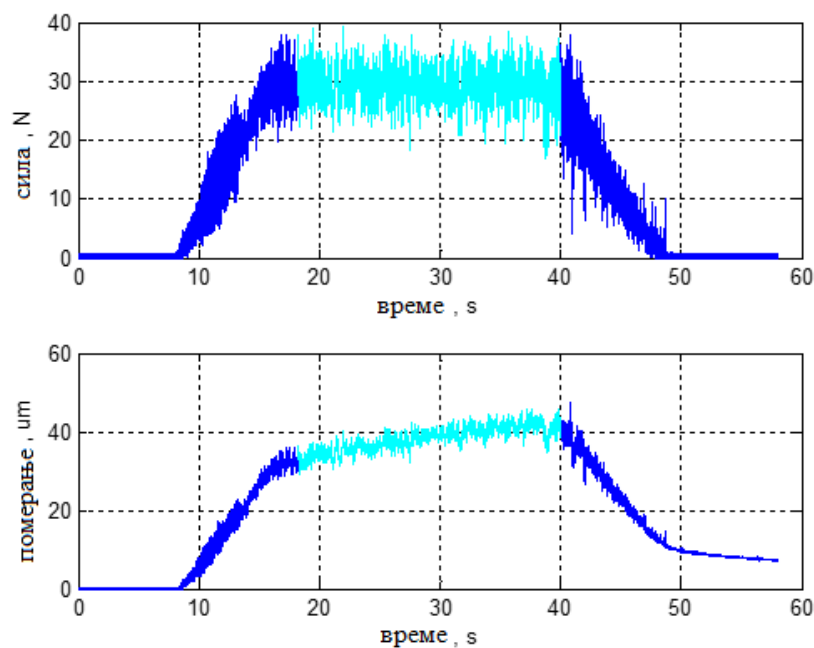


Слика 3.9 Примерак који се испитује према претходно датим вредностима

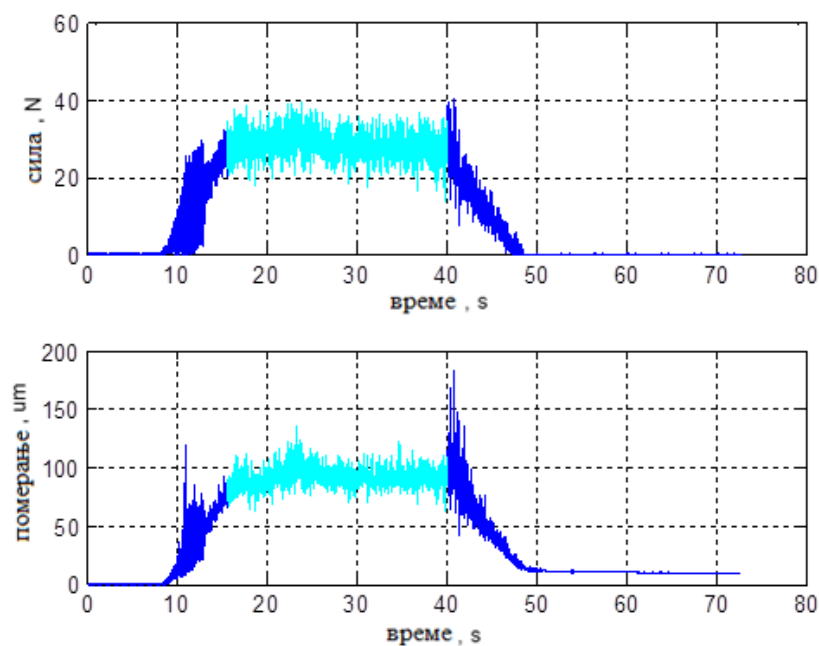
Табела 3.5 Резултати мерења попустљивости споја елемента за стезање и одређеног радног предмета

Датотека	Тег [kg]	F_n [N]	f [mm/min]	F_{sr} [N]	$SD(F)$ [N]	Померање , x_{sr} [μm]	$SD(x)$ [μm]
жути1	100	631,2	30	28,83	2,67	72,71	4,15
жути2	100	631,2	60	49,90	4,33	125,06	7,95
жути3	100	631,2	90	69,57	5,97	172,68	11,10
жути4	100	631,2	120	89,40	7,08	213,46	14,05
жути5	100	631,2	150	110,33	8,65	251,57	14,46
жути6	80	513,5	30	27,03	2,82	68,36	4,25
жути7	80	513,5	60	49,19	4,43	119,10	7,80
жути8	80	513,5	90	71,09	7,99	169,16	16,05
жути9	80	513,5	120	90,69	8,03	206,63	15,14
жути10	80	513,5	150	109,50	8,89	243,95	14,34
жути11	60	395,8	30	26,36	2,71	66,22	3,80
жути12	60	395,8	60	48,18	4,52	116,11	7,68
жути13	60	395,8	90	69,17	6,71	162,77	14,87
жути14	60	395,8	120	90,33	8,52	208,35	16,14
жути15	60	395,8	150	110,15	9,03	249,19	16,38
жути16	40	278,0	30	27,22	2,85	68,96	4,86
жути17	40	278,0	60	49,13	4,88	124,52	9,01
жути18	40	278,0	90	69,88	6,63	169,92	13,03
жути19	40	278,0	120	88,62	7,45	212,02	17,31
жути20	40	278,0	150	108,72	11,39	271,14	21,77

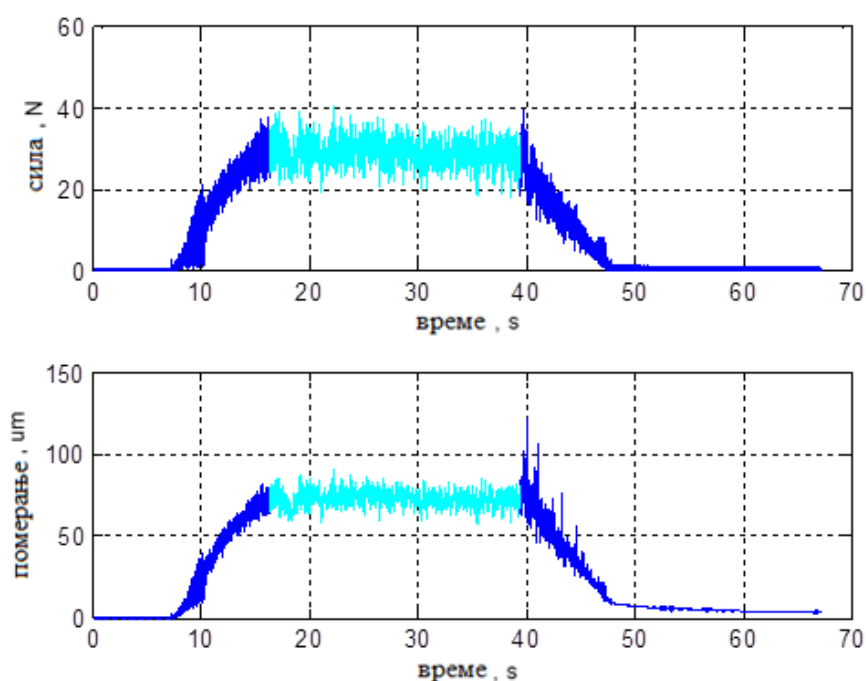
На сликама 3.10 – 3.21 дати су записи тангенцијалних сила F_{sr} и одговарајућих померања x (попустљивост везе) за дејство четири различите нормалне силе F_n .



Слика 3.10 Записи тангенцијалних сила F_{sr} и одговарајућих померања x за вредност црвени I



Слика 3.11 Записи тангенцијалних сила F_{sr} и одговарајућих померања x за вредност зелени I

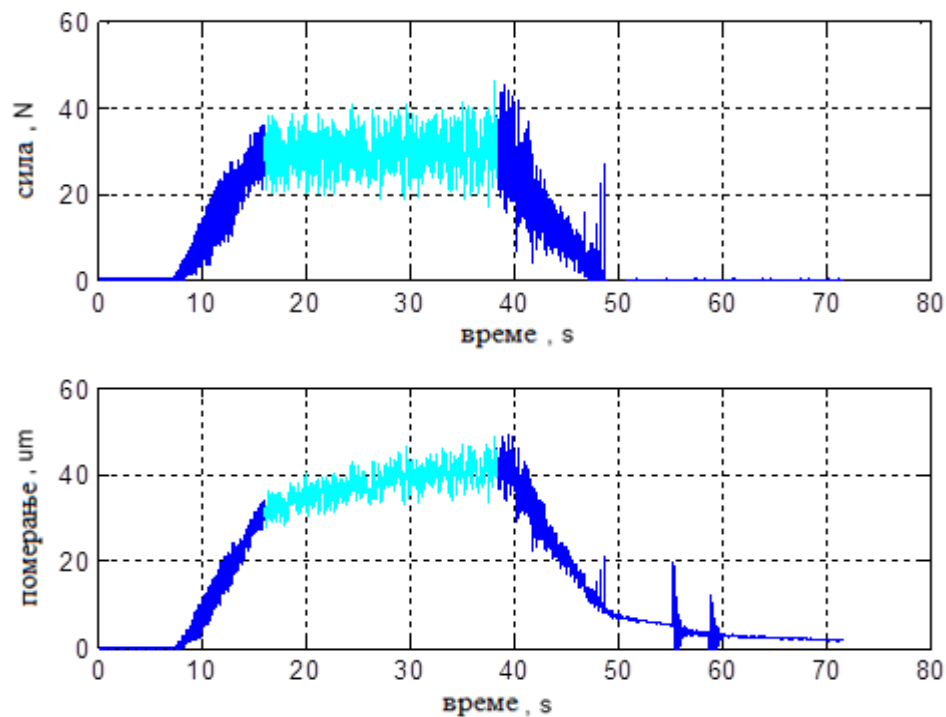


Слика 3.12 Записи тангенцијалних сила F_{sr} и одговарајућих померања x за вредност жути 1

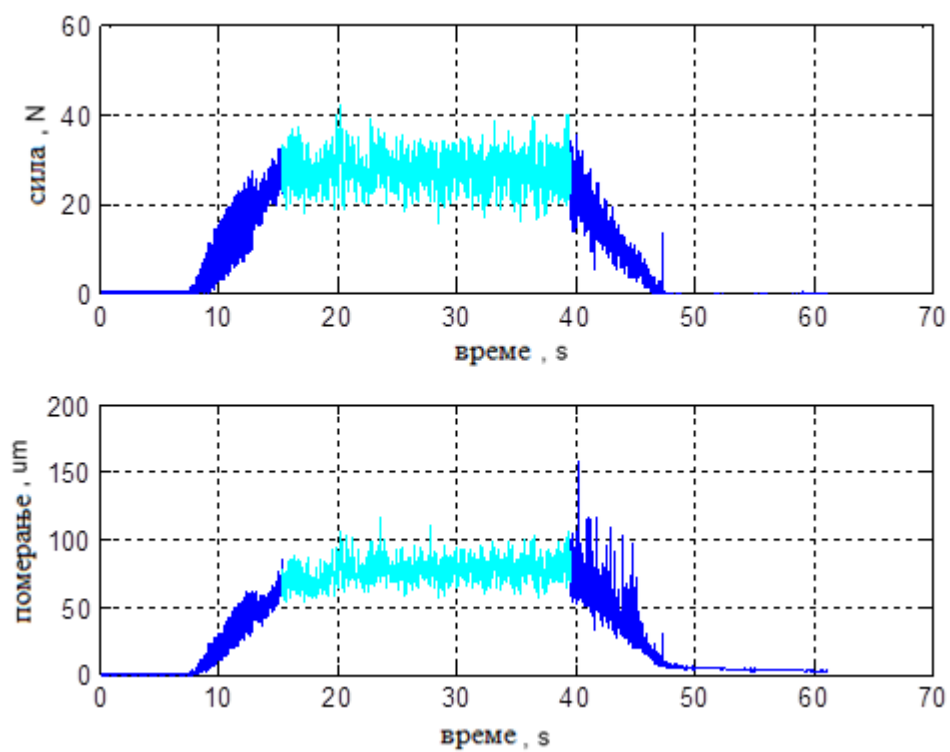
Табела 3.6 Табеларни приказ за три различита узорка при дејству исте нормалне силе 631,2 [N]

Испитивани узорци <i>fibroflex-a</i> и поређење тангенцијалних сила F_{sr} и одговарајућих померања x за вредност							
Датотека	Тег [kg]	F_n [N]	f [mm/min]	F_{sr} [N]	SD(F) [N]	Померање, x_{sr} [μm]	SD(x) [μm]
црвени1	100	631,2	30	29,12	2,68	38,42	3,02
зелени1	100	631,2	30	28,42	3,00	90,93	7,23
жути1	100	631,2	30	28,83	2,67	72,71	4,15

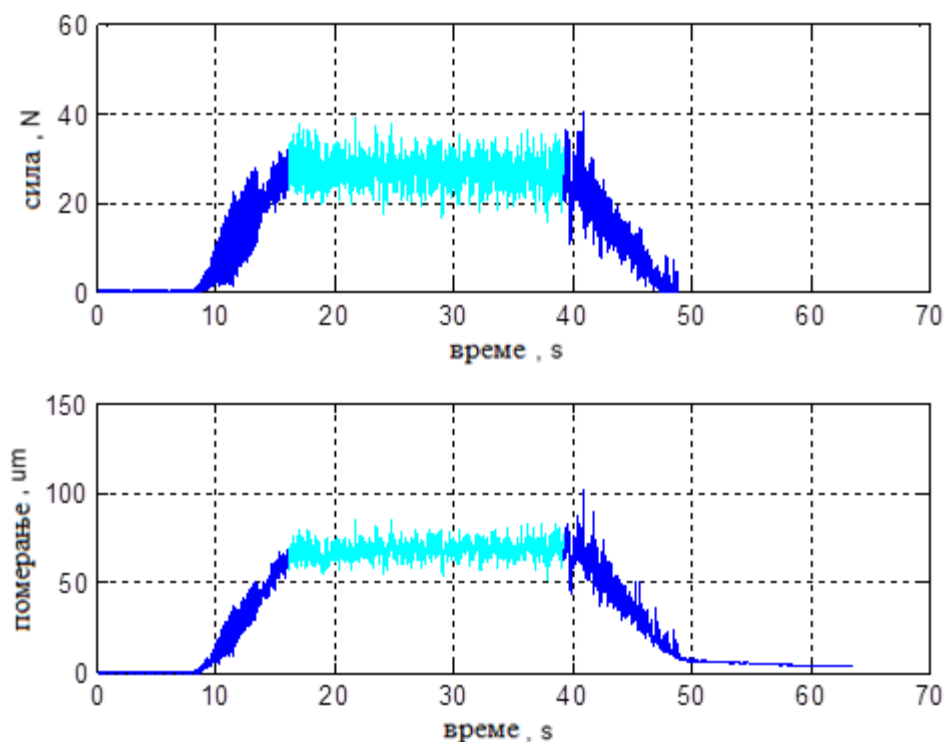
Из претходне табеле се закључује да од три испитана узорка, при истим условима, најбоље карактеристике тачније најмању попустљивост има црвени1 узорак. Испитивање одрађено при норманој сили F_n од 631,2 N, са помоћним кретањем $f = 30 \text{ mm/min}$ и приближно истим тангенцијалним силама.



Слика 3.13 Записи тангенцијалних сила F_{sr} и одговарајућих померања x за вредност *црвениб*



Слика 3.14 Записи тангенцијалних сила F_{sr} и одговарајућих померања x за вредност *зелениб*

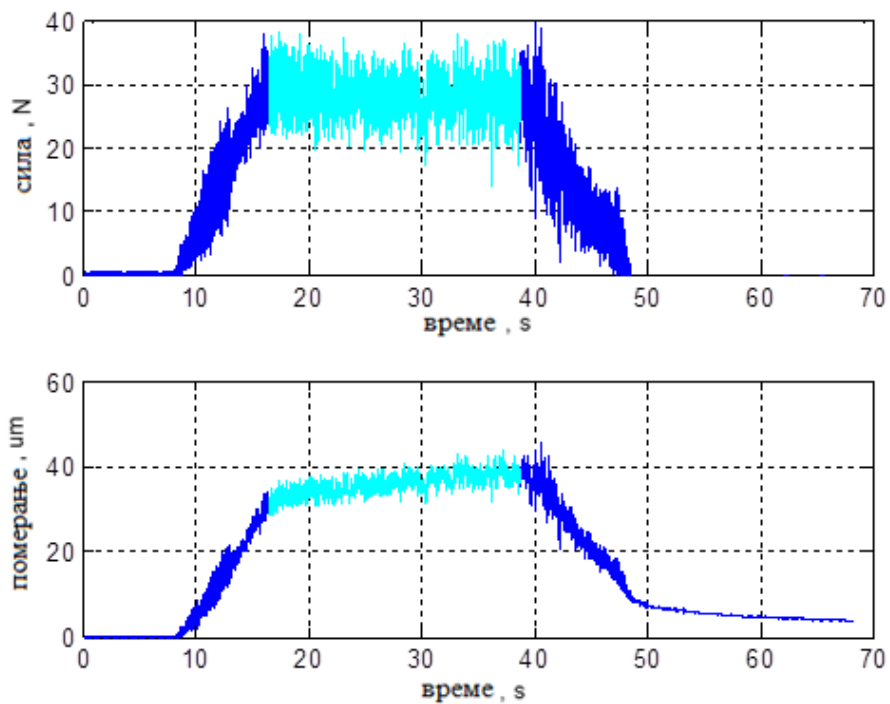


Слика 3.15 Записи тангенцијалних сила F_{sr} и одговарајућих померања x за вредност $жутиб$

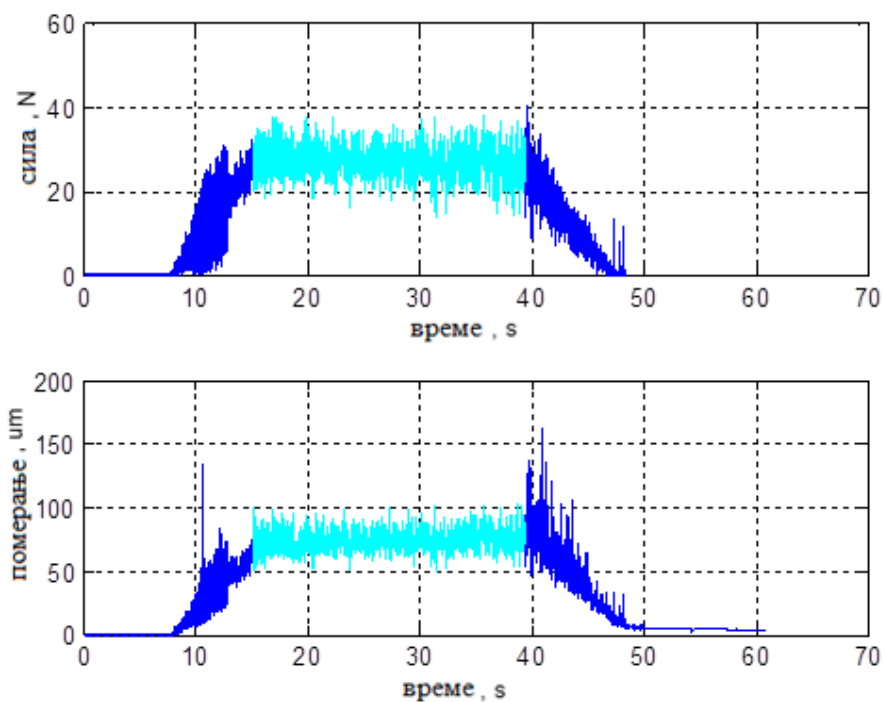
Табела 3.7 Табеларни приказ за три различита узорка при дејству исте нормалне силе 513,5 [N]

Испитивани узорци <i>fibroflex-a</i> и поређење тангенцијалних сила F_{sr} и одговарајућих померања x за вредност							
Датотека	T_{gr} [kg]	F_n [N]	f [mm/min]	F_{sr} [N]	$SD(F)$ [N]	Померање, x_{sr} [μm]	$SD(x)$ [μm]
црвениб	80	513,5	30	29,55	3,27	37,66	3,40
зелениб	80	513,5	30	27,46	3,03	76,28	6,88
жутиб	80	513,5	30	27,03	2,82	68,36	4,25

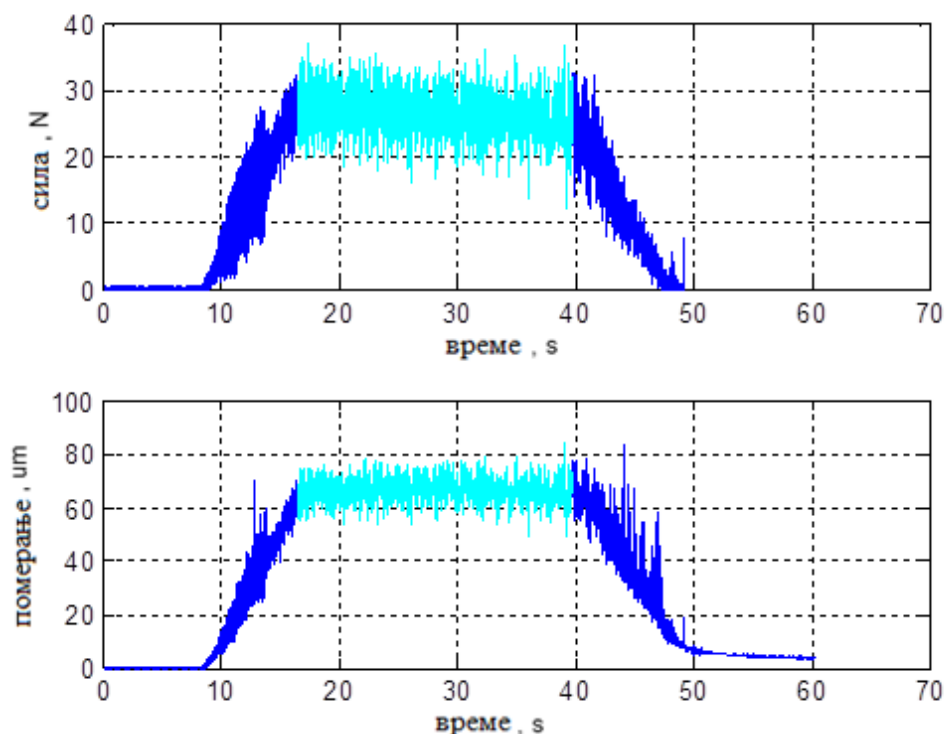
Из претходне табеле се закључује да од три испитана узорка, при истим условима, најбоље карактеристике тачније најмању попустљивост има *црвени1*. Испитивање одрађено при норманој сили F_n од 513,5N, са помоћним кретањем $f = 30 \text{ mm/min}$ и приближно истим тангенцијалним силама.



Слика 3.16 Записи тангенцијалних сила F_{sr} и одговарајућих померања x за вредност *црвени11*



Слика 3.17 Записи тангенцијалних сила F_{sr} и одговарајућих померања x за вредност *зелени11*

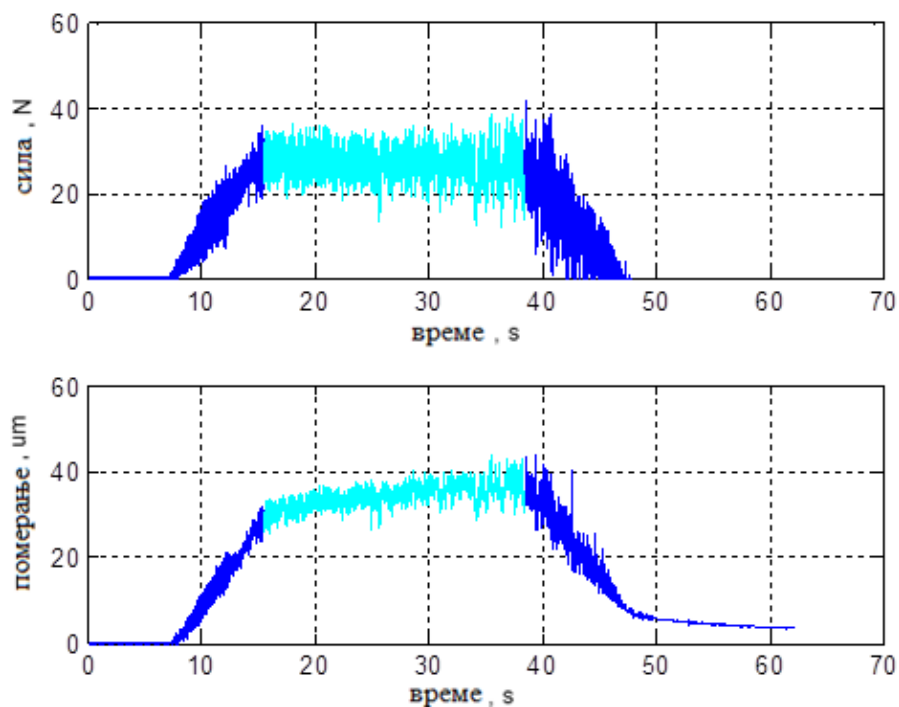


Слика 3.18 Записи тангенцијалних сила F_{sr} и одговарајућих померања x за вредност $жути11$

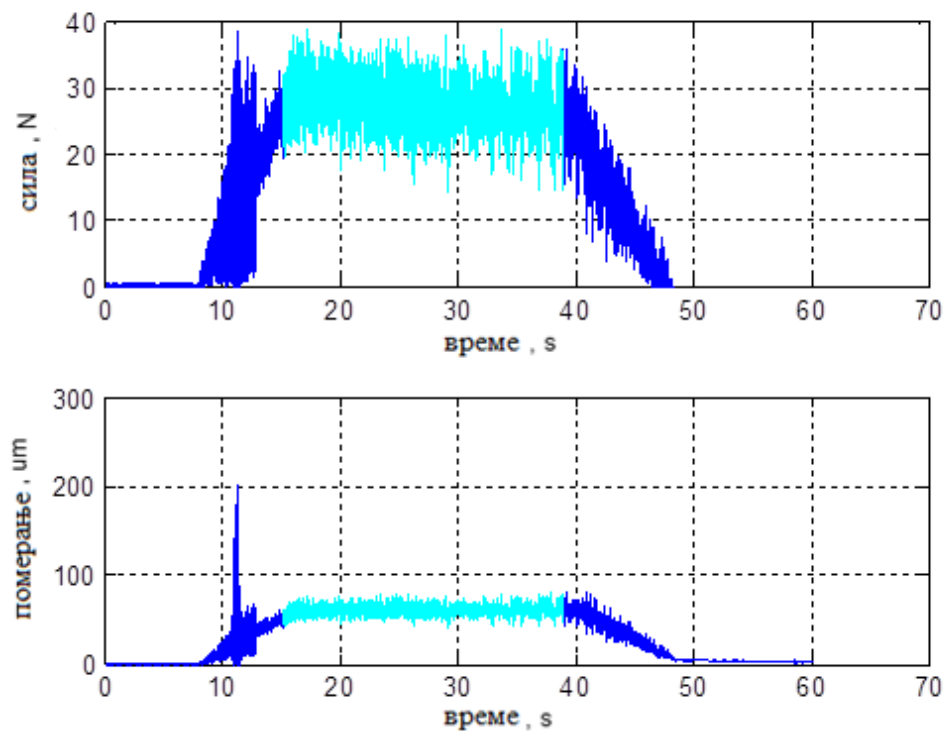
Табела 3.8 Табеларни приказ за три различита узорка при дејству исте нормалне силе 395,8 [N]

Испитивани узорци <i>fibroflex-a</i> и поређење тангенцијалних сила F_{sr} и одговарајућих померања x за вредност							
Датотека	Тег [kg]	F_n [N]	f [mm/min]	F_{sr} [N]	$SD(F)$ [N]	Померање, x_{sr} [μm]	$SD(x)$ [μm]
црвени11	60	395,8	30	28,7	2,74	35,86	2,26
зелени11	60	395,8	30	27,19	3,16	73,69	6,65
жути11	60	395,8	30	27,03	2,82	68,36	4,25

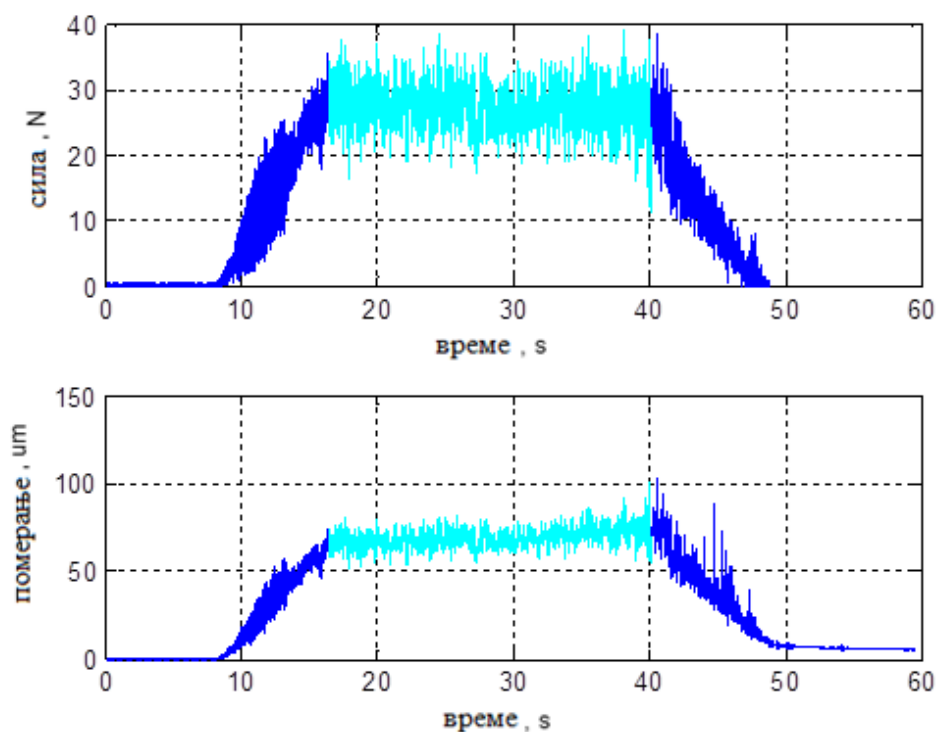
Из табеле 3.8 се види да од три испитана узорка, при истим условима, најбоље карактеристике тачније најмању попустљивост има *црвени1* узорак. Испитивање одрађено при норманој сили F_n од 395,8N, са помоћним кретањем $f = 30 \text{ mm/min}$ и приближно истим тангенцијалним силама.



Слика 3.19 Записи тангенцијалних сила F_{sr} и одговарајућих померања x за вредност *црвени16*



Слика 3.20 Записи тангенцијалних сила F_{sr} и одговарајућих померања x за вредност *зелени16*



Слика 3.21 Записи тангенцијалних сила F_{sr} и одговарајућих померања x за вредност $жути16$

Табела 3.9 Табеларни приказ за три различита узорка при дејству исте нормалне силе 278,0 [N]

Испитивани узорци <i>fibroflex-a</i> и поређење тангенцијалних сила F_{sr} и одговарајућих померања x за вредност							
Датотека	Тег [kg]	F_n [N]	f [mm/min]	F_{sr} [N]	$SD(F)$ [N]	Померање, x_{sr} [μm]	$SD(x)$ [μm]
црвени16	40	278,0	30	26,85	3,16	34,30	2,62
зелени16	40	278,0	30	27,44	3,18	60,79	5,20
жути16	40	278,0	30	27,22	2,85	68,96	4,86

Из табеле 3.9 се види да од три испитана узорка, при истим условима, најбоље карактеристике тачније најмању попустљивост има *црвени1* узорак. Испитивање одрађено при норманој сили F_n од 395,8N, са помоћним кретањем $f = 30 \text{ mm/min}$ и приближно истим тангенцијалним силама.

4. Статистичка анализа и обрада података мерења

4.1 Графички приказ односа тангенцијалне силе F_{sr} и померања x

4.1.1 Први испитани узорак полиуретана црвене боје

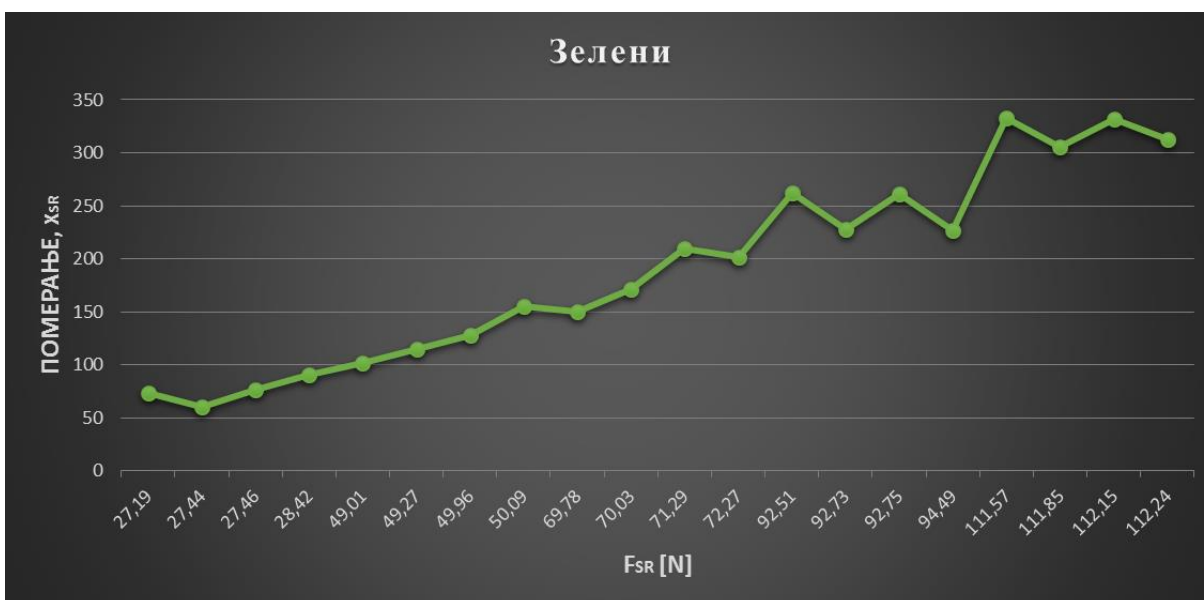
Графички приказ односа дејства тангенцијалне динамичке силе F_{sr} и померања x приказан је на слици 4.1. На дијаграму се налазе вредности црвеног „fibroflex-a“ испитаног за двадесет различитих вредности тангенцијалне динамичке силе и њихово померање.



Слика 4.1 Дијаграм са вредностима тангенцијалне динамичке силе и померања првог испитаног узорка стезног алата

4.1.2 Други испитани узорак полиуретана зелене боје

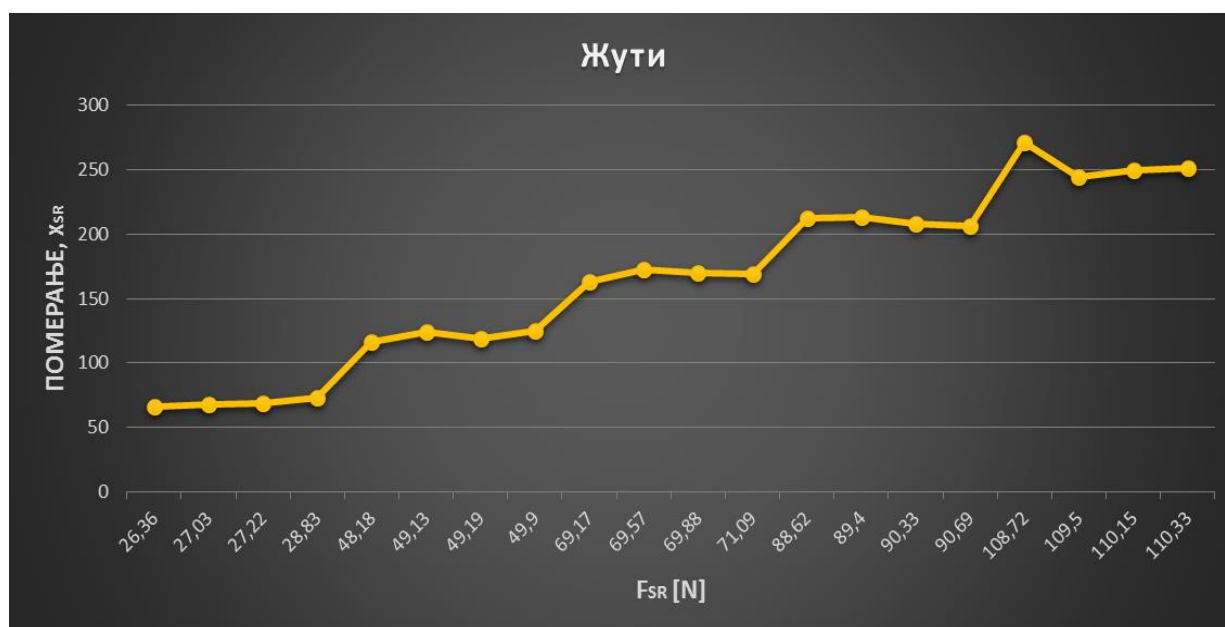
По карактеристикама зелени узорак је нешто веће густине од црвеног, већег модула еластичности и веће затезне чврстоће али према вредностима добијеним експерименталним испитивањем показало се да долази до веће попустљивости него код претходно испитаног узорка полиуретана. На дијаграму који се налази на слици 4.2 приказан је, као и на претходном, однос померања x у односу на промену тангенцијалне динамичке силе F_{sr} . Узорак је испитан за двадесет различитих вредности тангенцијалних сила, где се види да померање не зависи само од дејства нормалне силе већ и од других параметара који утичу на процес приликом процеса обраде предмета.



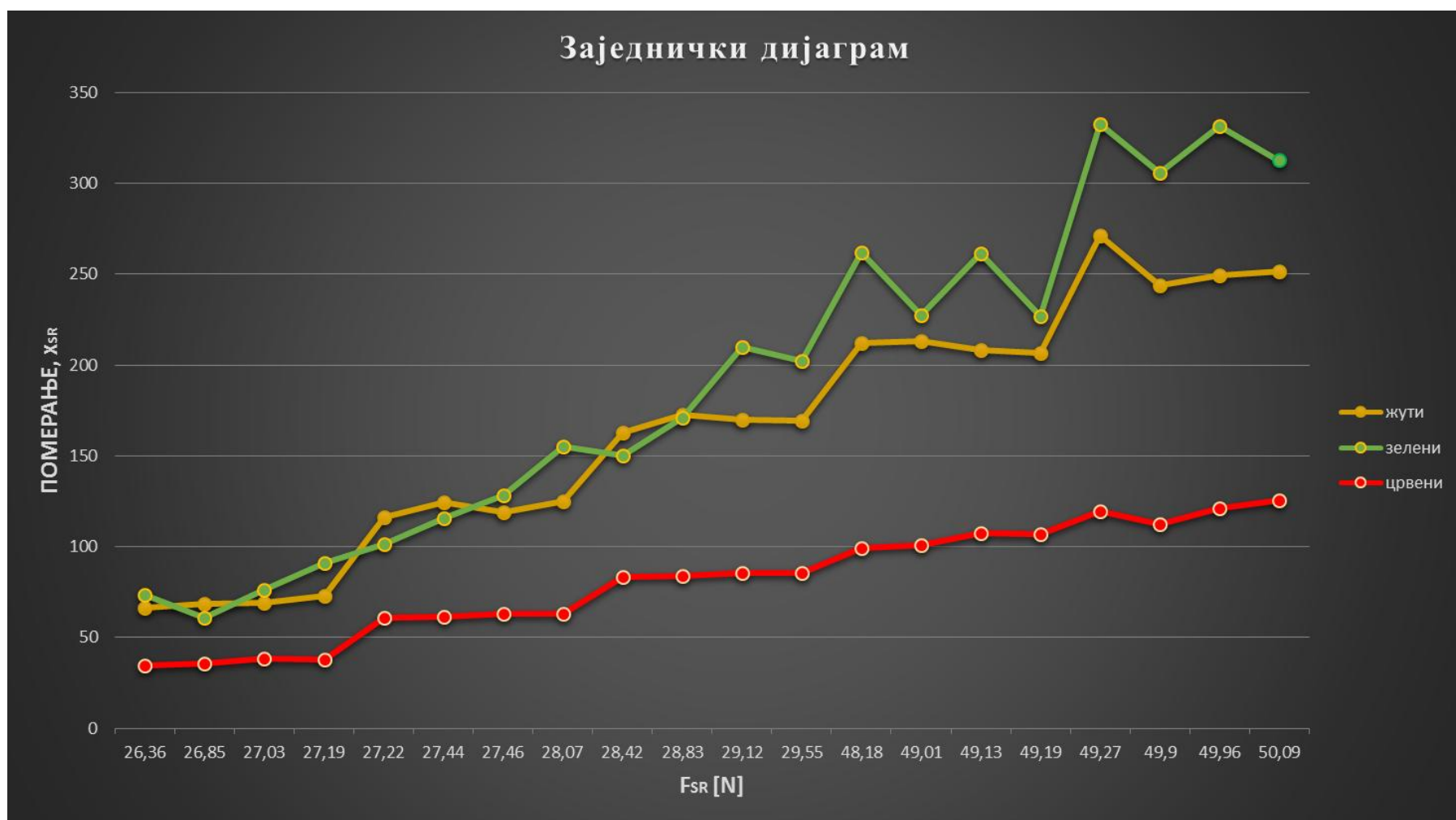
Слика 4.2 Дијаграм са вредностима тангенцијалне динамичке силе и померања другог испитаног узорка стезног алата

4.1.3 Трећи испитани узорак полиуретана жуте боје

Трећи у серији испитиваних узорак полиуретана, примењеног као стезни алат био је „fibroflex“ жуте боје. Од три испитана, овај примерак има највећу густину, највећи модул еластичности и затезну чврстоћу, поред тога он је и најтврђи. Дијаграм са вредностима испитаног узорка налази се на слици 4.3.



Слика 4.3 Дијаграм са вредностима тангенцијалне динамичке силе и померања другог испитаног узорка стезног алата



Слика 5. Заједнички дијаграм три врсте полиуретана

5. Закључак

Испитивања попустљивости контакта еластомера и челика обављена су у динамичким условима оптерећења на узорцима датим у тачкама 3.1.1 и 3.1.2 како би се испитала могућност примене полиуретана као стезног алата. Основни циљ испитивања јесте повећање поузданости, односно смањење попустљивости контакта при дејству тангенцијалне динамичке силе. Испитани узорци полиуретана су различитих механичких и термичких особина.

На слици 5. приказани су резултати испитивања, који дају однос тангенцијалне динамичке силе F_{sr} и померања x . Од три испитана узорка, током експеримента најмање померање, односно попустљивост имао је црвени узорак „*fibroflex-a*“ . Црвени примерак полиуретана показао је најбоље особине, јер се током промене оптерећења његово померање креће у уским границама и нема наглих померања. Са дијаграма се види да у току двадесет промена оптерећења, при дејству највеће тангенцијалне динамичке силе од $F_{sr}=50,09 \text{ N}$ померање не прелази границу од $130\mu\text{m}$. Код друга два узорка видимо да долази до наглих померања приликом промене вредности тангенцијалног динамичког оптерећења, али треба има у виду да се приликом промене овог оптерећења мења и брзина помоћног кретања као и дејство нормалне силе. Померања зеленог полиуретана прелазе границу од $300\mu\text{m}$, што у поређењу са првим испитаним узорком представља значајну разлику. Жути узорак се налази у границама између претходна два, али су то опет значајна померања у односу на црвени узорак, док поред тога имамо и скоковите промене.

Узорак са најбољим резултатима током експерименталних испитивања је густине $1,08 \text{ g/cm}^3$, модула еластичности 2300 N/cm^2 и затезне чврстоће 2100 N/cm^2 . У поређењу са остала два има најмању густину, знатно мањи модул еластичности и затезну чврстоћу, али је током испитивања показао убедљиво најбоље карактеристике и значајно мање померање.

Ова експериментална испитивања показала су да постоје решења која могу допринети смањењу попустљивости, што аутоматски доводи до повећања прецизности израде предмета обраде при мањим дејствима нормалних сила. Такође су са својим карактеристикама, полиуретани значајно погоднији за замену и одржавање.

6. Литература

- [1] Недић, Б., Ђукић, В., Пластичне масе, Машински факултет Крагујевац Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2004.
- [2] Симић, Б., дипломски рад, Пројектовање алата за израду делова од гуме, Машински факултет Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2006.
- [3] Јовановић, М., Адамовић, Д., Лазић, В., Ратковић, Н.: Машински материјали, Машински факултет Крагујевац, 2003.
- [4] <http://www.termoplast.rs/poliuretani/poliuretan/> , преузето 20.10.2015.
- [5] Јовичић, С., Марјановић, Н., Основи конструисања, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
- [6] Тадић Б., Ђорђе В., Тодоровић П., Јеремић Б., Мачужић И., Богдановић Б., Ново експериментално постројење за одређивање динамичке попустљивости стезних и ослоних елемената прибора, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац 2013.
- [7] Ћировић М.: Отпорност материјала I, Машински факултет Крагујевац, Крагујевац, 2008.
- [8] Тадић Б., Специјални стезни прибори, Машински факултет Крагујевац, Крагујевац, 2002.
- [9] <http://www.fibro.de/en/standard-parts/product-groups/f-springs-gas-springs/elastomerfedern.html> , преузето 20.10.2015.
- [10] http://www.tehnikakb.rs/files/Image/proizvodi/ostali_nemetalni_materijali/Poliuretan_web.pdf , преузето 20.10.2015.
- [11] Тодоровић, П., Вукелић, Д., Тадић, Б., Вељковић, Д., Будак, И., Мачужич, И., Лалић, Б., (2014). Modelling of dynamic compliance of fixture/workpiece interface. *International journal of simulation modelling*, 13(1), 54-65.
- [12] Тадић, Б., Вукелић, Д., Миљанић, Д., Богдановић, Б., Мачужић, И., Будак., Тодоровић, П., (2014). Model testing of fixture–workpiece interface compliance in dynamic conditions. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(1), 76-83.

Изјава о самосталној изради дипломског рада

Изјављујем да сам дипломски рад под насловом „Експериментална испитивања попустљивости контакта еластомера и челика при дејству тангенцијалне динамичке силе“

Стефан Ђурић 505/2011