

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Алати и прибори

Број индекса: 46/2014

Сретеновић Н. Стефан

**Стезање предмета обраде у условима
деформисања контакта предмета обраде и
стедача**

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Бранко Тадић -ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да изучи проблематику стезања предмета обраде у условима утискивања стезача у површински слој предмета обраде. Са тим у вези треба анализирати литературне податке и утврдити ефекте утискивања стезача са аспекта попустљивости контакта и тангенцијалне носивости у зонама контакта.

Препоручена литература:

- [1]. Tadić, B., Vukelić, Đ., Jurković, Z: *Alati i pribori*, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, 2013.
- [2]. Budak I., Tadić B., Jeremić B., Vukelić Đ., Miljanić D., Todorović P., Hodolić J, *Industrijski prototip uređaja za ispitivanje statičke popustljivosti i nosivosti spoja elemenata za stezanje i radnog predmeta*, Novi Sad, 2012.
- [3]. Miljanić, D. (2015.). *Projektovanje elemenata pribora sa aspekta nosivost i popustljivosti njihovih kontakata sa radnim predmetom*, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu.

ментор:

Проф. др Бранко Тадић

Крагујевац, 2018.

Abstract

This paper discusses the method of clamping of the object of processing based on the embossing of the clamp into the subject of processing. While machining clamped object, cutting forces that occur are usually countered out and balanced by forces of friction that occur on contact surfaces. In order to increase the load and reduce loss of friction forces, recommended method is to press sharp edged clamping tools into machinable object. Clamping is performed on certain surfaces (surfaces that are not machined and do not have special aesthetic requirements) due to deformation of contact surfaces that occur during cutting. This method is most commonly used for machining of forgings or castings.

Key words: clamping tool, clamping, embossing, load, contact laxity, friction

Резиме

У раду се разматра метода стезања предмета обраде заснована на утискивању стезача у предмет обраде. При стезању предмета обраде у процесу обраде метала резањем силе резања, се обично, уравништавају силама трења које настају на контактним површинама стезног прибора и предмета обраде. Како би се повећала носивост, а смањила попустљивост контакта препоручује се метода заснована на утискивању оштрих врхова стезача у предмет обраде. Утискивање се обавља на одређеним површинама (површинама које се не обрађују и немају посебних естетских захтева) из разлога што на тим местима долази до деформисања контактне површине. Ова метода се најчешће примењује код машинске обраде отковака или одливака.

Кључне речи: стезни прибор, стезање, утискивање, носивост, попустљивост, трење

Садржај

1. Увод	2
2. Стезни прибор, принципи базирања и стезања, подела.....	4
2.1. Стезни прибор.....	4
2.1.1. Универзални стезни прибори.....	5
2.1.2. Специјални стезни прибори	6
2.1.3. Групни прибори	6
2.2. Базирање.....	8
2.2.1 Грешка базирања предмета обраде	11
2.2.2 Грешка базирања цилиндричних делова	11
2.2.3. Грешка базирања на чеповима за центрирање.....	12
2.3. Стезање.....	12
2.3.1. Механички елементи за стезање.	12
2.3.2. Механизација стезних прибора.....	13
3. Стезање предмета обраде утискивањем стезача у површину предмета обраде.....	14
4. Приказ експерименталних резултата.....	21
4.1. Мерна инструментација.....	21
4.2. Резултати експерименталних испитивања	25
5. Дискусија.....	28
6. Закључци	31
7. Литература	32

1. Увод

Стезни прибор се користи да базира и ограничи кретање предмета обраде током његове машинске обраде. Прибори директно утичу на квалитет обраде, продуктивност и цену производа. Трошкови пројектовања и израде стезног прибора износе 10-20% трошкова производње. Ови трошкови не односе се само на трошкове материјала, израду и монтажу прибора, већ и на трошкове пројектовања прибора. Да не би дошло до грешака обраде од великог значаја је да се предмет обраде исправно базира и стегне у стезном прибору. Грешке израде радног предмета у великој мери су последица неадекватног начина стезања предмета обраде. Лоше стезање може проузроковати већу попустљивост између предмета обраде и елемената за стезање што има негативне последице на квалитет обраде. То је довело до доста истраживања о оптимизацији пројектовања прибора. Основни циљ истраживања стезних прибора јесте проналажење конструкције која минимизира еластичну деформацију радног предмета и контактну деформацију на местима контакта радног предмета и прибора у току процеса обраде.

Традиционални приступ дизајнирању прибора „trial and error“ је доста скуп и одузима доста времена. Због тога је доста истраживања усмерено ка програмским пакетима за пројектовање прибора (CAFD, computer-aided-fixture-design) чиме се доста смањило време производње као и трошкови производње. Главни циљ је развој рачунарских алата за моделирање граничних услова радног комада који се примењује у машинству. Amaral и његови сарадници [4] су у свом чланку употребљавали ANSYS програмски језик за индентификацију дизајна прибора. Они су развили алгоритам за аутоматизовану оптимизацију елемената за позиционирање и елемената за стезање са циљем минимизације деформисања радног предмета. Huang и Wang [5] су у свом експерименту тражили минималну силу стезања која је потребна да би радни предмет остао у статичкој равнотежи при обради и да се минимизира његова деформација у току обраде. Код стезања предмета облика лима Cai [6] је предложио „N-2-1“ начин базирања при чему је $N(N \geq 3)$ унапред одређена констата која се односи на примарну површину ослањања (највећу површину) лима. Lee и Haynes [7] су анализирали деформисање радних предмета једноставних облика под дејством сила резања и учвршћавања силе помоћу методе коначних елемената. Они су посматрали треће између елемената за причвршћивање и радног предмета, док су елементи прибора сматрани крутим телима. Menessa и DeVries [8] су користили методу коначних елемената за израчунавање деформација тако што су за оптимирање критеријума усвојили минимизирање деформације радног предмета у одабраним тачкама. Применили су алгоритам за не-линеарну оптимизацију у циљу синтезе лоцирања ослонаца за радни предмет плочастог облика. Њихов циљ био је да минимизирају суперпозицију померања у чворовима у посебним тачкама на обрађеној површини. Проблем се сводио на одређивање положаја ослонаца. Mittal и његови сарадници [9] су представили динамички модел склопа прибора и радног предмета. Нестабилност је дефинисана на основу губитка контакта између радног предмета и елемента прибора, уз претпоставку да сви елементи за затварање производе идентичну величину пригушења. Истраживање је базирано на методама коначних елемената, при чему је радни предмет посматран као круто тело и силе резање су сматране константним или линеарно променљивим величинама. King и Huttersey [10] дефинисали су шеме позиционирања коришћењем модела чврстог тела система радног предмета-прибора, узимајући у обзир крутост контаката. Нелинеарне технике оптимизације су коришћене за одређивање

статички стабилних конфигурација прибора. DeMeter [11] је користио модел прибора-радног предмета као крутог тела и минимални-максимални критеријум оптерећења, ради синтезе оптималне конфигурације прибора и минималне снаге за активирање елемената затварања. Користио је не-линеарне поступке за оптимизацију, при чему је занемарена еластична деформација радног предмета. Liu и сарадници су развили [12] мулти-оптимизациони метод базиран на геометријском моделу облика елемената за позиционирање и моделу силе учвршћења. Силе стезања су оптимизоване коришћењем методе коначних елемената.

Код прибора се у већини случајева силе резања уравнотежавају преко сила трења између елемената прибора и радног предмета који се обрађује. При дејстви силе резања у зонама контакта елемената за стезање са површином радног предмета и зонама контакта радног предмета са елементима за позиционирање доћи ће до одређених померања у правцу и смеру тих сила. Вредност силе одређује величину тих померања. Тачност израде предмета и максимално дозвољене силе резања зависе од вредности силе стезања, коефицијента трења, остварених сила трења и макро геометрије контакта. Радни предмет се у прибору помера у одређеним границама, то померање зависи од интензитета, правца и смера силе резања. Погрешан избор начина стезања доводи до појаве еластичних и пластичних деформација радног предмета који утичу на квалитет готовог производа. Уколико сила стезања није довољна може да се деси да се предмет обраде у току обраде резањем помери од елемената за позиционирање чиме се јавља грешка обраде коју треба отклонити. Величина силе стезања, при којој се радни предмет неће померити изван граница толеранција, зависе од путање алата и параметара режима резања. Пројектовање и оптимизација конструкција прибора добија све више на значају из разлога што је често потребно да се обезбеди позиционирање и стезање радног предмета веома сложеног облика, када се у једном стезању предмета обраде, обрада изводи са великим бројем алата који врше обраду у више зона резања. Циљ оптимизације прибора јесте проналажење конфигурације која ће минимизирати еластичну деформацију и контактне деформације радног предмета на местима контакта радног предмета и елемената прибора.

Међутим постоји могућност да се предмет обраде деформише на контактним местима са прибором а да при томе квалитет радног предмета остане у дозвољеним границама. Принцип је да се елементи прибора утискују у радни предмет, при чему се јавља локална деформација радног предмета. Мале локалне деформације које би се јавиле на предмету обраде не би имале утицаја на естетику предмета обраде. То су локалне деформације чије величине, без обзира на вредност силе стезања немају утицај на естетски изглед предмета обраде. Одливци и отковци по својој функцији у склопу могу бити у процесу стезања деформисани по неким одређеним зонама, односно на местима која се не обрађују, немају посебних естетских захтева и по њима да је могуће извести стезање.

2. Стезни прибор, принципи базирања и стезања, подела

2.1. Стезни прибор

Стезни прибор треба да обезбеди поуздано базирање и стезање предмета обраде. Предмет обраде се у стезном прибору треба ослањати, базирати и центрирати по тачно дефинисаним површинама, линијама и тачкама. Избор површина, линија и тачака зависи од: готовог производа, могућности извођења производне операције и могућности стезања. Основни задаци прибора су:

- да прихвате радни предмет или алат на одређене елементе машине алатке или радног места уопште,
- да обезбеде међусобне положајне односе између радног предмета и алата,
- да радни предмет или алат довољно чврсто стегну у циљу одржавања потребних положаја.

Стезни прибори су обавезни чиниоци обрадног система. Њиховом применом долази до побољшања низа ефеката као што су:

- исправно базирање радног предмета на машини у односу на захтеване конструктивне базе, чиме се смањује припремно време,
- повећање продуктивности алатних машина,
- скраћење времена обраде,
- олакшање рада радника,
- смањење грешака тачности димензија при постављању предмета обраде у стезни прибор што је један од услова за спровођење принципа заменљивости готових производа,
- максимално искоришћење перформанси машинског парка,
- реалније одређивање норми рада,
- смањење цене производа,
- скраћује се време тачног постављања радног предмета или алата на машину алатку,
- скраћује се време стезања радних предмета и алата,
- мањи је проценат шкарта,
- мањи замор радника,
- могу се користити радници нижих квалификација.

Постоје разне поделе стезних прибора на основу неколико критеријума и то према: виду радног поступка, континуалности рада, степену механизације, степену универзалности, броју предмета који се истовремено обрађују и конструктивно-експлоатационим карактеристикама прибора.

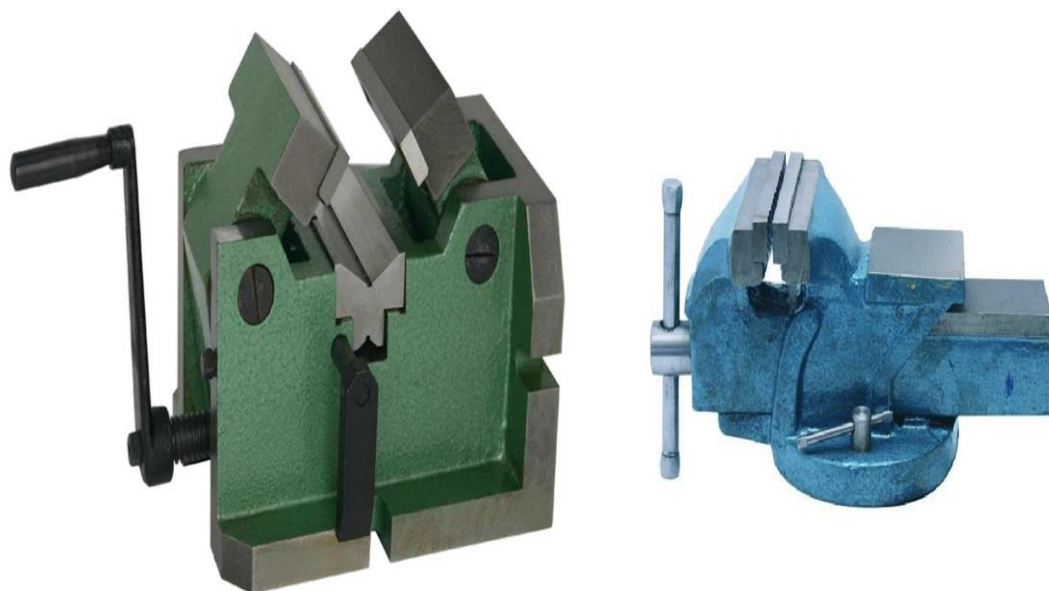
Када је реч о обради метала резањем постоје прибори намењени за обраду на: стругу, глодалици, бушилици, брусилци....

Углавном се помоћни прибори деле према намени и то:

- универзални (прибори опште намене),
- специјални (прибори индивидуалне намене),
- групни прибори,
- модуларни прибори.

2.1.1. Универзални стезни прибори

Користе се за стезање и базирање предмета обраде у појединачној и малосеријској производњи. Ови прибори представљају стандардизоване или номинизоване поизводе развијне за вишеструку употребу. Доста су заступљени у операцијама обраде метала резањем.



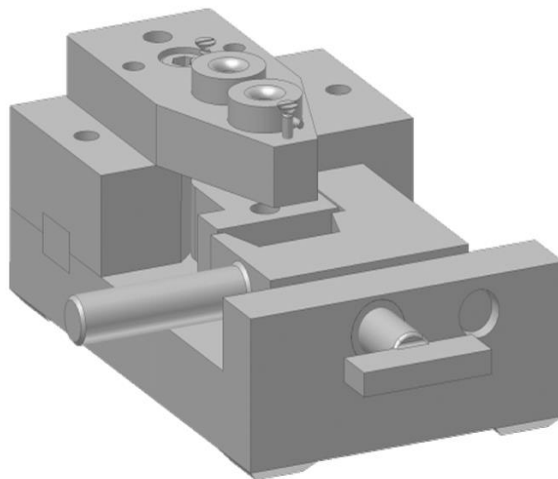
Слика 2.1. Ручна стега [1]



Слика 2.2. Стезне чауре [1]

2.1.2. Специјални стезни прибори

Једнонаменски прибори, намењени су за базирање и стезање предмета одређеног облика. Користе се у серијској и масовној производњи.



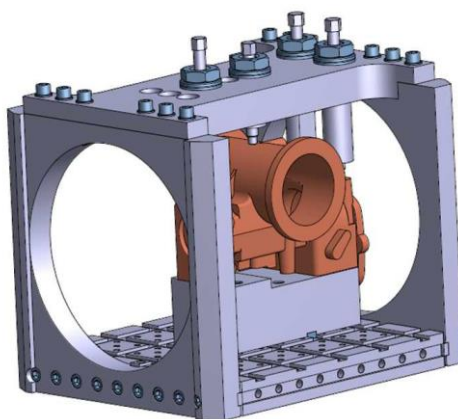
Слика 2.3. Приказ једне конструкције специјалног прибора [1]

2.1.3. Групни прибори

Користе се за базирање и стезање групе технолошки сличних предмета обраде. Групни прибори се обично пројектују за једну операцију заједничног технолошког поступка групе предмета обраде. Код пројектовања ових прибора тежи се што мањем броју изменљивих елемената како се не би доста смањила крутост конструкције а самим тим и не би дошло до грешака при обради. Основни захтев који ови прибори треба да обезбеде је могућност стезања, базирања или вођења алата за све предмете обраде дате групе. То се може остварити применом:

- групног прибора са изменљивим елементима,
- групног прибора са регулисањем неких елемената,
- комбиновањем претходне две групе.

При преласку на обраду следећег предмета обраде из групе треба изменити одређени број елемената или треба извршити одговарајућа регулисања положаја појединих елемената. Код групног прибора постоји основни прибор и комплет изменљивих (подешивих) елемената. Пошто се користе код групе технолошки сличних елемената ови прибори налазе примену у серијској и масовној производњи.



Слика 2.4. Групни прибор [1]

2.1.4. Модуларни прибори

Ови прибори се заснивају на принципу спајања из стандардних елемената који се налазе у одговарајућем комплету. Комплет се састоји из различитих делова, различитог облика и подсклопова који су обликовани тако да се могу међусобно склапати. Елементи су израђени од квалитетног конструкцијског и алатног челика, термички су обрађени а додирне површине су брушене и глачане што обезбеђује високу отпорност на хабање и тачност склапања. Склапањем се могу компоновати прибори за делове различитог облика и величине. Међусобне везе елемената су развојиве па се делови прибора могу, без оптерећења, расклопити и користити за формирање нових прибора. Због великог броја елемената прибора може се у исто време формирати већи број прибора. Комплет стандардних елемената садржи: основне елементе, елементе за ослањање и локацију, елементе за вођење алата, елементе и механизме за стезање, допунске елементе и различите подсклопове.

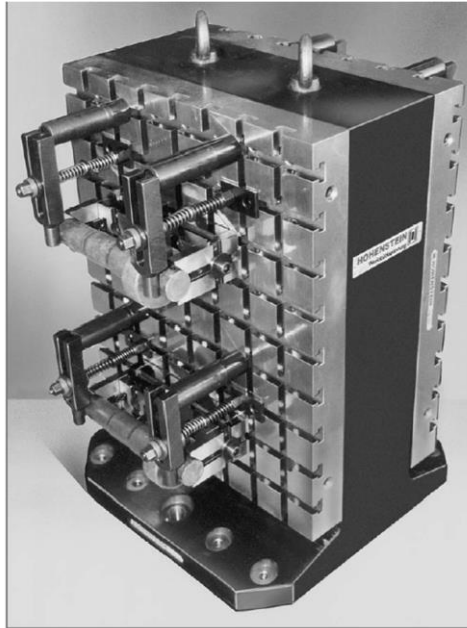
Предности примене модуларних стезних прибора:

- мањи трошкови конструисања прибора,
- време склапања је веома кратко а самим тим су и мањи трошкови израде прибора,
- смањивање потрошње материјала за израду производа,
- оштећени елементи се могу лако и брзо заменити,
- брз повраћај уложених средстава.

Поред ових предности модуларни прибори имају и одређене мане:

- висока почетна улагања,
- смањена крутост комплетног прибора услед великог броја спојева,
- мале могућности за примену агрегата за брзо стезање.

Област примене ових прибора је веома велика као на пример: у малосеријској и појединачној производњи, при развоју и изради прототипа машина и уређаја при увођењу нових производа, у серијској производњи.

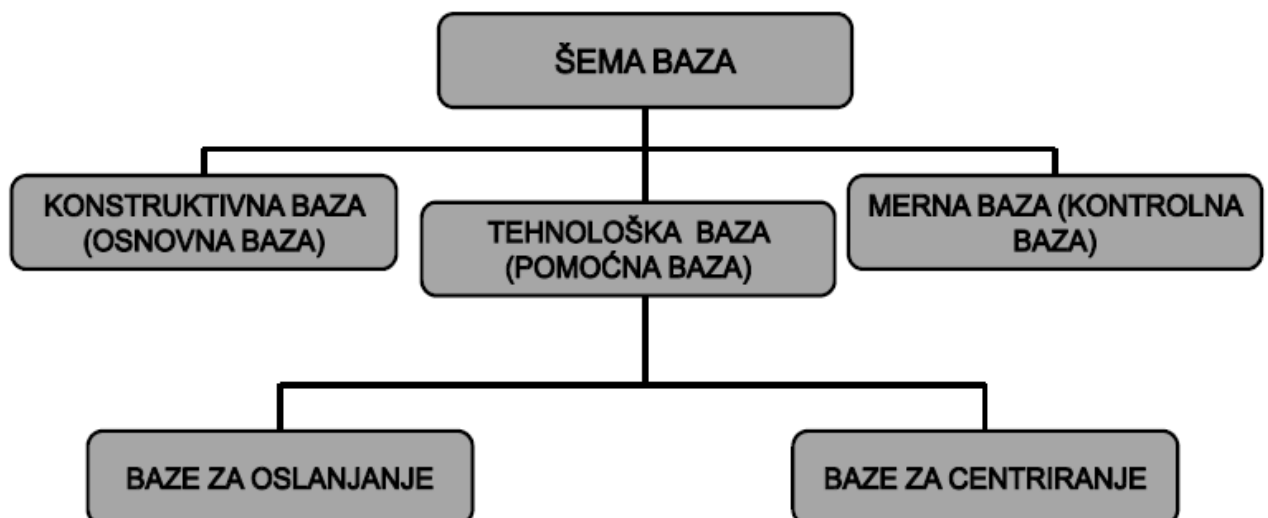


Слика 2.5. Пример склопа прибора [1]

2.2. Базирање

Базирање представља одузимање степени слободе предмету обраде и то ослањањем предмета обраде на базе, потребно је предмету обраде одузети свих 6 степени слободе. Базе се могу поделити на:

- Основна (конструктивна) база- служе за одређивање положаја дела у склопу машине у односу на друге делове и склопове који се спрежу са њим, треба настојати да се основна база користи за базирање предмета обраде у стезни прибор.
- Технолошка (помоћна) база- нема утицај на положај готовог дела у односу на друге делове и формира се само из технолошких разлога.
- Мерна (контролна) база- по њима се врши провера узајамног положаја површина и од њих се врши читавање при мерењу дела.



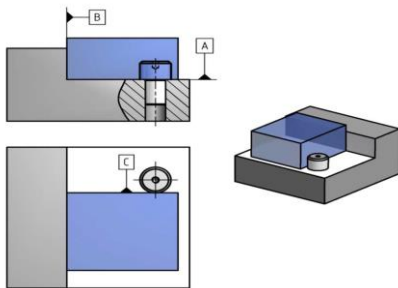
Слика 2.6. Шема базирања [1]

Грешке које се јављају приликом израде предмета обраде су:

- Грешке израде стезног прибора- грешке у димензијама, облицима и квалитету обраде елемената прибора. Δ_{prib}
- Грешке базирања- услед неодговарајућег одузимања степена слободе предмета обраде. Δ_{baz}
- Грешке стезања- грешке услед еластичних деформација радног предмета због деловања силе стезања. Δ_{st}
- Грешка обраде- грешка услед еластичних деформација радног предмета због деловања силе резања. Δ_{obr}

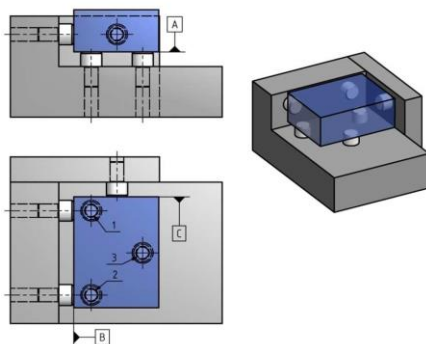
$$\Delta \leq \sqrt{\sum \Delta_i^2} = \sqrt{\Delta_{baz}^2 + \Delta_{st}^2 + \Delta_{obr}^2 + \Delta_{prib}^2} \leq T$$

Базирање предмета обраде се може обављати на различите начине, а све у зависности од облика предмета обраде који треба базирати. Тако да се базирање призматичних елемената врши по равним површинама и ослоним и граничним чеповима. Као и у сваком случају базирања површина са највећим габаритима се ослања у најмање три тачке. У зависности од тога да ли је та површина претходно обрађена или не разликују се два случаја. Када је реч о томе да је површина са највећим габаритима претходно обрађена онда се базирање (ослањање) може извести по целој површини. Базирање се врши по целој површини зато што су одступања равности належуће површине мала и при дејству силе стезања неће доћи до деформација врхова неравнина контакта. Уколико се ради о великим димензијама предмета обраде онда се ослањање врши по ослоним чеповима.



Слика 2.7. Базирање призматичних предмета [1]

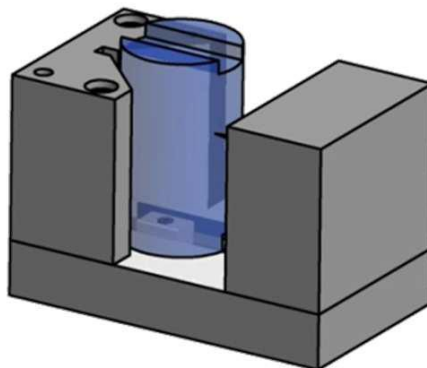
Када је реч о базирању предмета обраде чије површине нису претходно обрађиване онда се користе различите врсте подесивих и неподесивих вијака.



Слика 2.8. Базирање призматичних делова по ослонцима [1]

Базирање цилиндричних елемената.

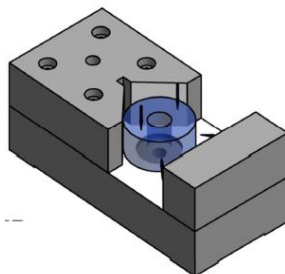
Базирање ових делова се врши у призмама. Предмет обраде се базира у призми, ослања по равној површини и центрира преко клина. Обртање предмета обраде и његово померање по „у“ оси зауставља клин док су остали степени слободе одузети самим постављањем у призму и стезањем предмета обраде.



Слика 2.9. Базирање предмета обраде у призми [1]

Базирање предмета обраде облика диска.

Базна површина диска је чеона површина и она се ослања у околини три тачке као и код призматичних делова. Спољашња контура диска се базира по призми. Шести степен слободе, ако је то потребно, одузима се уз помоћ додатног елемента (обично клина) и самим тим се дефинише полазни положај диска.

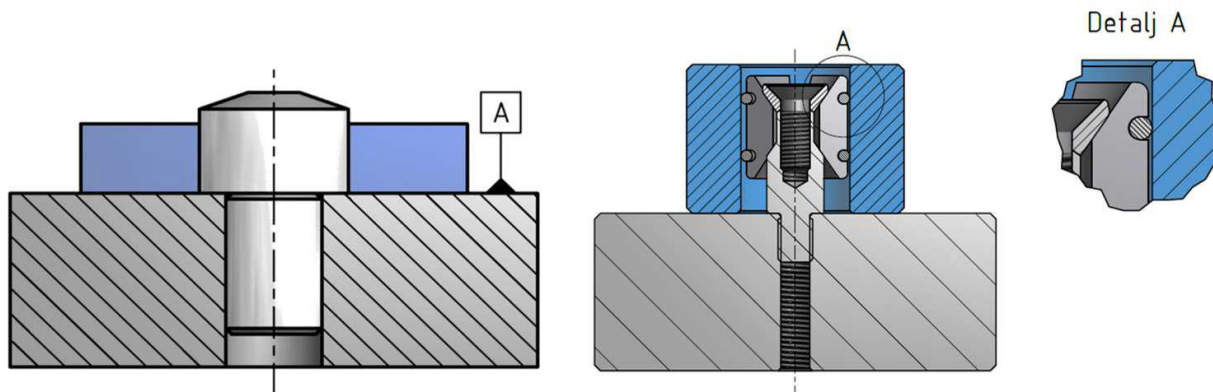


Слика 2.10. Базирање предмета обраде облика диска [1]

Базирање предмета обраде по отворима за центрирање.

Веома чест случај у пракси је да се предмети обраде базирају, па и стежу, преко отвора за центрирање. Постоје различити начини да се то оствари и то:

- базирање по чеоној површини и кратком отвору,
- базирање по чеоној површини и дугом отвору,
- базирање по чеоној површини и два кратка отвора,
- базирање по два кратка отвора за центрирање и
- базирање на две управне површине и кратком чепу.



Слика 2.11. Базирање предмета обраде по чеоној површини и кратком отвору [1]

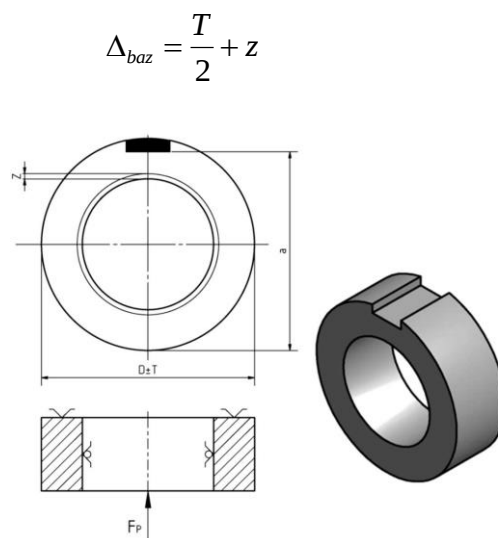
2.2.1 Грешка базирања предмета обраде

Грешка базирања предмета обраде се јавља уколико конструктивна база предмета обраде није у исто време и технолошка база и величина ове грешке зависи од избора шеме базирања.

Да би се избегла грешка базирања потребно је да се технолошка и конструктивна база поклапају, у том случају грешка базирања не постоји. Када се не поклапају величина грешке је разлика кота између технолошке и конструктивне базе.

2.2.2 Грешка базирања цилиндричних делова

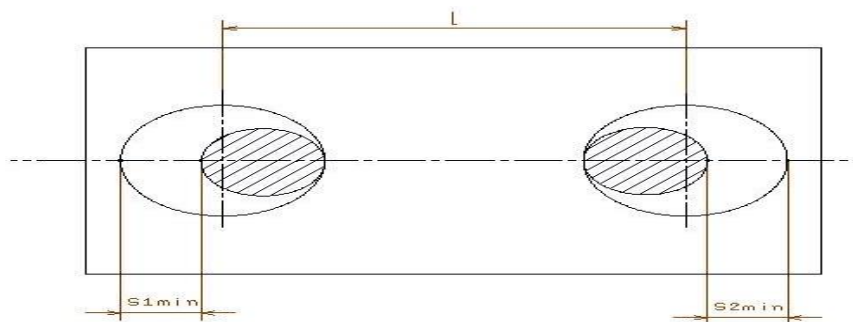
Пошто се базирање цилиндричних делова врши у призмама услед постојања толеранције пречника цилиндричног дела његов положај (пропадање) у призми зависи од толеранције пречника, угла призме и начина на који је дефинисана функционална кота.



Слика 2.12. Грешка базирања цилиндричних делова [1]

2.2.3. Грешка базирања на чеповима за центрирање

Уколико је предмет обраде потребно базирати на два отвора онда се користе чепови за центрирање и онда услед толеранција отвора и пречника чепова за центрирање долази до одређене грешке базирања.



Слика 2.13. Чепови за центрирање [1]

2.3. Стезање

Стезање треба да у току процеса обраде, при дејству динамичких оптерећења, онемогући померање предмета обраде од базних површина као и да не дозволи повећани ниво вибрација. Односно основна функција стезања је да обезбеди једнозначно дефинисање положаја предмета обраде у стезном прибору. Величина силе стезања и избор начина стезања зависи од силе резања која се јавља у току машинске обраде. Положај смер и правац силе резања треба изабрати тако да се са што мањом силом стезања може успешно реализовати производна операција. Поуздано стезање треба да се оствари на што мањем броју стезних места.

Елементи и механизми за стезање треба да обезбеде самокочивост и једнозначно дефинисање положаја предмета обраде у стезном прибору. Елементи за стезање који се најчешће примењују су зартњеви, клинови, ексцентри (кружни, спирални), полуге, чауре и слични елементи. Поред механичких елемената користе се и различите врсте хидрауличких и пнеуматских цилиндара, а примењује се и електромагнетно, вакумско и стезање са електромоторним погоном. Најширу примену имају механички елементи.

2.3.1. Механички елементи за стезање.

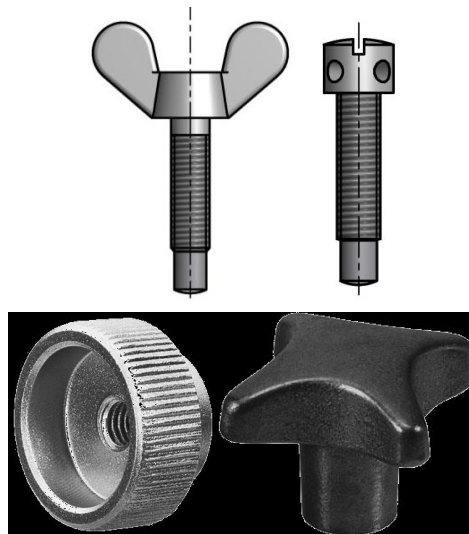
Доста се примењују из разлога што имају велики низ добрих карактеристика као што су: добра стабилност, једноставна израда, ниска цена, могућност постизања веома високих вредности сила стезања. Преко ових елемената се на врло једноставан начин може извршити стезање предмета обраде у већини операција уз висок степен поузданости склопа стезног прибора.

Стезање завртњем- од свих механичких елемената има најширу примену у градњи стезних прибора. Користи се као директни елемент за стезање или, много чешће, у склопу различитих полуга и механизма. Могуће је остварити велике аксијалне силе при дејству релативно малих момената на главу завртња.

Аксијална сила која се остварује:

$$F_s = \frac{M_t}{\frac{d_m}{2} \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \rho) + C}$$

при чему је M_t -момент којим се делује на главу завртња, d_m - средњи пречник завојнице, α - угао завојнице, ρ - угао трења, C - констата која зависи од облика притезне површине.



Слика 2.14. Завртањ и навртка [1]

2.3.2. Механизација стезних прибора.

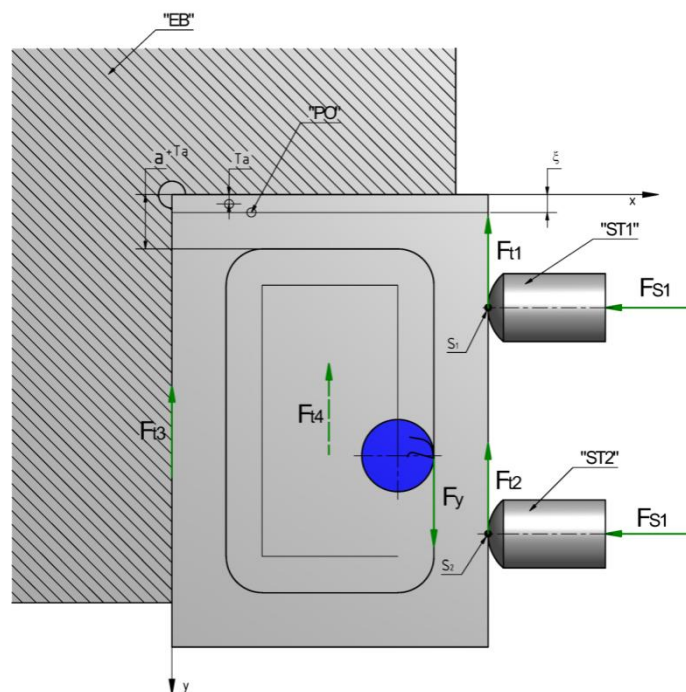
Базира се на примени пнеуматских, хидрауличних или пнеумохидрауличних система за стезање и отпуштање предмета обраде. Према степену аутоматизације стезни прибори се деле на: механизоване, полуаутоматске и аутоматске. Код полуаутоматских стезних прибора постављање предмета обраде у стезни прибор се изводи без учешћа радника, док се код аутоматских прибора све операције (довођење предмета обраде у одређени положај, стезање, отпуштање, скидање предмета обраде...) врше аутоматски без учешћа радника.

Основни задатак свих аутоматизованих елемената за стезање је да коршћењем енергије флуида или електричне енергије покрену одговарајући механички елемент и обезбеде поуздано и брзо стезање и отпуштање предмета обраде.

Уређаји који се користе су: клипни пнеуматски уређаји- цилиндри једносмерног дејства, цилиндри двоструког дејства, двојни клипни уређаји, пнеумохидраулични уређаји.

3. Стезање предмета обраде утискивањем стезача у површину предмета обраде

Код стезних прибора се силе стезања у великом броју случајева уравнотежавају силама трења између стезних елемената прибора и дела који се обрађује.

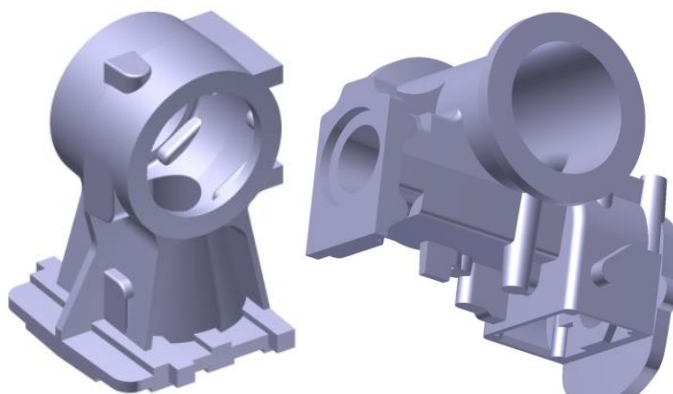


Слика 3.1. Пример уравнотежавања сила резања силама трења [2]

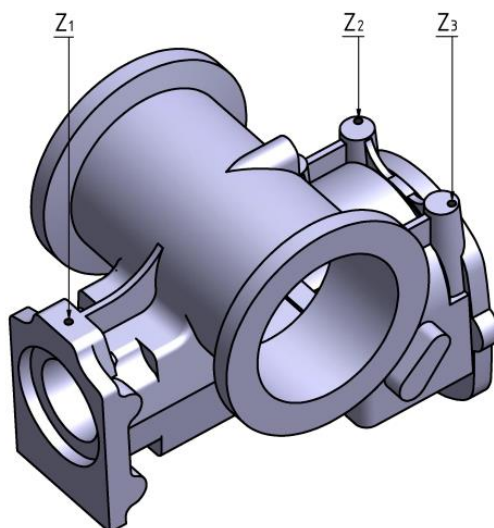
При дејству сила стезања и резања у зонама контакта (S_1 и S_2) стезача са површином предмета обраде као и у зонама контакта предмета обраде са елементима за базирање стезног прибора долази до поморења у правцу и смеру деловања силе F_y . Величина померања предмета обраде у току процеса извођења обраде зависи од вредности сила трења (F_{t1} , F_{t2} , F_{t3} , F_{t4}) и величине оптерећења контакта (F_y). Ова померања проузрокују грешку обраде и поред тога што је систем посматрано на макро нивоу у равнотежи. То ће се десити уколико величина померања (ξ) прекорачи вредност дозвољене толеранције по коти a . Сила трења зависи од нормалног оптерећења, карактеристика материјала елемената у контакту, микрогеометрије контакта, врсти контакта итд. Тачност израде предмета обраде зависи од вредности силе стезања, коефицијента трења, остварених сила трења, макрогеометрије контакта која дефинише поља напона и померања у зонама контакта односно попустљивости носивости. Да би се побољшала носивост, а смањила попустљивост спојева предлаже се метода заснована на утискивању стезача и предмет обраде.

Ова метода се користи код стезања предмета обраде на коме се изводе операције по малом броју површина. Преостале површине немају неку велику улогу која би захтевала квалитетну обраду или естетику. Најчешће се обрађују делови добијени ковањем или ливењем као што су кућишта, постолја носача и слични делови. Ови сложени делови се обрађују на савременим обрадним центрима у једној операцији са великим бројем алата. Због тога је подизање нивоа поузданости система стезања од

великог значаја како не би дошло до превеликих грешака обраде. Померање предмета обраде у прибору изван дозвољених граница доводи до шкарта и финансијских губитака.



Слика 3.2. Примери делова који се могу трајно деформисати [3]



Слика 3.3. Кућиште мултипликатора [2]

На слици 3.3. приказано је кућиште мултипликатора који се може трајно деформисати на местима стезања а да се не наруши његова функција. Тачке у којима се кућиште стеже приликом обраде и у којима долази до деформисања на слици су означене са: Z_1 , Z_2 и Z_3 .

Научници који су се бавили овом методом су полазили од следећих претпоставки:

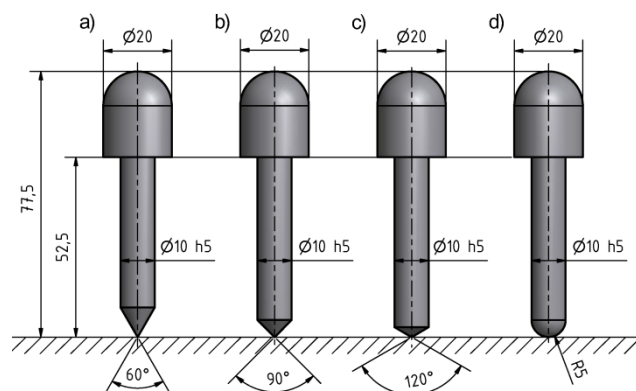
- Попустљивост споја у „тачкама“ где се врши стезање дела зависи од микрогеометрије контактних површина и од макрогеометрије контакта елемената за стезање и предмета обраде.
- Тангенцијална носивост контакта (носивост у правцу управном на силу стезања) у зонама где се врши стезање дела такође зависи од микрогеометрије контаката елемената за стезање и предмета обраде.
- Да се избором геометрије контакта елемената за стезање и предмета обраде може у значајној мери повећати тангенцијална носивост контакта и смањити попустљивост

контакта чиме се битно може побољшати или тачност израде дела или повећати дозвољене силе резања.

- Спој утиснутог оштрог врха стезног елемента у предмет обраде, са дубинама утискивања величине до три милиметра, може обезбедити мање попустљивости и веће носивости споја у односу на контакте у којима се спољашње оптерећење уравнотежава искључиво силама трења које настају у зони контакта стезача и предмета обраде.

- Да се поређењем резултата прорачуна преко нумеричких метода и резултата експерименталних мерења могу добити веома корисни подаци који могу послужити као подаци за оптимизацију макрогеометрије стезних елемената.

Нумерички и експериментално су одређене тангенцијалне носивости контакта и попустивости контакта за различите геометрије стезних елемената при варирању силе стезања у широком опсегу. Геометрије стезних елемената су приказане на слици 3.4.



Слика 3.4. Геометрије стезних елемената [3]

Геометрије стезних елемената су:

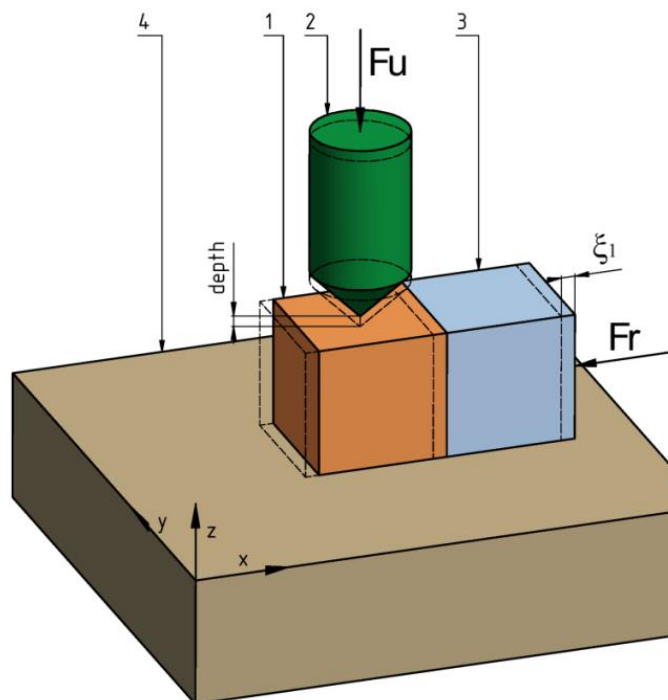
а) Утискивач са углом конуса 60° -K60

б) Утискивач са углом конуса 90° -K90

в) Утискивач са углом конуса 120° -K120

г) Сферни утискивач- стезач са сферичним завршетком радијуса свере-R=5mm

Нумерички прорачуни се изводе у програмском пакету Simufact Forming v9.

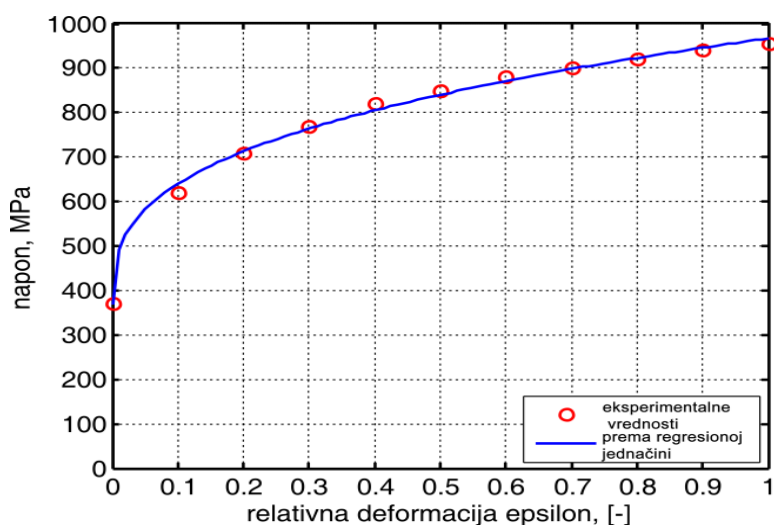


Слика 3.5. CAD модел [3]

На слици означено је са 1- предмет обраде, 2- утискивач, 3- потискивач, 4- постоље, F_r - сила резања, F_u - сила стезања.

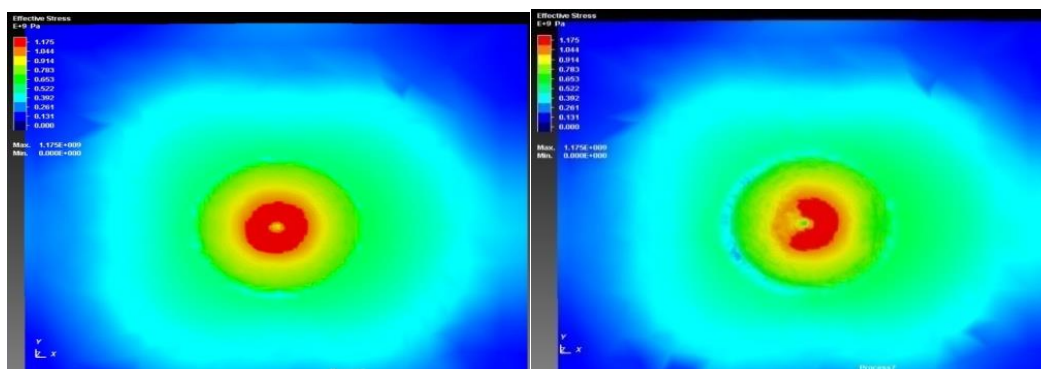
Преко утискивача делује се на предмет обраде тако да он продре у предмет обраде до дефинисане дубине. Након тога утискивач не врши никакво померање. Програм омогућава да се за дубину која је добијена током извођења експеримента одреди сила утискивања. У другом кораку предмет обраде се потискује преко потискивача у правцу x осе при чему се прати зависност силе потискивања од хода потискивача. Занемарено је трење између непокретног постоља и предмета обраде. Поред дубине утискивања као улазни податак за анализу користе се и следећи полазни подаци:

- 1) Крива ојачања,
- 2) Вредност коефицијента трења између утискивача и испитиваних узорака,
- 3) Брзина утискивања утискивача.



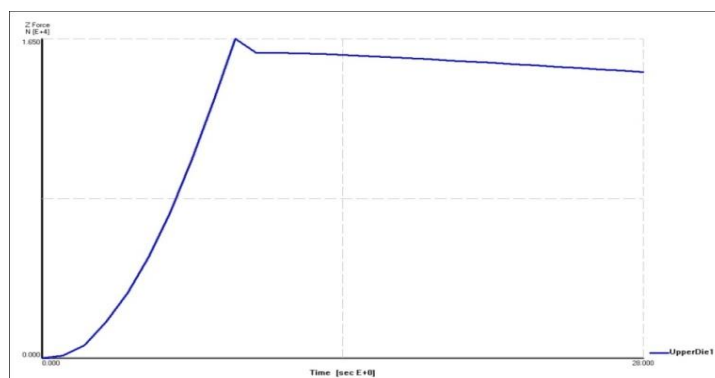
Слика 3.6. Пример криве ојачања за материјал C 45 E [3]

Утискивање је изведено са утискивачима чије су геометрије дате на слици 3.4. Прорачуни су изведени за све геометрије утискивача и дубине утискивања које су постигнуте при дејству различитих вредности сила утискивања. На слици 3.7. дати су облици поља напона после деловања утискивача односно потискивача.

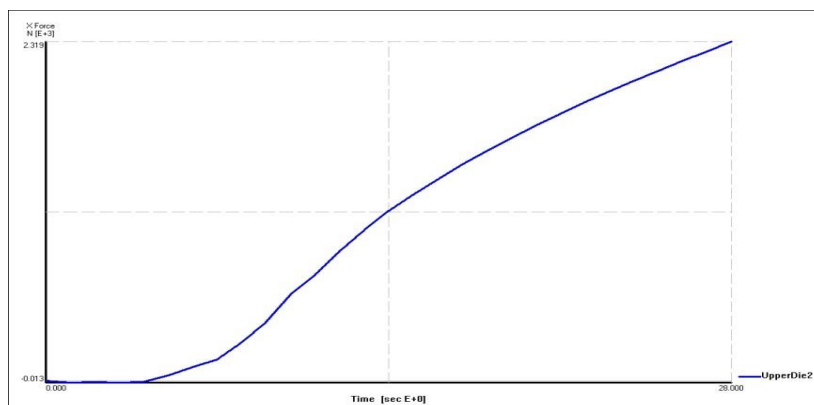


Слика 3.7. Напонска поља у зони контакта [3]

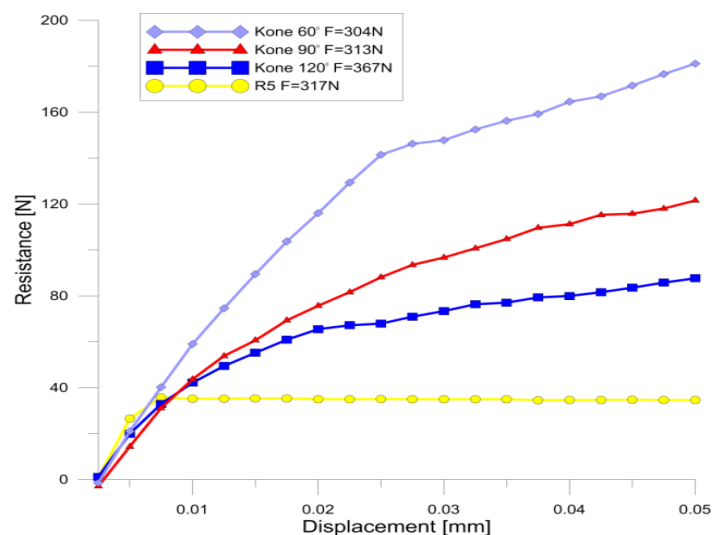
На сликама 3.8. и 3.9. дат је дијаграм промене силе утискивања у функцији времена утискивања и дијаграм аксијалне носивости споја у функцији времена односно померања потискивача при утискивању утискивача од 90° . Величини померања потискивача одговара одређена аксијална сила која изазива то померање. Величина померања потискивача је попустљивост споја а величина силе на потискивачу је носивост споја.



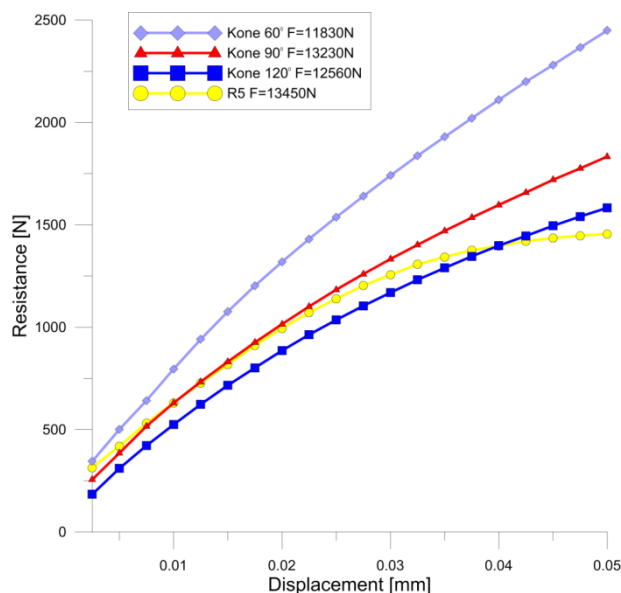
Слика 3.8. Зависност силе утискивања F_r од времена утискивања при утискивању утискивача врха од 90° [3]



Слика 3.9. Зависност носивости споја у правцу силе резања F_r од времена код угла врха од 90° [3]

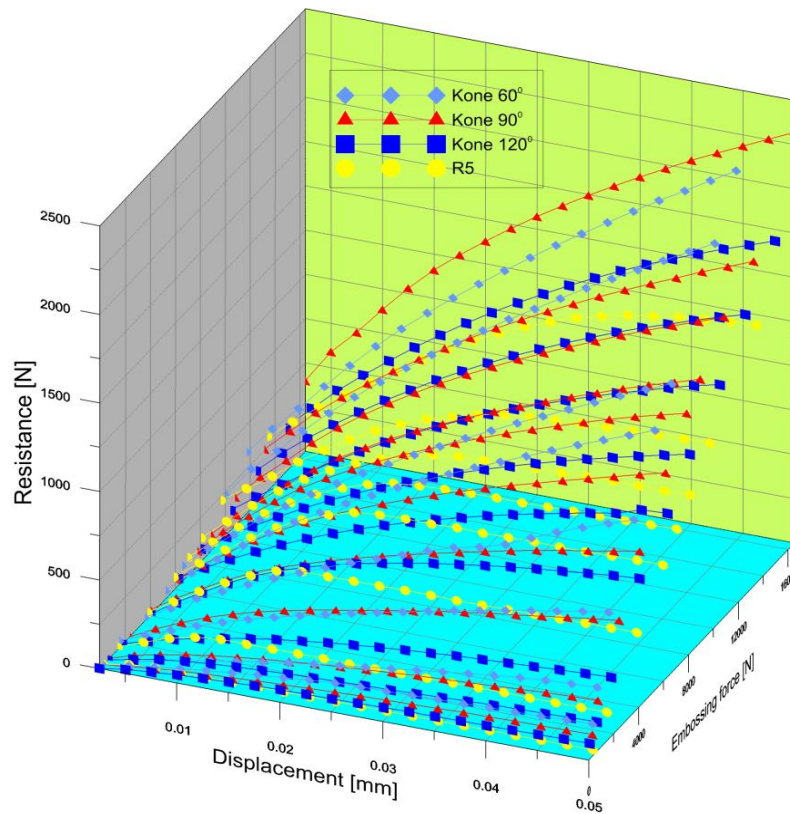


Слика 3.10. Зависност носивости споја од попустљивости споја за случај утискивања утискивача различитих облика релативно ниским вредностима сила утискивања [3]



Слика 3.11. Зависност носивости споја од попустљивости споја за случај утискивања утискивача различитих облика релативно високим вредностима сила утискивања [3]

Са аспекта носивости споја у домену нижих оптерећења и попустљивости већих од 0,0075 mm сви утискивачи конусног облика показују предност у односу на утискивач са сферичним завршетком. Такође се на дијаграма са слика 3.10. и 3.11. види да у домену високих вредности силе утискивања, утискивачи са углом врха од 60° и 90° у односу на утискивач са углом врха од 120° и утискивач са сферичним завршетком са аспекта носивости споја показују значајне предности.



Слика 3.12. 3D приказ зависности носивости споја од попустљивости споја, силе утискивања и геометрије утискивача [3]

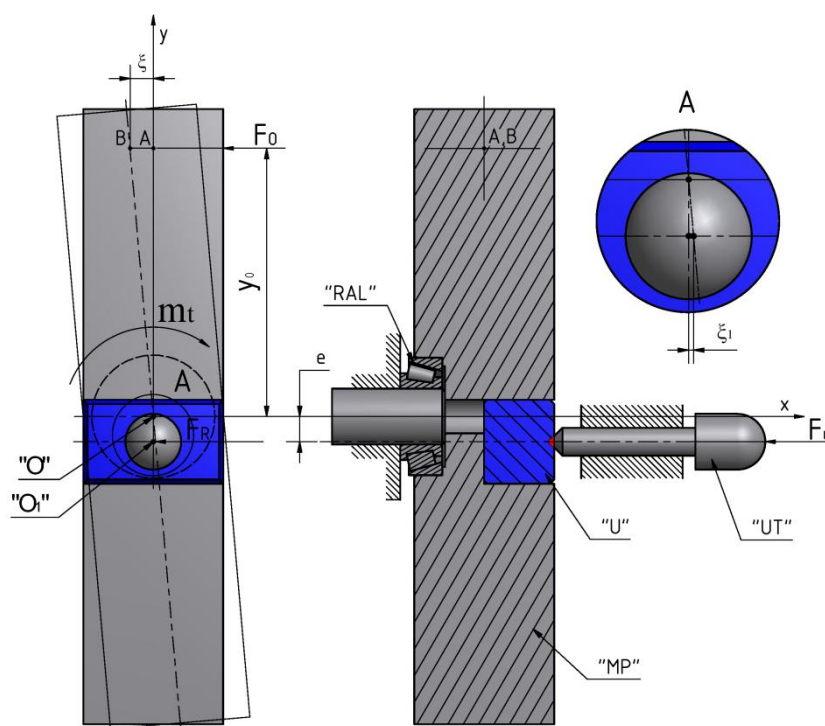
На основу дијаграма са слике 3.11. закључује се да утискивачи оштрог врха показују са аспекта носивости значајне предности у односу на утискивач са сферичним завршетком.

4. Приказ експерименталних резултата

4.1. Мерна инструментација

Мерна инструментација која се користи приликом испитивања попустиљивости експерименталним путем је следећа :

- Компаратери- индикатори померања који раде са тачношћу читавања од 0,01 mm. Преко њих се, са циљем повећања тачности мерења, прате померања која су 22,5 пута већа од померања у зони контакта стезача и испитиваног узорка.
- Мерење ширине и дубине отисака које је у испитиваном узорку направио специјални стезач врши се помоћу микроскопа и уређаја за мерење храпавости.
- Наменски пројектован и реализован уређај чија је принципска шема функционисања дата на слици 4.1. Овај уређај функционише на механичком принципу. Преко полужних механизма и избаждарених тегова омогућава стезање узорака стезачем са равним челом и специјално дизајнираним стезачем одређеним вредностима сила стезања F_c . Уређај такође омогућава да се симулира оптерећење контакта F_t и прати попустљивост контакта ξ_1 .



Слика 4.1. Принципка шема уређаја за мерење носивости и попустљивости контакта стезача и узорка [2]

Мерна полука MP по оси која пролази кроз тежиште маса улежиштена је радиаксијалним лежајем RAL. Овај лежај омогућава обртање мерне полуке око тачке O и равни x-y. Посредством силе F_u остварује се контакт стезача са узорком који симулира предмет обраде. Стезање се врши у тачки O_1 , односно правац дејства силе стезања пролази кроз тачку O_1 . Тачка O_1 у односу на осу обртања мерне полуке помера се у правцу осе y за величину e. Различите вредности сила стезања F_c обезбеђују се преко специјално дизајнираног полужног механизма и избаждарених тегова. Након стезања на мерну полуку се у тачки A на одстојању y_0 од тачке до мерне полуке, делује

силом F_0 и прати померање ξ . Сила F_0 се одређује преко система полуга и избаждарених тегова, чиме је омогућено да она расте од минималне до максималне вредности.

На бази геометријских односа и статичких услова равнотеже мерне полуге произилазе вредности носивости контакта F_t и попустљивости контакта ξ_1 у тачки O_1 односно попустљивости контакта ξ_1 у зони стезања одакле следи:

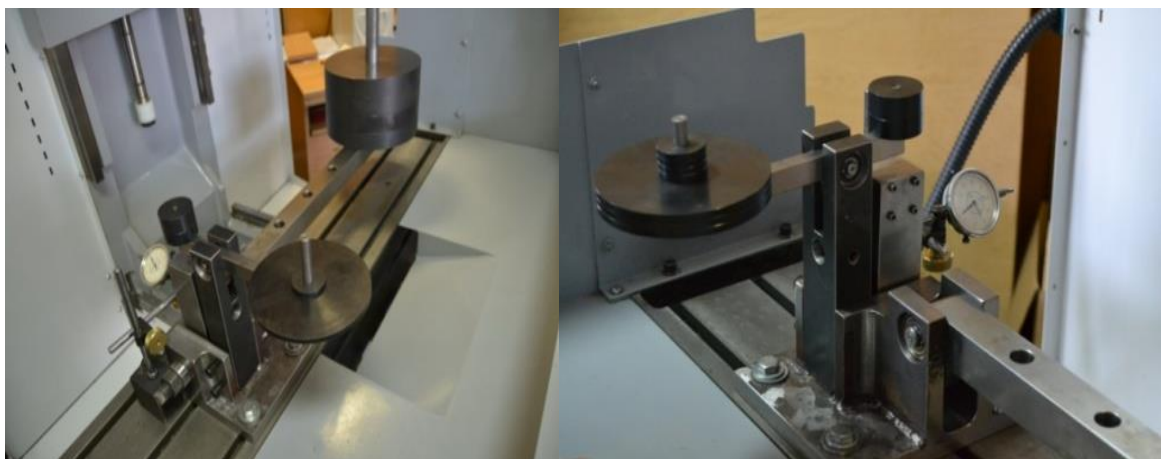
$$F_t = \frac{F_0 \cdot y_0 - M_t}{e} \quad \text{и}$$

$$\xi_1 \cong \frac{e}{y_0} \cdot \xi$$

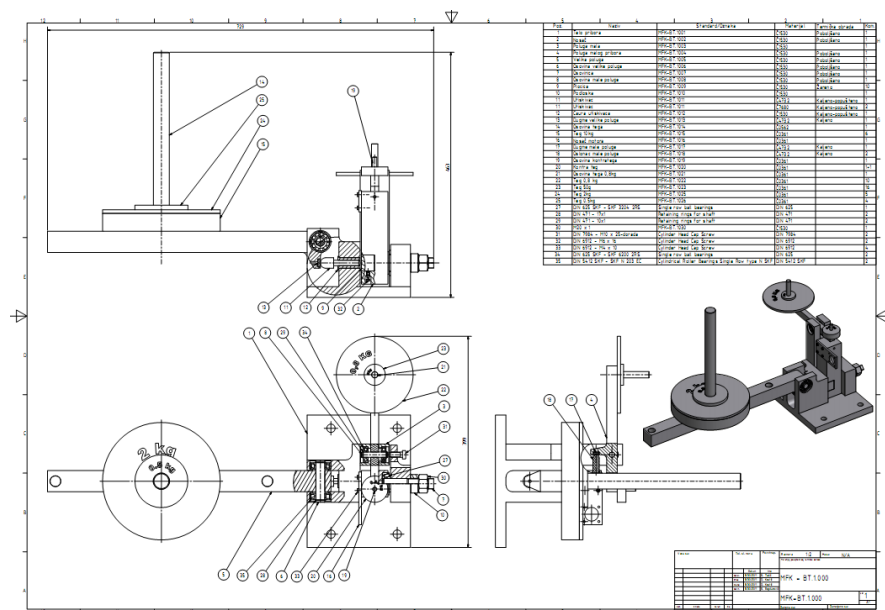
Где је : F_t – носивост контакта; F_0 – оптерећење контакта у тачки А; M_t – момент трења котрљања лежаја RAL, e – одстојање тачке стезања у односу на обртање мерне полуге; y_0 – одстојање од тачке дејства силе F_{t1} до осе обртања; ξ_1 – попустљивост контакта испитиваног узорка и стезача у тачки O_1 (слика 13.); ξ – померање мерне полуге по оси x и тачки А.

За мерни уређај приказан на слици 4.1 треба нагласити да:

- 1) Мерни уређај обезбеђује стезање различитим силама стезања
- 2) Обртне тачке мерне полуге и свих осталих полуга изведене су котрљајним лежајевима високе тачности и малог коефицијента трења.
- 3) Мерни уређај обезбеђује тачност вођења стезача већу од $5 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$ што, с обзиром на регистроване вредности попустљивости представља основни предуслов за поуздано мерење.
- 4) Радиаксијални лежај који је уграђен на мерној полуци је лежај мале вредности коефицијента трења котрљања. Приликом прорачуна момента трења овог лежаја коришћени су експериментални подаци добијени од произвођача лежаја. Такође су и за све лежајеве, у функцији њиховог оптерећења, прорачунате и узете у обзир вредности њихових момената трења.

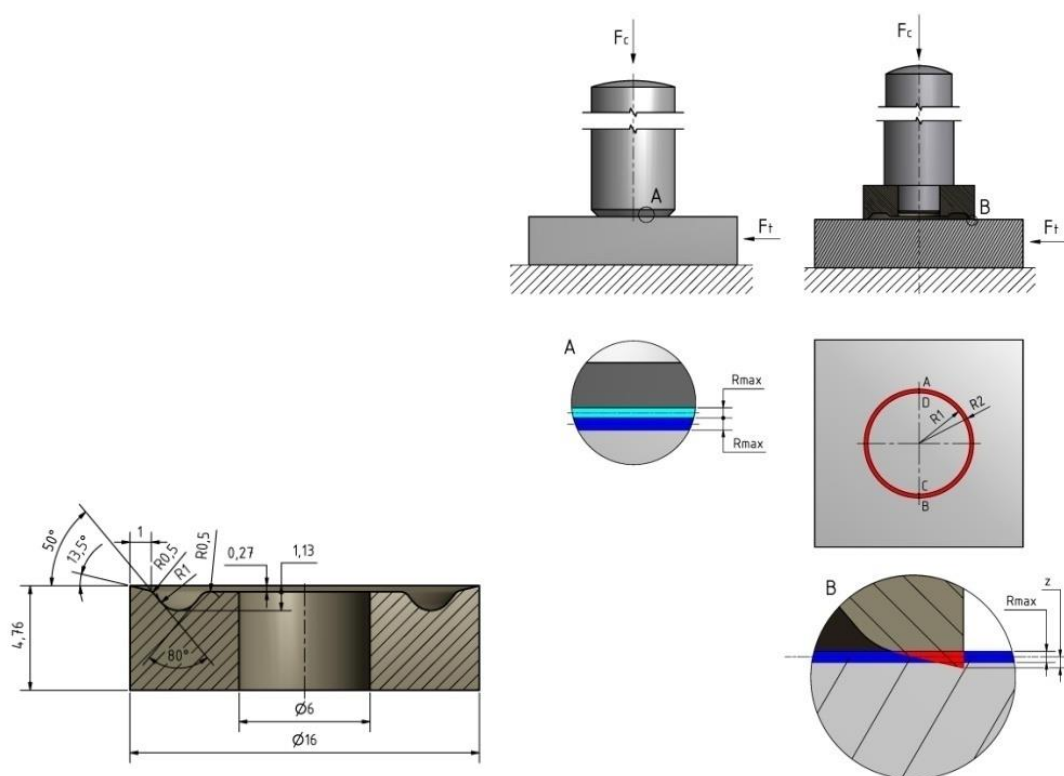


Слика 4.2. Фотографски приказ уређаја за мерење носивости и попустљивости контакта стезача и узорка [2]



Слика 4.3. Модел склопа уређаја за мерење носивости и попустљивости споја [2]

У експерименту који је обављен испитивала су се два типа елемената за стезање који могу представљати не само елементе за стезање већ и елементе за позиционирање прибора.



Слика 4.4. Макрогеометрија елемената за стезање са равним челом и специјално дизајнираног елемента за стезање [3]

Идеја специјално дизајнираног елемента за стезање облика прстенастог клина је претпоставка да ће он у односу на елемент за стезање са равним челом обезбедити мању попустљивост везе са предметом обраде. Приликом дејста силе стезања F_c

елемент за стезање облика прстенастог клина се утискује у предмет обраде. Дубина утискивања је у зависи од величине силе стезања, утискивање се врши по релативно великом обиму прстена кружног клина у радни предмет.

Приликом експеримента вршено је мерење носивости F_t и попустљивости контакта елемената за стезање и испитиваних узорака. Експериментом је обухваћено:

- варирање силе стезања F_c у интервалу од 400N до 13000N,

- варирање тангентијалног оптерећења споја F_t елемената за стезање и узорка у интервалу од 5N до 2500N и

- Праћење попустљивости споја ξ_1 изражено преко померања у зони контакта

Материјал узорака који су коришћени на испитивањима је С 45 Е.

4.2. Резултати експерименталних испитивања

У табели 1. приказани су резултати експерименталних испитивања која су изведена:

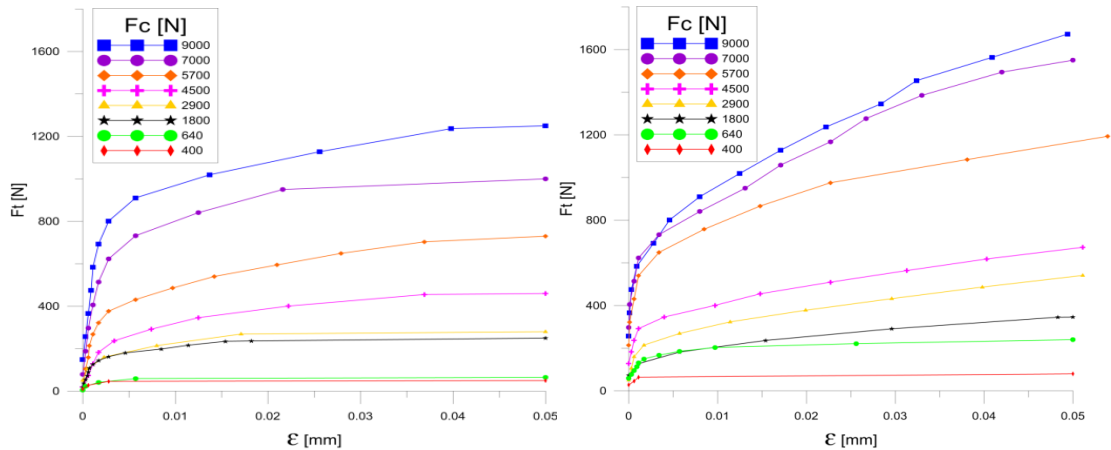
Табела 1. Резултати експерименталних испитивања [3]

F _c =400N		F _c =640N		F _c =1800N		F _c =2900N		F _c =4500N		F _c =5700N		F _c =7000N		F _c =9000N		F _c =11000N		F _c =13000N	
ξ ₁	F _t	ξ ₁	F _t	ξ ₁	F _t	ξ ₁	F _t	ξ ₁	F _t	ξ ₁	F _t	ξ ₁	F _t	ξ ₁	F _t	ξ ₁	F _t	ξ ₁	F _t
0	28.1	0	59.4	0	73.3	0	51.5	0	128.7	0	213.84	0	296.9	0	257.5	0	217.9	0	178.3
0.0006	46.1	0.0003	77.4	0.0011	127.7	0.0003	105.9	0.0003	183.1	0.0001	322.6	0.0001	405.8	0.0001	366.3	0.0001	326.7	0.0001	287.1
0.0011	64.2	0.0006	95.4	0.0057	182.1	0.0006	160.2	0.0006	237.6	0.0006	431.5	0.0006	514.5	0.0003	475.1	0.0003	435.5	0.0001	395.9
0.05	80.2	0.0009	113.4	0.0154	236.4	0.0017	214.6	0.0011	292.0	0.0011	540.2	0.0011	623.4	0.0009	583.9	0.0006	544.4	0.0003	504.8
/	/	0.0011	131.5	0.0296	290.9	0.0057	269.1	0.004	346.4	0.0034	649.1	0.0034	732.2	0.0028	692.7	0.0009	653.1	0.0011	613.5
/	/	0.0017	149.5	0.0483	345.3	0.0114	323.5	0.0097	400.7	0.0085	757.8	0.008	841.0	0.0046	801.6	0.001	761.9	0.0014	722.4
/	/	0.0034	167.5	0.05	346.2	0.0199	377.9	0.0148	455.2	0.0148	866.7	0.0131	949.9	0.008	910.4	0.0011	870.8	0.0023	831.3
/	/	0.0057	185.5	/	/	0.0296	432.2	0.0227	509.6	0.0227	975.6	0.0171	1058.6	0.0125	1019.2	0.0013	979.6	0.004	940.0
/	/	0.0097	203.6	/	/	0.0398	486.7	0.0313	564.0	0.0381	1084.3	0.0227	1167.5	0.0171	1128.1	0.0017	1088.5	0.0074	1048.9
/	/	0.0256	221.5	/	/	0.0511	541.1	0.0403	618.5	0.0539	1193.2	0.0267	1276.3	0.0222	1236.8	0.0023	1197.2	0.0108	1157.6
/	/	0.05	241.3	/	/	/	/	0.0511	672.8	/	/	0.033	1385.1	0.0284	1345.7	0.0051	1306.1	0.0137	1266.5
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0.042	1493.9	0.0324	1454.5	0.0085	1414.9	0.0176	1375.3
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0.0409	1563.3	0.0119	1523.7	0.0227	1484.1
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0.0494	1672.1	0.0148	1632.5	0.025	1592.9
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0.0176	1741.3	0.0296	1701.7
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0.0216	1850.1	0.033	1810.5
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0.0273	1958.9	0.0369	1919.4
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0.0335	2067.8	0.0403	2028.2
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0.0392	2176.6	0.0454	2136.9
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0.0471	2285.5	0.0511	2245.9

Научници који су се бавили овом проблематиком су на основу табеле 1. Формирали регресионе једначине које описују зависност силе трења (тангенцијалне силе) F_t од силе стезања F_c и попустљивости ξ₁ контакта стезача и предмета обраде.

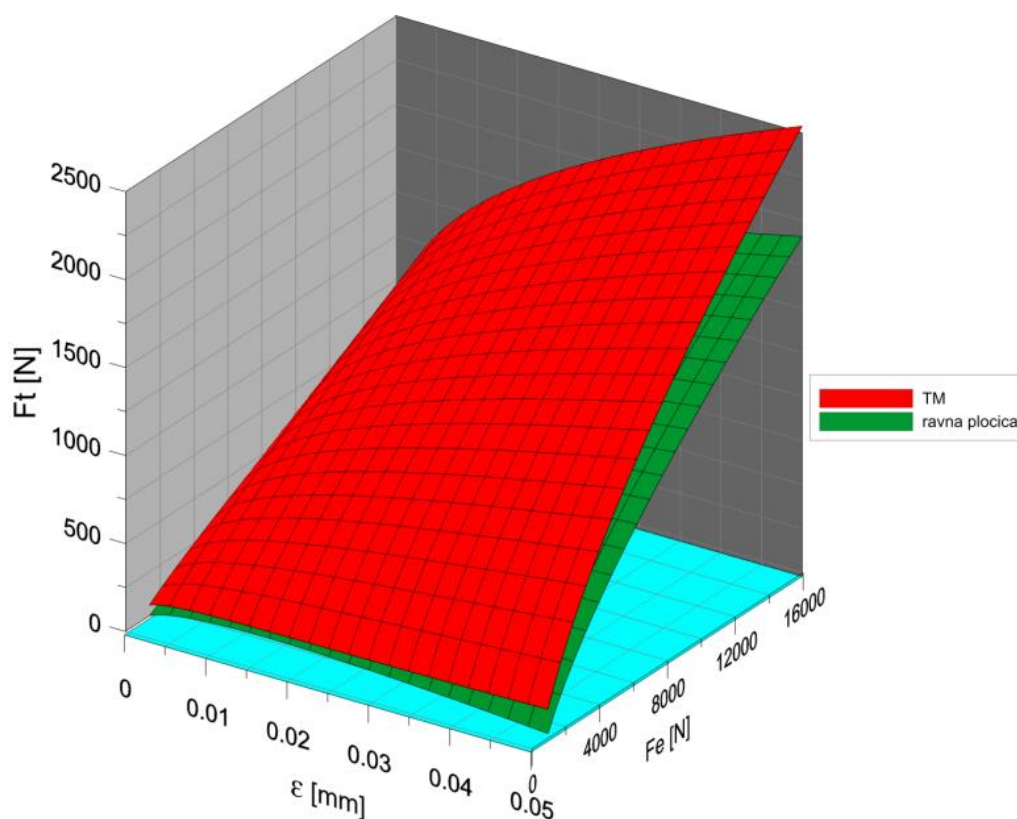
Табела 2. Регресионе једначине [3]

Стезач	Регресивна једначина	коэффициент корелације R
Специјално дизајнирани стезач	$F_t = -94265.3 \cdot \zeta_1 + 0.042104 \cdot F_c + 99435.53 \cdot \zeta_1^{1.052493} + 82.31460 \cdot (\zeta_1 \cdot F_c)^{1/2}$	0.970
Стезач са равним челом	$F_t = -8245.90 \cdot \zeta_1 + 0.035662 \cdot F_c - 52.9507 \cdot \zeta_1^{0.000872} + 63.77113 \cdot (\zeta_1 \cdot F_c)^{1/2}$	0.946



Слика 4.5. Дијаграми зависности силе трења од попустљивости контакта приказани према резултатима из табеле 1. за: а) стезање стезачем са равним челом и б) стезање специјално дизајнираним стезачем [3]

На основу дијаграма са слике 4.5. може се закључити да се стезањем предмета обраде преко специјално дизајнираног стезача добијају веће носивости контакта у односу на стезач са равним челом. Види се да у читавом интервалу сила стезач облика кружног клина има већу носивост и мању попустљивост у односу на стезач са равним челом.



Слика 4.6. Дијаграмске зависности силе трења од попустљивости споја и силе стезања [3]

13000	14.0
-------	------

Табела 3. Дубине трагова утискивања при одговарајућој сили стезања [3]

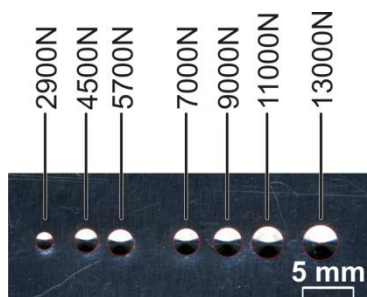
Сила стезања F_c [N]	Дубина утискивања z [μm]
400	3.1
640	3.0
1800	4.5
2900	5.1
4500	7.2
5700	8.5
7000	9.0
9000	10.7
11000	12.3
13000	14.0

Може се видети да су дубине трагова утискивања веома мале вредности без обзира на величину силе којом је вршено стезање. То значи да се високе вредности носивости контакта могу добити ако специјални утискивач продре до дубине приближно једнаке висини неравнина предмета обраде. Што значи да је ова метода стезања примењива у случајевима када стезачи овог облика неће оставити негативне естетске ефекте на предметима обраде. Чиме се знатно побеђава носивост а смањује попустљивост контакта стезача са предметом обраде.

5. Дискусија

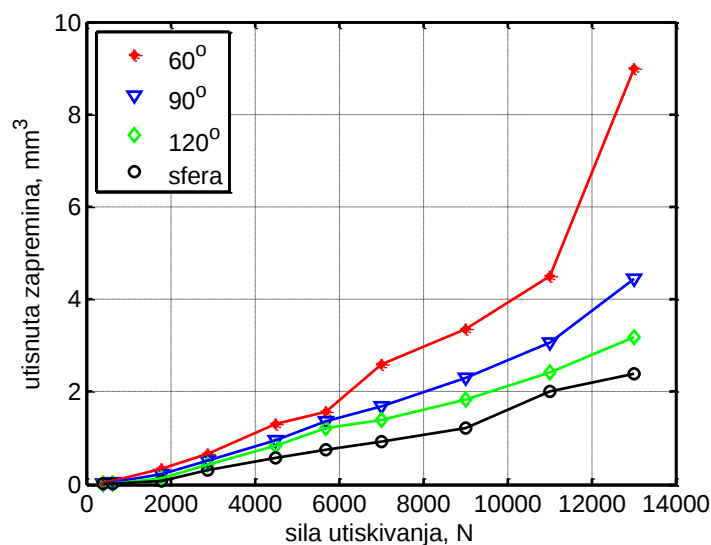
На основу резултата експерименталних испитивања долази се до закључка да се утискивањем оштрих врхова утискивача у узорак, за исту попустљивост, добијају веће носивости спојева у односу на утискивач са сферичним завршетком који оптерећење преноси првенствено трењем. На пример, код сферичног утискивача радијуса R5 максимална носивост контакта је приближно једнака 50 N, при сили утискивања од 400 N и при померању које износи приближно 0,03mm. Док код узорака са оштрим врхом, при истом померању, носивост споја износи између 150-180 , што је веће у односу на сферични утискивач. У домену ниских оптерећења сви утискивачи облика купе имају предност, са аспекта носивости и попустљивости, у односу на утискивач са сферичним завршетком. То је посебно важно при стецању танкозидних предмета обраде што је углавном случај са одливцима за чије стецање се препоручује ова метода. Када је реч о домену високих оптерећења утискивач са углом врха од 90° и 60° имају значајну предности, са аспекта носивости и попустљивости споја, у односу на утискивач са сферичним зглобом. То је важно при стецању у операцијама резања које карактеришу високе вредности сила резања.

Утискивач који симулира предмет обраде израђен је од алатног челика тврдоће 64 HRC па се деформације ових утискивача могу занемарити у односу на деформације предмета обраде.



Слика 5.1. Трагови утискивања добијени утискивањем утискивача од 120° различитим силама [3]

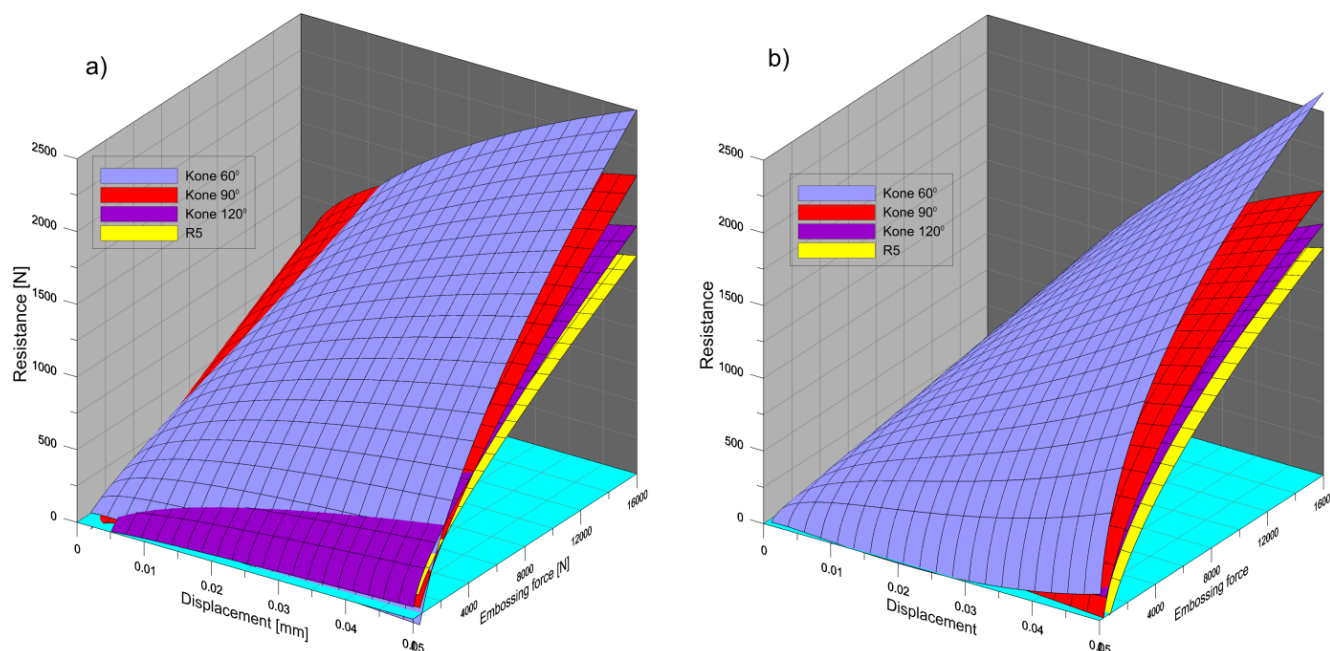
На основу трагова утискивања и облика утискивача могуће је прорачунати запремине утискивача уроњене у материјал узорка.



Слика 5.2. Дијаграм зависности запремине и силе утискивања за различите облике утискивача [3]

Јасно се уочава да утиснута запремина расте са смањењем угла утискивача. То је посебно изражено код утискивача K60 при већим силама утискивања. Може се закључити да постоји зависност између утиснуте запремине и носивости односно попустљивости споја. Утискивач са углом врха од 60° карактерише максимална утиснута запремина и висока попустљивост, посебно при високим оптерећењима. Отпорна сила очигледно зависи од величине утиснуте запремине и промене напона и коефицијента трења у функцији напона на контактним површинама утискивача и узорка.

На основу испитивања може се закључити да стезачи оштрог врха имају велику предност у односу на стезаче са сферичним завршетком. То се огледа у самом механизму уравнотежавања спољашњег оптерећења којим је ова веза изложена. Код стезача сферичног завршетка спољашње оптерећење се уравнотежава у највећој мери силом трења. Код утикивача са оштрим врхом утиснута запремина је већа него код сферичних утискивача. Услед дејства спољашњег оптерећења врши се еластично и пластично деформисање веће запремине материјала што, поред сила трења ствара додатни отпор контакта. Средња вредност напона по већој утиснутој запремини ће бити мања у односу на напоне по мањој запремини. Одатле логично произилази да мање вредности средњих напона на већој контактної површини изазива мање еластичне и пластичне деформације и мању укупну попустљивост контакта.



Слика 5.3. 3D приказ носивости контакта [3]

Када је реч о стезању или базирању обрађених површина, односно површина код којих би већи трагови на површини базирања стезања нарушили естетику предмета обраде, у највећој мери треба стезати помоћу специјално дизајнираног стезача са већим радијусом врха.

На основу експерименталних истраживања произилази да се у читавом интервалу оптерећења специјално дизајнирани стезач облика прстенастиг клина има изражену предност са аспекта веће носивости и мање попустљивости, у односу на стезач са равним челом. На основу истраживања произилази да:

- За интервал силе стезања од $F_c=400-1800$ N специјално дизајнирани стезач за 43,5% обезбеђује већу носивост, односно остварује већу силу трења. То је важно јер се ради о нивоу малих сила стезања и малих деформација предмета обраде.
- За интервал силе стезања од $F_c=9000-13000$ N специјално дизајнирани стезач за 22,8% обезбеђује већу носивост, односно остварује већу силу трења. То је важно јер се ради о условима обраде које карактеришу високе вредности сила резања.
- За интервал силе стезања од $F_c=400-13000$ N специјално дизајнирани стезач за 24,2% обезбеђује већу носивост, односно остварује већу силу трења. А то говори да се стезач овог типа може успешно користити без обзира на величину силе стезања.

Може се констатовати и да су дубине трагова утискивања веома мале вредности. А то значи да се високе вредности носивости контакта могу добити ако специјално дизајнирани стезач облика прстенастиг клина продре у предмет обраде до дубине приближно једнаке корену неравнина. Ова чињеница потврђује могућност примене стезача овог облика. Наиме ови стезачи немају негативне естетске ефекте на предметима обраде, а карактерисаће их знатно веће носивости и мање попустљивости њиховог контакта са предметима обраде.

6. Закључци

На основу претходно написаног у раду може се закључити следеће:

1. Код стандардних елемената за стезање, који се примењују код прибора за машинску обраду, силе резања се уравнотежавају силама трења које настају на контакту ових елемената за стезање и радног предмета.
2. Методом нумеричких прорачуна и експерименталном методом добијени су приближно слични резултати. Резултати нумеричких истраживања показују да са смањењем угла врха утискивача долази до значајног повећања носивости споја.
3. Када се преко стезача уравнотежава део силе резања која делује нормално на осу силе резања настаје одређена попустљивост система односно померање предмета обраде у односу на базе. Том приликом настају грешке израде предмета које могу прекорачити дозвољену толеранцију по одређеној коти. То померање предмета обраде зависи од интензитета, правца и смера силе резања и попустљивости предмета обраде у зонама контакта са стезачем и елементима за базирање.
4. Утврђено је да елемент за стезање са равним челом, који се у пракси доста често примењује, има мању носивост у односу на носивост спојева остварених утискивањем утискивача конусног облика у узорак.
5. Поређењем запремина утиснутих у узорак долази се до закључка да већа утиснута запремина одговара геометријама утискивача које карактерише већа носивост и мања попустљивост споја. Већа запремина обезбеђује мање средње вредности напона притиска на контакту утискивача и предмета што резултира мањом попустљивошћу споја приликом симулације оптерећења нормалног на осу утискивача. Са порастом утиснуте запремине расте носивост споја.
6. С аспекта практичне примене предложена метода стезања може наћи примену код елемената код којих је дозвољено њихово локално деформисање у неким зонама, што је чест случај са одливцима и отковцима различитог облика.
7. Пројектовање стезних елемената који би функционисали на овом принципу се своди на уметање уметака од тврдог материјала у стезни елемент, што је лако изводљиво и не захтева значајна финансијска средства.

7. Литература

- [1]. Tadić, B., Vukelić, Đ., Jurković, Z: *Alati i pribori*, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, 2013.
- [2]. Budak I., Tadić B., Jeremić B., Vukelić Đ., Miljanić D., Todorović P., Hodolić J, *Industrijski prototip uređaja za ispitivanje statičke popustljivosti i nosivosti spoja elemenata za stezanje i radnog predmeta*, Novi Sad, 2012.
- [3]. Miljanić, D. (2015.). *Projektovanje elemenata pribora sa aspekta nosivost i popustljivosti njihovih kontakata sa radnim predmetom*, Doktorska disertacija . Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu.
- [4]. Amaral, N., Rencis, J.J., Rong, Y., 2005. *Development of a finite element analysis tool for fixture design integrity verification and optimisation*. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 21, 409-419.
- [5]. Huang, Y., Wang, L., 2004. *Realizing high accuracy machining by applying optimal clamping forces*. Int. J. Comput. Appl. Technol. 19, 107-118.
- [6]. Cai, W., Hu, S.J., Yuan, J.X., 1996. *Deformable sheet metal fixturing: principles, algorithms and simulations*. J. Manuf. Sci. Eng.-Trans. ASME. 118, 318-324.
- [7]. Lee, J.D., Haynes, L.S., 1987. *Finite element analysis of flexible fixture system*. J. Eng. Ind.-Trans. ASME. 109, 134-139.
- [8]. R.J. Menassa, W.R. DeVries, *Optimization Methods Applied to Selecting Support Positions in Fixture Design*, J. Eng. Ind.-Trans. ASME. 113 (1991) 412-418.
- [9]. Mittal, R.O., Cohen, P.H., Gilmore, B.J.: *Dynamic modeling of the fixture-workpiece system, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 8 (4), pp. 201-217, 1991.
- [10]. King, L. S., Hutter, I., *Theoretical approach for generating optimal fixturing locations for prismatic workparts in automated assembly*, *Journal of Manufacturing Systems*, 12 (5), pp. 409-416, 1993.
- [11]. DeMeter, E. C.: *Min-max load model for optimizing machine fixture performance*, *Journal of Engineering Industry*, 117 (2), pp. 183-186, 1995.
- [12]. Liao, Y.G., Hu, S.J., 2000. *Flexible multibody dynamics based fixture workpiece analysis model for fixturing stability*, Int. J. Mach. Tools Manuf. 40, 343-362.