

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 26/2016

Саша Д. Јовановић

Обрадивост челика са аспекта топографије обрађене површине

глодањем

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **др Богдан Недић-ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Основне студије: **Машинско инжењерство**

Студијско подручје (усмерење): **Производно машинство**

Име и презиме: **Саша Јовановић**

Бројиндекса: **26/2016**

ПРИЈАВА ЗАВРШНОГ РАДА

Тема рада: **Обрадивост челика са аспекта топографије обрађене површине глодањем**

Задатак: У оквиру завршног рада кандидат треба да изврши прикупљање и систематизацију података о обрадивости материјала и начинима дефинисања обрадивости. Потребно је дати основне податке о испитиваним материјалима и условима испитивања обрадивости. За једне услове обраде глодањем ваљкастим глодалом приказати резултате испитивања обрадивости групе челика различитих својстава са аспекта топографије обрађене површине.

Рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања,
2. Дефинисање обрадивости материјала,
3. Карактеристике испитиваних материјала,
4. Експериментална испитивања и анализа резултата,
5. Закључци,
6. Литература.

Ментор:

Крагујевац, 13.05.2019.

Др Богдан Недић, редовни професор

Резиме рада:

У раду су приказане основне дефиниције обрадивости материјала као и дефиниције основних метода испитивања обрадивости. Такође су приказане и врсте утицајних фактора на обрадивост укључујући и критеријуме обрадивости. Затим је дат начин одређивања универзалне обрадивости као и индекса обрадивости. На крају је представљен експеримент који обухвата прорачун индекса обрадивости на основу параметара храпавости, као и анализу добијених резултата.

Кључне речи: обрадивост, индекс обрадивости, утицајни фактори.

Summary of work:

This paper presents basic definitions of material workability as well as definitions of basic workability test methods. Types of influential factors on workability are also presented, including workability criteria. Then a method of determining the universal workability as well as the workability index is given. Finally, an experiment is presented that includes the calculation of the workability index based on roughness parameters, as well as an analysis of the results obtained.

Keywords: workability, workability index, influencing factors.

САДРЖАЈ:

1. УВОД	7
2. ОБРАДИВОСТ МАТЕРИЈАЛА	8
2.1. Дефинисање обрадивости материјала	8
2.2. Методе испитивања обрадивости	9
2.2.1. Компаративна метода испитивања обрадивости	10
2.2.2. Комплексне методе испитивања обрадивости	12
2.3. Утицајни фактори на обрадивост материјала	14
2.4. Одређивање универзалне обрадивости	15
2.5. Критеријуми обрадивости	19
2.5.1. Постојаност алата	19
2.5.2. Квалитет обрађене површине	21
2.5.3. Сила резања	23
2.5.4. Облик одвојене честице (струготине)	24
2.6. Индекс обрадивости	26
2.6.1. Дефинисање обрадивости са енергетског аспекта	27
2.6.2. Дефинисање обрадивости са аспекта трибометријских испитивања	29
2.7. Утицај улазних параметара на обрадивост материјала	31
3. Експериментална испитивања	35
3.1. Услови истраживања	35
3.2. Карактеристике испитиваних материјала	35
3.3. Резултати истраживања	41
3.4. Анализа резултата	50
4. Закључак	51
Литература	52

1. УВОД

Нагли развој индустрије у послењих неколико деценија допринео је развоју нових, квалитетнијих материјала, као и модификацији постојећих материјала. Развој и побољшање ових материјала подстиче развој нових алата, као и развој технологија обраде. Да би се нови материјал спровео у употребу, неопходно је испитати његове механичке особине, као и његове технолошке особине међу којима се налази и обрадивост.

Испитивање материјала са становишта обрадивости има за задатак проналажење оптималних услова обраде, односно ефективније управљање процесом обраде. Праћењем обрадивости материјала тежи се ка максималном искоришћењу информација добијених током испитивања у циљу економичнијег остваривања процеса обраде. Такође, обрадивост зависи од низа утицајних фактора који утичу на испитивање обрадивости. Неки од утицајних фактора приказани су у даљем раду.

Рад има за циљ упознавање са основним дефиницијама обрадивости као и факторима, односно елементима који утичу на обрадивост. Такође, у раду ће бити представљене карактеристике десет материјала (специјалних челика), који ће се користити приликом експерименталног испитивања, након чега ће бити извршена анализа добијених резултата.

У другом поглављу овог рада детаљно је представљена дефиниција обрадивости, као и методе њеног испитивања, утицајни фактори и критеријуми. Такође, детаљно је приказан и појам универзалне обрадивости као и појам индекса обрадивости.

Треће поглавље представља експеримент везан за обрадивост материјала са аспекта храпавости обрађене површине обимним глодањем. Експеримент садржи прорачун индекса обрадивости са аспекта средњег аритметичког одступања профила (R_a), средње максималне висине неравнина (R_{tm}) и средње дужине таласа профила (S_m). У трећем поглављу приказани су и специјални материјали који су предмет експерименталног испитивања, њихове механичке особине, хемијски састав као и област примене. На крају трећег поглавља извршена је анализа вредности добијених у експерименту.

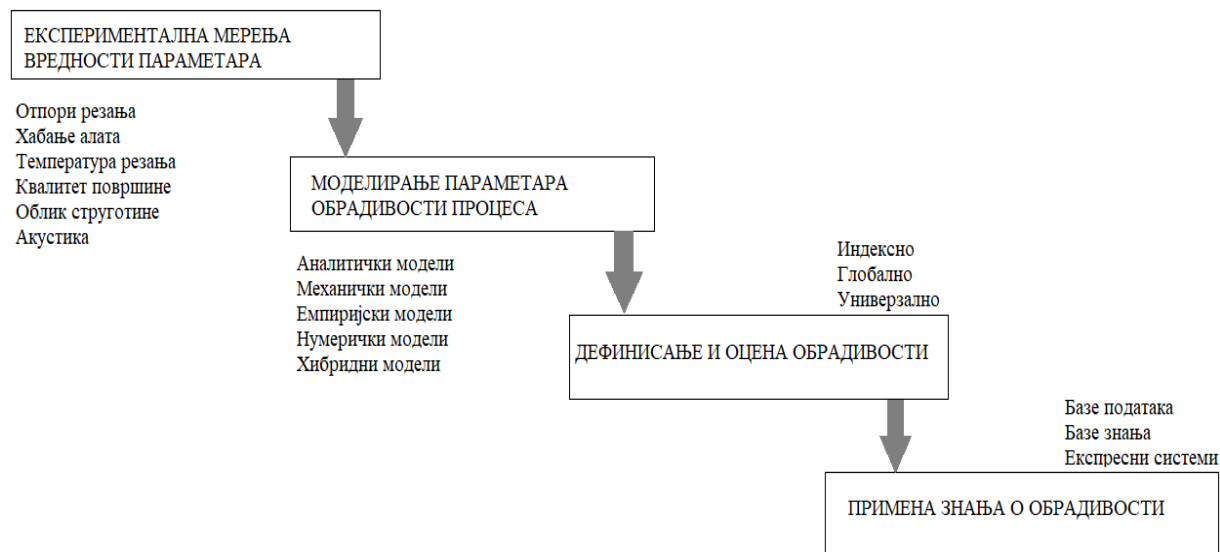
На крају рада су представљени закључци и дат је преглед коришћене литературе.

2. ОБРАДИВОСТ МАТЕРИЈАЛА

2.1. Дефинисање обрадивости материјала

Обрадивост материјала је релативна особина материјала предмета обраде, која се дефинише као лакоћа којом се изводи обрада. Као технолошка особина материјала, представља склоност материјала да се лакше или теже обрађује одговарајућим процесима обраде резањем у уском спектру и условима режима обраде. Обрадивост материјала представља способност неког материјала да се обрађује економичним методама [1].

Према обрадивости, материјали се деле на тешкообрадиве и лакообрадиве. Ова особина представља основу за развој оптимизационих модела, пошто садржи велики број улазно – излазних параметара. Све компоненте обрадног система утичу на физичке процесе који се одвијају у зони резања, посебно на хабање алата и квалитет обрађене површине, па се они обично користе као критеријуми обрадивости материјала [6].



Слика 1. Спровођење процеса обрадивости [1]

Дефиниција обрадивости се заснива на:

- Аспекту (критеријуму)
- Функцији обрадивости
- Рангу функције

Пошто не постоји потпуна сагласност у вези са потпуном дефиницијом обрадивости, могу се навести неке од најчешће коришћених у литератури [3]:

- Обрадивост се може узети као мера потешкоћа које настају при обради резањем одређеног материјала;
- Обрадивост представља лакоћу обрађивања датог материјала обрадком;
- Обрадивост је скуп већег броја особина материјала обрадком које показују са каквим се успехом може обрађивати одређени материјал;
- Обрадивост је карактеристика обрађиваног материјала која показује ефекат производности и квалитета производа;
- Обрадивост је један од основних показатеља технологичности материјала и одликује се низом параметара који одређују производни процес резања и квалитет обрађене површине производа;
- Обрадивост материјала није јединствена унутрашња особина материјала и може се само делимично посматрати са три аспекта:
 - Са аспекта алата - изражава се преко односа количине одвојеног материјала и постојаности алата.
 - Са аспекта машине - изражава се силама резања;
 - Са аспекта квалитета обраде - изражава се преко квалитета обрађене површине.

Појам обрадивости материјала представља сигурно један од недовољно дефинисаних, али и најважнијих појмова у метало-прерађивачкој индустрији. Најбоље обрадив материјал јесте материјал који дозвољава најбрже одношење највеће количине материјала са задовољавајућим квалитетом обрађене површине, са што мањим силама резања и што мањим трошењем алата. Такође, постоји случај у ком материјал има добру постојаност алата, али да сама обрађена површина услед кидана делова није довољно добра [4].

2.2. Методе испитивања обрадивости

Развој савремених експерименталних техника у обради резањем допринео је развоју различитих метода испитивања обрадивости које у одређеној мери утичу на дефинисање и квантитативно изражавање мере обрадивости [6].

Испитивање обрадивости материјала се заснива на применама две групе метода [5]:

- Компаративне (индексне) методе
- Комплексне методе

2.2.1. Компаративне методе испитивања обрадивости

Компаративне методе испитивања обрадивости су засноване на упоређивању обрадивости испитаног и референтног материјала, чији је индекс обрадивости једнак 100. Критеријуми за оцену обрадивости материјала предмета обраде при компаративним испитивањима се формирају на основу: постојаности алата, економичне брзине резања, трошкова обраде, отпора резања, температуре резања, параметара храпавости обрађене површине и сл. [5].

Неки од најпримењенијих компаративних метода испитивања обрадивости су [6]:

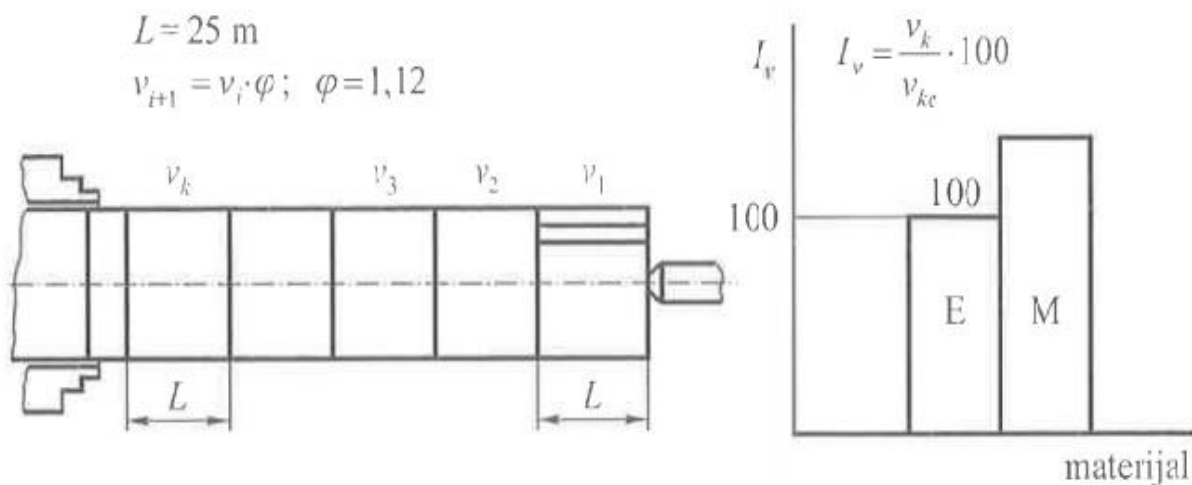
- Метод променљивих брзина резања
- Метод анализе хемијског састава
- Метод анализе микроструктуре

Метод променљивих брзина резања

Испитивање се врши са константном брзином резања v на дужини L , при чему се почетна брзина v_1 постепено повећава након пређеног пута L . Број ступњева промене углавном се налази у опсегу 6-8, са циљем успостављања фине градације испитиваних материјала. Ступњеви се изводе по геометријској прогресији са фактором ступњевања $\varphi = 1,12$ па је:

$$V_{i+1} = \varphi \cdot V_i$$

Експеримент се изводи до тренутка одређивања брзине резања v_k при којој долази до потпуног затупљења алата (слика 2.)



Слика 2. Метод променљивих брзина резања [6]

Методe анализе хемијског састава

Приликом примене ових метода, обрадивост се најчешће дефинише преко брзине резања v_t која одговара усвојеној постојаности алата Т. Из теорије обраде материјала је познато да на обрадивост материјала утиче и хемијски састав материјала предмета обраде. Такође је познат и утицај легирајућих елемената као што су: угљеник, силицијум, манган, фосфор, сумпор и др. Материјали који у себи садрже 0,1-0,2% угљеника имају висок индекс обрадивости и обезбеђују већу постојаност алата. Повећан садржај мангана доводи до смањења обрадивости, јер доприноси повећању тврдоће и чврстоће, док истовремено доприноси и смањењу пластичности материјала. Фосфор смањује пластичност материјала, што доводи до његове лоше обрадивости. Сумпор, посебно у условима када је мали садржај мангана, ствара сулфид гвожђа (FeS) и доводи до повећања индекса обрадивости јер се љуске сулфида издвајају на границама зрна. Ниски садржај олова (0,2%) доводи до погоршања обрадивости. Поред тога, ствара услове за формирање добре крупнокисане струготине јер ремети непрекидност зрнасте структуре материјала. Обрадивост се смањује са повећаним присуством силицијума јер се стварају силикатна, абразивна зрна у материјалу. До смањења индекса обрадивости доводи и присуство молибдена, ванадијума и хрома, јер они узрокују повећање чврстоће и жилавости материјала. Уважавајући ове чињенице, могуће је успоставити функционалну зависност брзине резања и хемијског састава материјала предмета обраде [6].

Методe анализе микроструктуре

Међу карактеристикама микроструктуре посебан значај имају [6]:

- врста припремне термичке обраде (отпуштање, жарење, побољшање);
- структура материјала (ситнозрнаста, крупнозрнаста и сл.);
- тип структуре (феритна, перлитна и сл.);
- димензија карбида и сулфида;
- садржај растворених оксида;
- форма сулфида и оксида;
- садржај додатака (мангана, фосфора, азота);

Ако се ове карактеристике обележе са x_i ($i = 1, k$) где је k број утицајних фактора микроструктуре, онда се овај метод анализе своди на успостављање математичког модела обрадивости облика:

$$V_T = V_T(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

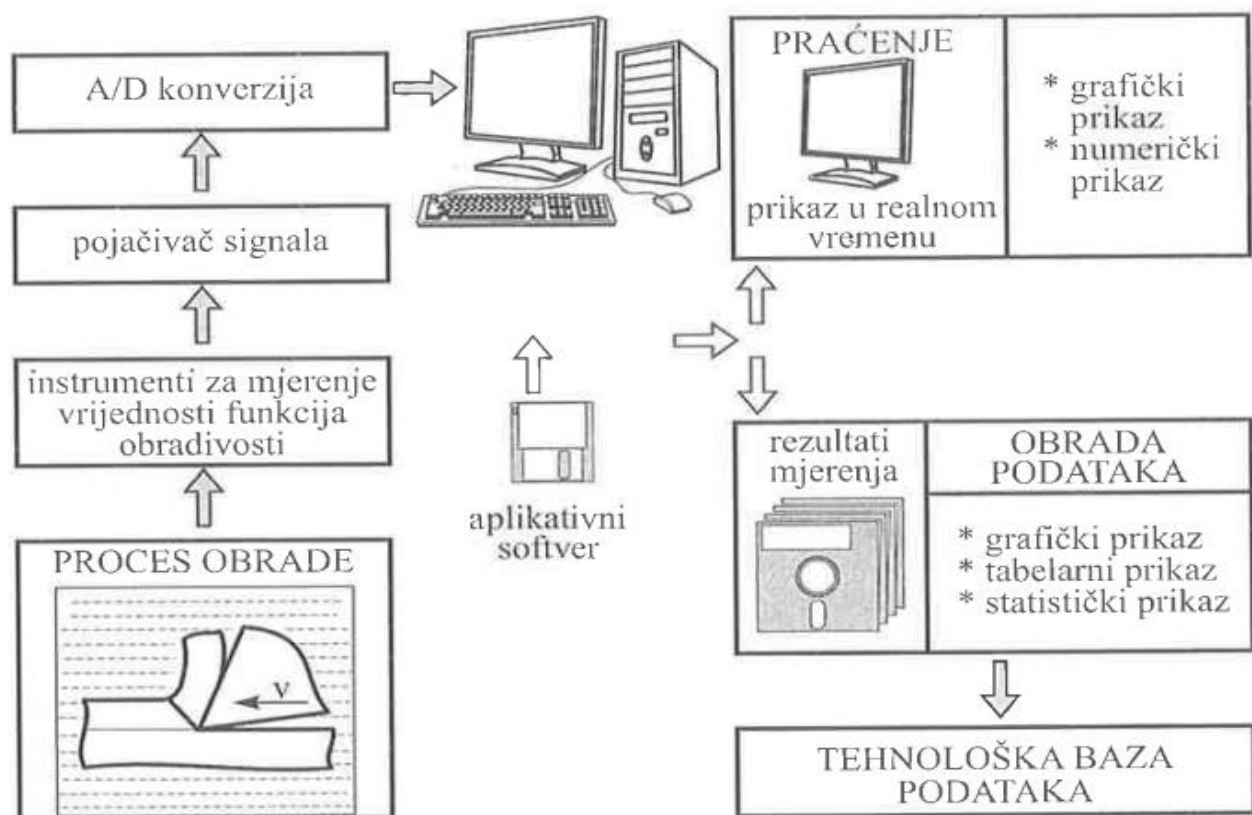
Где је за дате вредности карактеристика x_i може прогноzirати обрадивост испитиваног материјала изражена преко брзине резања V_T за усвојену или оптималну вредност постојаности алата.

Овакав модел испитивања обрадивости материјала има још једну предност која се огледа у томе да се овај модел може користити и у анализи технологије добијања испитиваног

материјала (челика), јер омогућава модификовање процеса добијања челика са циљем постизања уједначених и оптималних нивоа његове обрадивости [6].

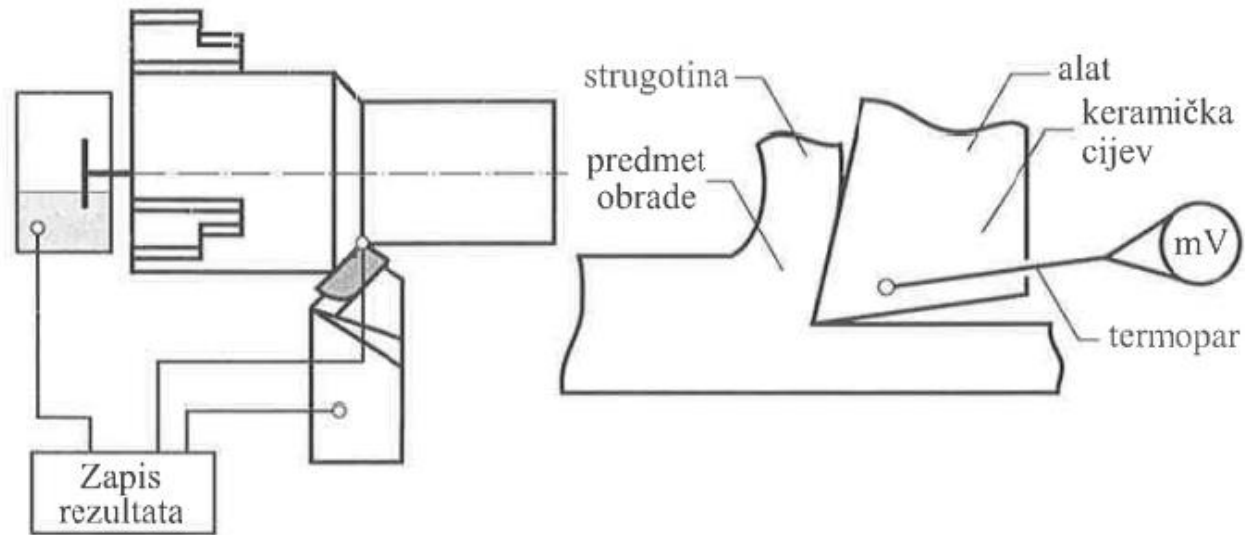
2.2.2. Комплексне методе испитивања обрадивости

Комплексне методе су методе систематског испитивања обрадивости и формирања технолошких база података. Комплексне методе представљају методе утврђивања скупова функција обрадивости, која обезбеђују комплексна знања о механици, термодинамици, трибологији и економици резања, као и квалитету обраде. Одликују их комплексна, скупа и дуготрајна испитивања, уз велики утрошак расположивих ресурса. Зато се и користе за систематска и системска испитивања усмерена формирању технолошких база података неопходних за развој рачунарски подржаних система пројектовања технологија [5].



Слика 3. Шема комплексних испитивања обрадивости [6]

Комплексне методе испитивања обрадивости се састоје из великог броја експерименталних метода (температурни метод, метод попречне обраде, метод обраде конуса, метод микроиспитивања, радиоактивни метод и др.). На слици 4. је приказан температурни метод.

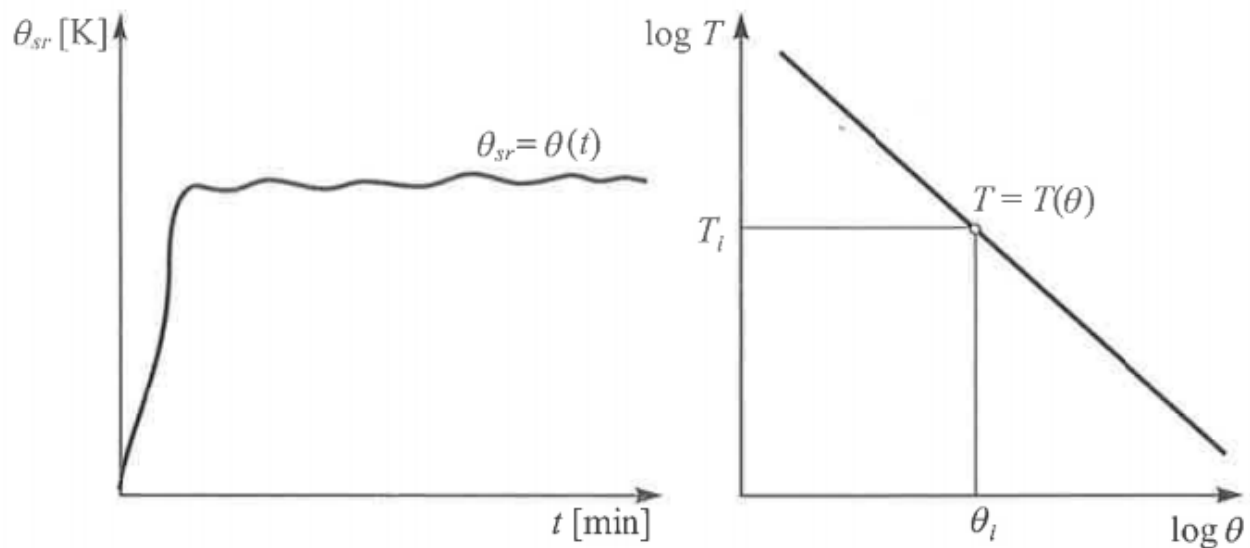


Слика 4. Поступак испитивања обрадивости температурним методом [6]

Температурна метода заснива се на Рајхел-овим принципима:

- Средња температура резања након наглог пораста температуре на почетку резања, стабилизује се на одређеном нивоу и остаје константна све до затупљења алата.
- При свим режимима резања, при којима се добија иста постојаност алата, за исти радни предмет и алат, средња температура резања је константна у свим процесима.

Метод се састоји из експерименталног дела који обухвата мерење параметара хабања и средње температуре резања (слика 5.) и утврђивања функције обрадивости, парцијалних и проширених Тејлор-ових израза [6].



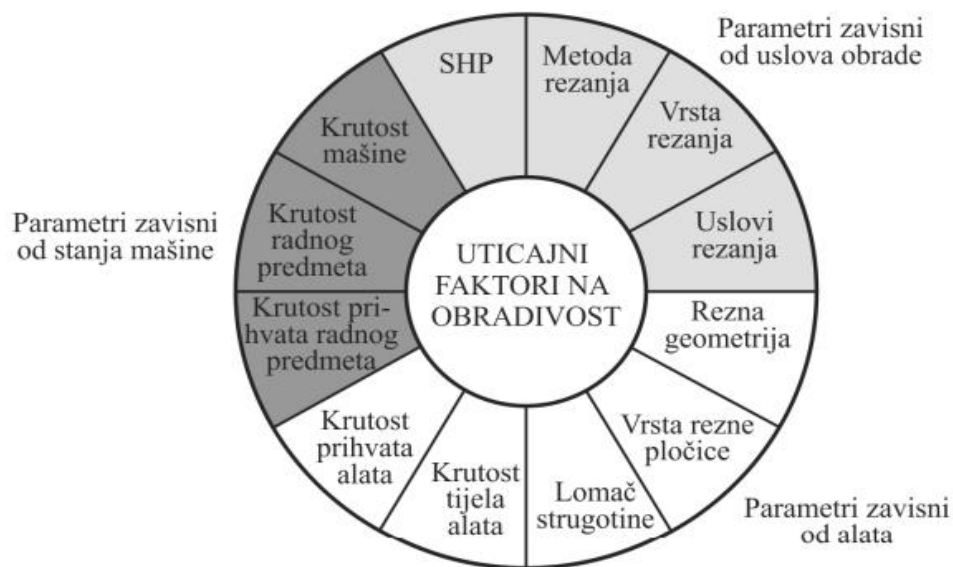
Слика 5. Зависност средње температуре резања од времена резања и постојаности алата T од температуре резања [6]

2.3. Утицајни фактори на обрадивост материјала

Утицај обрадног система на обрадивост се посматра преко директних и индиректних фактора и описује се путем модела који се заснивају на комбинацији датих фактора.

Обрадивост материјала зависи од низа утицајних фактора, као што су [2]:

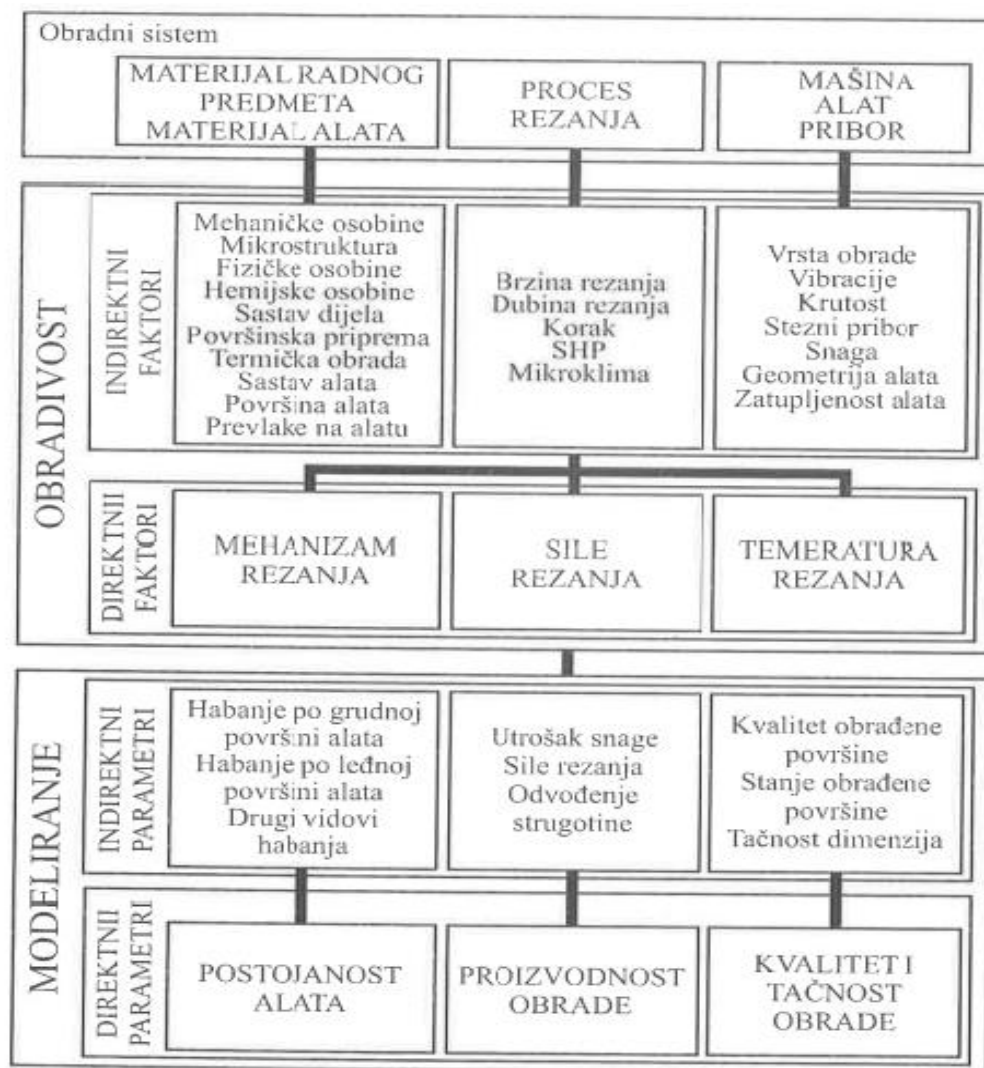
- Механичка, структурна и термичка својстава материјала
- Материјал и геометрија алата
- Својства хлађења и подмазивања
- Динамичке карактеристике система
- Услови обраде итд.



Слика 6. Утицајни фактори који утичу на обрадивост материјала [1]

Циљ испитивања обрадивости јесте проналажење оптималних геометријских и технолошких услова обраде и ефикасно управљање процесом обраде. Анализа процеса обрадивости материја представља изузетно компликован процес због великог броја утицајних фактора који су међусобно повезани. Утицајни фактори обрадивости својим променама у великој мери утичу на лакоћу обраде, пре свега на: материјал предмета обраде, систем и врсту обраде, хлађење и подмазивање, стање сечења итд. Обрадивост се дефинишена основу различитих параметара, као што су: радни век алата, триболошке карактеристике процеса, силе сечења, квалитет површине и температура сечења. Још један од параметара који има велики утицај на обрадивост материјала јесте продуктивност обраде. Она се изражава према количини уклоњеног материјала у јединици времена [2].

На слици 6. је приказана веза између утицајних фактора на обрадивост и параметара за моделирање обрадивости.



Слика 7. Директни и индиректни фактори који се разматрају при моделирању обрадивости [6]

2.4. Одређивање универзалне обрадивости

Анализом претходног приступа може се закључити да неки материјали имају добру обрадивост према једном критеријуму, али изузетно лошу обрадивост према другим критеријумима. Универзална обрадивост представља процес који се заснива на разматрању свих критеријума истовремено. Вектор обрадивости представља правоугли координатни систем који се формира векторским збиром свих вектора критеријума. На основу координатног система извршено је подешавање параметара који описују дате критеријуме (вредност силе сечења, сила трења, ширина трага хабања алата, температура...). Досадашњи приступ у дефинисању обрадивости при резању заснивао се на

дефинисању силе резања, хабању алата и квалитета обрађене површине. Први критеријум је повезан са машином на којој се врши обрада, други критеријум је везан за алат којим се врши обрада, док је трећи критеријум повезан са излазом обрадног система, односно обрађеним делом. Вредност силе резања, хабање алата, као и квалитет обрађене површине добијају се помоћу експеримента или прорачуном, на основу примене одговарајућих аналитичких модела, препоручених алата и услова обраде. На основу добијених скаларних вредности и одговарајућих јединичних вектора формирају се вектори критеријума који су везани за одговарајућу координатну осу [2].

$$\vec{K}_i^{KO} = \vec{k}_i^{ko} \cdot K_i$$

Где је:

$\vec{K}_i^{KO}$ - вектор i критеријума;

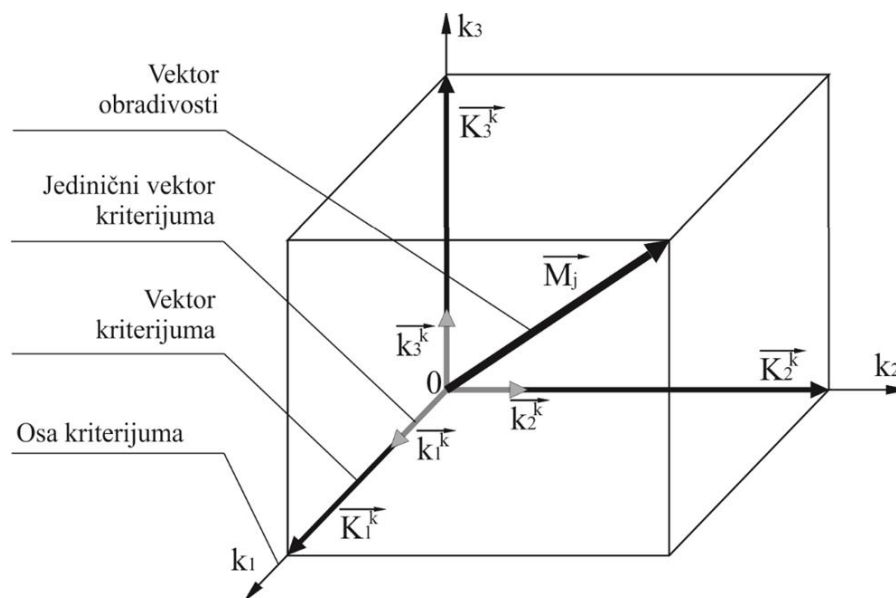
KO - симбол критеријума;

K_i – скаларна вредност параметра i критеријума;

$\vec{k}_i^{ko}$ - јединични вектор i критеријума;

Вектор обрадивости представља векторски збир вектора критеријума (слика 8.) и дат је релацијом [2]:

$$\vec{M}_j = \sum_{i=1}^n \vec{K}_i^{KO}$$



Слика 8. Вектор обрадивости у правоуглом координатном систему [2]

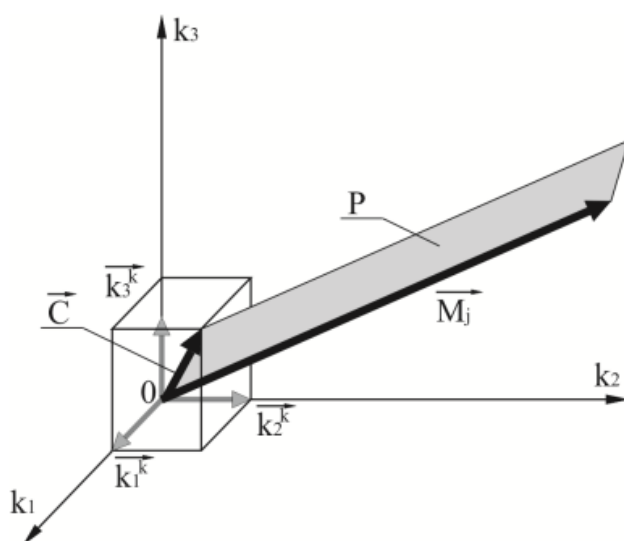
Анализом вектора положаја обрадивости могу се извести закључци о испитиваним материјалима и понашању појединих критеријума.

Неки од тих критеријума су:

- Хабање алата током обраде
- Квалитет обрађене површине
- Енергија потребна за реализацију обраде са препорученим стањем сечења

У зависности од критеријума доћи ће до промене обрадивости и положаја вектора обрадивости. Циљ дефинисања вектора обрадивости, који такође обухватају три најважнија критеријума обрадивости, јесте дефинисање универзалне обрадивости испитиваног материјала, тј. дефинисање параметара обраде материјала. На основу закључака ове анализе може се развити модел који ће извршити рангирање материјала према универзалној обрадивости [2].

Да би дошло до модела оцене универзалне обрадивости потребно је формирати јединични вектор критеријума обрадивости - вектор који показује најповољнији (уједначен) правац и има минималну дужину. Што су вредности параметара уједначеније, односно имају једнак утицај на обрадивост, то ће се и вектор обрадивости приближити правцу контролног вектора и тежити његовом интензитету (слика 9.). Може се закључити да материјал чији вектор обрадивости има мањи интензитет и који затвара мањи угао са контролним вектором има и бољу обрадивост. Величина која најбоље показује колико је вектор обрадивости уједначен са правцем контролног вектора и колики је његов интензитет је величина површине паралелограма коју стварају вектор обрадивости и контролни вектор.



$$\vec{C} = \sum_{i=1}^3 \vec{k}_i^k$$

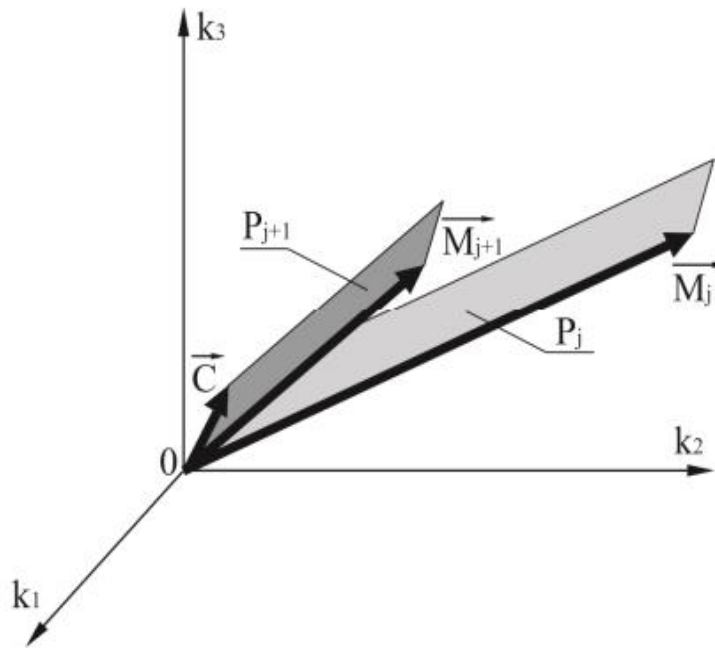
Слика 9. Јединични вектор критеријума обрадивости [1]

Приказана површина паралелограма може се директно повезати са обрадивости материјала. Што је мањи интензитет вектора обрадивости посматраног материјала и што је мањи угао који он затвара са контролним вектором, толико је боља и његова обрадивост у

односу на друге материјале са дефинисаним вектором обрадивости. Материјал са мањом датом површином има бољу обрадивост у односу на материјал код ког се формира паралелограм са већом површином [1].

Анализа обрадивости може се спровести и за више материјала, што није случај код индексне методе испитивања обрадивости (слика 10.). Коначно, површина паралелограма за сваку улазну комбинацију износи:

$$P_j = \sqrt{K_1^2 + K_2^2 + K_3^2} \cdot \sqrt{1 - \frac{(K_1 + K_2 + K_3)^2}{(k_1^2 + k_2^2 + k_3^2) \cdot (K_1^2 + K_2^2 + K_3^2)}}$$



Слика 10. Анализа обрадивости за више материјала [1]

Универзална обрадивост је обрнуто пропорционална површини паралелограма формираног над вектором моћи и контролним вектором. Формула за универзалну обрадивост, у том случају, би се могла написати у облику [1]:

$$M_{univ} = \frac{1}{\sqrt{K_1^2 + K_2^2 + K_3^2} \cdot \sqrt{1 - \frac{(K_1 + K_2 + K_3)^2}{(k_1^2 + k_2^2 + k_3^2) \cdot (K_1^2 + K_2^2 + K_3^2)}}}$$

2.5. Критеријуми обрадивости

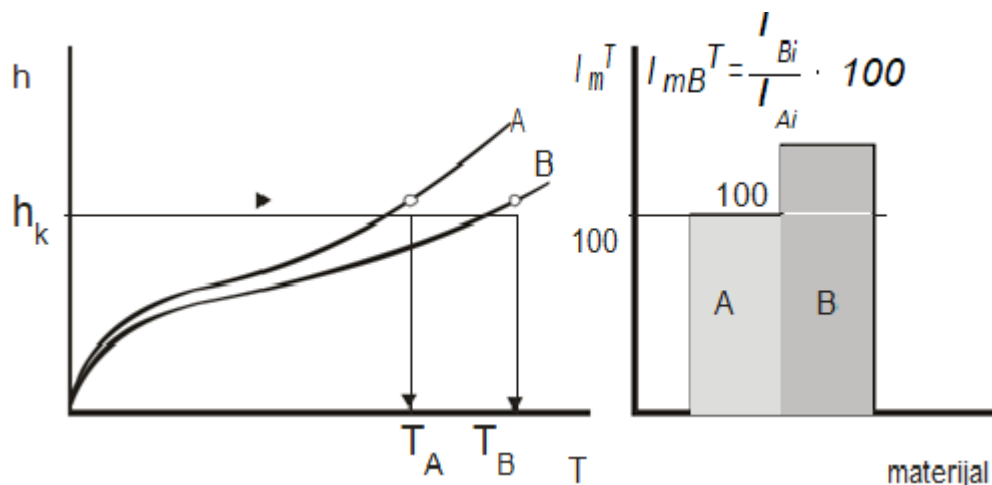
Обрадивост различитих материјала оцењује се на основу четири критеријума:

- Постојаност алата;
- Сила резања;
- Квалитет обрађене површине;
- Облик одвојене честице (струготине);

Треба напоменути да наведени критеријуми немају једнак значај у различитим производним условима и технолочким токовима процеса обраде неког материјала. То значи да је потребно рангирати утицајне факторе за сваки појединачни случај [3].

2.5.1. Постојаност алата

Постојаност алата је један од основних показатеља за дефинисање индекса обрадивости материјала. На основу формираних криви хабања за различите материјале (слика 11.) и утврђених критеријума затупљења алата идентификују се вредности постојаности алата (T_E и T_A) при обради различитих материјала [5].



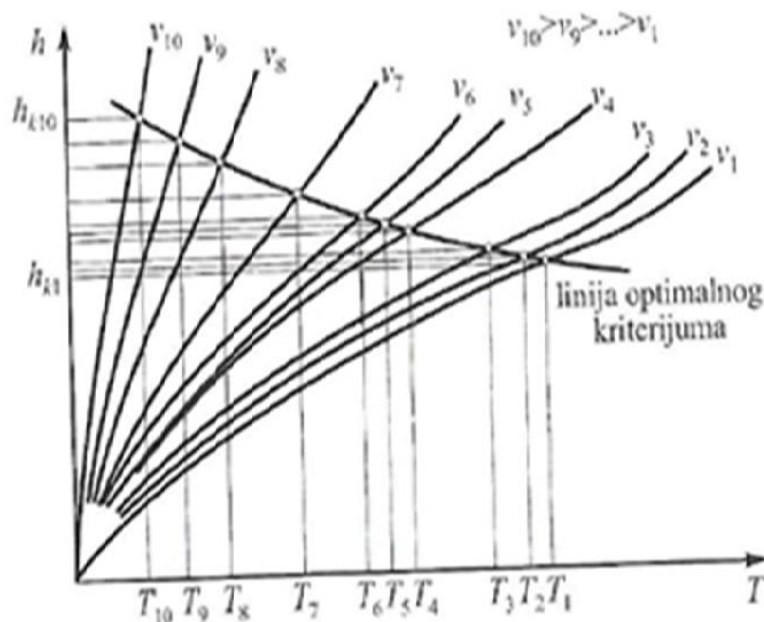
Слика 11. Криве хабања и индекс обрадивости материјала [5]

Ако је индекс обрадивости материјала А (еталон материјала) означен са 100 тада је индекс обрадивости материјала В:

$$I_{mB}^T = \frac{T_B}{T_A} \cdot 100$$

Постојаност алата је време непрекидног резања између два оштрења или две замене алата [5].

Према стандарду ISO 3658 постојаност алата се најчешће дефинише као време у којем наступају оштећења резног клина, односно када је величина средње ширине трага хабања на задњој површини резног клина 0,3mm и када је дубина кратера на предњој површини клина 0,01mm. Резни алат је затупљен када ширина појаса достигне вредност оптималног хабања. За алате који се оштре, оптимално хабање је хабање код кога је производ броја оштрења алата и просечне похабаности максимална. Вредност параметара хабања h се мења у одговарајућој превојној тачки криве хабања за сваку брзину резања, па ће се вредност оптималног критеријума хабања мењати по линији оптималног критеријума, као што је приказано на слици 12. Примена критеријума оптималног хабања је оправдана када се у лабораторијским условима утврђује функција постојаности алата за фину обраду. Ако криве хабања немају превојну тачку, примена овог критеријума није могућа. Ако се при дефинисању критеријума похабаности алата мора водити рачуна о строжијим технолошким захтевима онда се критеријум хабања назива технолошки критеријум и његова вредност је нижа што су технолошки захтеви строжији [3].



Слика 12. Оптималне вредности критеријума затупљења алата [3]

Постојаност алате изражава се у временским јединицама, мада се могу користити и величине као што су: пређени пут алата, број обрађених комада, запремина скинуте струготине, површина обрађена у току процеса резања и сл. Постојаност алата зависи од великог броја параметара: режима резања, геометрије алата, материјала предмета обраде и алата, врсте алата, врсте и начина довођења СХП (средства за хлађење и подмазивање), врсте производне операције, поступка обраде, врсте резања (прекидно, непрекидно), динамичких појава у процесу и сл. При оптималној геометрији алата и константним

условима обраде основни параметри утицајни на постојаност алата су корак, брзина и дубина резања [5].

Економична постојаност алата представља време непрекидног резања између два оштрења алата или две замене алата, при чему су трошкови обраде минимални или је специфична производност обраде максимална. На основу дефиниције економичне постојаности алата произилазе и методе прорачуна. То значи да се економична постојаност може прорачунати на бази: трошкова обраде, производности обраде, времена израде и сл.

Економични и меродавни режими обраде су дефинисани параметрима: главног и помоћног кретања.

Економични режим обраде је режим обраде одређен на бази трошкова обраде, односно економичне постојаности алата. За изабрани режим обраде бира се и машина. Меродавни режим обраде се пројектује за познату машину релативно мале снаге [5].

2.5.2. Квалитет обрађене површине

Квалитет обраде је комплексан показатељ и функција је квалитета: конструкције дела, израде и обраде, обрадног система, обрадног процеса, припремка и сл.

Квалитет израде и обраде је један од услова постизања високог нивоа квалитета производа и обухвата: тачност обраде и квалитет обрађене површине. Ова два показатеља су у међусобној зависности, различито за сваки обрадни систем и функције су великог броја утицајних фактора [5].

Квалитет обрађене површине одређује се низом геометријских, физичко-механичких и хемијских показатеља који се могу упоређивати код одређивања обрадивости неког материјала [3].

Излазна површина из трибомеханичког система у обради метала резањем је увек обрађена површина, површина иза резног алата [5].

Квалитет обрађене површине зависи од [3]:

- Параметра обраде;
- Геометрије алата;
- Материјала обрадка и материјала алата;
- Крутости састава машина-алат-обрадак;

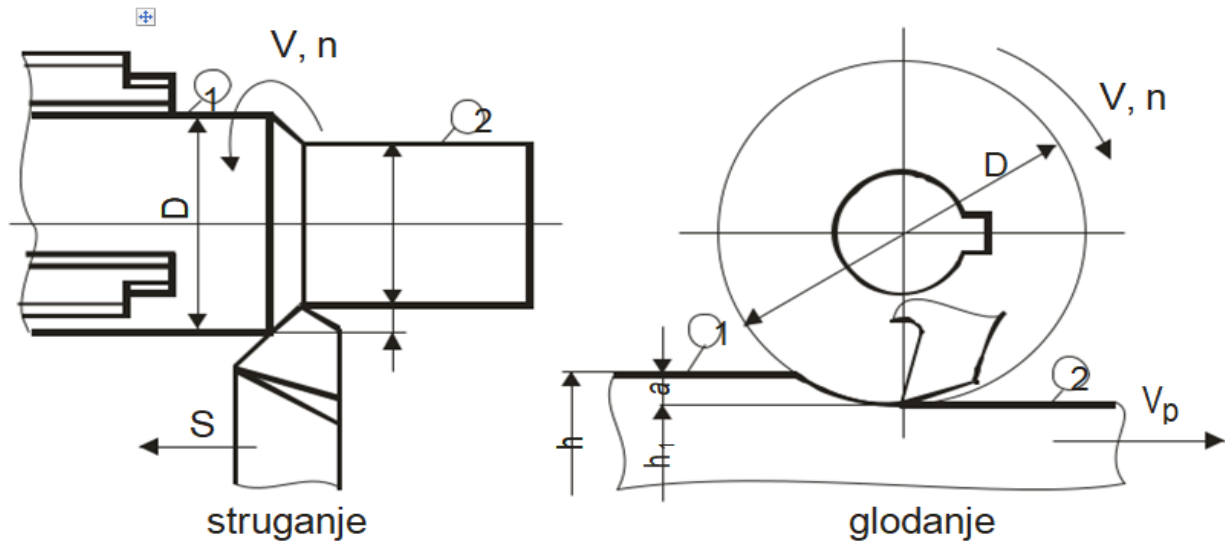
Параметри обраде се састоје из: дубине резања, корака и брзине резања.

Дубина резања a , mm је вредност дебљине слоја материјала који се уклања у процесу резања, одређена растојањем обрађиване (1) и обрађене површине (2) [5].

Корак (посмак) s , mm/o представља померање алата и предмета обраде у правцу помоћног кретања за један обрт алата или предмета обраде. Нпр. за један зуб алата S_1 , mm/z код глодања [5].

Највећим делом зависи од захтева квалитета обрађиване површине, односно од фазе обраде. Код грубе обраде на уму треба имати снагу машине, трошење алата, облик одвојене честице као и полупречника врха алата. Док код фине обраде једини елемент који утиче на корак јесте теоријска храпавост обрађиване површине [3].

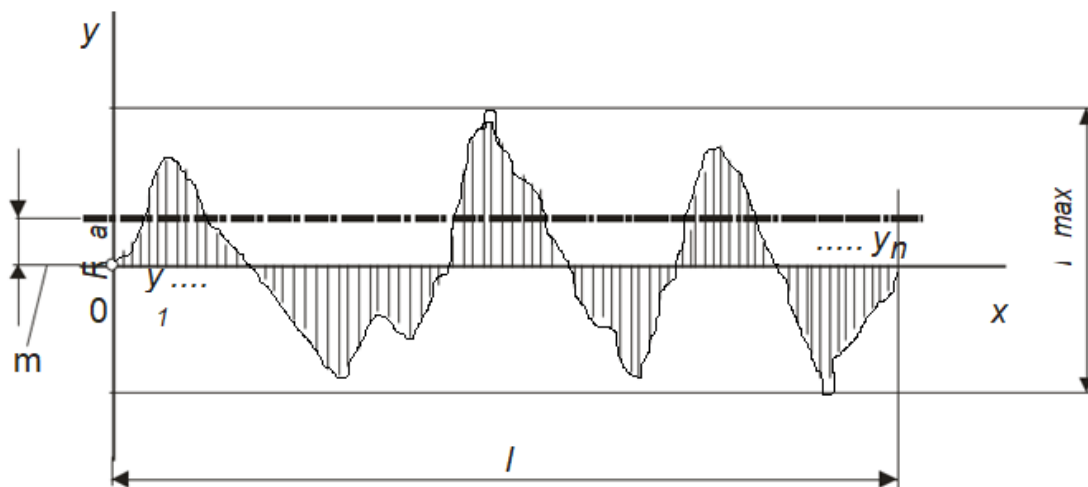
Брзина резања v , mm/min v , m/s (брушење) је пређени пут главне резне ивице алата у јединици времена [5].



Слика 13. Технолошки параметри обраде у обради стругањем и глодањем [5]

Три основна параметра храпавости су:

- R_a - средње аритметичко одступање профила од средње линије профила
- R_z - средња висина неравнина
- R_{max} - максимална висина неравнина

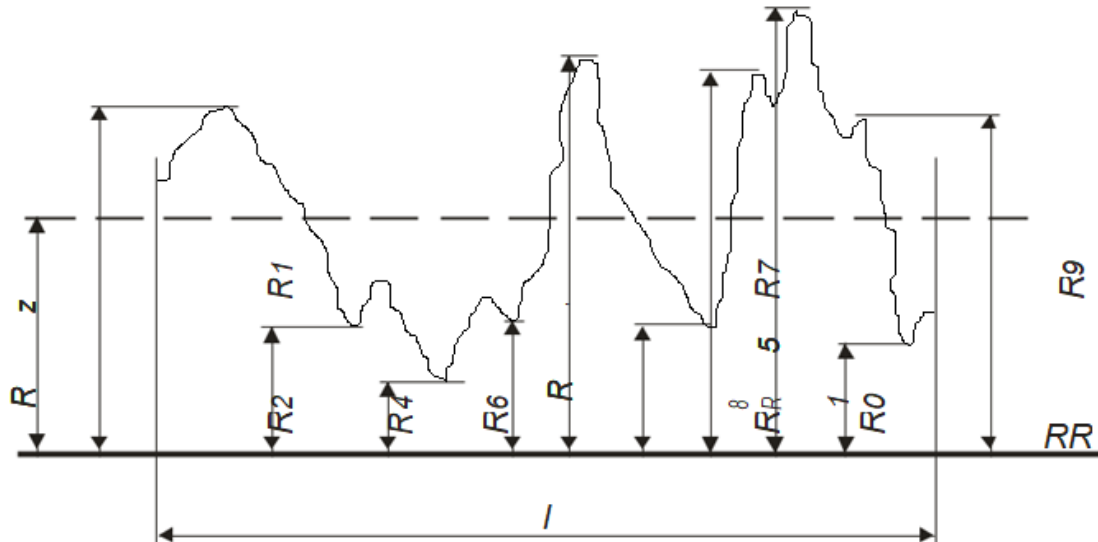


Слика 14. Параметри храпавости површина [5]

Средње аритметичко одступање од средње линије профила - R_a (слика 14.) је средња аритметичка вредност одступања свих тачака ефективног слоја ($y_1, y_2, \dots, y_n$) од средње линије профила у границама референтне дужине [5].

Максимална висина неравнина – R_{max} (слика 14.) је растојање две паралелне праве са средњом линијом профила, повучене тако да, у границама референтне дужине профила додирују највишу и најнижу тачку профила.

Средња висина неравнина- R_z (слика 15.) је разлика средњих аритметичких вредности пет највиших и пет најнижих тачака профила у границама референтне дужине [5].



Слика 15. Средња висина неравнина [5]

2.5.3. Сила резања

Постоје два разлога због којих се као критеријум обрадивости користи и сила резања. Први разлог произилази из дефиниције обрадивости која гласи да је обрадивости лакоћа обраде неког материјала што имплицира да материјал кроз који алат лакше продире има бољу обрадивост. Други разлог је повезан са ценом обраде неког материјала. Пошто су силе резања директно повезане са снагом, а самим тим и са потрошњом енергије, боље обрадивим материјалом сматра се онај за чију обраду се потроши мања количина енергије [3].

У општем случају, резултујући отпор резања у обради глодањем се може, у координатном систему глодала, разложити на три компоненте:

- F_o - Главну или обимну - тангенцијалну силу, која делује у правцу брзине резања тангенцијално на глодало;
- F_r - Радијалну или силу продирања, која делује у радијалном правцу;
- F_a - Аксијалну силу, која делује у правцу осе глодала

Обимна компонента се користи за дефинисање снаге машине и деформација предмета обраде, алата и елемената машине. Радијална компонента има важну улогу при прорачуну елемената машине и алата, као и идентификовању вибрација у процесу резања. Обимна сила једног зуба F_{01} [5]:

$$F_{01} = K_{sm} \cdot A = K_{sm} \cdot b \cdot h, N$$

A, mm^2 – површина попречног пресека струготине

K_{sm}, MPa – средњи специфични отпор резања

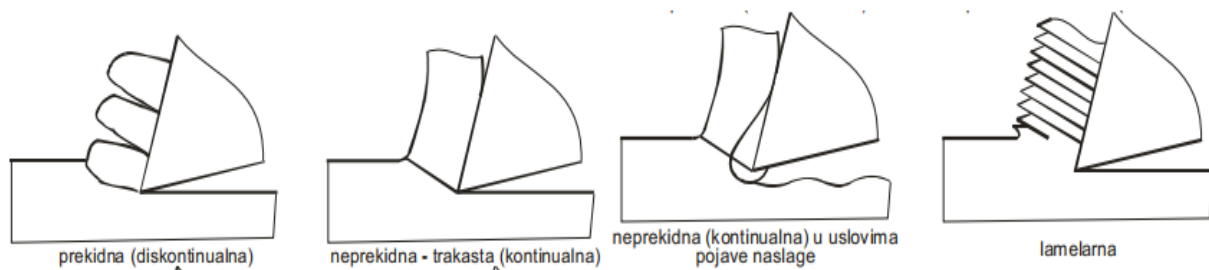
Како се дебљина струготине повећава од нуле до своје максималне вредности код супротносмерног глодања тако главни отпор резања расте од нуле до максималне вредности, односно смањује се од максималне вредности до нуле код истосмерног глодања, тако и главни отпор резања опада од максималне вредности до нуле. За праксу проучавање и израчунавање обимне силе једног зуба нема великог значаја. Зато се утврђује обимна сила настала као резултат резања зуба глодала који су истовремено у захвату. Та сила се назива обимна сила [5].

2.5.4. Облик одвојене честице (струготине)

Обрадивост материјала може се дефинисати и према томе како се одводи одвојена честица приликом обраде тј. према томе да ли се приликом обраде ствара непрекидано одвојена честица или долази до стварања континуиране одвојене честице која се тешко одводи из зоне резања. Код употребе облика одвојене честице као критеријума обрадивости највећи индекс обрадивости добиће онај материјал код ког, приликом обраде, настаје непрекидана одвојена честица [3].

У зависности од механизма и карактера образовања струготине формира се струготина различитог облика и типа. Облик и тип струготине зависи од врсте и физичко-механичких особина материјала предмета обраде (пре свега пластичности) и услова пластичног деформисања резног слоја: карактера напрезања (прекидно или непрекидно резање), времена, степена и брзине деформисања. Шароликост услова обраде, по спектру обрађиваних материјала и њихових особина, методама обраде итд., доводи до појаве великог броја облика и типова струготине, које се могу поделити у четири групе (слика 16.):

- Прекидна (дисконтинуална);
- Непрекидна или континуална (тракаста);
- Непрекидна у условима појаве наслагe;
- Ламеларна



Слика 16. Основне врсте струготине [5]

Прекидна или дисконтинуална струготина настаје при обради жилавих материјала малим брзинама резања и великим корацима. Процес формирања прекидне струготине прате ломови материјала нестационарне природе између којих тече процес пластичног деформисања дела материјала који се претвара у струготину.

Непрекидна или континуална струготина је најчешће жељени облик струготине при обради већине материјала. Њено формирање је последица пластичног деформисања у зони смицања, одвајање материјала се врши континуално у виду трака одређене дебљине. При томе је квалитет обрађене површине веома добар. При обради на аутоматима овај облик струготине није пожељан.

Непрекидна струготина у условима појаве насlage јавља се у условима резања погодним за стварање насlage на резним елементима алата.

Дебљина струготине зависи од угла смицања. При малим вредностима угла смицања вишак материјала се претвара у струготину веће дебљине и обрнуто. [5]

Треба истаћи да наведени критеријуми немају подједнак утицај у различитим производним условима и технолошким токовима процеса обраде неког материјала. На основу тога, неоподно је извршити рангирање критеријума по важности. Рангирање се врши на следећи начин [3]:

- Груба обрада: постојаност алата, сила резања, облик одвојене честице, квалитет обрађене површине;
- Фина обрада: квалитет обрађене површине, постојаност алата, облик одвојене честице, сила резања;
- Обрада на аутоматима: облик одвојене честице, квалитет обрађене површине, постојаност алата, сила резања;

Код грубе оградe извршен је овакав начин рангирања због тога што се као основни критеријум оптимизације узима максимална производност процеса уз минималан утрошак

снаге. Код fine обраде критеријум оптимизације је економичност процеса, дефинисана економичном постојаношћу алата, уз високе захтеве квалитета обрађене површине [3].

2.6. Индекс обрадивости

Један од најчешћих начина исказивања обрадивости јесте индекс обрадивости. Индекс обрадивости је релативна мера обрадивости у односу на унапред усвојени одговарајући материјал - еталон материјал. За еталон се усваја онај материјал који се највише користи у пракси. Индекс обрадивости је мера обрадивости материјала исказана према следећим критеријумима [6]:

- Отпор резања- енергетски аспект;
- Постојаност алата;
- Температура резања;
- Параметри храпавости обрађене површине;
- Економична брзина резања;
- Трошкови обраде;

Такође, могу се користити и друге величине које у мањој или већој мери исказују обрадивост материјала.

Индекс обрадивости испитаног материјала може се представити изразом:

$$I_i = (p_i / p_r)^{+1} \cdot 100 \%,$$

Где је:

I_i – индекс обрадивости испитаног материјала;

p_i – величина параметра усвојеног за оцену обрадивости испитаног материјала;

p_r – величина параметра усвојеног за оцену обрадивости референтног материјала;

Експонент односа (p_i / p_r) има вредност +1 ако пораст изабраног параметра има позитиван ефекат на лакоћу одбијања процеса обраде. У обрнутом случају експонент има вредност -1. Углавном се поређење преко индекса обрадивости представља помоћу хистограма (слика 17.), код којих сваки стубац представља по један испитивани материјал. Материјалу који је усвојен као еталон материјал додељује се индекс обрадивости 100. Информације добијене дефинисањем обрадивости путем индекса обрадивости имају практичан значај у праћењу квалитета датог материјала пре и у току његове експлоатације. На основу добијене вредности индекса обрадивости могу се утврдити оптимални режими за посматрани материјал. Ако познајемо оптималне режимо рада еталон материјала, нпр. економичну брзину резања, онда се оптимални режими (економична брзина) за посматрани материјал добија из односа:

$$I_i / I_r = V_i / V_r$$

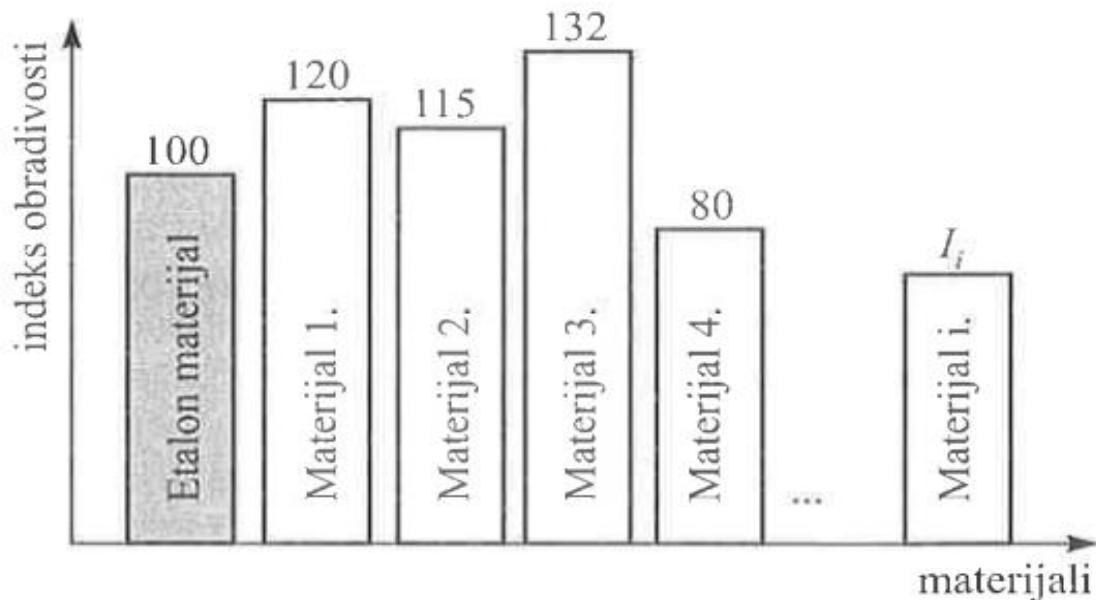
Где је:

I_i - Индекс обрадивости испитиваног материјала;

I_r - Индекс обрадивости референтног материјала;

V_i - Економична брзина резања испитиваног материјала;

V_r - Економична брзина резања референтног материјала;



Слика 17. Хистограмски приказ индекса обрадивости [6]

Универзалније дефинисање обрадивости може се исказати помоћу израза:

$$I_{uni} = \sum_{i=1}^n I_i^{\alpha_i} = I_1^{\alpha_1} + I_2^{\alpha_2} + \dots + I_n^{\alpha_n}$$

Где је:

I_{uni} – универзални индекс обрадивости;

I_i – индекс обрадивости по i -том критеријуму;

α_i – коефицијент утицаја i – тог критеријума;

2.6.1. Дефинисање обрадивости са енергетског аспекта

Посматрање материјала са аспекта енергије потребне за његову обраду, представља један од најмеродавнијих показатеља обрадивости. Основни проблем при дефинисању индекса

обрадивости јесте избор режима и услова обраде на коме ће се вршити посматрање материјала. Један од начина решавања овог проблема представља развој модела који је заснован на регресионим једначинама које дефинишу везу отпора резања и параметара обраде уз коришћење одговарајућих енергетских једначина. Обрадивост материјала дефинисана на овај начин заснована је на средњој вредности отпора резања добијених из регресионих једначина и представља добро приближавање интегралном показатељу обрадивости са енергетског аспекта. Снага потребна за обављање неке производне операције може се представити изразом [6]:

$$P = P_g + P_{f1} + P_{f2} + P_{f3}$$

Где је:

P_g - Снага потребна за савлађивање губитака;

P_{fi} - Снага потребна за савлађивање компонентних отпора F_1, F_2, F_3 ;

Ако се снаге P_{fi} ($i = 1, 2, 3$) изразе као производи одговарајућих отпора и брзина онда се укупна снага потребна за обављање процеса резања може одредити из једнакости:

$$P = P_g + F_1 \cdot v + F_2 \cdot v_{pr} + F_3 \cdot v_p$$

Где је:

v — Брзина резања;

v_{pr} — Брзина продирања;

v_p — Брзина помоћног кретања;

Ако се узме у обзир ред величине датих брзина, у реалним условима обраде стругањем, израз за потребну снагу резања се може знатно упростити:

$$P = P_g + F_1 \cdot v$$

Индекс обрадивости се може дефинисати као однос снага потребних за резање k -тог и r -тог материјала према изразу:

$$I^{(k)} = \frac{p^{(r)}}{p^{(k)}} = \frac{P_g^{(r)} + F_1^{(r)} \cdot v}{P_g^{(k)} + F_1^{(k)} \cdot v} = \frac{F_1^{(r)}}{F_1^{(k)}} + \frac{P_g^{(r)} \cdot F_1^{(k)} - P_g^{(r)} \cdot F_1^{(r)}}{F_1^{(k)} \cdot (P_g^{(k)} + F_1^{(k)} \cdot v)}$$

Други члан једнакости представља величину нижег реда, па се израз своди на облик:

$$I^{(k)} = \frac{F_1^{(r)}}{F_1^{(k)}} \cdot 100\%$$

Где су:

$F_1^{(r)}$ - Главни отпор резања референтног материјала;

$F_1^{(k)}$ - Главни отпор резања испитиваног материјала;

a - Дубина резања;

s - Корак;

v - Брзина резања;

Може се закључити да је за дефинисање индекса обрадивости са енергетског аспекта меродаван главни отпор резања, односно резултујући отпор резања. Познато је да је главни отпор резања везан јаким корелативним везама за параметре режима обраде. Индекс обрадивости може се одредити и на основу поређења конкретних измерених вредности отпора резања за тачно изабране режиме обраде. Поред тога, у циљу квалитетније анализе и поређења испитиваних материјала, битно је поређење извести и према:

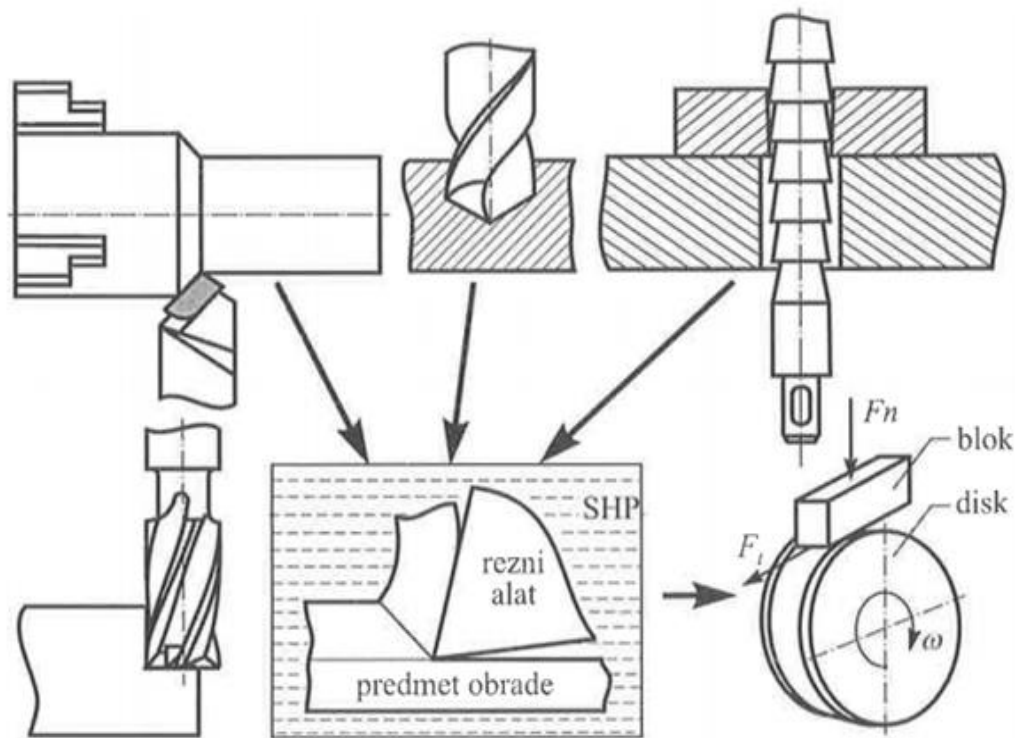
- Отпору продирања F_2 ;
- Отпору смицајног кретања F_3 ;
- Резултујућем отпору резања F_R ;
- Резултујућем отпору продирања и смицајног кретања $F_{R2,3}$;
- Коефицијенту односа ϕ између резултанте $F_{R2,3}$ и главног отпора резара;

Веома је битно дефинисање обрадивости тешкообрадивих материјала вршити преко резултујућег отпора резања F_R , јер он у себи обухвата енергију која је потребна за савладавање отпора трења на грудној и леђној површини резног клина алата, отпор материјала пластичном деформисању, као и енергију која је потребна за савлађивање унутрашњег трења у материјалу [6].

2.6.2. Дефинисање обрадивости са аспекта трибометријских испитивања

Комплексност природе трења, хабања и других триболошких категорија, као и брз развој нових материјала, алата и средстава за хлађење и подмазивање, који могу да одговоре на нове захтеве обраде, наметнуо је потребу да се одређене триболошке величине (коефицијент трења, хабање, температура контактних парова и сл.) експериментално одреде. За потребе триболошких испитивања развијен је до сада велики број трибометара који омогућују одређивање већег броја триболошких карактеристика материјала различитих врста, средстава за хлађење и подмазивање, алата, тврдых превлака на алатима и сл. У лабораторији за обраду метала и трибологију Машинског факултета у Крагујевцу већ дужи низ година се постижу значајни резултати у развоју трибометријских метода и симулација триболошких процеса у зони резања на трибометрима Pin on disk Blok и on Disk. Критична похабаност алата којом се одређује његова постојаност, односи се на похабаност леђне површине резних елемената алата (слика 18.). Од својстава материјала алата и предмета обраде и триболошких карактеристика за хлађење и подмазивање зависе

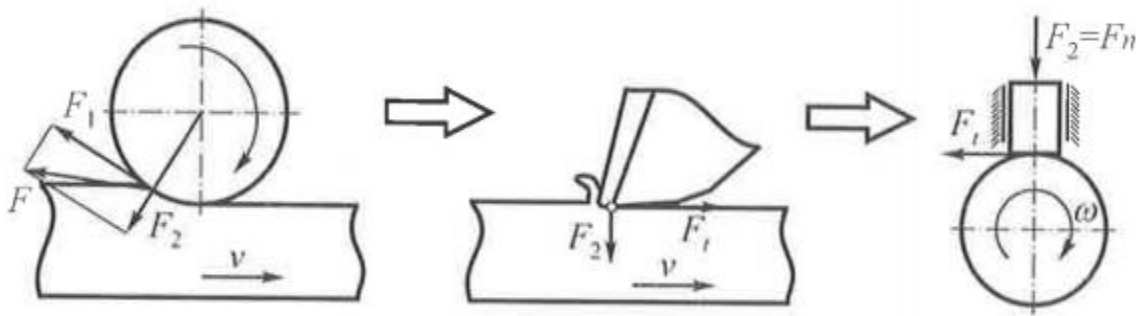
интензитет хабања алата тј. његова постојаност и количина енергије која се троши у процесу резања.



Слика 18. Основни трибомеханички систем у обради резањем [6]

Полазећи од чињенице да се процес хабања алата по обе површине резног клина врши у условима клизања са познатим спољашњим оптерећењем (на грудној површини алата је то нормална сила која делује на ту површину, а на леђној површини резног клина алата је то радијална компонента F_2 резултујуће силе резања) и брзином клизања (на грудној површини је то брзина клизања струготине, а на леђној површини је то брзина резања v), уз гранично подмазивање и хлађење, могу се вршити експериментална испитивања на трибометру Block on Disk.

При овим испитивањима блок се израђује од материјала од ког се израђује резни алат, а диск од материјала предмета обраде. Контакт између блока и диска се остварује по линији при чему се ширина контакта повећава са временом трајања контакта, исто тако се повећава ширина појаса хабања на леђној површини резног клина алата. Спољашње нормално оптерећење и брзина клизања на трибометру одређују се према величини радијалне компоненте резултујућег отпора резања F_2 која се јавља у одговарајућој врсти обраде. Сила трења која се измери на трибометру одговара сили трења која се јавља у процесу резања између леђне површине резног клина алата и обрађене површине предмета обраде. На слици 19. приказано је моделирање процеса обимног глодања на трибометру Block on Disk. [6]



Слика 19. Моделирање процеса обимног глодања на трибометру [6]

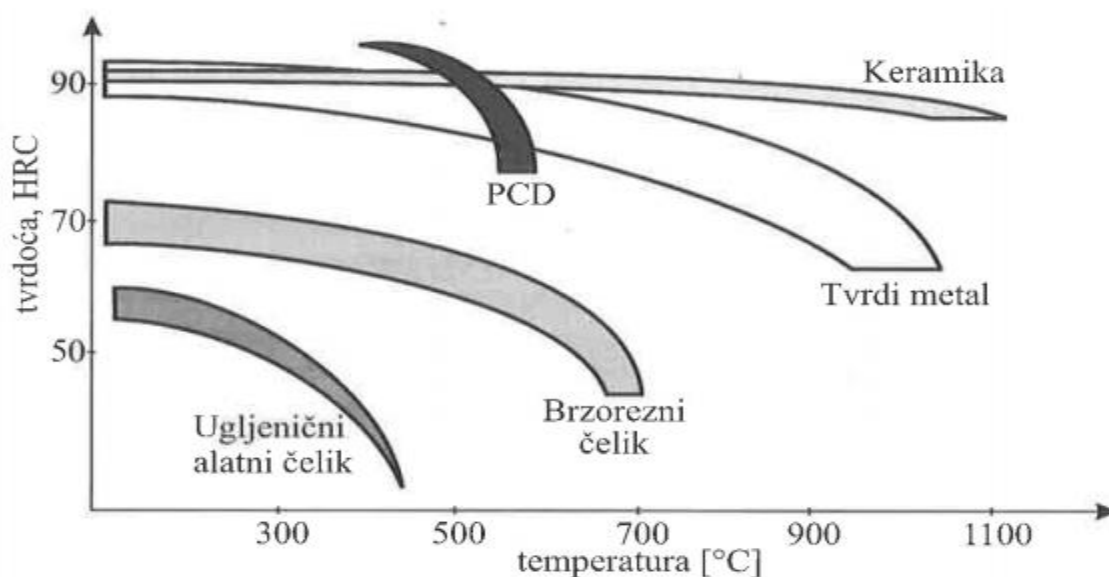
Пошто се у већини случајева у обради резањем интензивни процеси хабања одвијају на резном клину алата, онда се разматрање сложеног система може свести на анализу два тела, при чему једно тело клизи по другом уз присуство средстава за хлађење и подмазивање као и спољашњег оптерећења. У том случају се стварни процес може моделирати триболошким паром Block on Disk, где блок представља алат а диск предмет обраде. Да би се потпуно одредили услови испитивања, неопходно је одредити величину спољашњег оптерећења и брзину клизања. Вредности се могу одредити рачунски у складу са врстом и условима обраде (елементи режима обраде, познате карактеристике материјала предмета обраде, геометрија обраде, тип алата и сл.) или мерењем отпора резања уз помоћ динамометра. Радијална компонента силе резања F_2 делује нормално на леђну површину резних елемената алата и зависи од карактеристика материјала предмета обраде и брзине клизања леђне површине алата по обрађеној површини предмета обраде, тј. брзине резања.

Примена трибометра има велики број предности, као што су: мале димензије елемената у контакту (блок, диск), једноставна геометрија, могућност контроле и варирања радних услова и структурних параметара контактнoг пара, смањење времена и трошкова испитивања и сл. [6].

2.7. Утицај улазних параметара на обрадивост материјала

Од великог броја утицајних параметара којим обрадни систем делује на обрадивост, посебно се издвајају они параметри који су директно повезани са карактеристикама радног предмета и алата. Такође, треба напоменути и утицај технологије обраде и машине на којој се врши обрада. Основне особине обрађиваног материјала као што су: затезна чврстоћа, тврдоћа, жилавост, топлотна проводљивост, структура, имају велики утицај у оцени обрадивости тог материјала. Материјали са већом затезном чврстоћом имају лошију обрадивост у односу на материјале за мањом чврстоћом, јер је много теже раскинути међуатомске и међукристалне везе унутар такве структуре за време продирања алата у материјал. Легирани челици имају боље механичке особине од конструкционих челика јер имају већу затезну чврстоћу. Томе доприноси проценат легирајућих елемената (молибден, хром, никл и др.). Утицај тврдоће на обрадивост материјала огледа се у томе да материјали са малом тврдоћом и великом тврдоћом имају лошију обрадивост у односу на материјале

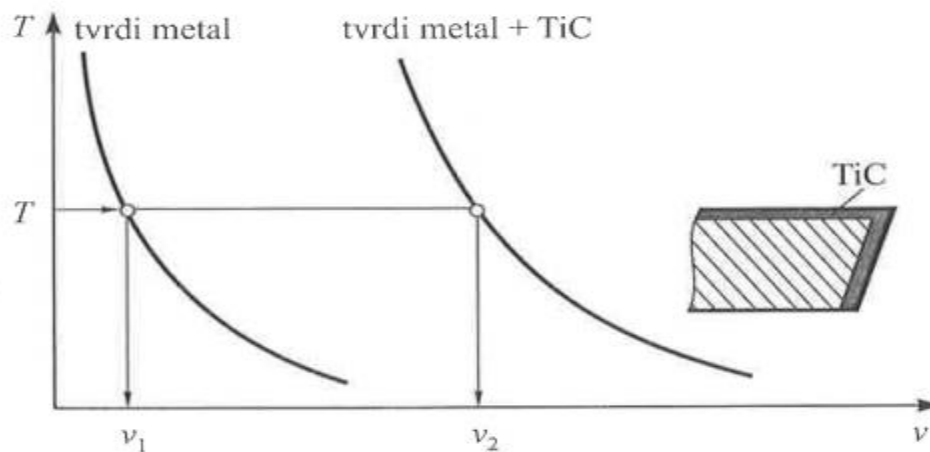
чија се тврдоћа креће у границама 40-55 HRC. Жилавост се такође може довести у везу са тврдоћом радног предмета. Материјал са ниском тврдоћом, односно, жилавији материјал, приликом процеса обраде ствара наслаге које негативно утичу на квалитет обрађене површине. Исто тако, специфична тежина се може повезати са тврдоћом, јер тврђи материјал због своје компактне и уређене структуре има и већу специфичну тежину, па се на основу тога изводе и закључци о утицају специфичне тежине на обрадивост материјала. Проценат легирајућих елемената у материјалу радног предмета има значајан утицај на обрадивост материјала при резању. Проценат силицијума, мангана, фосфора и сумпора, негативно утиче на затезну чврстоћу и тврдоћу, при чему материјал са већим процентом ових елемената има бољу обрадивост при резању. Легирањем челика постижу се ситнозрнаста или крупнозрнаста структура. Ситнозрнаста структура има боље механичке особине (затезну чврстоћу и жилавост), док крупнозрнаста структура ове особине има у мањој мери. Уопштено, материјали са ситнозрнастом структуром су неповољни за обраду резањем, али треба имати на уму да обрада ових материјала обезбеђује бољи квалитет обрађене површине. Облик кристалне решетке нема значајан утицај на обрадивост материјала при резању, али се може закључити да челици са површинском кубном решетком имају бољу обрадивост од просторно кубних и хексагоналних решетака. Висока температура у зони резања има низ негативних утицаја на квалитет обрађене површине и на карактеристине алата. Висока температура мења површинску структуру алата, тако што му повећава кртост и смањује отпорност на лом. Генерисана топлота изразито лоше утиче на алат тако што доприноси хабању грудне и леђне површине алата (слика 20.) [6].



Слика 20. Промена тврдоће алатних материјала услед повећања температуре обраде [6]

Велики утицај на обрадивост материјала има термичка обрада, па су зато каљени припремци неповољнији за обраду, јер приликом каљена долази до отврђивања материјала. Док на пример ваљање, доприноси анизотропности структуре материјала припремка, па је са тог аспекта материјал неповољан за обраду резањем.

Физичко – механичке карактеристике и геометрија алата имају велики утицај на обрадивост материјала. Употребом тврдог материјала са превлакама и резне керамике дошло је до знатног повећања обрадивости материјала. Наношењем превлака на алате (слика 21.) обезбеђује се повећање отпорности на хабање површинских слојева при непромењеној жилавости. На овај начин се обезбеђује већа брзина резања и повећава постојаност алата. Свако побољшање механичких особина алата, као и термичких особина, доприноси повећању обрадивости материјала.

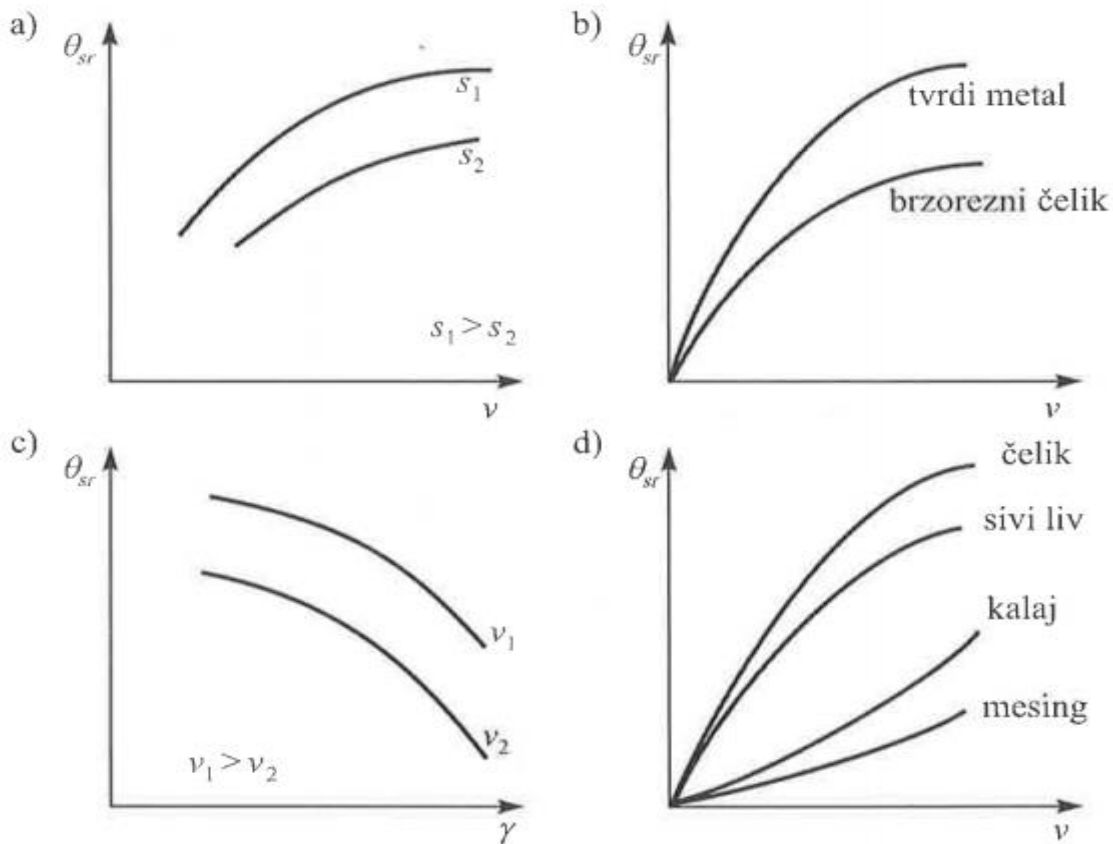


Слика 21. Утицај превлака од TiC на постојаност алата од тврдог метала [6]

Геометријски параметри алата: углови радног клина, нападни углови алата, радијус врха алата, облик алата и др. имају велики утицај на обрадивост материјала са аспекта алата којим се обрада изводи. На силе резања велики утицај има геометрија алата, посебно вредност грудног угла. Смањењем вредности грудног угла смањују се и компоненте силе резања, али при томе долази и до опадања чврстоће алата што може довести до његовог лома. Најјача резна оштрица се постиже са негативним грудним углом. Алатни материјал као и структура нанесених превлака на резни део алата, такође могу значајно утицати на силе резања (промене области контакта између алата и струготине, смањујући дужину контакта и струготине са грудном површином алата). Утицај главног нападног угла на обрадивост манифестује се кроз процес формирања струготине. Мањи главни нападни угао значи и већу површину попречног пресека струготине, па према томе и већу силу резања.

Угао нагиба резне ивице утиче на отпоре резања и смер одвођена струготине, а самим тим и на вибрације у току обраде. Ломачи струготине доприносе бољем одвођењу струготине, чиме доприносе повећању обрадивости материјала. Значајан утицај на обрадивост материјала при резању има генерисана топлота у зони резања. Са порастом температуре

резања смањује се тврдоћа алатног материјала па тиме и његова постојаност. На вредност температуре резања највећи утицај има материјал алата и предмета обраде, брзина резања и средство за хлађење и подмазивање. Температура резања је нижа при обради кртијих материјала, јер се они лакше деформишу а мања је и дужина контакта алата - струготина, што позитивно утиче на обрадивост. Важан критеријум за оцену обрадивости материјала јесте храпавост обрађене површине. Вредност параметара храпавости зависи од дубине и брзине резања, корака, радијуса врха алата и времена рада алата (слика 22).



Слика 22. Утицај параметара обраде на температуру резања: а) брзина резања, б) материјал алата, ц) грудног угла резног клина, д) материјала предмета обраде [6]

Крутост обрадног система има једнозначно деловање на обрадивост материјала. Последица мале крутости обрадног система је лошији квалитет обрађене површине, интензивније трошење алата, па према томе и лошија обрадивост материјала. Средство за хлађење и подмазивање има функцију одвођења генерисане топлоте из зоне обраде и функцију смањења трења на додирним површинама између алата и радног предмета. Смањење трења и смањење температуре у зони резања има позитиван утицај на постојаност алата, смањење вибрација и побољшање квалитета обраде, што директно доприноси бољој обрадивости материјала при резању [6].

3. Експериментална испитивања

Циљ истраживања је био испитивање обрадивости материјала са аспекта храпавости обрађених површина. При испитивању се користило 10 различитих материјала (челика), а као квантитативни показатељ обрадивости материјала се користио индекс обрадивости материјала. Концентрација средства за хлађење и подмазивање је била 6%. Као концентрат за 6% средства за хлађење и подмазивање коришћен је UBA-5. Резултати мерења се добијају на уређају за мерење топографије површине „TALYSURF-6“. Исти су садржали податке за 14 параметара храпавости површине. Обрада резултата је извршена на рачунару.

3.1. Услови истраживања

Експериментално испитивање обухвата испитивање обрадивости 10 материјала чије су карактеристике наведене у делу 3.2.

Сва испитивања су изведена са једним режимом:

- Брзина резања: $V = 44.3 \text{ m/min}$
- Корак по зубу: $S_z = 0.08 \text{ mm/z}$
- Дубина резања: $\delta = 1 \text{ mm}$
- Ширина глодала: $b = 10 \text{ mm}$
- Дужина обраде: $l = 100 \text{ mm}$

Као алат се користило ваљкасто глодало које је било непохабано ($h_{sr} = 0 \text{ mm}$). Средство за хлађење и подмазивање је био 6% UBA -5

Услови истраживања су дефинисана следећим параметрима:

А) Машина:

Универзална глодалица Првомајска „PGU“ -3 $P = 10 \text{ kW}$

Б) Алат: Ваљкасто глодало $\phi 63 \times 50 \times 27$

В) Средство за хлађење и подмазивање 6% UBA -5

3.2. Карактеристике испитиваних материјала

Специјални челици представљају легуре које се својим посебним својствима разликују од уобичајених челика. Таква својства се могу постићи на три начина: утицајем на хемијски састав, производњом као и прерадом челика. Челик се сматра специјалним уколико су му својства побољшана бар једним од ова три начина. Специјални челици се најчешће добијају појединачним или комбинованим легирањем са силицијумом, манганом, хромом, никлом, волфраном, молибденом, ванадијумом, кобалтом, титанијумом, алуминијумом, бакром и др. [7].

Манган као пратећи елемент у челику креће се у садржају 0.2-0.8%, а потиче из руде или феромангана који се додаје пред изливање челика. Има позитиван утицај на смањење штетног дејства сумпора и веома је добар дезоксидатор.

Силицијум као легирајући елемент челика креће се у опсегу 0.2-0.3% и има сличан утицај на процес добијања челика као и манган.

Никл као легирајући елемент повољно утиче на физичко-хемијска својства (нпр. код нерђајућих и ватроотпорних челика). Такође утиче на повећање затезне чврстоће и ударне жилавости, као и на повећање прокаљивости.

Молибден као легирајући елемент углавном се користи у комбинацији са другим легирајућим елементима у циљу смањења негативних утицаја других елемената. Садржај молибдена повећава затезну чврстоћу и ударну жилавости, посебно на повишеним температурама. Такође, смањује опасност према прегревању, склоност челика према отпусној кртости и повећава прокаљивост. Утиче на побољшање обрадивости.

Хром представља најчешће примењени легирајући елемент у челику и креће се у садржају 0.3-30%. Утиче на повећање затезне чврстоће (100MPa за сваки 1% Cr). Такође, хром веома добро утиче на прокаљивост, у већој мери снижава критичну брзину хлађења [9].

Хемијски састав и механичке особине испитиваних материјала дате су у табелама 1-10.

Челик 41Cr4 (Č4131.54) је нисколегирани челик који садржи 0.41% угљеника, код кога је легирајући елемент хром са садржајем од 1%. Има добра својства отпорности на затезање. Такође, његова својства отпорности на хабање могу се побољшати очвршћивањем пламеном или нитрирањем.

Табела 1. Хемијски састав и механичке особине челика 41Cr4 (Č4131.54)

41Cr4 (Č4131.54)								
Хемијски састав							Механичке особине	
C	Si	Mn	P&S	Cr	Mo	Ni	σ _m (MPa)	HB daN/mm ²
%	%	%	%	%	%	%		
0.41	0.3	0.7	0.035	1			1040	298

Челик C45E (Č1531.54) је челик за побољшање, са гарантованим хемијским саставом и садржајем угљеника од 0.5%. Представља конструкциони челик који има добру обрадивост и висока својства на затезање. Такође, одликује га добра заваривост. Може сеојачати гашењем или индукционим каљењем. Има широку примену у машинској индустрији (алати, завртњи, навртке, вратила), као и у изради сечива.

Табела 2. Хемијски састав и механичке особине челика C45E (Č1531.54)

C45E (Č1531.54)								
Хемијски састав							Механичке особине	
C	Si	Mn	P&S	Cr	Mo	Ni	σ _m (MPa)	HB daN/mm ²
%	%	%	%	%	%	%		
0.46	0.3	0.7	0.035				890	254

Челик C15E (Č1221.5) је челик за цементацију, са гарантованим хемијским саставом и процентом угљеника 0.15-0.2%. Користи се при изради делова ковањем. Одликује га висока дуктилност и прилично ниска затезна чврстоћа.

Табела 3. Хемијски састав и механичке особине челика C15E (Č1221.5)

C15E (Č1221.5)								
Хемијски састав							Механичке особине	
C	Si	Mn	P&S	Cr	Mo	Ni	σ _m (MPa)	HB daN/mm ²
%	%	%	%	%	%	%		
0.15	0.3	0.5	0.035				720	202

Челик 36CrNiMo4 (Č5430.5) представља конструкциони челик код кога су легирајући елементи Cr, Ni, Mo. Одликује га висока жилавост и висока затезна чврстоћа. Користи се у нафтној и гасној индустрији као и за израду делова који трпе велика оптерећења (осовине турбине турбо-мотора, вратила, осовине ротора хеликоптера итд.) [8].

Табела 4. Хемијски састав и механичке особине челика 36CrNiMo4 (Č5430.5)

36CrNiMo4 (Č5430.5)								
Хемијски састав							Механичке особине	
C	Si	Mn	P&S	Cr	Mo	Ni	σ _m (MPa)	HB daN/mm ²
%	%	%	%	%	%	%		
0.36	0.3	0.7	0.035	0.1	0.2	0.1	1250-1450	220

Челик 21NiCrMo2 (Č7422.52) је челик кога чине легирајући елементи Ni, Cr, Mo. Поред добре обрадивости има и висок ниво отпорности на хабање. У индустрији се најчешће користи за израду осовина малог и средњег оптерећења за које је потребан висок ниво површинског отпора на хабање.

Табела 5. Хемијски састав и механичке особине челика 21NiCrMo2 (Č7422.52)

21NiCrMo2 (Č7422.52)								
Хемијски састав							Механичке особине	
C	Si	Mn	P&S	Cr	Mo	Ni	σ _m (MPa)	HB daN/mm ²
%	%	%	%	%	%	%		
0.2	0.3	0.8	0.035	0.5	0.2	0.6	570	166

Табела 6. Хемијски састав и механичке особине челика 21NiCrMo2.B (Č7422.52B)

21NiCrMo2.B (Č7422.52B)								
Хемијски састав							Механичке особине	
C	Si	Mn	P&S	Cr	Mo	Ni	σ _m (MPa)	HB daN/mm ²
%	%	%	%	%	%	%		
0.2	0.3	0.8	0.035	0.5	0.2	0.6	682	195

Челик St 35.4 (Č1212) представља конструкциони челик са гарантованим хемијским саставом и спада у групу челика који су нису намењени термичкој обради. Најчешће се користи за израду цеви.

Табела 7. Хемијски састав и механичке особине челика St 35.4 (Č1212)

St 35.4 (Č1212)								
Хемијски састав							Механичке особине	
C	Si	Mn	P&S	Cr	Mo	Ni	σ _m (MPa)	HB daN/mm ²
%	%	%	%	%	%	%		
0.17	0.2	0.4	0.05				540	150

Челик C45 (Č1530.5) је челик са гарантованим хемијским саставом. Спада у групу челика за побољшање. Представља материјал који има изузетно добру обрадивост, али недостатак овог материјала јесте то што нема добру реакцију на нитрирање због недостатка легирајућих елемената.

Табела 8. Хемијски састав и механичке особине челика C 45 (Č1530.5)

C 45 (Č1530.5)								
Хемијски састав							Механичке особине	
C	Si	Mn	P&S	Cr	Mo	Ni	σ _m (MPa)	HB daN/mm ²
%	%	%	%	%	%	%		
0.46	0.3	0.7	0.045				878	251

Челик 35 S20 (Č1490.5) јесте челик са гарантованим хемијским саставом који садржи 0.35-0.4% угљеника. Спада у групу челика за аутомате.

Табела 9. Хемијски састав и механичке особине челика 35 S20 (Č1490.5)

35 S20 (Č1490.5)								
Хемијски састав							Механичке особине	
C	Si	Mn	P&S	Cr	Mo	Ni	σ _m (MPa)	HB daN/mm ²
%	%	%	%	%	%	%		
0.35	0.3	0.7	0.035				836	239

Табела 10. Хемијски састав и механичке особине челика 95 Mn28 (Ћ3990.5)

95 Mn28 (Ћ3990.5)								
Хемијски састав							Механичке особине	
C	Si	Mn	P&S	Pb	Mo	Ni	Ом(МПа)	HB daN/mm ²
%	%	%	%	%	%	%		
0.1	0.1	0.1	0.02	0.3			686	196

Значење додатних ознака у старим ознакама челика дато је у табели 11.

Табела 11. Додатне ознаке у старим ознакама челика

Ознака стања	Стање челика
0	Без одређене термичке обраде
1	Жарено
2	Жарено на најбољу обрадивост
2А	Термички обрађено на одређену затезну чврстоћу
2В	Термички обрађено на феритно перлитну структуру
2С	Обрађено на способност за сечење у хладном стању
3	Нормализовано
4	Побољшано
5	Хладно деформисано
6	Брушено
9	Подешено по нарочитим упутствима

За одређивање параметара храпавости коришћен је компјутеризовани мерни уређај „TALYSURF-6“ који омогућава комплексно дефинисање стања контактних површина. Овај уређај одликује широк спектар могућности, као што су:

- Мерење основних и допунских параметара храпавости и валовитости;
- Статистичка обрада резултата мерења параметара храпавости;
- Приказивање резултата, њихово меморисање и штампање;
- Просторно скенирање површине;



Слика 23. Мерни уређај „TALYSURF-6“ [6]

Коришћењем овог мерног система добијена је представа о почетној микрогеометрији испитиваних узорака.

Микрогеометрија контактних површина испитиваних узорака представљена је преко основних и допунских параметара храпавости датих у табели 11.1:

Табела 11.1. Основни и допунски параметри храпавости

Rt1	Максимална висина неравнина у првом сегменту дужине оцењивања
Rt2	Максимална висина неравнина у другом сегменту дужине оцењивања
Rt3	Максимална висина неравнина у трећем сегменту дужине оцењивања
Rt4	Максимална висина неравнина у четвртном сегменту дужине оцењивања
Rt5	Максимална висина неравнина у петом сегменту дужине оцењивања
Ra	Средње аритметичко одступање профила на дужини оцењивања
Rq	Средње квадратно одступање профила на дужини оцењивања
Ry	Максимална висина неравнина
Rtm	Средња R-ти вредност
Rv	Највећа дубина удубљења профила на дужини оцењивања
Rp	Највећа висина испупчења профила на дужини оцењивања
Sm	Средњи корак испупчења профила на дужини оцењивања
Δq	Средња вредност угла нагиба профила
Rsk	Коефицијент асиметрије профила- мера асиметрије распореда амплитуда
Rku	Мера заострености криве расподеле профила
S	Средњи корак локалних испупчења профила на дужини оцењивања
R3z	Средња вредност растојања трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтним дужинама у оквиру дужине оцењивања
Rpm	Средња вредност R-пивредности одређеним на референтним дужинама
R3y	Највеће растојање трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтним дужинама у оквиру дужине оцењивања

3.3. Резултати истраживања

Резултати испитивања садрже податке везане за вредности 14 параметара храпавости који дефинишу микрогеометрију површине (у табели 11.1 дата су значења 14 наведених параметара добијених на „TALYSURF -6“ као и 5 допунских параметара) са хистограмским приказима индекса обрадивости материјала са аспекта средњег

аритметичког одступања (R_a), средње R_i -ти вредност (R_{tm}) и средњег корак испупчења профила (S_m). План експеримента је дат у табели 12.

Табела 12. План експеримента

Ред.Бр.	Материјал	Редни број експеримента		
1	41Cr4 (Č4131.54)	1	2	3
2	C45E (Č1531.54)	4	5	6
3	C15E (Č1221.5)	7	8	9
4	36CrNiMo4 (Č5430.5)	10	11	12
5	21CrNiMo2 (Č7422.52)	13	14	15
6	21CrNiMo2.B (Č7422.52.B)	16	17	18
7	St 35.4 (Č1212)	19	20	21
8	C45 (Č1530.5)	22	23	24
9	35S20 (Č1490.5)	25	26	27
10	95Mn28 (Č3990.5)	28	29	30

Обрадивост материјала најчешће се исказује преко одговарајућег индекса обрадивости материјала који се, као што је већ речено, дефинише релацијом:

$$I_i = (P_i / P_o) * 100 \text{ (\%)}$$

Где су:

I_i - Индек обрадивости материјала

P_o - Параметар обрадивости (параметар храпавости обрађене површине)

P_i - Параметар обрадивости референтног материјала

При обради оштрим алатом, или при било ком степену затупљења алата храпавост обрађене површине биће различита за различите материјале предмета обраде. Као референтни материјал коришћен је челик C45E (Č1530). Вредност истог параметра храпавости се међусобно разликују зависно од места мерења на узорку тако да и табеле 13-26 садрже за сваки параметар више мерених вредности као и средњу вредност.

Табела 13. Вредности параметра R_a

Р.бр	Материјал	$R_a, \mu m$			
		X1	X2	X3	Xsr
1	41Cr4 (Č4131.54)	0.959	1.04	1.28	1.09
2	C45E (Č1531.54)	1.29	1.35	1.44	1.36
3	C15E (Č1221.5)	0.642	0.729		0.685
4	36CrNiMo4 (Č5430.5)	0.8	0.92	1.14	0.95
5	21CrNiMo2 (Č7422.52)	0.92	1.12	1.13	1.06
6	21CrNiMo2.B (Č7422.52.B)	0.89	0.9	1.09	0.96
7	St 35.4 (Č1212)	0.616	0.681	0.95	0.749
8	C45 (Č1530.5)	0.79	0.82	1.09	0.9
9	35S20 (Č1490.5)	0.61	0.69	0.77	0.69
10	95Mn28 (Č3990.5)	0.406	0.416	0.58	0.467

Табела 14. Вредности параметра Rq

Р.бр	Материјал	Rq, μm			
		X1	X2	X3	Xsr
1	41Cr4 (Č4131.54)	1.173	1.366	1.81	1.45
2	C45E (Č1531.54)	1.736	1.85	2.17	1.92
3	C15E (Č1221.5)	0.904	0.931		0.917
4	36CrNiMo4 (Č5430.5)	1.05	1.28	1.57	1.3
5	21CrNiMo2 (Č7422.52)	1.11	1.35	1.5	1.32
6	21CrNiMo2.B (Č7422.52.B)	1.11	1.18	1.41	1.23
7	St 35.4 (Č1212)	0.803	0.886	1.23	0.973
8	C45 (Č1530.5)	1.01	1.16	1.52	1.23
9	35S20 (Č1490.5)	0.78	0.9	1.06	0.91
10	95Mn28 (Č3990.5)	0.7	0.496	0.535	0.577

Табела 15. Вредности параметра Ry

Р.бр	Материјал	Ry, μm			
		X1	X2	X3	Xsr
1	41Cr4 (Č4131.54)	7.94	9.51	13.5	10.32
2	C45E (Č1531.54)	11.24	13.2	18.9	14.45
3	C15E (Č1221.5)	8.512	6.199		7.35
4	36CrNiMo4 (Č5430.5)	5.2	9.8	11.5	8.83
5	21CrNiMo2 (Č7422.52)	4.4	5.9	6.3	5.53
6	21CrNiMo2.B (Č7422.52.B)	8.5	7.7	9.1	8.43
7	St 35.4 (Č1212)	4.74	4.75	6.68	1.79
8	C45 (Č1530.5)	10.4	8.82	7	8.2
9	35S20 (Č1490.5)	7.2	5.3	4.2	5.57
10	95Mn28 (Č3990.5)	3.51	2.29	3.5	3.1

Табела 16. Вредности параметра Rtm

Р.бр	Материјал	Rtm, μm			
		X1	X2	X3	Xsr
1	41Cr4 (Č4131.54)	4.74	5.92	8.3	6.32
2	C45E (Č1531.54)	5.95	6.72	9.3	7.32
3	C15E (Č1221.5)	4.37	4.01		4.19
4	36CrNiMo4 (Č5430.5)	3.6	4.9	6.2	4.9
5	21CrNiMo2 (Č7422.52)	3.6	3.8	4.1	3.83
6	21CrNiMo2.B (Č7422.52.B)	4.9	5.2	5.8	5.3
7	St 35.4 (Č1212)	3	3.32	4.71	3.68
8	C45 (Č1530.5)	7	5.7	4	5.57
9	35S20 (Č1490.5)	3.6	3.5	2.9	3.33
10	95Mn28 (Č3990.5)	2.17	1.84	2.5	2.17

Табела 17. Вредности параметра R_v

Р.бр	Материјал	$R_v, \mu m$			
		X1	X2	X3	Xsr
1	41Cr4 (Č4131.54)	3.67	7.08	6.8	5.85
2	C45E (Č1531.54)	7	7.9	6	6.97
3	C15E (Č1221.5)	1.89	2.46		2.17
4	36CrNiMo4 (Č5430.5)	3	4.1	4	3.7
5	21CrNiMo2 (Č7422.52)	2.8	2.8	3	3.2
6	21CrNiMo2.B (Č7422.52.B)	2.3	2.3	2.7	2.43
7	St 35.4 (Č1212)	2.06	2.05	2.29	2.13
8	C45 (Č1530.5)	4.4	3.1	2.4	3.3
9	35S20 (Č1490.5)	2.5	2.8	1.8	2.37
10	95Mn28 (Č3990.5)	2.37	1.38	2.5	2.08

Табела 18. Вредности параметра R_p

Р.бр	Материјал	$R_p, \mu m$			
		X1	X2	X3	Xsr
1	41Cr4 (Č4131.54)	4.56	2.47	7.4	4.81
2	C45E (Č1531.54)	4.41	5.3	13.3	7.67
3	C15E (Č1221.5)	7.23	3.74		5.48
4	36CrNiMo4 (Č5430.5)	3.4	5.8	9.4	6.2
5	21CrNiMo2 (Č7422.52)	2.1	3.2	4.1	3.13
6	21CrNiMo2.B (Č7422.52.B)	6.2	6.4	6.7	6.43
7	St 35.4 (Č1212)	2.68	3.11	4.5	3.43
8	C45 (Č1530.5)	7.7	6.1	4.9	6.23
9	35S20 (Č1490.5)	4.7	3.1	3	3.6
10	95Mn28 (Č3990.5)	1.43	1.07	1.6	1.37

Табела 19. Вредности параметра S_m

Р.бр	Материјал	$S_m, \mu m$			
		X1	X2	X3	Xsr
1	41Cr4 (Č4131.54)	335	342	68.1	248.37
2	C45E (Č1531.54)	402.7	254	168	275
3	C15E (Č1221.5)	210.9	135		173
4	36CrNiMo4 (Č5430.5)	314.5	328	376	339.5
5	21CrNiMo2 (Č7422.52)	370	407	336	371
6	21CrNiMo2.B (Č7422.52.B)	185	274.9	401.1	287
7	St 35.4 (Č1212)	346	371.7	171.6	296.43
8	C45 (Č1530.5)	157	159	311	209
9	35S20 (Č1490.5)	381	304	279	326
10	95Mn28 (Č3990.5)	363	326	346	329.3

Табела 20. Вредности параметра Δq

Р.бр	Материјал	$\Delta q, \mu m$			
		X1	X2	X3	Xsr
1	41Cr4 (Č4131.54)	3.5	3.9	0.3	2.57
2	C45E (Č1531.54)	3.6	5.6	6.6	5.27
3	C15E (Č1221.5)	3.8	3.3		3.5
4	36CrNiMo4 (Č5430.5)	1.9	2.5	3.5	2.63
5	21CrNiMo2 (Č7422.52)	2	1.8	1.5	1.77
6	21CrNiMo2.B (Č7422.52.B)	4.5	3.7	3.2	3.8
7	St 35.4 (Č1212)	2.1	1.8	3.5	2.47
8	C45 (Č1530.5)	5.4	5.4	3.3	4.7
9	35S20 (Č1490.5)	2.3	2.3	1.7	2.1
10	95Mn28 (Č3990.5)	1.4	1.1	1.5	1.33

Табела 21. Вредности параметра R_{sk}

Р.бр	Материјал	R_{sk}			
		X1	X2	X3	Xsr
1	41Cr4 (Č4131.54)	-0.4	-1.5	0.1	-0.6
2	C45E (Č1531.54)	-0.6	-0.8	1.7	0.1
3	C15E (Č1221.5)	2	0.2		1.1
4	36CrNiMo4 (Č5430.5)	0.4	0.3	1.5	0.73
5	21CrNiMo2 (Č7422.52)	-0.2	0	0.5	0.1
6	21CrNiMo2.B (Č7422.52.B)	0.9	1.2	1	1.03
7	St 35.4 (Č1212)	0.6	0.7	0.8	0.7
8	C45 (Č1530.5)	1	1.5	0.6	1.03
9	35S20 (Č1490.5)	1.1	0.4	0.2	0.57
10	95Mn28 (Č3990.5)	-0.9	-0.2	-0.6	-0.56

Табела 22. Вредности параметра R_{ku}

Р.бр	Материјал	R_{ku}			
		X1	X2	X3	Xsr
1	41Cr4 (Č4131.54)	3.2	6.9	1.7	3.93
2	C45E (Č1531.54)	4.4	5.4	11.1	6.97
3	C15E (Č1221.5)	13.5	3.5		8.5
4	36CrNiMo4 (Č5430.5)	3.6	5.7	9.3	6.17
5	21CrNiMo2 (Č7422.52)	2.2	2.3	3.2	2.57
6	21CrNiMo2.B (Č7422.52.B)	4.9	6.5	5.8	5.73
7	St 35.4 (Č1212)	3.2	3.9	4	3.7
8	C45 (Č1530.5)	7.2	8.4	4.3	6.63
9	35S20 (Č1490.5)	4.3	6.5	4	4.87
10	95Mn28 (Č3990.5)	5.2	2.3	3.3	3.6

Табела 23. Вредности параметра S

Р.бр	Материјал	S, μm			
		X1	X2	X3	Xsr
1	41Cr4 (Č4131.54)	57	53	13.4	41.13
2	C45E (Č1531.54)	88.9	68	66.7	75.43
3	C15E (Č1221.5)	77.3	46		61.7
4	36CrNiMo4 (Č5430.5)	81.7	102	84	89.23
5	21CrNiMo2 (Č7422.52)	73	79	100	84
6	21CrNiMo2.B (Č7422.52.B)	51	56.2	66.8	58
7	St 35.4 (Č1212)	47	73.6	49	56.53
8	C45 (Č1530.5)	44	46	64	51.33
9	35S20 (Č1490.5)	77	76	64	72.33
10	95Mn28 (Č3990.5)	77	71	65	71

Табела 24. Вредности параметра R3z

Р.бр	Материјал	R3z, μm			
		X1	X2	X3	Xsr
1	41Cr4 (Č4131.54)	2.83	2.79	0.2	1.94
2	C45E (Č1531.54)	0.73	3.1	2	1.94
3	C15E (Č1221.5)	1.01	2.35		1.68
4	36CrNiMo4 (Č5430.5)	1.2	0.5	0.5	0.73
5	21CrNiMo2 (Č7422.52)	2	2.1	1.8	1.97
6	21CrNiMo2.B (Č7422.52.B)	2.6	2.3	2.6	2.5
7	St 35.4 (Č1212)	1.57	1.65	2.81	2.01
8	C45 (Č1530.5)	3.6	3.1	2	2.9
9	35S20 (Č1490.5)	1.3	1.3	1.5	1.37
10	95Mn28 (Č3990.5)	0.36	0.85	1.3	1

Табела 25. Вредности параметра Rpm

Р.бр	Материјал	Rpm, μm			
		X1	X2	X3	Xsr
1	41Cr4 (Č4131.54)	2.23	2.08	0.2	1.5
2	C45E (Č1531.54)	2.63	2.7	5.7	3.68
3	C15E (Č1221.5)	3.12	2.54		2.02
4	36CrNiMo4 (Č5430.5)	1.9	2.9	4	2.93
5	21CrNiMo2 (Č7422.52)	1.7	1.7	2.2	1.87
6	21CrNiMo2.B (Č7422.52.B)	3.2	3.7	3.8	3.57
7	St 35.4 (Č1212)	1.47	1.97	2.93	2.12
8	C45 (Č1530.5)	4.4	3.7	2.5	3.53
9	35S20 (Č1490.5)	2.1	2	1.6	1.9
10	95Mn28 (Č3990.5)	0.99	0.85	1.2	1.01

Табела 26. Вредности параметра R3y

Р.бр	Материјал	R3y, μm			
		X1	X2	X3	Xsr
1	41Cr4 (Č4131.54)	4.59	3.53	0.5	2.87
2	C45E (Č1531.54)	1.16	5.9	3.8	3.62
3	C15E (Č1221.5)	1.89	3.95		2.92
4	36CrNiMo4 (Č5430.5)	2.1	1.7	1	1.6
5	21CrNiMo2 (Č7422.52)	3.1	4.7	3.3	3.7
6	21CrNiMo2.B (Č7422.52.B)	3.6	3.7	4.1	3.8
7	St 35.4 (Č1212)	3.48	2.72	4.01	3.43
8	C45 (Č1530.5)	5.5	6	3.6	5.03
9	35S20 (Č1490.5)	2.5	2.9	2.2	2.53
10	95Mn28 (Č3990.5)	1.44	1.45	2.1	1.65

У наредне 3 табеле приказани су вредности индекса обрадивости (минимална, средња и максимална), за параметре храпавости Ra, Rmt и Sm. Као референтни материјал кошћен је челик C45 (Č1530.5). Хистограмски приказ индекса обрадивости представљен је на сликама (24.25. 26.)

Табела 27. Индекс обрадивости са аспекта Ra

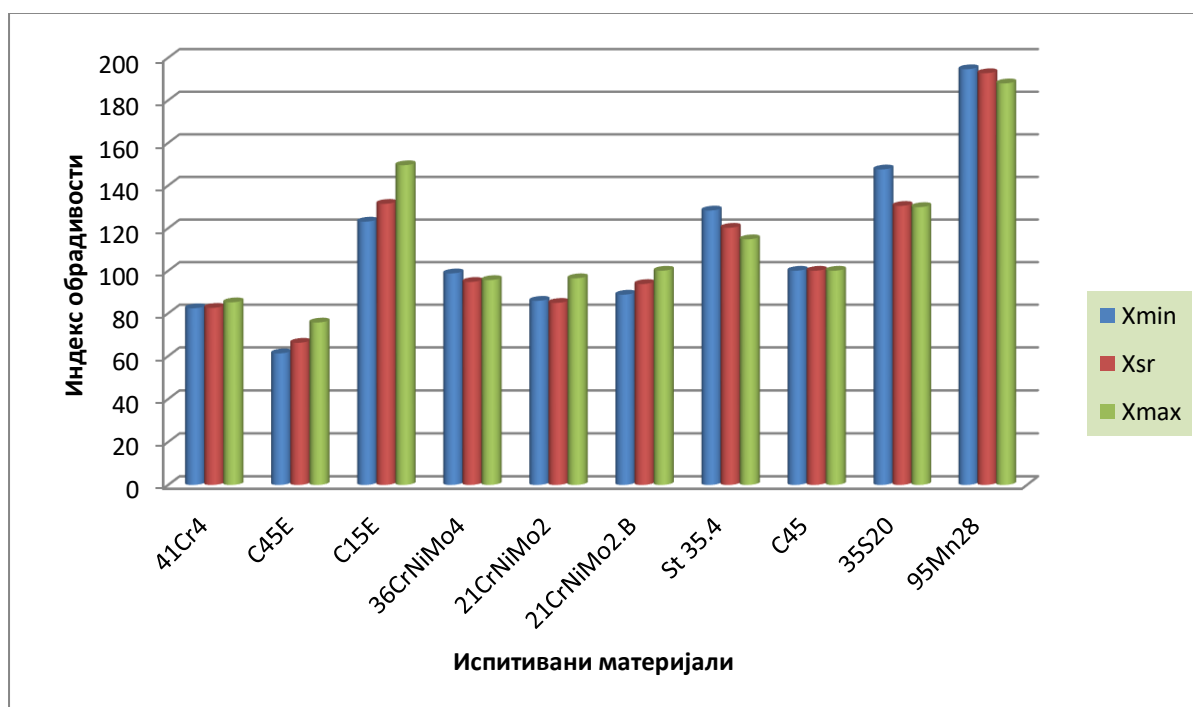
Ред. број	Материјал	Индекс обрадивости (%) на основу Ra		
		Xmin	Xsr	Xmax
1	41Cr4 (Č4131.54)	82.38	82.57	85.16
2	C45E (Č1531.54)	61.24	66.18	75.69
3	C15E (Č1221.5)	123.05	131.39	149.52
4	36CrNiMo4 (Č5430.5)	98.75	94.74	95.61
5	21CrNiMo2 (Č7422.52)	85.87	84.91	96.46
6	21CrNiMo2.B (Č7422.52.B)	88.76	93.75	100
7	St 35.4 (Č1212)	128.25	120.16	114.74
8	C45 (Č1530.5)	100	100	100
9	35S20 (Č1490.5)	147.54	130.43	129.87
10	95Mn28 (Č3990.5)	194.58	192.72	187.93

Табела 28. Индекс обрадивости са аспекта Rtm

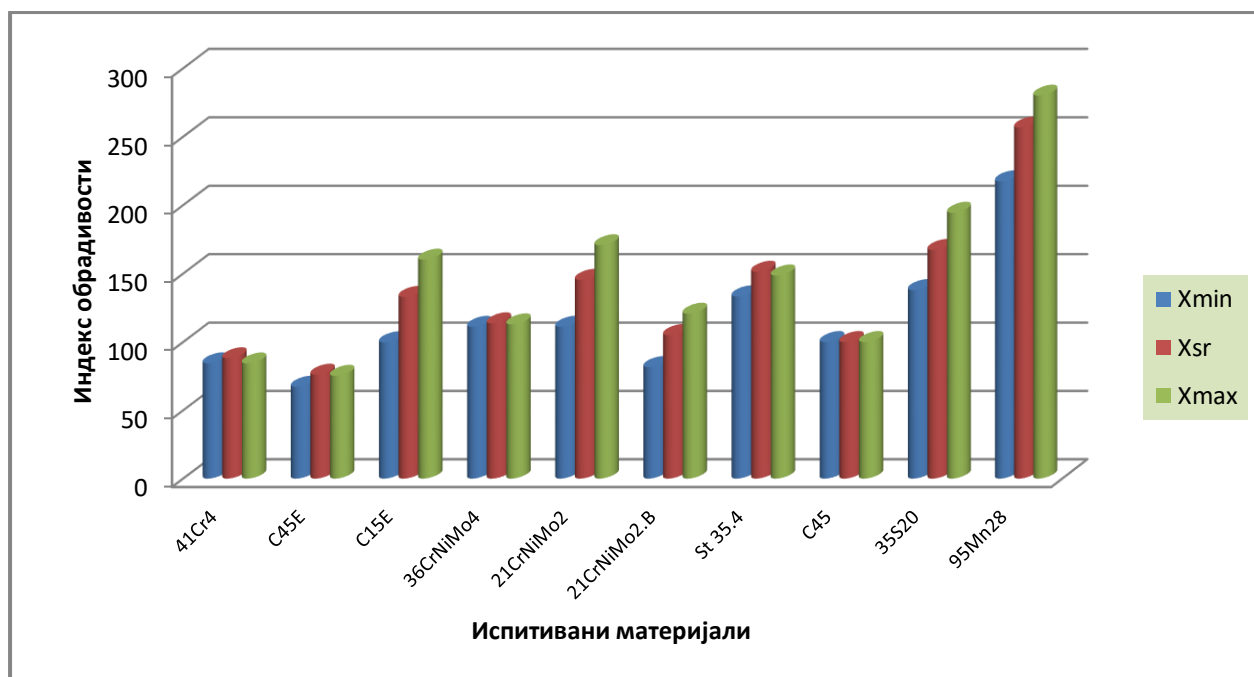
Ред. број	Материјал	Индекс обрадивости (%) на основу Rtm		
		Xmin	Xsr	Xmax
1	41Cr4 (Č4131.54)	84.39	88.13	84.34
2	C45E (Č1531.54)	67.23	76.09	75.27
3	C15E (Č1221.5)	99.75	132.94	160.18
4	36CrNiMo4 (Č5430.5)	111.1	113.67	112.9
5	21CrNiMo2 (Č7422.52)	111.1	145.43	170.73
6	21CrNiMo2.B (Č7422.52.B)	81.63	105.09	120.69
7	St 35.4 (Č1212)	133.33	151.36	148.62
8	C45 (Č1530.5)	100	100	100
9	35S20 (Č1490.5)	137.93	167.27	194.44
10	95Mn28 (Č3990.5)	217.39	256.68	280

Табела 29. Индекс обрадивости са аспекта Sm

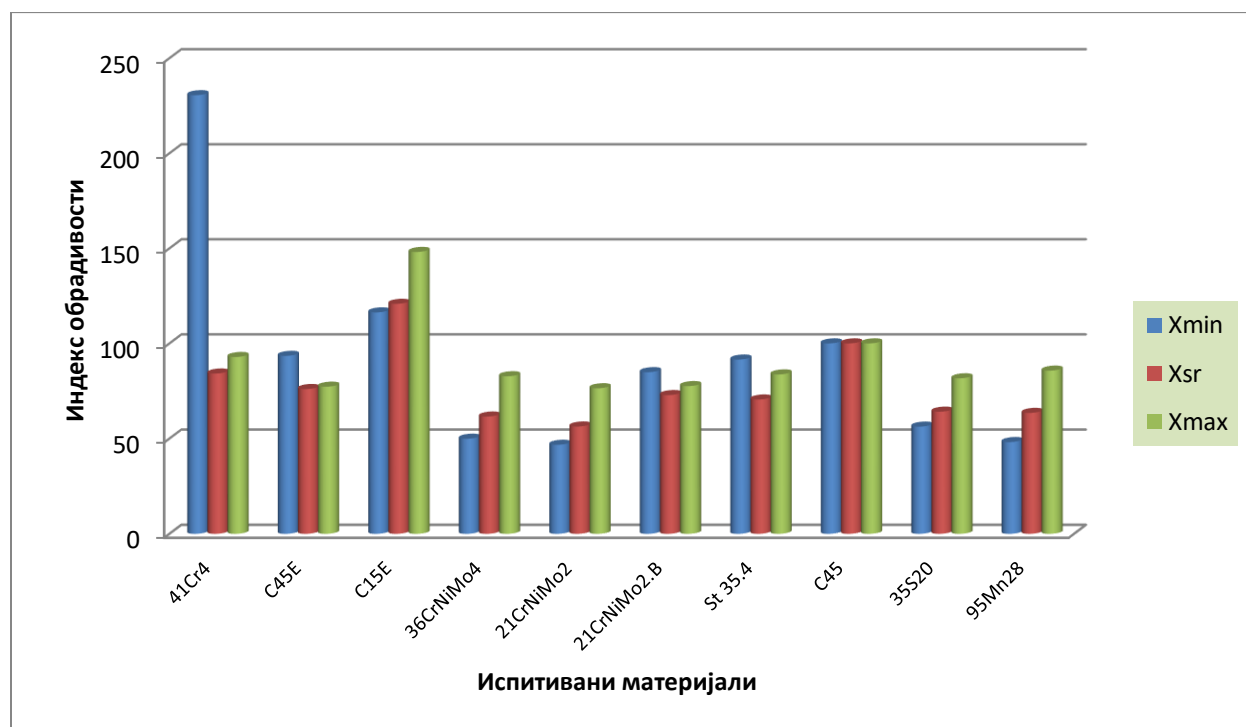
Ред. број	Материјал	Индекс обрадивости (%) на основу Sm		
		Xmin	Xsr	Xmax
1	41Cr4 (Č4131.54)	230.54	84.15	92.84
2	C45E (Č1531.54)	93.45	76	77.23
3	C15E (Č1221.5)	116.3	120.81	148.09
4	36CrNiMo4 (Č5430.5)	49.92	61.56	82.71
5	21CrNiMo2 (Č7422.52)	46.73	56.33	76.41
6	21CrNiMo2.B (Č7422.52.B)	84.86	72.82	77.54
7	St 35.4 (Č1212)	91.49	70.51	83.67
8	C45 (Č1530.5)	100	100	100
9	35S20 (Č1490.5)	56.27	64.11	81.63
10	95Mn28 (Č3990.5)	48.16	63.47	85.67



Слика 24. Хистограмски приказ индекса обрадивости са аспекта Ra



Слика 25. Хистограмски приказ индекса обрадивости са аспекта Rtm



Слика 26. Хистограмски приказ индекса обрадивости са аспекта Sm

3.4. Анализа резултата

На основу обраде добијених резултата може се закључити да постоје велике разлике у обрадивости материјала са аспекта квалитета обрађене површине приказане преко индекса обрадивости материјала. Посматрајући обрадивост са аспекта средњег аритметичког одступања профила (R_a) најбољу обрадивост има челик 95Mn28 (Č3990.5), док је обрадивост челика C45E (Č1531.54) најмања. Посматрајући обрадивост на основу средње максималне висине неравнина (R_{tm}) може се закључити да је најбоље обрадив материјал челик 95Mn28 (Č3990.5), док је најмања обрадивост, као и у претходном случају, код челика C45E (Č1531.54). Уколико се обрадивост посматра са аспекта средње дужине таласа профила (S_m) резултати ће бити другачији. Показало се да најбољу обрадивост има челик 41Cr4 (Č4131.54), док су најлошији резултати код челика 21CrNiMo2 (Č7422.52). Приликом упоређивања добијених резултата са сва три аспекта, може се закључити да се индекс обрадивости мења у зависности од параметра храпавости који се узима као предмет анализе. Такође, може се закључити да је средње аритметичко одступање (R_a) један од најрелевантнијих параметара хабања који се користи за израчунавање индекса обрадивости.

4. Закључак

Најбоље обрадив материјал јесте онај материјал код кога најбрже долази до одношења највеће количине материјала са високим квалитетом обрађене површине, са што мањим силама резања и што мањим трошењем алата.

Такође, може се закључити да је обрадивост процес који се не заснива само на једном универзалном критеријуму, већ на низу критеријума који одређују у којој мери ће материјал бити обрадив. Обрадивост материјала је боља што је већи број критеријума преко којих може бити представљена. Од низа фактора којим обрадни систем делује на обрадивост, највећи утицај на оцену обрадивости имају фактори као што су: затезна чврстоћа, тврдоћа, жилавост, топлотна проводљивост и структура материјала, јер су они директно повезани са предметом обраде и алатом.

На основу изведеног експеримента може се закључити да приликом упоређивања добијених резултата са сва три аспекта, индекс обрадивости се разликује у зависности од параметра храпавости који се узима као предмет анализе. Такође, може се закључити да при обради различитих материјала постојаност алата представља један од основних показатеља индекса обрадивости.

Челик 95Mn28 (Ћ3990.5) представља најбоље обрадив материјал, са аспекта средњег аритметичког одступања (R_a) и средње R_i -ти вредност (R_{tm}), од свих испитаних материјала. Један од главних критеријума који томе доприноси јесте затезна чврстоћа чија вредност се налази међу минималним вредностима у односу на друге испитане материјале. Материјали са ниском затезном чврстоћом имају бољу обрадивост јер се знатно лакше врши раскидање међуатомских и међукристалних веза унутар такве структуре за време продирања алата у материјал.

Челик C45E (Ћ1531.54) представља најбоље обрадив материјал, са аспекта средњег корак испупчења профила (S_m), од свих испитаних материјала. Узрочник тога јесте висок проценат мангана и силицијума у материјалу. Проценат силицијума, мангана, фосфора и сумпора, негативно утиче на затезну чврстоћу и тврдоћу, при чему материјал са већим процентом ових елемената има бољу обрадивост при резању.

Литература

- [1]http://mf-bl.com/upload/documents/laboratorije/laboratorija%20za%20tehnologiju%20obrade%20rezanjem%20i%20obradne%20sisteme/Sredanovic_OBRADIVOST.pdf август 2019.
- [2] Development of Mathematical Model of Universal Material Machinability, Глобочки Лакић Г., Средановић Б., Недић Б., Чича Ћ. Машински факултет Бања Лука, Машински факултет Крагујевац.
- [3] Тамара Г. Радичевић, Обрадивост метала резањем, Завршни рад;
- [4]http://repozitorij.fsb.hr/1313/1/20_05_2011_Diplomski_rad_Damjan_Strsoglavec.pdf август 2019.
- [5] Лазић М., Недић Б. Технологија обраде метала резањем, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу;
- [6] Глобочки Лакић Г. Обрада метала резањем – теорија, моделирање и симулација, Машински факултет Бања Лука 2010.;
- [7][file:///C:/Users/DELL/Downloads/Specijalni%20celici-skripta%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/DELL/Downloads/Specijalni%20celici-skripta%20(1).pdf) септембар 2019.
- [8]<http://www.astmsteel.com/product/4340-steel-aisi/> септембар 2019.
- [9] Ђукић В., Метални материјали; Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1984.;