

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 39/2015

Тамара Г. Радичевић

Обрадивост метала резањем

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Недић Богдан - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Изјава о самосталној изради рада

Изјављујем да сам овај завршни рад урадила самостално, служећи се стеченим знањем и искуством као и наведеном литературом.

39/2015 Тамара Радичевић

Потпис

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да изврши прикупљање и систематизацију информација о начину дефинисања обрадивости метала резањем. Потребно је у првом делу рада дати основе теорије обраде резањем, а затим преглед метода за истраживање обрадивости. Посебно објаснити како се дефинише универзална обрадивост. У другом делу рада приказати неколико примера исказивања обрадивости метала резањем применом различитих модела обрадивости.

Препоручена литература:

- [1] Ивковић Б. Теорија резања - Основи механике, термодинамике, трибологије и економије процеса резања, самостално ауторово издање, Крагујевац, 1991.
- [2] Глобочки Лакић Г. Обрада метала резањем - теорија, моделирање и симулација, Машински факултет Бања Лука, 2010;
- [3] Недић Б. Динамика процеса резања, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, 2006;

Крагујевац, 06.10.2018.

ментор:

Проф. др Недић Богдан

Резиме рада:

У овом раду је дат приказ основних карактеристика обрадивости метала резањем, затим критеријуми, методе и функције обрадивости метала резањем као и основне силе резања код ортогоналног и косог резања метала, и на крају, одступање отпора резања од средње вредности и индекс обрадивости при обради стругањем различитих метала.

Кључне речи: обрадивост, резни алат, индекс обрадивости.

Summary of work

In this paper, we present the basic characteristics of the workability of metal by cutting, then the criteria, method and functions of the workability of the metal by cutting, as well as the basic cutting force in orthogonal and slit cutting of metals, and finally, the deviation of the cutting resistance from the mean and the workability index in the treatment by scraping various metal.

Key words: : workability, cutting tool, workability index.

Садржај:

1. Увод.....	7
2. Основе процеса обраде резањем	8
2.1. Појаве у зони резања.....	8
2.1.1. Настајање одвојене честице.....	9
2.1.2. Облик и врста одвојене честице.....	11
2.2. Ортогонално резање.....	122
2.3. Косо резање.....	14
2.3.1. Модели за процену силе резања.....	15
3. Основе обрадивости материјала	17
3.1. Дефинисање обрадивости.....	17
3.2. Критеријуми обрадивости	18
3.2.1. Постојаност алата	18
3.2.2. Силе резања.....	21
3.2.3. Квалитет обрађене површине.....	24
3.2.4. Облик одвојене честице	24
3.3. Методе и функције обрадивости	27
3.3.1. Индексне (компаративне методе)	27
3.3.1.1. Метода варијабилних брзина резања	28
3.3.1.2. Метода константног пута резања	29
3.3.1.3. Метода константних сила резања.....	29
3.3.1.4. Метода радиоактивних изотопа.....	30
3.3.1.5. Метода попречне обраде	30
3.3.1.6. Индиректне методе	30
3.3.1.7. Метода испитивања облика одвојене честице	31
3.3.2. Комплексне методе истраживања обрадивости (функције обрадивости)	32
4. Обрадивост материјала дефинисана преко корелативних зависности параметара процеса обраде	33
4.1. Обрадивост са аспекта потребне снаге	33
4.2. Обрадивост преко параметара обраде када не постоје корелативне зависности.....	34
4.3. Дефинисање универзалне обрадивости	35
5. Експериментални део	38

5.1. Обрадивост испитиваних материјала на основу отпора резања.....	38
5.2. Одступање отпора резања од средње вредности.....	40
5.3. Универзална обрадивост	42
5.3.1. Обрадивост тешкообрадивих материјала.....	43
5.3.2. Хабање алата и обрадивост са аспекта хабања алата.....	43
6. Закључак	47
Литература.....	48

1. Увод

Обрада метала резањем је данас једна од најчешће коришћених производних технологија у металопрерађивачкој индустрији. То је процес обраде у коме се облик радног предмета добија одстрањивањем сувишног материјала у виду струготине. Ова обрада је најзаступљенија јер омогућава производњу сложених делова са тачном мером и захтеваним квалитетом обраде у релативно кратком времену.

Иако је обрада метала резањем широко истраживана још од 1900-те године, избор параметара режима резања, материјала алата и резне геометрије алата за мале обиме производње још увек је заснован на искуству оператера или препорученим вредностима. Изабрани параметри обраде су ретко оптимални, а мали обим производње не оправдава извођење експеримената за повећање ефикасности. За веће обиме производње, параметри резања се добијају експериментима у циљу остварења максималне ефикасности, а трошкове експеримента компензује велика количина произведених делова.

Рад има за циљ да представи најчешће видове обраде метала. Такође, има за циљ да представи потпуније и прецизније концепте који се користе у различитим приступима приликом обраде метала. Кроз експеримент обраде метала резањем указује се на све предности које доноси правилан приступ при реализацији самог експеримента.

У другом поглављу овог рада детаљно су описане основе процеса обраде резања као и појаве у зони резања код ортогоналног и косог резања.

У трећем поглављу представљени су основни принципи обрадивости материјала, дат су опште дефиниције обрадивости као и критеријуми обрадивости. Поред основних појмова који се користе у овој области, представљене су методе и функције обрадивости материјала.

Четврто поглавље овог рада се односи на обрадивост материјала која је дефинисана преко корелативних зависности параметара процеса обраде и на обрадивост преко параметара обраде када не постоје корелативне зависности, где је такође описана и универзална обрадивост.

Пето поглавље овог рада се односи на експериментални део везан за обрадивост испитиваних материјала на основу отпора резања, као и на универзалну обрадивост материјала.

На крају рада биће извучени закључци везани за обраду метала резањем, као и закључци који су настали као резултат истраживања приликом израде самог завршног рада.

2. Основе процеса обраде резањем

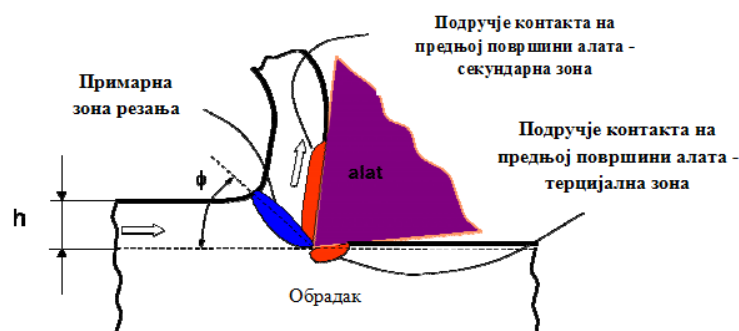
2.1. Појаве у зони резања

Обрада одвајањем честица као систем се састоји од машине алата, обратка, алата, интерфејса обратак – машине алата, интерфејса алат – машине алата. Процес резања дефинисан је сучељем алата и обратка уз средства за хлађење и подмазивање. Пре саме обраде имамо припремак који се на крају процеса дефинише као радни предмет. За разумевање процеса резања, неопходно је потпуно разјаснити следеће феномене и механизме:

- Услове заједничког деловања између алата и обратка;
- Пластичне протоке метала, нарочито у карактеристичним зонама;
- Утицаје брзине резања;
- Граничне услове деформација у зони деформисања;
- Силе трења и особина материјала обратка и алата на високим температурама.

Зона резања је део резног слоја у којем се врши процес локализоване пластичне деформације у току резања (стварање одвојене честице). Због изразито сложених појава у зони резања, није могуће доћи до једноставног и свеобухватног математичког модела напрезања и деформацијског стања којим би се објаснила суштина и механизам стварања одвојене честице[3].

Изузетна сложеност процеса резања је основни разлог што се не може описати чистим аналитичким методама. Из тог разлога и не постоји поуздан математички модел процеса резања којим би се могло поуздано предвидети ток и промена механичких, термодинамичких, хемијских, триболошких и динамичких појава при резању. Стога се за проучавање појединих појава које се догађају у току резања користе разне експерименталне методе. Практични значај познавања законности ових појава изузетно је велик. Оне директно утичу на главне излазне ефекте процеса резања, односно на економичност, производност и квалитет [7].



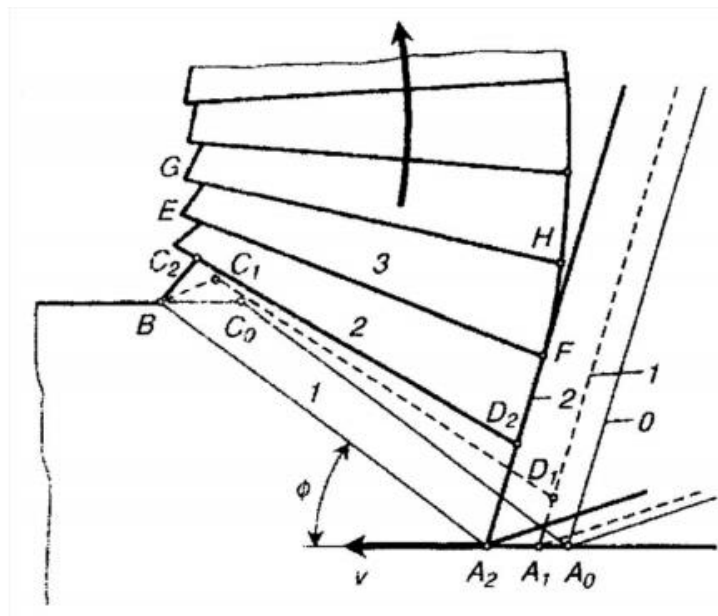
Слика 1. Зоне резања

2.1.1. Настајање одвојене честице

Уколико је материјал обрадка донекле пластичан, при томе долази до деформације одвојене честице. Догађаји у зони резања везани су за настанак одвојене честице, могу се објаснити помоћу више модела, а један од њих је теорија елементарних ламелица. Основа овог модела, коју је поставио Брих, састоји се од две чињенице:

- Елементарна ламела се у току процеса резања непрекидно налази у стању пластичне деформације, сабијања и клизања. У овом стању материјал се налази све док траје додир са предњом површином алата;
- Попречни пресек елемента поступно прелази из паралелограмског у све изразитији трапезни облик са све уочљивијим клинастим обликом трапеза.

За положај A_0 , почетни паралелограмски облик ламеле $A_0A_2BC_0$ услед великог сабијања материјала у околини тачке A_0 се деформише. Због овога сабијање честица материјала се креће у правцу равнине смицања и у правцу предње површине алата, па почетни облик ламеле $A_0A_2BC_0$ поприма облик $A_1A_2BC_1D_1$. Даљим гibaњем врха алата од положаја 1 до положаја 2, ламела се коначно деформише у облик клинастог трапеза $A_2BC_2D_2$.



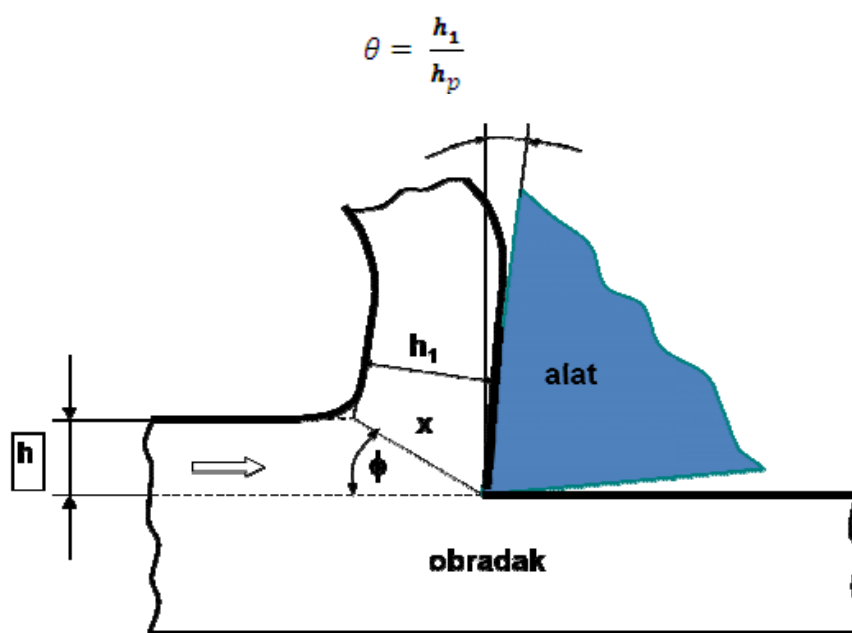
Слика 2. Модел настајања одвојене честице сабијањем трапезних елемената [6]

Истраживања зоне одвајања честица успела су направити физичку силу процеса одвајања честица. У првој фази, код кретања алата у смеру брзине резања, алат задира у материјал обрадка и најпре захвата комадић материјала у виду паралелограма и постепено га деформише. Ламела захваћеног материјала облика пластичног паралелограма претвара се у трапез. Ова промена облика је узрок увијања одвојене честице материјала.

Друга фаза се састоји од смицања тог слоја у равни смицања. Када напрезање у материјалу обратка досегне границу лома, настаје пукотина испред оштрице алата. Смицање настаје у моменту када силе на предњој површини алата постану једнаке чврстоћи материјала којег обрађујемо.

У трећој фази материјал одвојене честице тежи да се креће у смеру вертикалном на раван смицања. При томе део одвојене честице, који се одваја с обрадком, сабија се и истовремено клизи дуж равне смицања и дуж предње површине алата. Угао смицања зависи од пластичности материјала који се обрађује, угла предње површине алата и деломично од брзине резања V_c .

Због деформације у смичућој зони, почетна дебљина резања повећава се на дебљину h_1 . Однос те две дебљине означава се као коефицијент деформације одвојене честице материјала обратка, па се означава са θ :



Слика 3. Однос дебљине машине за сечење и одвојене честице

Коефицијент деформације одвојене честице лако се може одредити мерењем дебљине резања и дебљине одвојене честице. Он је важан и указује на обрадивост. Сматра се да је велики коефицијент деформације честице неповољан, јер код материјала исте чврстоће то значи већу потрошњу снаге због већих деформација. Познато је да највећи коефицијент деформације има бакар, око 7, па се исти тешко обрађује. Даљим израчунавањем можемо изразити коефицијент деформације одвојене честице у зависности од угла предње површине алата и угла смицања.

$$\theta = \frac{h_1}{h_p} = \frac{x * \frac{\pi}{2} + \gamma + \varphi}{x * \sin \varphi}$$

Сам процес формирања одвојене честице одвија се у зони смицања која представља прекратницу деформисаног и недеформисаног дела обратка. Елементи који значајно утичу на тај процес формирања одвојене честице су: [3]

- Материјал обратка;
- Параметри обраде, а посебно дубина и посмак, као и њихов однос. Важан је и утицај брзине резања;
- Геометрија алата (угао намештања, полупречник врха алата, угао предње површине);
- Геометрија обратка.

За дефинисање и објашњење ових феномена и механизма стварања одвојених честица не постоји јединствен и свеобухватан математичко – теоријски модел, пре свега из разлога сложености деловања свих процеса који се одвијају у зони резања и који узрокују настајање одвојене честице. Тих модела има више, али се може издвојити шест карактеристичних:

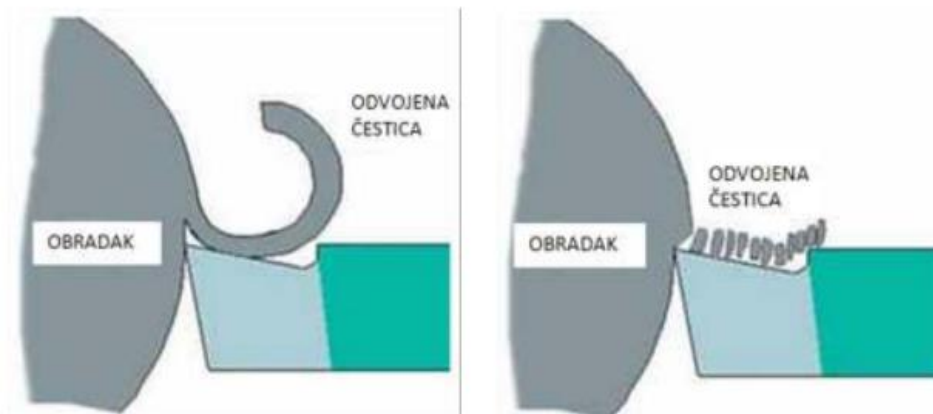
- Модел настајања одвојене честице у једној равнини смицања;
- Модел настајања одвојене честице сукцесивним смицањем елемената – ламела;
- Модел настајања одвојене честице деформисањем елемената (ламела);
- Модел настајања одвојене честице сабијањем трапезних елемената – ламела;
- Модел настајања одвојене честице у клинастој зони смицања;
- Модел настајања одвојене честице у широкој криволинијској зони смицања.

2.1.2. Облик и врста одвојене честице

По спољашњем изгледу одвојене честице, настале у процесу обраде пластичних метала можемо сврстати према облику у три основне групе:

1. Ломљена (елементарна) одвојена честица. Настаје при обради пластичних материјала са малим брзинама резања, с великим дебљинама резања и ако истовремено употребљавамо мали угао предње површине алата;
2. Насечена (ламеларна) одвојена честица. Оне одвојене честице које су код одвајања од основног материјала обрадка, као елементи остали међусобно повезани. Настају при нешто већем углу предње површине алата него у горњем случају. Пукотина оштрице алата постаје мања. Одвојена честица је дужа и квалитет обрађене површине је бољи него код обраде при којој настаје ломљена одвојена честица;
3. Текућа (континуирана) одвојена честица. Онај облик који нема приметних трагова у зони смицања. Постиге се великим углом површине алата, великим

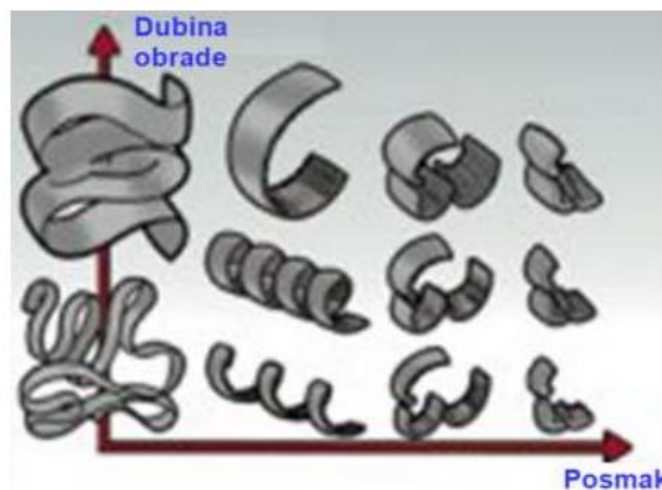
брзинама резања. Пукотина испред оштрице алата је минимална, па се постиже врло високи квалитет одређене површине.



Слика 4. Облици одвојене честице а) континуална одвојена честица б) елементарна одвојена честица [9]

Параметри који утичу на облик одвојене честице су:

- Материјал обратка;
- Параметри обраде, а посебно дубина и посмак;
- Геометрија алата;
- Геометрија обратка.



Слика 5. Зависност облика одвојене честице од посмака и дубине обраде [9]

2.2. Ортогонално резање

Најједноставнији приказ механизма формирања одвојене честице је случај ортогоналног резања, којим се све силе могу приказати у једној равнини, па ако претпоставимо да све силе делују на врх оштрице алата, можемо добити најважнију резултантну силу F_R . Силу F_R називамо силом резања и њоме треба притискати алат

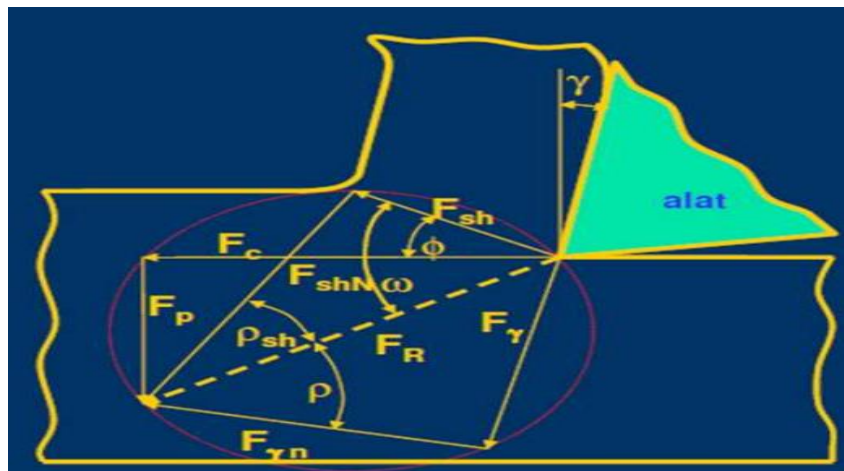
да би могао задирати у материјал обратка.

Основне претпоставке ортогоналног резања су:

- Брзина резања вертикална је на главну оштрицу и на посмичну брзину резања;
- Параметри обраде су константни;
- Нема трења на задњој површини алата;
- Смицање се догађа у равни;
- Једнолика расподела напрезања;
- Главна оштрица шири је од ширине обраде.

Marchantov модел користи претпоставку да се ради о ортогоналном резању. Осим ове претпоставке овај модел заснива се и на следећим претпоставкама:

- Врх алата је апсоутно оштар, при чему нема клизања између алата и обратка;
- Деформација материјала се одвија у равни, нема бочног клизања;
- Напрезања у равни смицања су равномерно распоређена.



Слика 6. Marchant-ов модел ортогоналног резања

где је:

- F_c - Главна сила резања;
- F_p - Натражна сила резања;
- F_γ - Тангенцијална сила на предњој површини алата;
- $F_{\gamma N}$ - Нормална сила на предњој површини алата;
- F_{sh} - Тангенцијална сила на равни смицања
- F_{shN} - Нормална сила у равни смицања.

2.3. Косо резање

Силе резања и њени моменти имају велики значај у технологији обраде одвајањем честица. Њима се исказује једна од основних карактеристика стања и понашања процеса резања материјала. Када се на неки начин одреде функције силе резања и њихови моменти, тада ове функције омогућавају да се [11]:

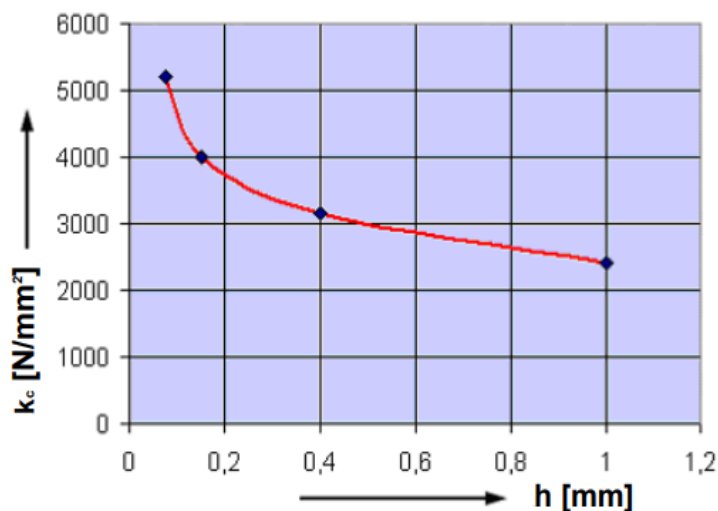
- Прорачуна снага која се троши;
- Изврши прорачун чврстоће и да се димензионирају елементи и делови алата;
- Одаберу типови и димензије резног алата, и провери стабилност алата у целини;
- Одреди параметри режима обраде при пројектирању економичних и продуктивних варијанти технолошког процеса обраде;
- Изврши прорачун тачности и провери могућност обраде неког дела машине са становишта прописане контроле квалитете;
- Изврши надзор трошења алата.

На овај начин се у производним условима, на основу познавања и коришћења функција сила и момената резања, омогућава рационална конструкција и економична експлоатација производних средстава, оптимизација процеса обраде, као и развој одређеног концепта адаптивно управљаних обрадних суистема са могућношћу регулације.

Силе резања и њихови моменти стоје у директној или индиректној вези са низом значајних феномена који прате процес резања, као што су, нпр. температура у зони резања и њеној околини, трошење резних елемената алата итд. Специфична сила резања k_c , за коју поједини аутори наводе различите једначине, може се у већини случајева писати као [11]:

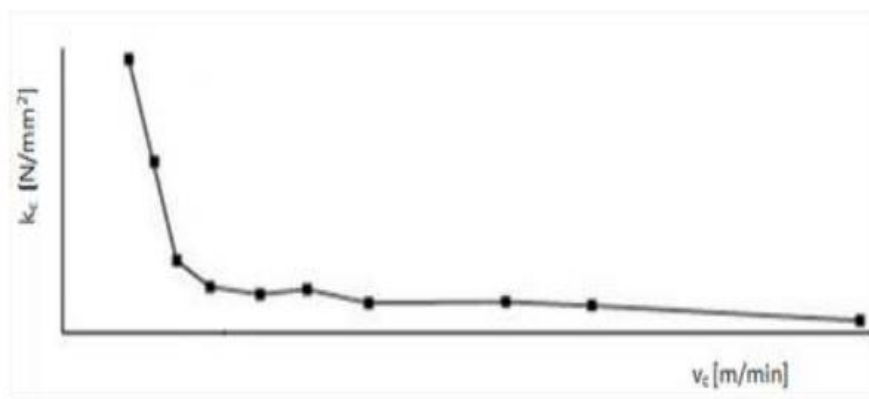
$$k_c = \frac{F_c}{A} \neq konst$$

Вредност силе резања није константна већ се она мења са дебелином резања и брзином резања. На слици 7 је приказана зависност специфичне силе резања од различитих дебелина резања за материјал обраде С0750, па добијена крива има облик хиперболе.



Слика 7. Зависност специфичне силе резања од дебљине одвојене честице

На слици 8 је приказана зависност специфичне силе резања од брзине резања.



Слика 8. Зависност специфичне силе резања од брзине резања.

2.3.1. Модели за процену силе резања

Опште прихваћени и најчешће примењивани модел за израчунавање сила резања је Киензле-ов модел при чему је [10]:

$$F_c = k_c \cdot A$$

$$k_c = k_{clxl} \cdot h^{-z}$$

$$F_c = k_{clxl} \cdot b \cdot h^{1-z}$$

где је:

b , mm - Ширина резања;

h , mm - Дебљина резања;

$1-z$ - Експонент зависан од материјала обрадка;

k_{clxl} - Специфична једначина силе резања код пресека резања;

$A=1 \text{ mm}^2$ - Дебљина одвојене честице.

Сама специфична јединична сила резања је константна, а њен износ је различит за различите материјале и различите компоненте силе (главна, посмична или натражна). Током времена дошло се до сазнања да и многи други фактори утичу на величину силе резања, тако да је Киензле-ова једначина проширена са разним корекцијским факторима. Тако да тај проширени модел има следећи облик :

$$F_c = b * h^{1-m} * k_{clxl} * k_{\gamma_0} * k_v * k_{sch} * k_{VB}$$

где је:

$b, \text{ mm}$ - Ширина резања;

$h, \text{ mm}$ - Дебљина резања;

k_{γ_0} - Коефицијент утицаја предњег угла;

k_v - Коефицијент утицаја брзине;

k_{sch} - Коефицијент утицаја материјала и геометрије алата;

k_{VB} - Коефицијент утицаја века трајања алата.

Проширени облик Киензле-ове једначине такође показује зависност пораста сила резања с порастом трошења алата.

3. Основе обрадивости материјала

3.1. Дефинисање обрадивости

Појам обрадивости представља један од најнеодређенијих, а уједно и најважнијих појмова у подручју технологије обраде одвајањем честица. Оно што се са сигурношћу може тврдити јест да се обрадивост огледа као резултат заједничког деловања следећих фактора процеса резања [3]:

- Материјал и геометрија обрадка;
- Материјал и геометрија алата;
- СХП (средство за хлађење и подмазивање).

Очито је да се за разлику од осталих јасно дефинисаних појмова (разне физичке, механичке, хемијске и друге особине) овде ради о врло комплексној категорији која је одређена са много утицајних фактора [3].

Пошто не постоји потпуна сагласност око дефиниције обрадивости могу се навести неке у литератури најчешће навођене [3]:

- Обрадивост се може узети као мера потешкоћа које настају при обради резањем одређеног материјала;
- Обрадивост представља лакоћу обрађивања датог материјала обрадка;
- Обрадивост је скуп већег броја особина материјала обрадка 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 деломично изразити преко следећа три одвојена аспекта:
 - С аспекта алата – изражава се преко односа количине одвојеног материјала и постојаности алата;
 - С аспекта машине – изражава се силама резања;
 - С аспекта квалитета обраде – изражава се преко квалитета обрађене површине.

Могућа најприкладнија дефиниција обрадивости би могла бити она по којој је најбоље обрадив онај материјал који дозвољава најбрже одношење највеће количине материјала са задовољавајућим квалитетом обрађене површине [3].

Поштујући све до сада у литератури наведене описне дефиниције може се закључити да је обрадивост материјала основна технолошка карактеристика којом се изражава подобност обраде неког материјала, а оцењује се скупом критеријума (или функција) обрадивости " F_0 ", користећи се при томе скупом метода за испитивање обрадивости [4].

Обрадивост материјала не одређује један универзални већ више парцијалних критеријума обрадивости. Обрадивост је боља што је већи број критеријума или функција обрадивости постигло већи позитивни утицај. Могуће је да ти резултати буду потпуно опречни. На пример могуће је да један материјал по критеријуму постојаности оштрице алата има добру обрадивост, али због склоности стварању наслага по критеријуму квалитета обрађене површине има лошу обрадивост [4].

3.2. Критеријуми обрадивости

Обрадивост различитих материјала се оцењује (описује) са четири основна критеријума:

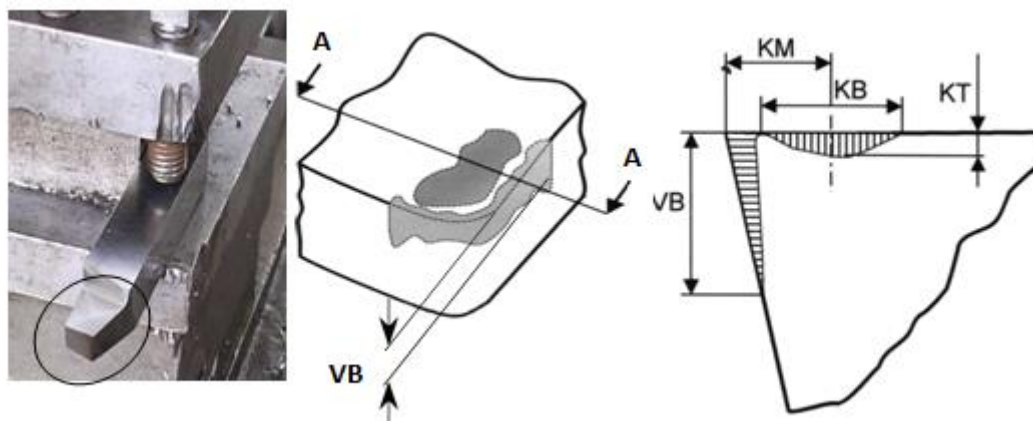
- Постојаност алата;
- Силе резања;
- Квалитета обрађене површине;
- Облик одвојене честице.

Важно је истакнути да наведени критеријуми немају једнаки значај у различитим производним условима и технолошким токовима процеса обраде неког материјала. То значи да је потребно рангирати утицајне факторе за сваки појединачни случај [4].

3.2.1. Постојаност алата

Трошкови производње и време израде зависе од постојаности алата, па се може рећи да је одређени материјал боље обрадив ако је већа постојаност алата. Постојаност алата представља време резања у току којег алат врши резање до свог затупљења тј. до таквог степена истрошености због којег би даља употреба била немогућа. Постојаност алата се најчешће изражава у временским јединицама, иако јединице постојаности могу бити и неки други показатељи (нпр. број обрађених комада).

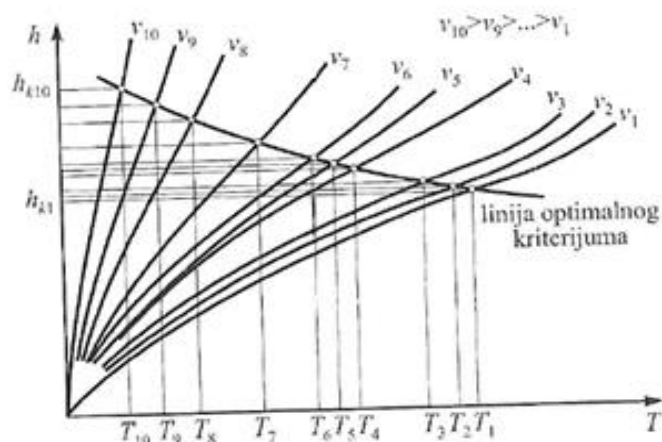
Трошење задње површине алата присутно је увек, док је трошење по предњој површини алата, у великом броју случајева, врло мало, тако да се интересантним контактним површинама сматрају задња површина алата и обрађена површина обрадка [6].



Слика 9. Параметри трошења оштрице резног алата (VB - Истрошеност задње површине алата, KM - Удаљеност од средишта кретања до теоријског врха оштрице, KB - Ширина кратера, KT - Дубина кратера)

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 $0,3\text{mm}$ и када је дубина кратера на предњој површини клина $0,01\text{mm}$.

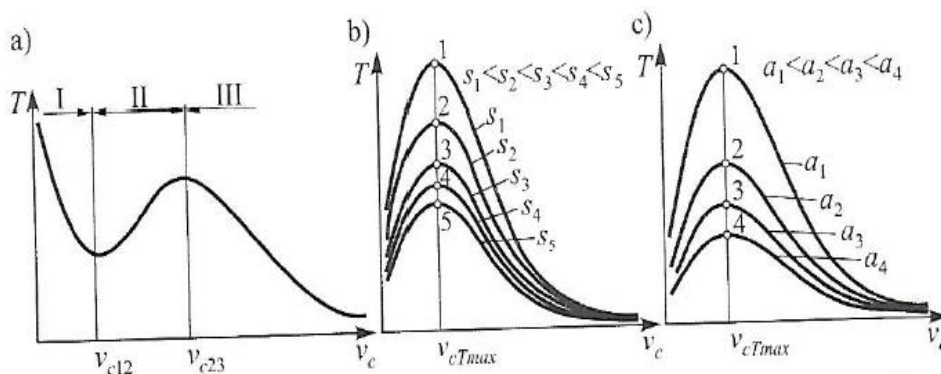
Резни алат је затупљен када ширина појаса хабања достигне вредност оптималног хабања. За алате који се оштре, оптимално хабање је хабање код кога је производ броја оштрења алата и просечне похабаности максималан. Вредност параметара хабања h се мења у одговарајућој превојној тачки криве хабања за сваку брзину резања, па ће се вредност оптималног критеријума хабања мењати по линији оптималног критеријума, као што је и приказано на слици 10. Примена критеријума оптималног хабања је оправдана када се у лабораторијским условима утврђује функција постојаности алата за фини 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.



Слика 10. Оптималне вредности критеријума затупљења алата [2]

Постојаност алата зависи од низа утицајних фактора: режима резања, врсте и геометрије алата, особине обрађиваног материјала, услова хлађења и слично.

На слици 11 је приказан утицај режима резања на постојаност алата и у пракси је најбитније одредити највећу вредност брзине резања v_{c23} .



Слика 11. Утицај режима резања на постојаност алата, а) брзине резања, б) корака, ц) дубине резања [2]

Треба напоменути да у сва три приказана случаја на слици 11 максимална постојаност алата одговара оптималној брзини резања v_{cTmax} . Најчешће коришћени модел за дефинисање постојаности алата је Тејлорова једначина општег облика:

$$v_c * T^m = C_t$$

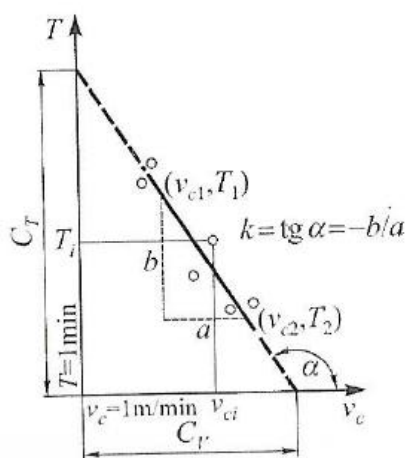
где је:

T - Постојаност алата;

C_t - Брзина резања за постојаност алата од 1 min;

m - Експонент који првенствено зависи од материјала алата.

Линеарна зависност постојаности алата у дуплологаритамском координатном систему приказана је на слици 12.

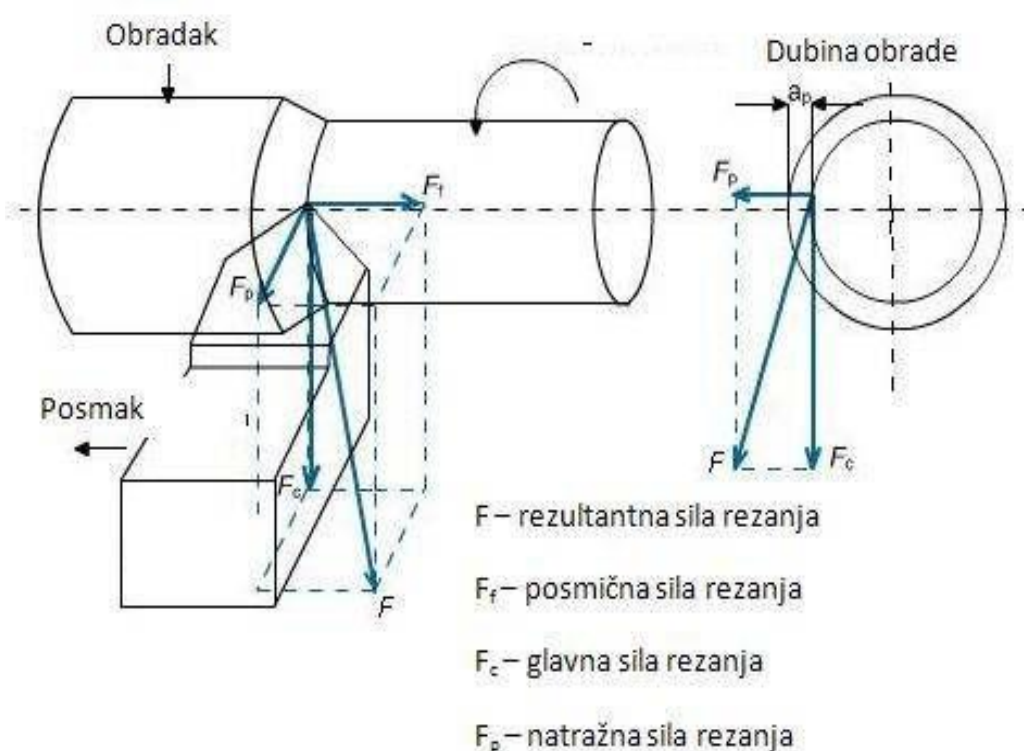


Слика 12. Тејлорова крива зависности постојања алата T од брзине резања у дуплологаритамском координатном систему [2]

3.2.2. Силе резања

Два су разлога зашто се као критеријум обрадивости користе силе резања. Први произлази из дефиниције обрадивости која гласи да је обрадивост 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 потрошњом енергије, боље обрадивим материјалом сматра се онај за чију обраду се потроши мање енергије.

Иако се као критеријум обрадивости може узети и посмична сила резања најчешће се узима главна сила резања јер она омогућава продирање алата у материјал и самим тим одређује потрошњу енергије.



Слика 13. Компонентне силе резања код косог резања [7]

Као што је приказано на слици 13 вектор резултантне силе резања се раставља на три компоненте силе резања[8]:

F_c – Главна сила резања која се поклапа са правцем вектора главне брзине резања;

F_f – Посмична сила резања која делује у правцу посмичноггибања алата;

F_p – Натражна сила резања која делује у смеру вертикалном на F_c и F_f .

Резултантна сила резања рачуна се преко израза:

$$F_R = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}$$

Силама и моментима резања исказују се карактеристике стања и понашања процеса резања. Силе резања су важни параметри процеса обраде. Од величине силе резања зависи снага која је неопходна за остваривање процеса резања. Силе резања утичу на хабање алата, вибрације у процесу резања, а такође утичу и на храпавост обрађене површине.

Познавање отпора резања има значајну улогу у поступку дефинисања обрадивости материјала, хабања резних елемената алата, температуре резања, тачности обраде, димензионисаности елемената машине, погонске снаге машине.

За одређивање функције силе резања користе се две методе [1]:

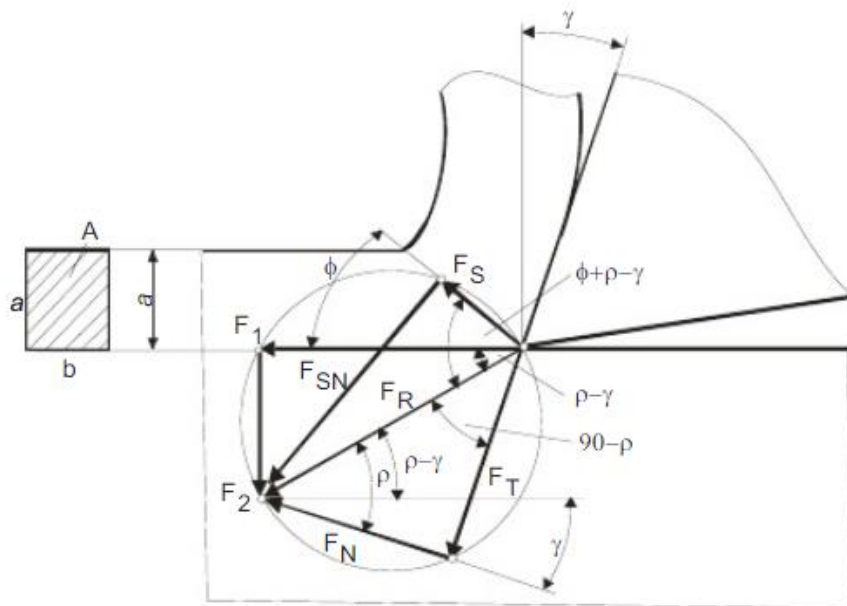
- **Аналитички метод** - полази од локализоване пластичне деформације у зони резања под дејством резног клина. Овај метод се темељи на теорији пластичности, теорији трења и хабања, науци о структури материјала и другима математичко-технолошким дисциплинама. Овим начином добијене једначине су врло сложеног облика, приближне су због низа апроксимација и претпоставки које су неминовне због присуства низа утицајних фактора;
- **Експериментални метод** - аналитички метод одређивања функција силе резања је метод регресије и заснива се на теорији планирања експеримента и теорији регресионе анализе. На основу овог метода могу се, за поједине операције обраде и за познате услове резања добити одговарајуће функције силе резања које могу да послуже и за квалитетне анализе и за практичну употребу.

Анализа сила резања зависи од принципа резања, тј. да ли је у питању ортогонално или косо резање. Ортогонално резање се јавља у случајевима када је главно сечиво алата нормално на правац кретања алата или предмета обраде. Код косог резања, правац кретања алата или предмета обраде и главно сечиво алата заклапају угао различит од 90° .

На слици 14 приказано је разлагање резултујуће силе резања на више компоненти под условом да се прихвате следеће апроксимације [2]:

- Резни алат је потпуно оштар;
- Не постоји трење између материјала предмета обраде;
- Деформација материјала предмета обраде врши се у равни тј. дводимензионалне је природе;
- Резултујући отпор резања који се јавља у материјалу при продирању резног клина алата једнак је по правцу и величини а супротног је смера од силе којом алат делује на предмет обраде.

Прихватањем наведених апроксимација знатно се одступа од реалних услова под којима се процес резања изводи. На пример, процес резања у коме се не појављује трење између материјала предмета обраде и обе површине резног клина алата не постоји а утицај трења на величину силе резања је врло велики.



Слика 14. Општи случај резања [2]

Уз ова ограничења теоријска анализа сила резања у зони резања даје изразе за силу резања у правцу главног кретања и силу резања са којом резни клин притиска предмет обраде у облику:

$$F_1 = \frac{\delta b \tau \cos(\rho - \gamma)}{\sin[\phi \cos(\phi + \rho - \gamma)]}$$

$$F_2 = \frac{\delta b \tau (\rho - \gamma)}{\sin \phi \cos(\phi + \rho - \gamma)}$$

где је:

δ - Дубина резања у mm;

ρ - Угао трења;

τ - Напрезање на померање;

γ - Ширина резања у mm.

На основу ових израза могуће је прорачунати ове две веома битне компоненте резултујуће силе резања. Познавање компоненте резултујуће силе резања односно резултујућег отпора у правцу главног кретања омогућава прорачун највећег дела енергије која се троши при резању.

Познавање компоненте F_2 неопходно је за прорачунавање последица које процес резања оставља у слоју испод обрађене површине као и процеса трења у зони контакта леђне површине резног клина алата и обрађене површине предмета обраде.

Проблем коришћења ових израза своди се на проблем одређивања угла смицања ϕ и угла трења ρ . Међутим, савременим динамометрима и пратећом мерном инструментацијом могу се лако мерити обе компоненте резултујуће силе.

3.2.3. Квалитет обрађене површине

Квалитета обрађене површине одређује се низом геометријских, физичко-механичких и хемијских показатеља који се могу упоређивати код одређивања обрадивости неког материјала. Једна од карактеристика површине којом се оцењује њен квалитет након обраде назива се храпавост. Ниједан процес обраде одвајањем честица не оставља идеално глатку површину него услед контакта, релативног кретања и међусобног оптерећења алата и обрадка у току процеса резања, настаје храпава површина геометријски дефинисана неравнинама [3].

Квалитет обрађене површине зависи од [9]:

- Параметра обраде (посмак, брзина резања);
- Геометрије алата;
- Материјала обрадка и материјала алата;
- Крутости састава машина-алат-обрадак.

Параметри којима се описује квалитет обрађене површине су:

- Ra- средње аритметичко одступање профила од средње линије профила
- Rz- средња висина неравнина
- Rmax- максимална висина неравнина

Брзина резања заједно са брзином помака пресудно утиче на трајање обраде при обради а тиме и на излаз/произведену количину по јединици времена и на постигнути квалитет обрађене површине. Међутим, пошто при растућој брзини расте и температура на оштрици, повећање брзине резања истовремено значи и веће трошење алата, а тиме и скраћење века трајања.

Посмак f (mm) је пут који ће прећи главна оштрица резног алата у смеру посмичноггибања за један окретај обрадка. Вертикалан је на главну брзину резања. Највећим делом зависи од захтева квалитета обрађиване површине односно од фазе обраде. Код грубе обраде на уму морамо имати снагу машине, трошење алата, облик одвојене честице као и полупречника врха алата док код fine обраде једини елемент који нам ограничава посмак јест теоријска храпавост обрађиване површине.

Дубина обраде је величина одвојеног слоја материјала, често одређена размаком између необрађене и обрађиване површине, мерена вертикално на обрађену површину. Другим речима, то је онај слој материјала који морамо одвојити од припремка да би добили захтевану димензију са одговарајућим додацима за обраду. Напредовањем технологије и резних материјала данас је омогућена и обрада у једном пролазу па и ако то није могуће тада се одређује највећа могућа дубина обраде имајући на уму врсту обраде (груба или fina), снагу машине и геометрију алата.ђ

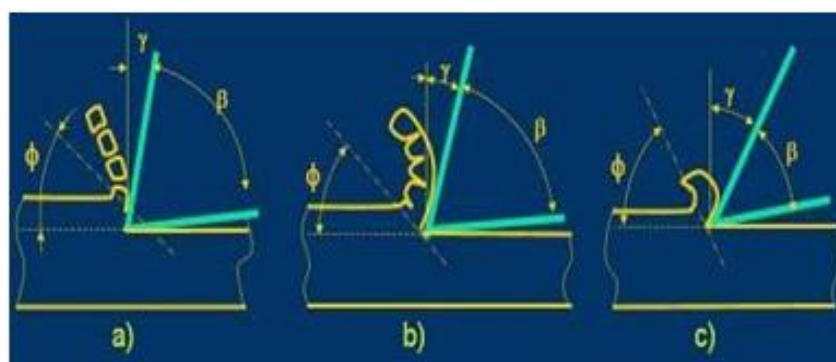
3.2.4. Облик одвојене честице

Обрадивост материјала може се дефинисати и према томе како се одводи одвојена честица приликом обраде тј. према томе дали се приликом обраде ствара непрекидана 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 којег, приликом обраде, настаје испрекидана одвојена честица [8].

Облик одвојене честице не зависи само од материјала обрадка него и од функција и других параметара као што су геометрија алата, параметри обраде итд. Индекс обрадивости добијен на овај начин може се повећати или смањити променом тих параметара. Основни облици одвојене честице су [1]:

- Испрекидана одвојена честица;
- Ламеларна одвојена честица;
- Континуирана одвојена честица.



Слика 15. Основни облици честица струготине [5]

Важно је истакнути да наведени критеријуми немају једнаки значај у различитим производним условима и технолошким токовима процеса обраде неког материјала. То значи да је потребно рангирати утицајне факторе за сваки случај. Важност појединих критеријума обрадивости, дакле није исти, тако да је за обраду одвајањем честица рангирање критеријума по важности следећи [5]:

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

Као што се види, код грубе обраде, постојаност алата и силе резања су међу првим рангираним утицајним факторима зато што се за основни критеријум оптимизације узима максимална производност процеса уз минимални утрошак снаге. Код фине обраде критеријум оптимизације је економичност процеса, дефинисана економичном постојаношћу алата, уз високе захтеве квалитета обрађене површине [4].

Према стандарду ISO 3685, осам облика струготине је добијено и генерисано за различите улазне параметре резања и за другачију хрпаваост обрађене површине материјала. Сви облици струготине су нумерисани према наведеном стандарду како би

била урађена нумеричка анализа применом неуро-фази логики:

- 1.1 Дуга равна струготина;
- 2.3 Дуга замршена струготина;
- 3.1 Равна струготина;
- 4.1 Дуга уврнута струготина;
- 4.2 Кратка струготина;
- 4.3 Кратка замршена струготина;
- 6.2 Неодређена струготина;
- 7 Ситна струготина.

Табела 1. Осам основних облика струготине према стандарду ISO 3685

1 RIBBON CHIPS*	2 TUBULAR CHIPS*	3 SPIRAL CHIPS	4 WASHER-TYPE HELICAL CHIPS*	5 CONICAL HELICAL CHIPS*	6 ARC CHIPS**	7 ELEMENTAL CHIPS	8 NEEDLE CHIPS
1.1 Long	2.1 Long	3.1 Flat	4.1 Long	5.1 Long	6.1 Connected		
1.2 Short	2.2 Short	3.2 Conical	4.2 Short	5.2 Short	6.2 Loose		
1.3 Snarled	2.3 Snarled		4.3 Snarled	5.3 Snarled			

Детаљном анализом закључено је да се струготина може класификовати у десет врста. Табела 2 даје упоредни приказ ових десет врста струготина.

Врсте струготине под бројевима 1), 2) и 3) су неповољне, под бројевима 6), 7) и 8) добре, док су преостале, 4), 5), 9) и 10) задовољавајуће. Дуга глатка струготина јавља се при већим дубинама резања, што значи да струготина има већи пресек, а алат нема ломач струготине. Згужвана струготина настаје при оптималној вредности корака помоћног кретања. Завојна струготина настаје у случајевима коришћења алата са минималним полупречником заобљења врха.

Завојно-цилиндрична струготина настаје при мањим дубинама резања и већим вредностима полупречника заобљења врха алата. Када се у овим условима повећа дубина резања настаје цилиндрична струготина. Обзиром да имају облик дугих завојних трака, задње две анализиране врсте струготина карактерише отежано уклањање са машине алатке. Кратка цилиндрична, спирално цилиндрична и спирална струготина настају из цилиндричне струготине у случајевима обраде са повећаним кораком. Са даљим повећањем корака настају крупно и ситно дробљена струготина. Због велике учесталости дробљења долази до појаве допунског динамичког оптерећења машине алатке, што доводи до крзања сечива, а у одређеним случајевима и до лома алата. Поред тога, због облика струготине отежано је чишћење машине.

Табела 2. Општа класификација облика струготине на врсте и групе

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Облици струготине										
Назив струготине	Дуга глатка	Згужвана	Завојна	Завојна цилиндрична	Цилиндрична	Кратка цилиндрична	Спирална цилиндрична	Спирална	Крупна дробљена	Ситна дробљена
	Неповољна					Добра				
				Задоволјава						

3.3. Методе и функције обрадивости

Скуп метода и функција за истраживање обрадивости може се сврстати у две основне групе [11]:

- Индексне методе (компаративне методе) или методе релативне обрадивости, којима је основни циљ добијање индекса (коефицијента) обрадивости, а којим се упоређују исти критеријуми обрадивости два различита материјала;
- Комплексне методе којима је основни циљ добијање функција обрадивости.

3.3.1. Индексне (компаративне методе)

Основна карактеристика компаративних метода за истраживање обрадивости је релативно оцењивање обрадивости испитиваног материјала у односу на усвојени, референтни материјал. За референтни материјал се најчешће бира материјал са добром обрадивошћу за посматрани критеријум обрадивости.

Индекс или коефицијент обрадивости је величина дефинисана изразом:

$$I_0 = \frac{K_{0IM}}{K_{0EM}}$$

где је:

K_{0IM} - Критеријум обрадивости испитиваног материјала;

K_{0EM} - Критеријум обрадивости еталон материјала.

За еталон материјал користи се конструкцијски материјал који се често користи у технолошкој производној пракси. Значај резултата компаративног испитивања обрадивости је двојако[11]:

- Овом методом и резултатима контролише се ниво и квалитет датог материјала у току или после његове производње, а пре процеса обраде;
- На основи добијене вредности I_0 за неки материјал може се утврдити оптимални режими обраде у датим операцијама технолошког процеса. Тако нпр. када се познаје вредност економичне брзине резања v_{01} и вредност индекса обрадивости I_{01} једног материјала, тада се вредност економичне брзине резања v_{02} другог материјала (пошто знамо I_{01}) добија из једначине:

$$v_{02} = \frac{I_{02}}{I_{01}} v_{01}$$

За добијање индекса обрадивости користе се следеће методе [11]:

- Метода варијабилних брзина резања;
- Метода константног пута резања;
- Метода константних сила резања;
- Метода радиоактивних изотопа;
- Метода попречне обраде;
- Индиректне методе;
- Метода испитивања облика одвојених честица.

3.3.1.1. Метода варијабилних брзина резања

Користи се при уздужној обради одвајањем честица. Код ове методе почетна брзина резања $v_p = v_1$ се постепено повећава после одређених истих дужина обраде. Брзина резања се повећава по законности:

$$v_{i+1} = 1,12v_i, \quad i = 1, 2, 3 \dots$$

све до тренутка затупљења алата, а ту брзину означавамо са $v_k = v_{kIM}$. Вредност индекса обрадивости испитиваног материјала одређује се изразом:

$$I_o = \frac{v_{kIM}}{v_{kEM}}$$

Где је v_{kEM} - брзина резања у тренутку затупљења алата при обради еталон материјала.

Препоручује се да се бирају такви услови испитивања који доводе до затупљења у шестом, седмом и осмом степену [11].

3.3.1.2. Метода константног пута резања

У овој методи, као критеријум за дефинисање индекса обрадивости материјала, користи се она вредност брзине резања v_L при којој наступају први знакови затупљења алата на унапред дефинисаној дужини пута резања. Код ове методе примењује се итеративна експериментална процедура, јер се само помоћу ње може утврдити тражена вредност брзине резања v_k .

Као усвојену дужину резања најчешће узимамо $L = 100 \text{ m}$. Када се утврде вредности брзине резања v_L при обради испитиваног материјала (v_{LIM}) и еталон материјала v_{LEM} можемо израчунати индекс обрадивости према изразу[11]:

$$I_o = \frac{v_{LIM}}{v_{LEM}}$$

3.3.1.3. Метода константних сила резања

Овом методом се постиже висока тачност испитивања обрадивости. Главно обележје ове методе је бушење обрадка при константној аксијалној сили. У испитиваном материјалу потребно је претходно избушити мали отвор који омогућава довођење средства за хлађење и подмазивање и лакше одвођење одвојене честице при процесу испитивања. Константна сила бушења се остварује деловањем тегова на вретено на којем се налази бургија.

Испитивање се изводи при константној брзини резања, а потребни индекс обрадивости I_o добија се односом дубине резања испитиваног материјала L_{kIM} и дубине резања еталон материјала L_{kEM} [11].

$$I_o = \frac{L_{kIM}}{L_{kEM}}$$

3.3.1.4. Метода радиоактивних изотопа

Ова метода се заснива на мерењу трошења алата праћењем промене радиоактивности претходно "бомбардоване" задње површине алата. Осим компаративног испитивања обрадивости ова се метода може користити и као експресни начин за утврђивање функција обрадивости (функција постојаности алата).

Добијена отпорност на трошење измерена на овај начин користи се за рачунање индекса обрадивости на темељу израза:

$$I_0 = \frac{v_{BIM}}{v_{BEM}}$$

где је:

v_{BIM} - Брзина трошења алата при обради испитиваног материјала;

v_{BEM} - Брзина трошења алата при обради еталон материјала.

3.3.1.5. Метода попречне обраде

Ова метода заснива се на линеарној промени брзине резања v од неке почетне вредности v_0 до крајње брзине v_z када наступа затупљење алата. На диску промера 300 – 350 mm претходно се избуши пролазни отвор и такав диск се причврсти у чељустима. Попречна обрада се врши посмичним кретањем алата од центра према рубу константном дубином резања, посмаком и при константном броју обртаја диска.

При помицању алата према рубу се због повећања промена повећава брзина резања чиме трошење алата постаје интензивније. Брзина која се, у процесу испитивања, постиже у тренутку потпуног затупљења алата користи се за рачунање индекса обрадивости [8].

$$I_0 = \frac{v_{zA}}{v_{zB}} = \frac{D_{zA}}{D_{zB}}$$

3.3.1.6. Индиректне методе

Све до сада наведене методе, за доказивање обрадивости, базирале су се на процесу резања док индиректна метода до обрадивости неког материјала долази без процеса резања тј. индиректним путем. Ова метода доводи у везу физичка, механичка, микроструктурна својства са обрадивошћу. Опште је познато да на обрадивост утичу следеће карактеристике материјала [1]:

- **Тврдоћа** - представља механичко својство које представља отпорност материјала према продирању неког другог знатно тврђег тела у његову структуру или површину. Такође се може рећи да је тврдоћа својство материјала

да се без појаве деформација супростави продирању другог тела, међутим она се са машинског аспекта може односити и на отпорност савијању, продирању, хабању или резању. Тврдоћа није својство материјала одређено тачним дефиницијама фундаменталних јединица масе, даљине и времена, па се стога не налази у SI саставу мерних јединица. Вредност тврдоће је резултат дефинисаног поступка мерења;

- **Чврстоћа** - представља механичко својство материјала да пружа отпор деловању силе. Материјали се састоје од једног или више кристала (монокристали, поликристали) или су аморфни. Разарање кристала настаје због прекорачења интератомских или интермолекуларних сила на два начина: одвајањем једнога дела од другог у вертикалној равни на смер деловања силе или смицањем или посмаком, то јест међусобним помаком једног дела кристала према другом у клизним равнима кристала;
- **Жилавост** - је својство које говори о способности апсорбовања механичке енергије, узроковане спољњим, углавном ударним оптерећењем, путем пластичне деформације материјала;
- **Топлотна проводљивост;**
- **Микроструктура;**
- **Хемијски састав** итд.

Најчешће се при томе обрадивост дефинише преко брзине резања v_T , која одговара изабраној вредности постојаности алата. Тако се на бази експерименталних испитивања може успоставити зависност обрадивости v_T неког материјала од тврдоће H_B и границе развлачења R_e према изразу:

$$v_{60} = \frac{C}{H_B^{1.63} * R_e^{1.01}}$$

Где је С - величина зависна од дубине резања, посмака и врсте алатног материјала [11].

3.3.1.7. Метода испитивања облика одвојене честице

Код ове методе као индекс обрадивости користи се коефицијент волумена S_k . Коефицијент волумена добија се односом волумена одвојене честице v_{st} и волумена материјала обрадка који је претворен у одвојену честицу v_m . v_m и који се рачуна према изразу:

$$v_m = \frac{1000 * G}{\rho}$$

Где је:

G - Тежина одвојене честице;

ρ - Густоћа обрадка.

3.3.2. Комплексне методе истраживања обрадивости (функције обрадивости)

Комплексне методе добиле су назив по томе што су засноване на експерименталном истраживању према потпуним вишефакторским плановима експеримента. Без обзира ради ли се о истраживању обрадивости с обзиром на постојаност алата или неки други критеријум метода испитивања је иста: планирање експеримента, извођење експеримента и обрада резултата. Дакле, сврха комплексних метода је добијање математичких модела процеса обраде односно функција обрадивости. Функције обрадивости су математички модели којима се описује узајамна зависност улазних и излазних параметара процеса обраде и представљају апроксимацију стварног облика функције процеса. Употребљавају се у сврху [2]:

- Дефинирања и оптимизације процеса обраде;
- Предвиђања интензитета утицаја појединих утицајних фактора у фази пројектовања и симулирања процеса обраде;
- Сигурног вођења и надзора процеса обраде.

Скуп основних функција обрадивости у обради одвајањем честица чине:

1. Функција постојаности алата, $T = T(x_i)$;
2. Функција сила резања, $F_x = F_x(x_i)$;
3. Функција квалитета обрађене површине $R_x = R_x(x_i)$;
4. Функција облика одвојене честице, $O_c = O_c(x_i)$.

Где је: (x_i) - Параметр и услов обраде.

Методе за добијање функција обрадивости су различити експериментални статистички вишефакторски планови. Крајњи резултат су математички модели којима се описује узајамна зависност улазних и излазних параметара процеса обраде и који представљају апроксимацију стварног, непознатог и аналитичког облика функције процеса.

4. Обрадивост материјала дефинисана преко корелативних зависности параметара процеса обраде

Обрадивост материјала је директно не мерљива величина. Првенствено зависи од структурарних и механичких својстава обрађиваног материјала. Може се сагледати кроз излазне параметре процеса обраде: отпоре и температуру резања, квалитет обрађене површине, тачност обраде, хабања алата итд. Како трошкови обраде великим делом зависе од обрадивости материјала предмета обраде то је потребно обрадивост дефинисати преко познатих корелативних веза између параметара процеса обраде за анализиране материјала.

Обрадивост материјала се најчешће дефинише преко индекса обрадивости који представља однос између посматраног параметра P_i за i -ти материјал параметра за усвојени, референтни материјал P_r [4]:

$$I_i = (P_i / P_r)^{\pm 1}$$

Често се индекс обрадивости изражава процентуално. Експонент $\pm$ зависи од утицаја посматраног параметра на обрадивост. Има вредност +1 ако је утицај позитиван, односно када са порастом тог параметра и обрадивост расте. Експонент је негативан -1 у случају негативног утицаја пораста параметра на обрадивост.

4.1. Обрадивост са аспекта потребне снаге

Обрадивост са становишта отпора резања се најчешће посматра као обрадивост са енергетског аспекта. То је из разлога што отпори резања директно утичу на потрошњу енергије за обраду резањем. Да би се избегли проблеми који се јављају у избору услова у којем ће се поредити два материјала предмета обраде обрадивост се може дефинисати на основу средњег отпора резања добијеног на основу регресионих једначина зависности отпора резања и параметара режима обраде.

Снага потребна за издвајање одговарајуће операције бушења представља збир снага неопходних за савладавање момента резања P_M , аксијалне силе резања P_{Fa} и губитака P_g , односно:

$$P = P_M + P_{Fa} + P_g$$

Снаге потребне за савладавање отпора резања се могу изразити као производни отпора резања и брзина, тј [4]:

$$p = M * w + F_a * V_a + P_g$$

где су:

w - Угаона брзина;

V_a - Брзина помоћног кретања.

Како је брзина помоћног кретања занемарљиво мала у односу на брзину резања то се она може занемарити. На основу овакве анализе индекса обрадивости дефинисан са аспекта потребне снаге за извођење одговарајуће операције се своди на однос момената резања[4]:

$$I_i = \frac{P_r}{P_i} = \frac{M_r w + P_{gr}}{M_i w + P_{gi}} = \frac{M_r}{M_i} + \frac{P_{gr} M_r - P_{gi} M_r}{P_{gi} M_i}$$

Други члан је једначине представља веома малу величину и може се занемарити, тако да се добија индекс обрадивости у облику:

$$I_i = \frac{M_r}{M_i}$$

Познавајући изразе за моменте резања, за материјале предмета обраде који се пореде, дефинисаних у облику једначина:

$$M_i = C_m D^{x_m} S^{y_m} V^{z_m}$$

тешко је изразити поређење обрадивости материјала. Да би се на основу познатих израза дошло до показатеља обрадивости потребно је дефинисати средњу вредност момената резања за обрађену област режима и пречника алата[4].

$$I_{mi} = \frac{M_{r_{sr}}}{M_{i_{sr}}} = \frac{\int \int \int_{SVD} M_{r_{sr}} ds dv dD}{\int \int \int_{SVD} M_{i_{sr}} ds dv dD} = \frac{\frac{S_2 v_2 d_2}{S_1 v_1 D_1} \int \int \int C_{m_r} D^{x_r} S^{y_r} V^{z_r} dD ds dv}{\frac{S_2 v_2 d_2}{S_1 v_1 D_1} \int \int \int C_{m_i} D^{x_i} S^{y_i} V^{z_i} dD ds dv}$$

Поред корелативних зависности отпора резања и режима резања за сваки испитивани материјал код којих се константа и експерименти разликују, често се користи корелативне зависности отпора резања где су експоненти заједнички, а само се константе разликују.

4.2. Обрадивост преко параметара обраде када не постоје корелативне зависности

Индекс обрадивости, као однос између посматраног параметра P_i за i -ти и референтни материјал P_r :

$$I_i = (P_i / P_r)^{\pm 1}$$

није увек могуће изразити преко средњих вредности посматраних параметара како је то у претходном делу објашњено. Првенствено се то односи на одређену област режима обраде из разлога не постојања довољно добрих корелативних веза. Индекс обрадивости се у овом случају може изразити на следеће начине:

- Преко појединачних индекса обрадивости који се односе на тачно дефинисане услове обраде;
- Преко збирног индекса обрадивости који представља средњу вредност претходно израчунатих индекса;
- Преко средње вредности посматраних параметара у одговарајућој области испитиваног услова обраде.

Који од ових начина изражавања индекса обрадивости ће се користити зависи првенствено од врсте података и области услова обраде резањем у којима су добијени подаци за поређење исправних материјала.

4.3. Дефинисање универзалне обрадивости

Обрадивост материјала се дефинише као способност неког материјала да се обрађује економичним методама. Проучавањем обрадивости материјала тежи се ка максималном искоришћењу информација у циљу економичнијег остваривања процеса обраде.

Велики број утицајних фактора усложњава испитивање и проучавање обрадивости, док велики број излазних фактора, који су у сложеним корелативним везама, оптерећује изучавање и анализирање феномена обрадивости. Утицајни фактори на обрадивост материјала при резању су параметри чија промена значајно утиче на лакоћу обраде, а то су:

- Материјал радног предмета (хемијски састав, механичке карактеристике, топлотна проводљивост, технологија израде, термичка обрада, микроструктура материјала, напонско стање и др.);
- Материјал и геометрија алата;
- Обрадни систем (крутост и динамичка стабилност, тачност и радни опсег);
- Средство за хлађење и подмазивање (концентрација, састав, начин подмазивања, систем хлађења, проток);
- Струготина (облик, дужина, одвођење,);
- Врста обраде;
- Режији обраде и остали услови обраде.

У оквиру овог поглавља биће приказан развој новог модела за дефинисање универзалне обрадивости путем вектора обрадивости. За дефинисање вектора обрадивости користи се правоугли координатни систем чије три осе представљају

осе одабраних критеријума обрадивости на основу којих се формира универзална обрадивост. На осе координатног система се наносе реалне вредности параметра који описује дати критеријум (вредност отпора резања, сила трења, ширина трага хабања алата, температура резања, параметар храпавости обрађене површине, итд.). Сви ови параметри су приказани у табели 3.

Табела 3. Односи примарног аспекта и критеријума обрадивости

Критеријум / Генерални аспект	Цена обраде	Хабање алата	Квалитет обраде
Главни отпор резања	I	-	-
Интензитет хабања алата	II	I	-
Храпавост обрађене површине	III	-	I
Триболошке карактеристике	-	II	-
Температура резања	-	III	II
Тачност обраде	-	-	III

За сваки дефинисани критеријум при дефинисању обрадивости постоје критеријуми нижег нивоа који га описује. Постоје два приступа при дефинисању обрадивости помоћу вектора обрадивости.

Код првог приступа који је универзалнији на осе координатног система се наносе реалне вредности параметара који описује тај критеријум, док се у другом приступу на осе координатног система наносе индексне вредности обрадивости. Свака оса координатног система има одговарајућу јединични вектор чија дужина одговара јединици којом се мери параметар, односно проценту индекса обрадивости.

Универзална обрадивост материјала као интегрална метода директно је везана за коришћење наведених параметара.

Међусобна корелација изабраних критеријума за дефинисање обрадивости може у извесној мери да наруши независност оса координатног система. Додатни проблем представља разнородност величина које се наносе на осе координатног система. Овај проблем се превазилази дефиницијом вектора обрадивости и моделом анализе обрадивости, где се присутна разнородност у изразу за универзалну обрадивост материјала. На осе се могу наносити само мерљиве величине, односно величине које се могу изразити неком јединицом [14].

Ако се избегну унапред поменута три критеријума, може се дефинисати вектор обрадивости неког материјала. На осе се једноставно наносе вредности отпора резања, интензитет хабања и храпавости површине. На основу скаларне вредности и одговарајућих једначина вектора формирају се вектори критеријума, који леже на припадајућим осама:

$$\overrightarrow{K_i^{KO}} = \overrightarrow{K_i^{KO}} * K_i$$

5. Експериментални део

Експериментална испитивања обраде глодањем реализована су у реалним условима. Услови при којима је реализован експеримент односе се на материјал обратка, машину алатку, резни алат и параметре режима обраде. Експериментална испитивања вршена су из два дела.

У првом делу експерименталног испитивања су вршена испитивања одцтупања отпора резања од средње вредности при обради стругањем предмета обраде од следећих материјала: Č1221, Č7422, Č7430 и Č3990 и пречника алата 10 mm, на универзалном стругу Д-480, Првомајска, снаге 10 KW, без присуства средстава за хлађење и подмазивање. Добијени резултати су приказани у табелама 5 и 6.

У другом делу експерименталног испитивања циљ је био да се примене универзалне методе обраде материјала. У овом делу експеримента вршена су испитивања обрадивости са аспекта хабања алата. Приликом испитивања коришћени су стругарски ножеви од брзорезног челика Č9780 HSS.E и ножеви са плочицом од тврдог метала без превлаке. Криве хабања и индекси обрадивости при обради тешкообрадивог челика су приказане на сликама од 18 до 22 а вредности хабања и постојаности у табели 7.

5.1. Обрадивост испитиваних материјала на основу отпора резања

Индекс обрадивости се може израчунати преко интегралног показатеља који узима у обзир све измерене вредности отпора резања за читаву испитивану област параметара режима обраде. Индекс обрадивости у овом случају представља однос између вредности отпора резања референтног и испитиваног материјала, односно:

$$Ii_{pr} = \frac{F_{i_{ref}}}{F_i}$$

$$Ii_{pr} = \frac{F_{i_{ref}}}{F_i} * 100 \%$$

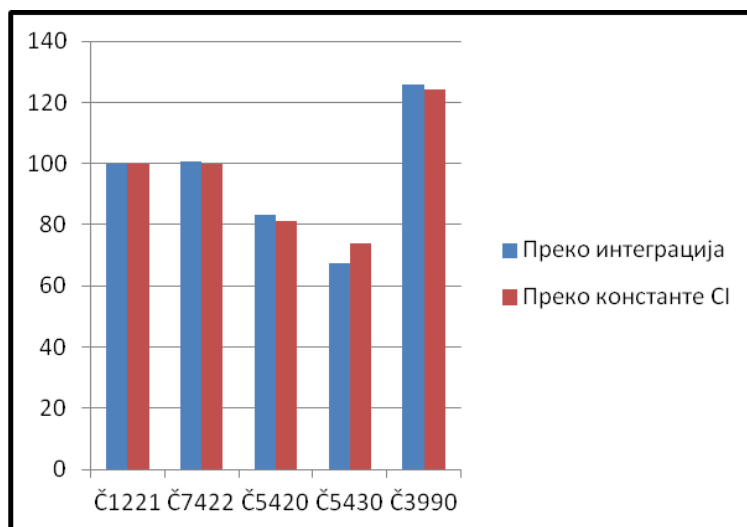
У табели 4. су дате упоредне вредности индекса обрадивости добијене на основу два анализирана начина. До индекса обрадивости се може доћи на било која од ова два начина. Очигледно је да константа у изразу за отпор резања може представљати карактеристику материјала, јер се њеним коришћењем лако долази до показатеља обрадивости преко отпора резања.

Табела 4. Индекси обрадивости [4]

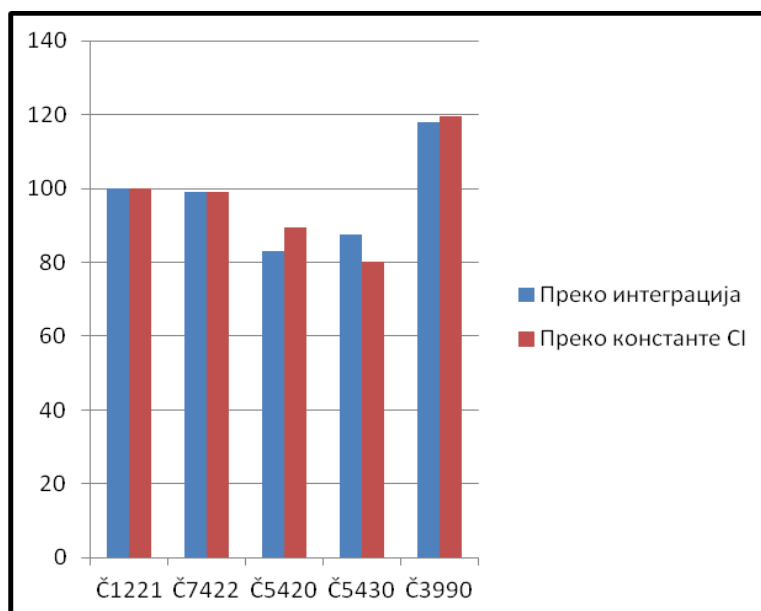
Материјал предмета обраде	Индек обрадивости %	
	Преко силе резања	Преко момента резања

	I_{pr}	I_c	I_{pr}	I_c
Č1221	100	100	100	100
Č7422	100,61	99,68	98,9	99,1
Č4520	83,2	81,03	83,1	89,43
Č5430	67,32	73,88	87,54	80,29
Č3990	126	124,36	117,87	119,56

На дијаграмима 1 и 2 су приказани графички односи претходно добијених индекса обрадивости.



Дијаграм 1. Индекс обрадивости преко аксијалне силе резања

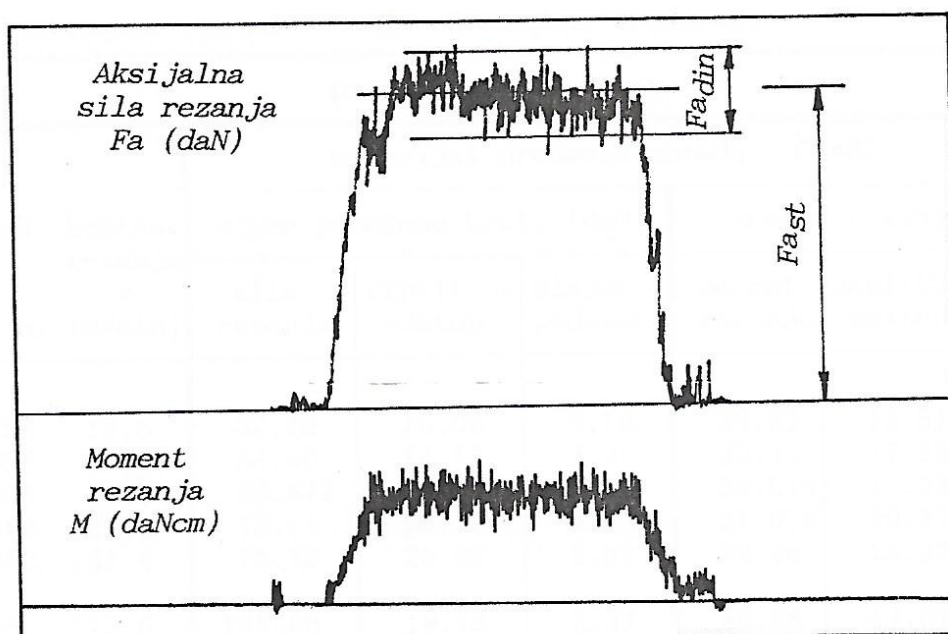


Дијаграм 2. Индекс обрадивости преко момента резања

5.2. Одступање отпора резања од средње вредности

Анализирајући сигнал отпора резања може се закључити да се променом параметара режима обраде као и при обради различитих материјала предмета обраде постоји битна разлика у облику снимљеног сигнала. На слици 17 приказан је облик сигнала отпора резања са статичком и динамичком компонентом.

Користећи одговарајуће рачунарске програме за обраду снимљеног сигнала отпора резања израчунаване су средње брзине отпора резања F_i и њихове амплитуде осцилација око средње вредности AF_i као и дисперзија DF_i података снимљеног сигнала[4].



Слика 17. Статичка и динамичка компонента отпора резања

У табелама 5 и 6 дати су резултати овакве обраде сигнала. Може се закључити да са порастом брзине резања и корака углавном долази до пораста амплитуде отпора резања као и дисперзије снимљеног сигнала.

Табела 5. Одступање отпора резања од средње вредности [4]

Пречник алата 10 mm								
Редни број мерења	Корак s (mm/o)	Брзина резања v (m/min)	Материјал предмета обраде Č7422					
			Отпор помоћном крет. daN			Момент резања daNcm		
			Сила резања	Ампл. одступ.	Диспер. подат.	Момент резања	Ампл. одступ.	Диспер. подат.
1	0,056	12,6	87,79	15,06	3,19	36,25	19,51	3,92
2	0,056	15,7	84,40	15,56	3,92	33,75	17,65	4,36
3	0,056	19,8	83,877	25,06	4,49	32,514	19,38	4,27

4	0,056	25,1	78,64	26,37	4,73	31,075	20,37	4,67
5	0,056	31,4	75,72	23,82	5,82	28,86	24,32	5,65
6	0,08	12,6	108,60	19,75	3,47	46,56	14,81	3,47
7	0,08	15,7	107,52	22,96	4,77	46,35	20,09	4,06
8	0,08	19,8	103,82	23,33	4,65	42,876	23,33	4,43
9	0,08	25,1	93,68	24,24	5,23	38,16	24,69	4,89
10	0,08	31,4	90,65	26,32	5,44	37,29	26,91	4,93
11	0,112	12,6	139,862	20,49	4,31	59,46	23,33	4,12
12	0,112	15,7	135,19	25,57	4,62	57,88	26,91	5,02
13	0,112	19,8	123,978	21,11	4,40	56,25	28,63	5,52
14	0,112	25,1	118,40	18,04	4,20	52,49	27,59	5,97
15	0,112	31,4	115,36	20,86	4,53	50,70	27,65	5,44
16	0,16	12,6	187,58	24,32	5,31	77,35	26,05	5,68
17	0,16	15,7	178,022	24,07	5,84	75,92	22,13	5,72
18	0,16	19,8	164,39	20,74	5,57	72,53	26,54	5,47
19	0,16	25,1	157,097	26,37	5,65	67,813	26,35	5,58
20	0,16	31,4	154,61	25,31	5,98	65,50	28,85	5,87
21	0,22	12,6	236,556	21,11	5,11	98,23	26,79	5,99
22	0,22	15,7	223,102	24,77	5,45	94,137	28,64	6,01
23	0,22	19,8	209,288	25,43	5,71	88,07	33,29	7,21
24	0,22	25,1	201,17	28,13	5,88	83,11	35,23	7,44
25	0,22	31,4	193,36	29,25	6,12	80,20	36,14	8,19

Табела 6. Одступање отпора резања од средње вредности[4]

Пречник алата 10 mm, корак S = 0,112 mm/O								
Редни број мерења	Корак s (mm/o)	Брзина резања v (m/min)	Отпор помоћном крет. daN			Момент резања daNcm		
			Сила резања	Ампл. одступ.	Диспер. подат.	Момент резања	Ампл. одступ.	Диспер. подат.
1	Č1221	12,6	139,02	14,69	3,54	56,29	17,28	3,36
2		15,7	131,759	18,148	3,995	55,66	18,756	4,569
3		19,8	126,06	21,112	4,647	52,43	20,247	4,477
4		25,1	121,77	24,324	4,51	49,72	19,877	3,624
5		31,4	119,07	25,93	5,226	49,58	19,877	3,834
1	Č7422	12,6	139,07	20,49	4,31	59,46	23,33	4,12
2		15,7	135,19	25,57	4,62	57,88	26,91	5,02
3		19,8	123,978	21,11	4,40	56,25	28,63	5,52
4		25,1	118,40	18,04	4,20	52,49	27,59	5,97
5		31,4	115,36	20,86	4,53	50,70	27,65	5,44
1	Č5420	12,6	165,63	23,21	4,16	63,125	19,013	4,05
2		15,7	160,94	24,322	4,763	64,687	20,988	4,566
3		19,8	159,375	31,976	6,616	64,06	27,285	5,51

4		25,1	158,125	19,013	3,757	63,437	21,235	4,53
5		31,4	156,875	16,296	3,393	62,75	21,729	5,096
1	Č5430	12,6	212,219	17,28	3,425	62,69	32,964	6,544
2		15,7	205,95	23,457	4,95	61,65	33,211	6,866
3		19,8	203,97	41,853	8,092	61,55	38,766	8,682
4		25,1	188,15	64,57	15,493	58,71	40,865	9,657
5		31,4	199,51	79,26	20,098	59,84	52,96	10,25
1	Č3990	12,6	109,88	11,85	2,534	48,34	16,05	3,305
2		15,7	106,67	14,815	2,972	45,33	13,334	2,674
3		19,8	106,25	20,864	4,041	45,41	14,815	3,612
4		25,1	104,3	24,94	4,411	44,2	15,93	3,43
5		31,4	99,02	15,803	3,38	41,93	14,94	3,139

5.3. Универзална обрадивост

Универзална обрадивост материјала при обради резањем, као технолошка особина материјала, представља способност или погодност материјала да се лакше или теже обрађује резањем у уском погледу улазних параметара, као што су карактеристике резног алата, параметри обраде резањем, врсте SHP-а, итд. Такође, обрадивост материјала је способност материјала да при преради резањем добијају захтеван квалитет обраде и високу ефикасност, ефективност и економичност процеса уз што мање нарушавања ентропијског аспекта обраде процеса и што мање нарушавања употребљивости средстава рада.

Како је немогуће једнозначно дефинисати обрадивост материјала, приступа се развоју одговарајућих модела, који се више или мање дефинишу као специјални модели за одређени скуп критеријума или за одређену групу материјала. Одређене институције развијају моделе за дефинисање обрадивости које се користе као интерни или национални модели везани за националне базе података. При сваком приступу одређивању обрадивости, главни параметри се узимају као почетни, било да су изабрани из одговарајућих базних података или изабрани из одређеног сета режима и услова обраде који су карактеристични за дате услове. Познавање обрадивости материјала има водећу важност у следећим областима:

- Производњи материјала и пријемној контроли - праћењем квалитета материјала преко функције обрадивости постиже се бољи услови за његову "лакоћу" обраде;
- Класичном и аутоматском пројектовању технологија обраде који је немогуће успешно решити без познавања функције обрадивости;
- Техноекономској оптимизацији процеса обраде;
- Испитивање нових материјала који се користе у изради комплексних делова и производа, нових типова SHP, нових резних алата са новим резним геометријама састављеним од нових алатних материјала, испитивање превлака итд.;
- Конструкције нових алата, резних плочица и превлака на резним алатима;
- Испитивање триболошких карактеристика средстава за хлађење и подмазивање.

Најповољнији облик експертног система би био онај који врши оптимизацију и корекцију параметара током обраде. За такав експертни систем потребно је располагати одговарајућим сензорима и осигурати могућност повратне везе у циљу корекције улазних параметара обраде процеса.

5.3.1. Обрадивост тешкообрадивих материјала

Интензиван развој аутомобилске и авио индустрије, ракетне технике, енергетике и процесне технике, условио је развој нових материјала који својим својствима могу да задовоље специфичне услове у експлоатацији. То су високолегирани и нерђајући ватроотпорни челици, легирани алатни челици, специјалне легуре на бази алуминијума, никла и кобалта, вишеслојни и керамички материјали. Већина ових материјала има повишене механичке карактеристике и специфична физичка својства која доводе до снижавања њихових технолошких својстава са становишта обликовања и обраде резањем[13].

Обрадивост резањем тешкообрадивих материјала првенствено зависи од њиховог хемијског састава који уз помоћ одговарајуће термичке обраде, обезбеђује њихова експлоатацијска својства (ватроотпорност, корозиону отпорност при високим температурама, високу чврстоћу и др.). Значи, ови материјали нису само тешкообрадиви при обради резањем него у свим врстама обраде.

Материјали са већом затезном чврстоћом имају нижу обрадивост од материјала са већом чврстоћом, јер је много теже раскинути међуатомске и међукристалне везе унутар структуре обрадка приликом продирања алата у току обраде. Зависност затезне чврстоће и обрадивости може се описати одговарајућом монотонно растућом функцијом. Већина материјала са малом тврдоћом и материјала са великом тврдоћом имају мању обрадивост од материјала којима се тврдоћа креће у границама од 35 до 45 HRC

Легирањем челика се постижу различите структуре, као што су ситнозрнаста или крупнозрнаста. Ситнозрнаста структура има боље механичке особине као што су затезна чврстоћа и жилавост. Глобално посматрајући, материјали са ситнозрнастом структуром су у извесној мери неповољнији за обраду резањем, али треба имати у виду да обрада материјала са ситнозрнастом структуром даје бољи квалитет обрађене површине.

5.3.2. Хабање алата и обрадивост са аспекта хабања алата

Постојаност алата је један од основних показатеља за дефинисање индекса обрадивости материјала. Приликом испитивања групе тешкообрадивих челика могу се формирати криве хабања алата при чему се прати ширина појаса хабања на леђној површини алата при раду са стругарским ножевима од брзорезног челика Š9780 HSS.E и ножевима са плочицом од тврдог метала без превлаке. Криве хабања алата су апроксимирани полиномом трећег степена[13]:

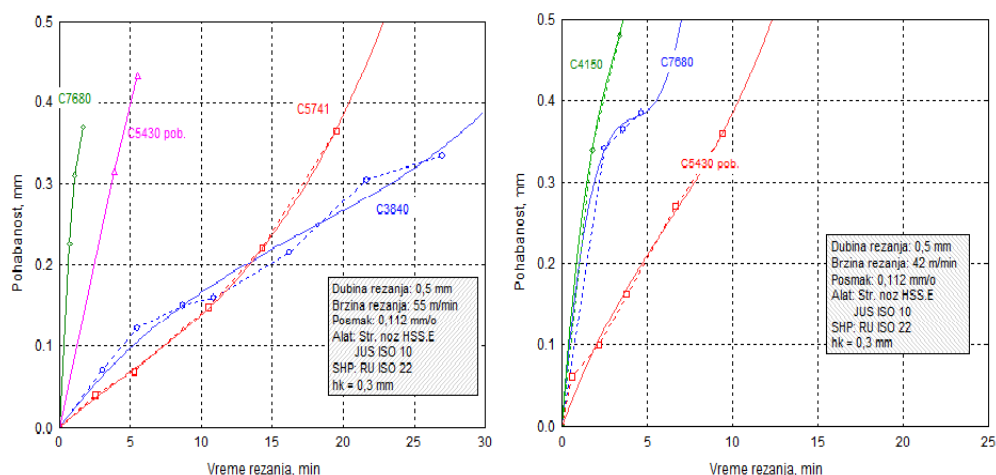
$$h = C_1 T + C_2 T^2 + C_3 T^3, \text{ односно } h - h_p = A_1(T - T_p) + A_2(T - T_p)^3$$

где су h_p и T_p вредности хабања и постојаности у превојној тачки криве хабања.

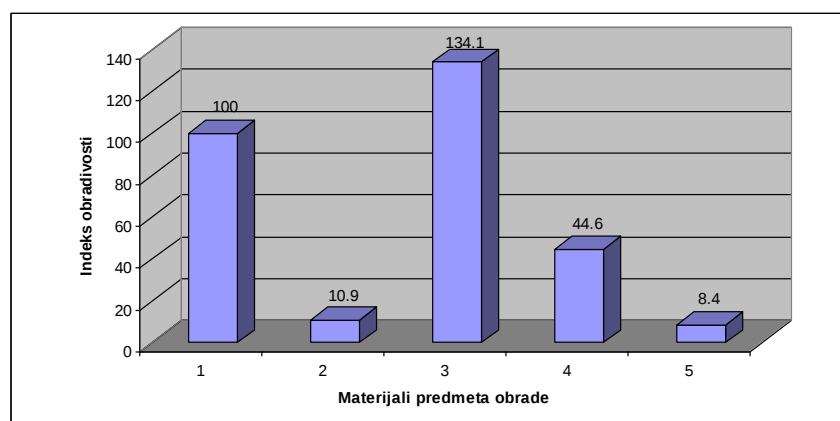
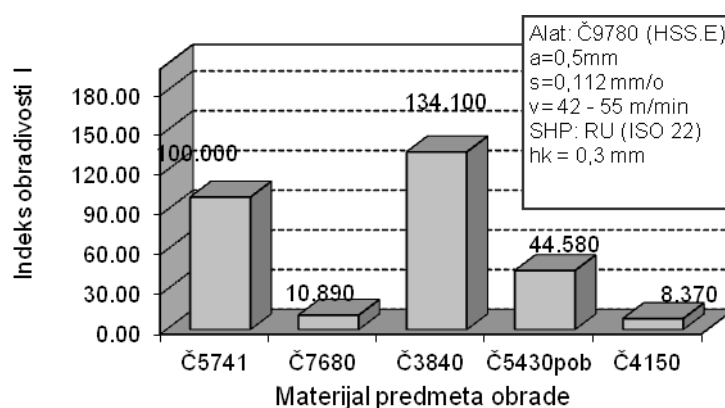
За криве хабања алата приказане на сликама 18 и 19 дефинисане су вредности постојаности алата за усвојени критеријум похабаности алата $h_k = 0,3 \text{ mm}$ за алат од брзорезног челика.

Табела 7. Вредности хабања и постојаности [13]

merilo		utop		hss		pob		OCR	
T	h	T	h	T	h	T	h	T	h
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.018	.060	2.565	.050	2.500	.280	.573	.060	1.770	.340
5.458	.110	5.280	.090	3.550	.355	2.168	.110	3.350	.480
8.650	.140	10.510	.148	4.603	.385	3.790	.152		
10.860	.160	14.300	.210			6.670	.270		
16.200	.215	19.480	.345			9.440	.380		
21.620	.285								
26.960	.335								

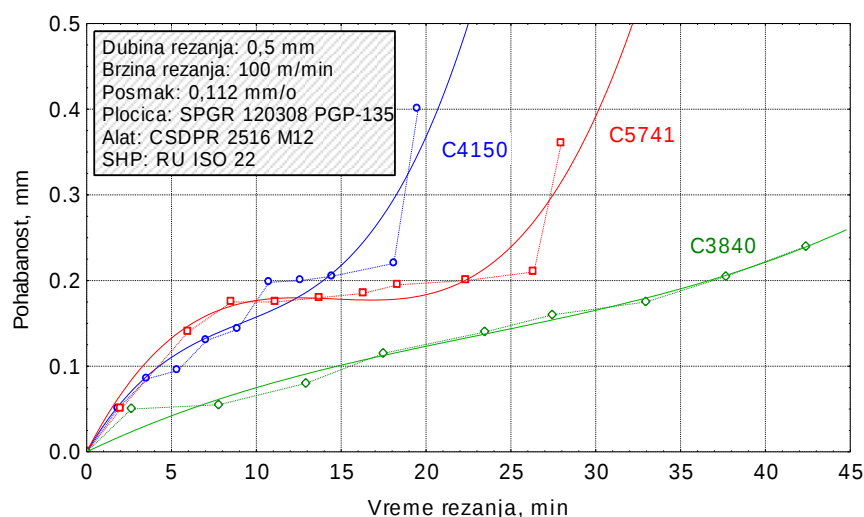


Слика 18. Пример експерименталних кривих хабања алата добијених при обради челика са алатом од HSS.E [13]



Слика 19. Индекси обрадивости дефинисани преко постојаности алата Т за усвојени критеријум хабања алата $h_k = 0,3\text{ mm}$ при обради групе челика са алатом од HSS.E [13]

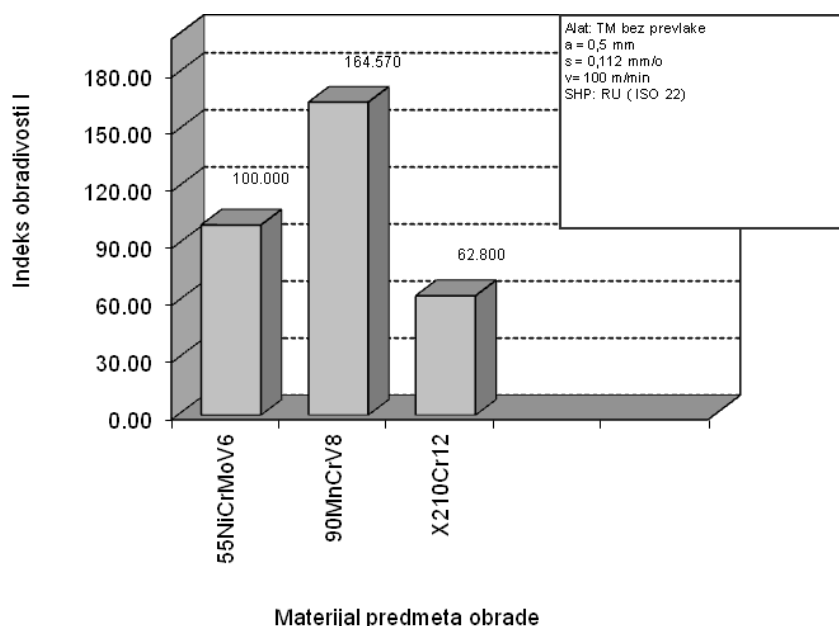
Усвојени критеријуми похабаности алата при обради испитиване групе челика са алатом од тврдог метала без превлаке је $h_k = 0,2\text{ mm}$. Резултати испитивања су приказани на сликама 20 и 21.



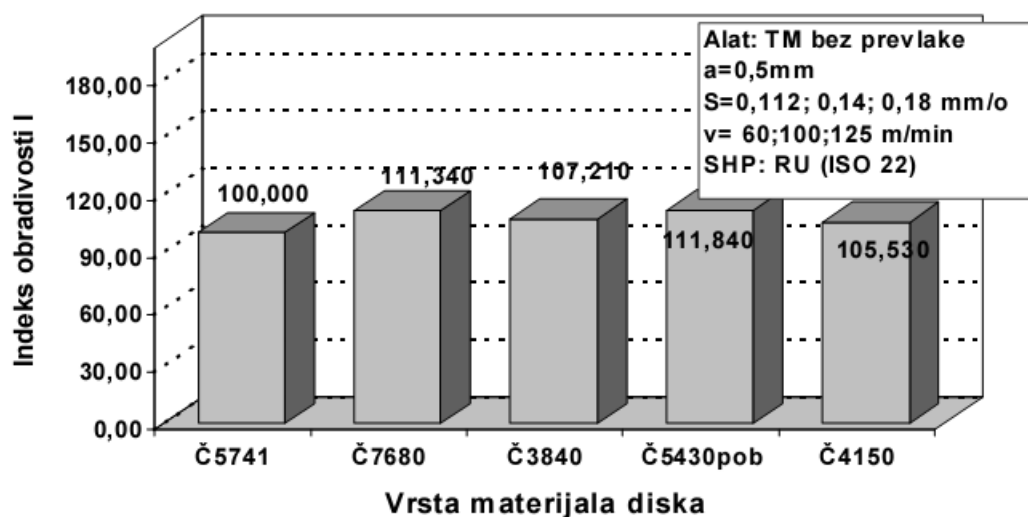
Слика 20. Примери експерименталних кривих хабања алата добијених при обради групе челика са алатом од ТМ без превлаке [13]

Приказани хистограми указују на чињеницу да у свим случајевима испитивања

најлошију обрадивост са економског аспекта показује Č4150, а најбољу обрадивост челик Č3840.



Слика 21. Индекси обрадивости дефинисани преко постојаности алата Т за усвојени критеријум хабања алата $h_k=0,2 \text{ mm}$ при обради групе челика са алатом од ТМ[13]



Слика 22. Хистограмски прикази индекса обрадивости за групу тешкообрадивих челика[13]

На слици 22 је дат хистограмски приказ индекса обрадивости за групу тешкообрадивих материјала. Приликом испитивања коришћени су алати од брзорезног челика Č9780 и алати од тврдог метала без превлаке. Као референтни материјал за поменућу групу изабран је челик Č5741. Анализом хистограма са индексима обрадивости, може се закључити да обрадивост материјала зависи од врсте алата али и од многих параметара (брзина обраде, корак, СХП, итд.)

6. Закључак

На основу рада може се закључити да обрадивост материјала не одређује један универзални већ више парцијалних критеријума обрадивости. Обрадивост је боља што је већи број критеријума и функција обрадивости постигао већи позитивни утицај.

На основу анализе резултата може се закључити да постоји веома висок коефицијент корелативне зависности између параметара обраде. Такође, може се закључити да између отпора резања у ширем спектру режима обраде и хабања алата постоји висока корелација.

Може се закључити да при обради различитих материјала хабање резног алата и његова постојаност представљају један од основних показатеља индекса обрадивости материјала.

Будућа истраживања, у подручју моделирања процеса обраде, се могу поделити у неколико различитих праваца: имплементација у различитим врстама обраде резањем, испитивање већег броја излазних перформанси обраде и њихово поређење са експерименталним испитивањима, као и превазилажење проблема који се јављају услед претходно поменутих ограничења.

Литература

- [1] Ивковић Б. Теорија резања - Основи механике, термодинамике, трибологије и економије процеса резања;
- [2] Глобочки Лакић Г. Обрада метала резањем - теорија, моделирање и симулација, Машински факултет Бања Лука, 2010;
- [3] Недић Б. Динамика процеса резања, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, 2006;
- [4] Недић Б. Управљање процесом обраде отвора бушењем, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, 1991;
- [5] Stephenson A. Metal cutting theory and practice, Second edition, CRC Press, Boca Raton, 2006;
- [6] Санић Ј., Калајдић М., Ковачевић Р. Мерна техника у технологији обраде метала резањем, Грађевинска књига, Београд 1983;
- [7] Шкорић С. Истраживање погодности обраде ортогоналним округлим глодањем, Загреб 2007;
- [8] Ashby F. Materials Selection in Mechanical Design, 3rd Edition; Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005;
- [10] Лазић М., Недић Б. Технологија обраде метала резањем, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац 2007;<http://www.tehnickasd.edu.rs/masinstvo/MFKG-OBRADA-METALA-REZANJEM.pdf> (Посећено 11.11.2018)
- [11] Николић Д., Станић Ј., Гајовић В. Машинска обрада III приручник, Машински факултет у Београду, Београд 1992;
- [12] <http://automatizacija1.etf.rs/poglavlja/Rezanje%201.htm> (Посећено 16.11.2018)
- [13] Недић Б., Глобочки Лакић Г. Хабање алата и обрадивост тешко обрадивих материјала.
- [14] Средојевић Б., Глобочки Лакић Г., Недић Б., Чича Ђ. Нови приступи дефинисању обрадивости материјала при резању.