

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Војна академија Универзитета одбране у Београду



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Наоружање

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 534/2011

Никола М. Поповић

Дефинисање и испитивање обрадивости

Дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Богдан Недић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Основне студије: **Војноиндустријско инжењерство**

Студијско подручје (усмерење): **Наоружање**

Име и презиме: **Никола Поповић**

Број индекса: **534/2011**

ПРИЈАВА ДИПЛОМСКОГ РАДА

Тема рада: **МЕТОДЕ ИСПИТИВАЊА ОБРАДИВОСТИ**

Задатак: У оквиру дипломског рада кандидат треба да изврши прикупљање података и опише начине дефинисања обрадивости материјала и методе испитивања обрадивости. Потребно је дефинисати индексне методе испитивања, испитивања са и без резања и комплексне методе. На крају рада описати начин дефинисања универзалне обрадивости материјала. Приликом израде рада потребно је да кандидат изврши претраживање информација о обрадивости на интернету.

Дипломски рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања,
2. Принципи обраде метала резањем
3. Појам и критеријуми за дефинисање обрадивости,
4. Методе дефинисања обрадивости,
5. Закључци,
6. Литература.

Ментор:

Др Богдан Недић, редовни професор

Крагујевац, 10.09.2019.

Резиме

Овај рад има за циљ да дефинише обрадивости материјала предмета обраде, као и најважније критеријуме који у већој или мањој мери на њу утичу, попут: постојаности алата, квалитета обрађене површине, температуре резања итд. Поред тога, у раду су описане и различите методе преко којих се утврђује обрадивости материјала, као што су метода универзалне обрадивости, компаративна метода или методе испитивања обрадивости материјала при обради стругањем.

Кључне речи: обрада метала резањем, испитивање обрадивости, обрадивост материјала...

Abstract

The goal of this paper is to define machinability of materials of the machined part, as well as the most important criterions that, more or less, affect it, for instance: tool life, surface finish, cutting temperature etc. Additionally, this paper contains descriptions of different methods through which machinability of materials is determined, such as: universal machinability method, machinability rating tests or methods of testing machinability of materials machined by turning.

Кључне речи: metal cutting, machinability of materials, machinability tests...

Садржај

1. УВОД	5
2. ПРИНЦИПИ ОБРАДЕ МЕТАЛА РЕЗАЊЕМ.....	6
2. 1. Механизам образовања струготине.....	6
2.1.1. Формирање наслага на резном клину	8
2.1.2. Модел ортогоналног резања	10
3. ОСНОВЕ ОБРАДИВОСТИ МАТЕРИЈАЛА	11
3. 1. Појам обрадивости.....	11
3. 2. Критеријуми обрадивости.....	12
3.2.1. Силе резања	14
3.2.2. Температура резања.....	17
3.2.3. Постојаност алата	23
3.2.4. Квалитет обрађене површине	31
3.2.5. Врсте и облици одвојене честице.....	33
4. МЕТОДЕ ИСПИТИВАЊА ОБРАДИВОСТИ.....	37
4. 1. Индексне методе испитивања обрадивости	38
4.2. Испитивања обрадивости материјала без извођења резања	41
4.2.1. Испитивање хемијског састава предмета обраде.....	42
4.2.2. Испитивање микроструктуре предмета обраде	42
4.2.3. Испитивање физичких својстава предмета обраде.....	43
4.3. Испитивања обрадивости материјала са извођењем резања	45
4.3.1. Метода константне силе.....	45
4.3.2. Метода интензивног стругања.....	46
4.3.3. Метода хабања деградираног алата	47
4.3.4. Метода наглог хабања алата	48
4.3.5. Метода хабања алата од брзорезног челика.....	49
4.3.6. Метода обраде конусног обрадка.....	50
4.3.7. Метода променљивог степена резања.....	50
4.3.8. Метода лимитираног распона брзина резања	51
4.4. Комбиновање параметара обраде.....	52
4.5. Комплексна метода испитивања обрадивости	54
4.6. Универзална обрадивост	55
5. ЗАКЉУЧАК	65
ЛИТЕРАТУРА.....	66

1. УВОД

Обрада метала резањем се најбоље може дефинисати као индустријски процес у коме се предмет обраде обликује уклањањем нежељеног материјала. Процеси обраде метала резањем се такође могу применити и на неметалне предмете обраде попут полимера, дрвета и керамике. Када се говори о овом начину обраде, обрада метала резањем представља најраспрострањенији и најчешће коришћени вид производних технологија у металоправаљачкој индустрији данас. Разлог због чега је ова обрада толико заступљена се може наћи у чињеници да се њиховом применом, као готови производи, могу добити врло сложени делови, који поред тога имају врло високу тачност израде и захтевани квалитет. Уз то не треба заборавити да је и време израде релативно кратко.

Обрада скидањем струготине представља скуп физичких, техничких и економских активности чије изучавање је повезано са широким скупом теоријских и практичних сазнања из широког скупа техничких наука као што су наука о металима, термодинамика, динамика, хидраулика, електротехника, хемија итд.

Примарни циљ овог рада јесте приказ и детаљнији опис појма обрадивости, као и метода помоћу којих се може утврдити за неки материјал предмета обраде.

У другом поглављу овог рада описани су принципи преко којих се одвија обрада метала резањем. Пре свега описан је механизам настајања струготине, тј. начин на који се врши деформација материјала, стварање и одношење струготине и појаве у зони резања, као и формирање наслага на резном клину у току резања.

У трећем поглављу овог рада представљен је појам обрадивости заједно са критеријумима за њено одређивање. Ови критеријуми су детаљно описани, као и начин на који се обрадивост материјала мења са променом вредности ових критеријума.

Четврто поглавље овог рада бави се методама за одређивање индекса обрадивости, описане су методе за одређивање обрадивости материјала са извођењем процеса обраде резањем и методе за одређивање без извођења резања. У оквиру овог поглавља описан је начин дефинисања и одређивања универзалне обрадивости.

Последње поглавље садржи закључне напомене везане за целокупну тематику овог рада. На крају рада дат је преглед коришћене литературе.

2. ПРИНЦИПИ ОБРАДЕ МЕТАЛА РЕЗАЊЕМ

Процес резања у свим врстама обраде метала резањем се остварује у трибомеханичком систему чију структуру чини резни клин алата, предмет обраде и средство за хлађење и подмазивање.

Трибомеханички систем представља скуп међусобно повезаних елемената у једну целину ради остваривања постављеног циља: уклањање вишка материјала и обликовање делова уз минималне трошкове израде и максималну производност, тачност и квалитет обраде [2].

Обрада метала резањем се одвија у условима веома специфичних процеса пластичне деформације. У веома малој, уско локализованој, зони долази до резања материјала, изузетно великих пластичних деформација, сложених триболошких процеса на површинама контакта алата и струготине и контакта алата и предмета обраде и до генерисања велике количине топлоте. Сложеност процеса је основни разлог непостојања поузданих математичких модела за описивање и предвиђање механичких, термодинамичких, триболошких и других појава у зони резања. Познати су само приближни, поједностављени модели којима се објашњавају поједине фазе процеса резања.

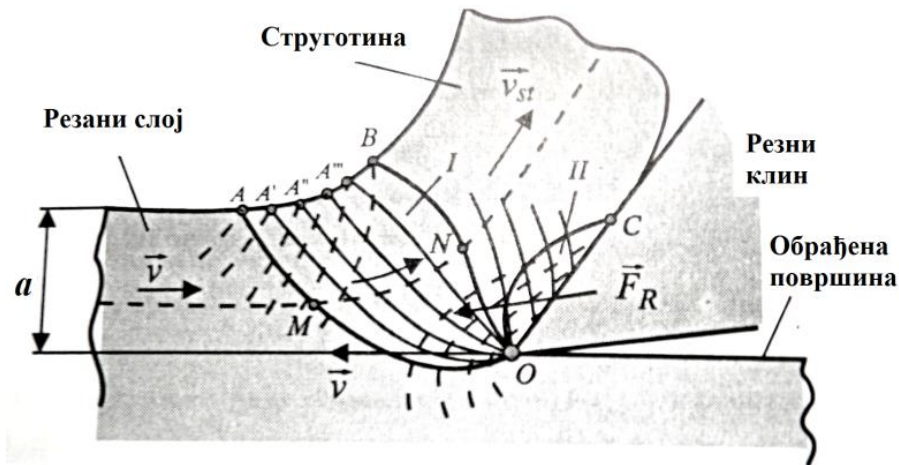
2. 1. Механизам образовања струготине

Начињени су многи покушаји са циљем да се анализирају и разумеју механизми који су укључени у процес обраде метала резањем, а који омогућавају предикцију важних карактеристика обраде. Развијено је неколико модела који описују процес резања; ови модели квалитативно објашњавају појаве које се могу уочити током обраде резањем. Штавише, они указују на смер у којем би требало променити услове обраде у циљу побољшања учинка резања у смислу квалитета обрађеног дела и површинске обраде [6].

Међу развијеним теоријским моделима могу се издвојити неколико карактеристичних који описују динамику формирања струготине.

Као што је приказано на **слици 2.1**, процес резања започиње дејством резног клина, који се креће брзином v и силом резања F_R , на материјал предмета обраде дебљине a .

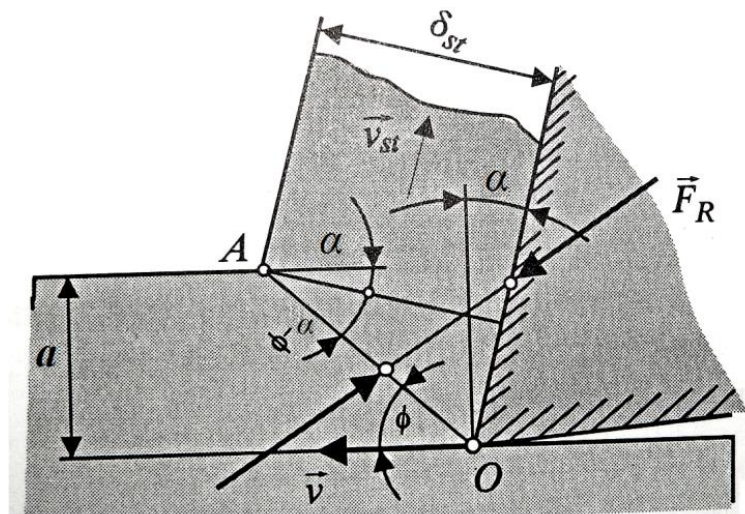
Деформација материјала се врши у простору ограниченом линијама $OABO$ (зона I). Процес пластичних деформација на смицање се одвија не у једној равни, већ у више криволинијских површина. Линија OA дели материјал предмета обраде на део у коме још није дошло до деформисања, смицања и део у коме је започело деформисање. Линија OB представља крајњу површину смицања у којима се процес деформисања завршава и почиње формирање струготине.



Слика 2.1 Модел формирања струготине

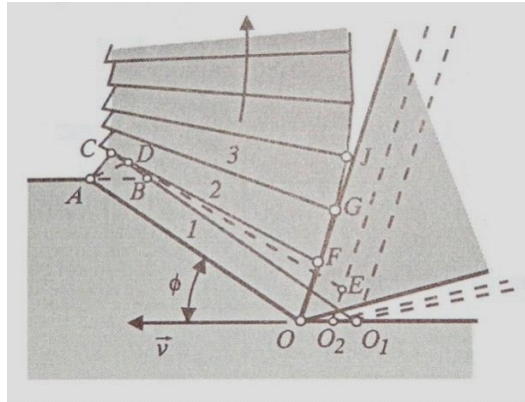
Међутим, услед постојања трења између грудне површине алата и струготине процес пластичне деформације се не завршава. Услед овог трења долази до накнадних деформација које могу бити веома велике. Зона са великим деформацијама је ограничена линијом OSO (зона II).

У одређеним случајевима, у зависности од вредности режима обраде (нпр. мала дубина резања), вредности грудног угла алата и карактеристика материјала предмета обраде, зона $OABO$ се знатно сужава, што се може видети на слици 2.1. Тада се може говорити да се процес резања одвија у равни OA која се назива раван смицања (слика 2.2). Положај ове равни је одређен углом смицања ϕ .



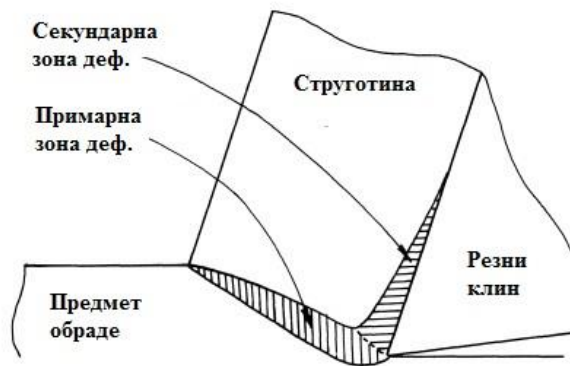
Слика 2.2 Раван смицања

Како су бројна експериментална испитивања показала, елементарна струготина се манифестује кроз ситно или крупно тестерасти облик спољашње површине струготине, као што је приказано на слици 2.3. Овакво представљање струготине у процесу резања је модел веома близак реалном моделу, јер објашњава феномене елементарности струготине и савијања струготине [3].



Слика 2.3 Елементарност и савијање струготине

Услови при којима се одвија деформација су широко проучавани и најбоље се могу разумети посматрајући настанак континуалне струготине, јер се пластичне деформације јављају у две зоне: примарној зони деформације, која се простире од врха резног клина до слободне површине предмета обраде, и секундарне зоне деформације на контакту резног алата и струготине (слика 2.4) [4].

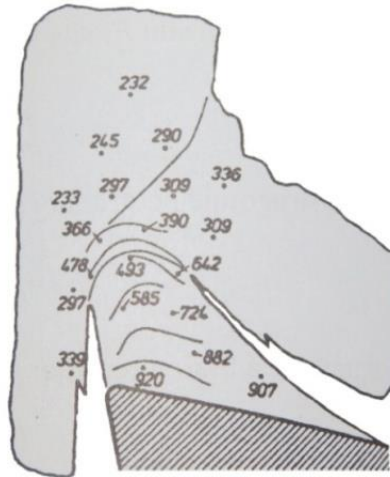


Слика 2.4 Деформационе зоне при резању

2.1.1. Формирање наслага на резном клину

На грудној површини резног клина услед трења између струготине и грудне површине јавља се зона накнадног деформисања материјала струготине. Овај слој се такође назива и кочиони. Велика контактна напрезања и деформације и велику количину генерисане топлоте која се јавља у овој зони прати непрекидно кретање маса елемената у систему. Честице алатног материјала прелазе на струготину или предмет обраде што доводи до хабања алата. Са друге стране честице материјала предмета обраде прелазе на алат где, под одређеним условима и режимима обраде, може доћи до формирања наслага на резном клину.

Насlage се састоје од честица материјала предмета обраде који су претрпели веома велике деформације. Структура насlage је слојевита, тако да је њена релативна тврдоћа чак и неколико пута већа од тврдоће предмета обраде што се може видети на слици 2.5 [3].



Слика 2.5 Тврдоћа сегмената наслага и предмета обраде, НВ [3]

Насlage се могу поделити на два типа, стабилну и нестабилну. Периодични лом нестабилне насlage и њено поновно формирање је веома учестао процес, где један њен део бива одстрањен са струготином, а део пролази испод леђне површине резног клина и постаје део новоформиране обрађене површине предмета обраде. Због тога што је материјал од којег је сачињена наслага значајно обрађен, обично је она много тврђа од струготине што за резултат има абразиво хабање резног клина алата, као и погоршање квалитета обрађене површине.



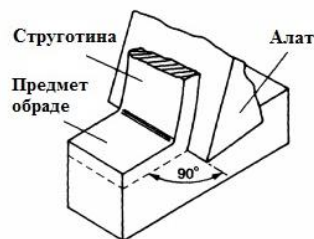
Слика 2.6 Стабилан облик насlage на резном клину

Супротно томе, стабилан облик насlage се ствара под условом да је степен њеног формирања на резном клину једнак степену њеног уклањања, као и то да једном када се појави не мења своју величину током резања. Овај облик насlage, приказан на слици 2.6, је увек користан за процес резања, пре свега јер повећава ефективни грудни угао алата што доводи до смањења сила резања. Поред тога доводи до продирања насlage на леђну површину резног клина и настанак заштитног слоја који смањује њено хабање. Стабилна наслага се у пракси обично не појављује при резању, али се може изазвати применом специјалног облика геометрије резног алата [5].

На ову појаву настанка наслаге се може утицати избором услова обраде и режима резања. Најзначајнији фактори који утичу на појаву наслаге су: брзина и дубина резања, грудни угао алата, материјал предмета обраде, средство за хлађење и подмазивање, температура резања, као и адхезија између предмета обраде и алата [3].

2.1.2. Модел ортогоналног резања

Сви поступци резања метала се могу упоредити са процесом приказаним на **слици 2.7**, где је алат клинастог облика, који има праву резну ивицу, ограничен релативним кретањем у односу на предмет обраде на начин да се слој метала уклања у облику струготине. Специјалан случај резања при којем је резна ивица постављена нормално на правац кретања алата назива се ортогонално резање. С обзиром да ортогонално резање представља дводимензионални пре него тродимензионални проблем, овај модел је погодан за истраживања где је потребно елиминисати што више независних променљивих. Због тога релативно једноставно уређење модела ортогоналног резања има широку примену у теоретским и експерименталним радовима [7].



Слика 2.7 Ортогонално резање

У случају ортогоналног резања обично се посматрају силе паралелне и управне на правац међусобног релативног кретања алата и предмета обраде које се дефинисане као тангенцијална и нормална сила. Дебљина струготине пре њеног смицања још се назива и дебљина недеформисане струготине, док након смицања има назив дебљина деформисане струготине δ_{st} . Оштар угао који раван смицања заклапа са правцем кретања алата назива се смицајни угао, док се оштар угао који грудна површина резног клина прави у односу на раван нормалну на правац кретања алата, назива грудни угао. Ови параметри приказани су на **слици 2.8**.



Слика 2.8 Параметри ортогоналног резања метала

3. ОСНОВЕ ОБРАДИВОСТИ МАТЕРИЈАЛА

3. 1. Појам обрадивости

Најчешћа, стандардизована дефиниција појма обрадивости односи се на лакоћу или потешкоћу са којом се дати материјал (или група материјала сличне обрадивости) може обрадити тј. колико је захтевно обликовати предмет обраде резним алатом. Обрадивост се не може поједностављено повезати са конкретном карактеристиком предмета обраде, већ се она пре може посматрати као резултујућа „особина“ система обраде који је под утицајем, директно или индиректно, материјала предмета обраде и алата, алатних машина, средстава за хлађење и подмазивање и услова резања. Све компоненте овог система подложне су физичким процесима, попут хабања, који се генерално користе као критеријуми обрадивости [10].

Покушаји да се дође до адекватне дефиниције термина обрадивости обично су фокусирани на једну или више специфичних карактеристика процеса резања, попут постојаности алата, енергије потребне за уклањање метала или квалитета обрађене површине. Силе резања и енергија потребна за обраду су дуго сматрани за релативно неважне критеријуме, из економских или операционих разлога. Данас, у енергетски свесном окружењу, ефикасност резања се сматра реалном мером обрадивости. Нешто уопштенија дефиниција се базира на животном веку алата којим се изводи резање током којег је остварен прихватљив квалитет обрађене површине [5].

Обрадивост се не може јединствено дефинисати у квантитативном смислу и може имати различита значења у различитим контекстима. Материјал може имати добру обрадивост по једном критеријуму, али слабу обрадивост по неком другом. Такође, релативна обрадивост се може променити и када се изводе различити поступци обраде или када се примењују различити алатни материјали. У овим случајевима термин обрадивост се често користи у компаративне сврхе [10].

На лакоћу или потешкоће приликом обраде резањем утичу различити фактори. Они обухватају хемијски састав, као и термомеханичке карактеристике предмета обраде, крутост алата, предмета обраде, стеге, материјала од којег је алат израђен, брзину резања и корак. Стога је обрадивост у пракси својство система машинске обраде која се одвија под одређеним условима.

Термин „обрадивост“ се такође односи и на прихваћене поступке обраде за дати материјал. Подаци о обрадивости, прикупљени у приручницима и базама података, укључују препоручене брзине резања, величину корака и дубину резања за одређени предмет обраде. Ови подаци су обично прикупљени из производних искустава и они сумирају услове под којима се одвија обрада, а уз помоћ којих се добија задовољавајући животни век алата и квалитет обрађене површине. Препоручена брзина резања и корак представљају само почетне услове, који се морају модификовати по потреби у циљу оптимизације учинка обраде. С обзиром да се поступци обраде временом мењају, услед развоја нових материјала од којих су алати израђени и могућности алатних машина, подаци о обрадивости се често морају ажурирати како би остали важећи и примењиви [4].

Вероватно 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].

3. 2. Критеријуми обрадивости

Неки од најчешће коришћених критеријума за одређивање обрадивост су [4]:

- *Постојаност алата или животни век алата.* Ово је најзначајнији и најчешће коришћен критеријум обрадивости. Постојаност алата утиче како на квалитет, тако и на цену обрађеног дела. Сматра се да обрадивост расте са смањењем трошења алата (или са повећањем његовог животног века) под датим условима обраде. Оцене обрадивости дате на основу постојаности алата су генерално примењиве на ограничен распон услова резања; када се ови услови промене, на пример, када се брзина резања значајно повећа или смањи, доминантни механизам трошења алата или његов интензитет се могу променити. Ова чињеница је посебно релевантна када се даје оцена обрадивости групе материјала под различитим условима обраде.
- *Остварив квалитет обрађене површине.* Генерално гледано, обрадивост расте са побољшањем квалитета обрађене површине за дате услове резања. Средња висина неравнина је најчешће коришћен параметар који служи за утврђивање квалитета обрађене површине.
- *Тачност обраде.* Обрадивост расте са повећањем тачности обраде (тј. смањењем толеранције) која може бити достигнута за дате услове резања. Као и код квалитета обрађене површине, овај критеријум је најкориснији при компарацији различитих класа материјала. Чешће је у примени при утврђивању обрадивости дрвета или пластике, више него метала. Тачност обраде се такође користи као критеријум и при дефинисању животног века алата.
- *Силе резања.* Обрадивост расте са смањењем утрошене енергије на резање, као и силе резања. Смањене силе резања генерално подразумевају и смањено трошење алата, бољу тачност обраде и продужен животни век машине. Такође, мерење сила резања и потрошње енергије захтева много мање материјала и времена од мерења постојаности алата, и посебно су погодна за процену карактеристика обрадивости већих група материјала.
- *Температура резања.* Мерења температуре резања се могу искористити за компарацију обрадивости материјала за дате услове резања. Обрадивост расте са смањењем температуре резања зато што многи механизми трошења алата зависе од температуре; просечна температура се због тога налази у узајамној вези са постојаношћу алата, а самим тим и са обрадивошћу. Неки алатни материјали попут резне керамике су „неосетљиви“ на температуру, због чега мали пораст температуре не утиче или чак побољшава њихов учинак при резању.

- *Механичке карактеристике.* Механичке карактеристике предмета обраде, попут тврдоће, границе течења, жилавост, су често довођени у узајамну везу са обрадивошћу. Ова веза постоји и у склопу група или класа метала. На пример, челици из исте групе генерално показују негативну корелацију између обрадивости и тврдоће и напона течења. Смањене вредности тврдоће и напона течења су пожељније.
- *Облик одвојене честице и склоност појави неравнина на обрађеној површини.* Материјали који у току резања стварају кратку струготину, која се са лакоћом може контролисати и уклонити, се одликују већом обрадивошћу од оних материјала који производе дугу континуалну или ситну дисконтинуалну струготину. Жилави материјали при чијој обради долази до стварања дуге континуалне струготине такође имају тенденцију да формирају неравнине на обрађеној површини предмета обраде, поготову са самњењем постојаности алата.

Без обзира на мањак универзалних мерила, обрадивост се може оценити помоћу једног или више критеријума класификованих на основне, заменске или помоћне, како је приказано на **слици 3.1**. Критеријуми, који се налазе у групи помоћних критеријума, могу се односити на карактеристике процеса резања (КПО) или на сам предмет обраде (ПО) [10].



Слика 3.1 Класификација критеријума обрадивости

Примена средстава за хлађење и подмазивање има за циљ да побољша обрадивост, али је некада чак може и умањити. Тип, чистоћа, рН вредност и многе друге карактеристике овог средства могу имати драматичан утицај на обрадивост. Поред тога, алатни материјал је још један од фактора који веома утиче на обрадивост, као и машине које се користе при обради, с обзиром да од њих зависи распон могућих брзина и корака [11].

У овом раду биће објашњени су неки од ових критеријума.

3.2.1. Силе резања

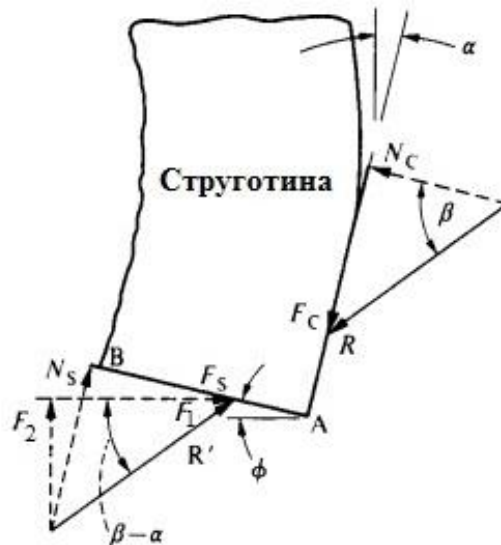
Сви поступци обраде метала резањем изводе се деловањем резног алата на предмет обраде, а све у циљу уклањања нежељеног материјала; због тога, неопходна је сила како би се овај задатак испунио. Познавање интензитета ових сила помаже при одређивању неколико битних параметара попут потребне чврстоће стезног прибора или крутости алата, као и прикладног резног алата.

Најједноставнији теоријски модел за проучавање сила резања базира се на анализи равни смицања. При овом приступу постављају се претпоставке да су карактеристике процеса резања константне у току времена и да је алат бесконачно оштар. Поред тога се сматра да је материјал предмета обраде крут и идеално пластичан [4].

Ако се струготина изолује и представи као слободно тело, као на **слици 3.2**, онда се две силе морају узети у разматрање - силе која се јавља између резног клина и струготине (R) и силе која се јавља између предмета обраде и струготине (R'). Да би равнотежа била успостављена ове силе морају бити једнаке: $R = R'$

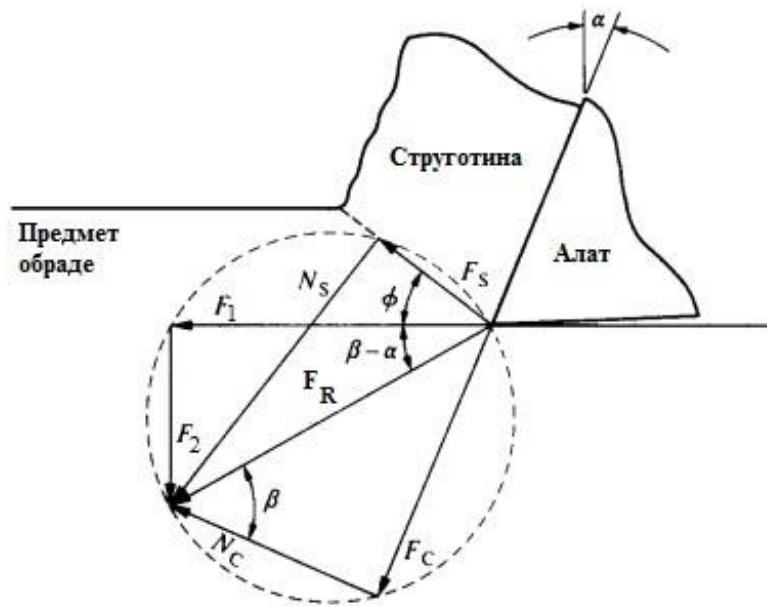
Силе R и R' се могу разложити на компоненте и у три групе:

- на хоризонталан и вертикалан правац, F_1 и F_2
- дуж смицајне равни и правац нормалан на њу, F_S и N_S
- дуж грудне површину алата и правац нормалан на њу, F_C и N_C



Слика 3.2 Приказ струготине као слободног тела

Ако се силе R и R' уцртају на врх резног клина уместо на стварну тачку њиховог дејства (дуж смицајне равни и грудне површине), добићемо компактан дијаграм са **слике 3.3**. Овде силе R и R' (које су колинеарне и једнаког су интензитета) заједно праве пречник испрекиданог круга са слике који представља резултујућу силу резања F_R .



Слика 3.3 Мерчантов модел ортогоналног резања

Коришћењем геометријске чињенице да линије које секу пречник круга R (тј. резултујућу силу резања F_R) у тачкама на испрекиданом кругу међусобно заклапају прав угао, добијамо погодан начин разлагања силе F_R на ортогоналне компоненте у било ком правцу.

Ово представља Мерчантов модел ортогоналног резања где је [8]:

- F_1 - главна сила резања
- F_2 - сила продирања
- F_C - тангенцијална сила (сила трења) која делује у равни грудне површине резног клина
- N_C - нормална сила која делује у равни нормалној на грудну површину резног клина
- F_S - сила у равни смицања (сила смицања)
- N_S - нормална сила која делује у равни нормалној на равни смицања.

По овом моделу, формирање струготине се одвија у равни смицања, равни која заклапа угао ϕ (угао смицања) са обрађеном површином предмета обраде.

За напон смицања који делује у равни смицања претпоставља се да је једнак критичном напону смицања (напон смицања на граници течења), τ , а да је правац резултујуће силе резања R под углом β у односу на нормалу грудне површине алата.

Под овим претпоставкама, изрази за главну силу резања F_1 и силу продирања F_2 , при ортогоналном резању, се могу извести геометријски:

$$F_1 = \frac{\tau ab \cos(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)}, \quad (3.1)$$

$$F_2 = \frac{\tau ab \sin(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)}, \quad (3.2)$$

где су:

b - ширина резања

τ - критични напон смицања (напон смицања на граници течења)

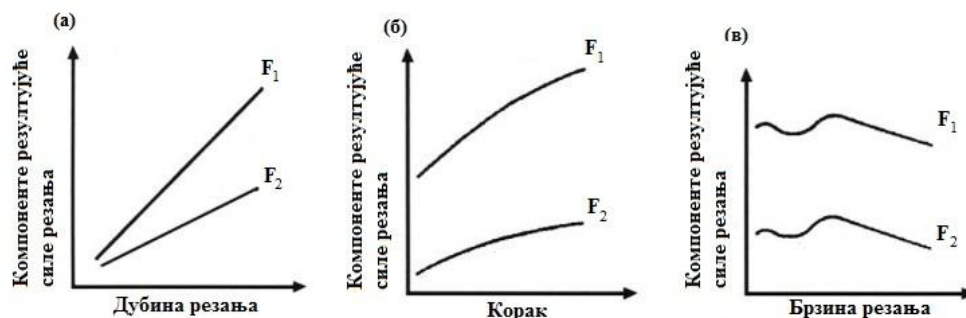
α - грудни угао

Да би се примениле ове једначине мора се дефинисати критични напон смицања:

$$\tau = \frac{(F_1 \cos \phi - F_2 \sin \phi) \sin \phi}{ab}, \quad (3.3)$$

Вредности параметара τ и β се могу добити низом краћих тестова. За жилаве предмета обраде попут нискоугљеничних челика или легура алуминијума, параметар τ има приближно исту вредност као напон течења, што је оквирно једнако једној трећини тврдоће материјала измерене по Бринелу (HB, kg/mm²). Ако се тестови не могу извршити, претпоставке да су $\tau = HB/3$ и $\beta = 45^\circ$ се могу применити при прорачуну [4].

Као што **слика 3.4** показује, на силу резања утичу параметри резања као и геометрија алата. Слика 3.3 (а) указује на линеаран раст компоненти резултујуће силе резања (главне силе резања F_1 и силе продирања F_2) услед пораста површине попречног пресека недеформисане струготине. С друге стране, криве на дијаграму сила/корак (б) су нелинеарне зато што пораст корака резултира смањењем специфичног отпора резања. Нагли пад вредности компоненти резултујуће силе резања на дијаграму сила/брзина резања (в), илуструје ефекат појаве наслага на резном клину.



Слика 3.4 Утицај параметара резања на компоненте резултујуће силе резања

Код челика, наслага на резном клину нестаје при повећању брзине резања. На силу резања такође утиче и геометрија алата, где је најважнији параметар грудни угао. Повећањем грудног угла смањују се компоненте резултујуће силе резања, али се у исто време смањује и чврстоћа резног клина алата што може довести до његовог оштећења. Највећа чврстоћа резног клина се остварује при негативним вредностима грудног угла, па се он најчешће примењује при обради керамичким или алатима од кубнога нитрида бора којег одликује смањена жилавост. Такође, уколико при косом резању угао који сечиво заклапа са правцем кретања алата (или предмета обраде) има велику вредност, то може

произвести велику силу продирања која ће довести до скретања предмета обраде. Супротно томе, ова сила је врло мала када се ради о ортогоналном резању. Материјал од којег је израђен алат, као и нанесена превлака исто тако могу имати утицај на силе резања, највише због промене захваћене контактне површине између струготине и алата. На крају, на контактну површину и силе резања се може утицати и коришћењем средства за хлађење и подмазивање. Обично се при обради тај контакт у зони резања не може спречити, али га ова средства могу свести на малу површину [10].

Узимање силе резања или снаге као критеријума обрадивости предмета обраде указује на то да метал при чијој обради се јављају мале силе резања има добру обрадивост. Употреба снаге резања као карактеристике обрадивости слична је употреби силе резања, пре свега из разлога што је потрошња енергије директно повезана са снагом. Оцена обрадивости се може представити и преко специфичне енергије која говори о енергији утрошеној на уклањање одређене запремине материјала у јединици времена. Материјали предмета обраде који имају велику вредност специфичне енергије резања сматрају се за мање обрадиве од оних материјала код којих је вредност специфичне енергије мања. Једна од предности коришћења специфичне енергије резања као показатеља обрадивости је та да она углавном представља својство предмета обраде и да је утицај материјала од којег је израђен алат на њу прилично мали. Насупрот томе, животни век алата строго зависи од коришћеног алатног материјала.

Коефицијент уклањања метала је у узајамној вези са специфичном енергијом резања и може се директно користити као оцена обрадивости материјала уколико су силе резања коришћене за њено дефинисање. То значи да се за метал који има велики коефицијент уклањања метала може рећи да има високу обрадивост [6].

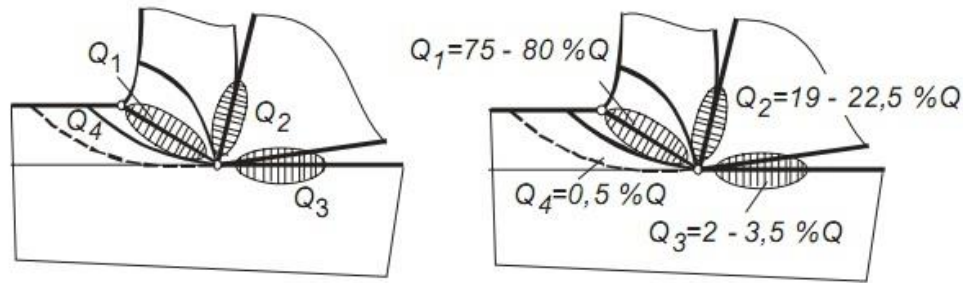
3.2.2. Температура резања

Више од 99,5% енергије (механичког рада) утрошене на деформисање материјала предмета обраде и савлађивање сила трења на контактним површинама резног клина алата (грудној и леђној) претвара се у топлоту, тако да је количина генерисане топлоте:

$$Q = F_1 \cdot V \quad , J \quad (3.4)$$

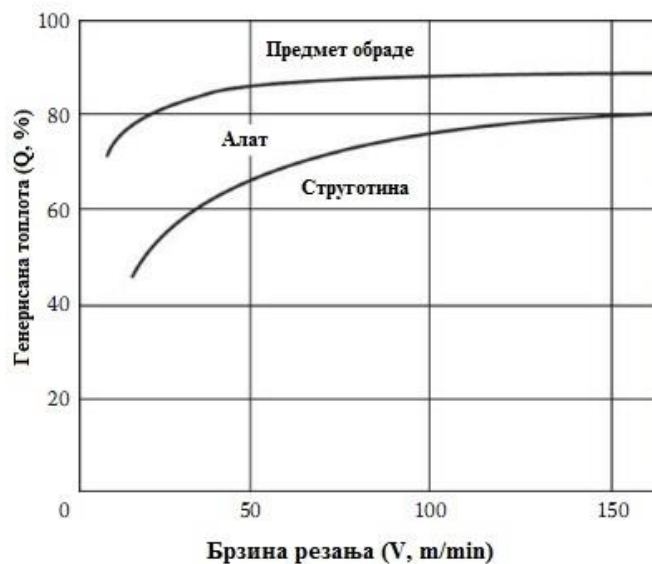
Генерисана топлота је резултат појаве четири топлотна извора, који су приказани на **слици 3.5**, и то у зонама [2]:

- $Q_1 = (75 - 80) \% Q$ - смицања (примарна зона деформације), у којој се изводи пластично деформисање материјала предмета обраде и њихово претварање у струготину,
- $Q_2 = (19 - 22.5) \% Q$ - контакта грудне површине резног клина алата и струготине,
- $Q_3 = (2 - 3.5) \% Q$ - контакта леђне површине резног клина алата и обрађене површине и
- $Q_4 = \text{око } 0.5 \% Q$ - зона еластичних деформација (испод зоне смицања)



Слика 3.5 Топлотни извори

На слици 3.6 приказано је одвођење генерисане топлоте преко струготине, предмета обраде и алата, изражено у процентима и у зависности од брзине резања.



Слика 3.6 Процентуални удео одвођења топлоте

Одавде се може закључити да се [6]:

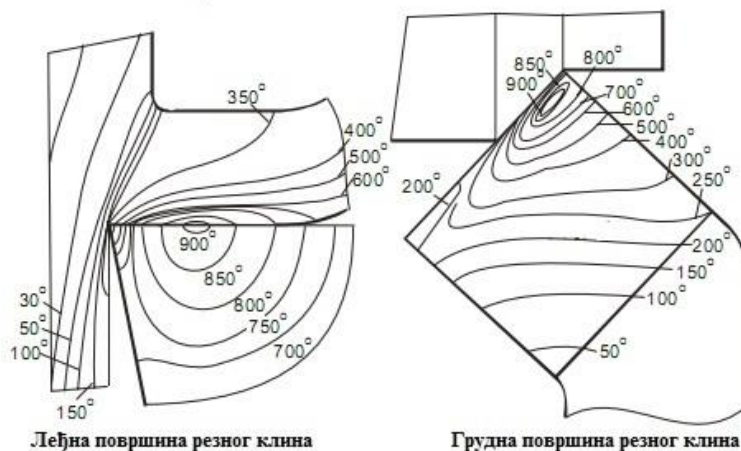
- 80 % топлоте одводи преко струготине
- 10 % топлоте одводи преко алата
- 10 % топлоте одводи преко предмета обраде.

Температуре резања представљају предмет изучавања јер утичу на учинак обраде. Температуре у примарној зони деформације, у којој се јавља обиман део деформација повезаних са формирањем струготине, утичу на механичке карактеристике предмета обраде и самим тим и на силе резања. Температуре на грудној површини алата имају јак утицај на постојаност алата. Како температура у овој области расте, алат постаје мекши а затим се или врло брзо троши услед дејства абразивних процеса или се пластично деформише. У неким случајевима се састојци алатног материјала расипају и постају део струготине или хемијски реагују са стругоотином или средством за хлађење и подмазивање, што доводи до потпуног отказа алата. С обзиром да температура резања расте са брзином резања, механизми хабања који зависе од температуре ограничавају максималну брзину резања за многе материјале. Због тога, познавање температуре у овој

области даје увид у то које алатне материјале и превлаке је потребно користити. На крају, температуре на леђној површини алата утичу на завршну обраду и металуршко стање обрађене површине. Умерене вредности ових температура изазивају појаву заосталих унутрашњих напона у обрађеној површини услед топлотних контракција, док високе вредности температуре доводе до појаве тврдог слоја на обрађеној површини.

Прецизно мерење температуре резања је сложеније од мерења сила резања. Сила резања представља вектор који је потпуно описан преко три компоненте, док је температура скаларно поље и варира кроз систем, па се не може јединствено описати вредностима у неколико тачака [4].

Карактеристична температурна поља приказана су на **слици 3.7**, где се може видети велики температурни градијент кроз ширину струготине током смицања материјала предмета обраде у примарној зони деформације, док се даље може приметити такође веома велики температурни градијент на делу струготине који се налази у контакту са грудном површином у току смицања материјала предмета обраде у секундарној зони деформације. Из овога се може закључити да се максимална температура резања јавља на грудној површини резног клина на малом растојању од резне ивице [5].

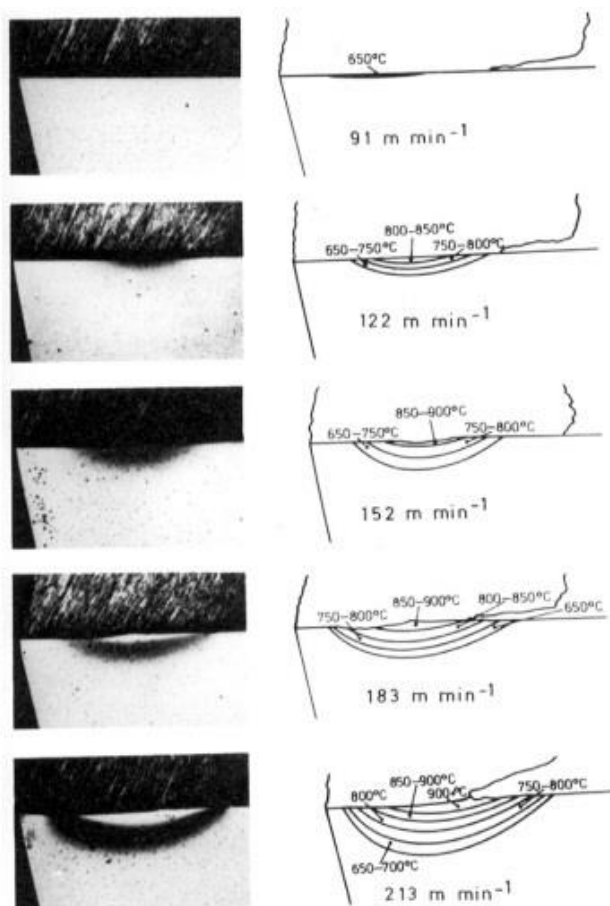


Слика 3.7 Температурна поља при обради челика [2]

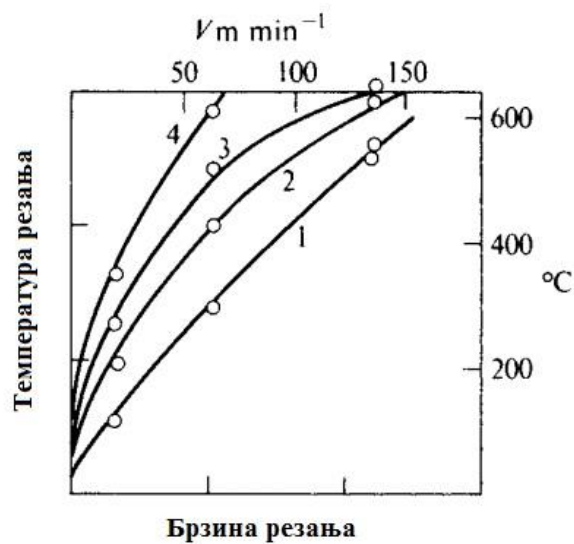
На **слици 3.8** приказан је попречни пресек резног алата коришћеног за резање челика при параметрима: корак 0.25 mm/o, брзине резања од 91 до 213 m/min и време резања од 30 секунди. У току резања максимална температура на грудној површини алата је расла, док је позиција у којој се она јавља остала непромењена. Чак и при максималним брзинама резања хладнија температурна поља (испод 650 °C) се шире за 0.2 mm од резне ивице, док је максимална температура, око 1000 °C, удаљена око 1 mm од резне ивице. Ово је доказ постојања веома високих температура и великих температурних градијената који могу бити присутни на грудној површини резног клина при обради метала са високом тачком топљења [12].

Параметар процеса резања који има највећи утицај на температуру јесте брзина резања. Како силе резања не варирају значајно са брзином резања, раст брзине резања повећава брзину расипања енергије кроз пластичну деформацију и трење, а самим тим и степен генерисане топлоте у зони резања. Повећање корака такође повећава генерисану топлоту и температуру резања [4].

Температуре резања, за различите вредности брзине резања при обради нискоугљеничног челика, приказане су на слици 3.9.



Слика 3.8 Температурна поља на резном алату

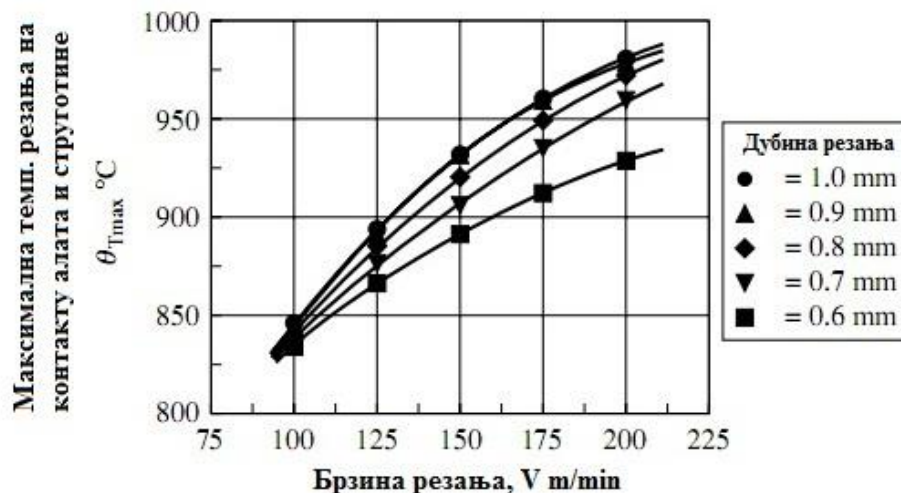


Слика 3.9 Приказ температура при ортогоналном резању за различите вредности корака

За дати случај је коришћен алат израђен од брзорезног челика, при грудном углу од 15° и леђним углом од 5° . Вредности корака су 0.005 mm/o (1), 0.11 mm/o (2), 0.17 mm/o (3), 0.29 mm/o (4) [8].

С обзиром да се практично сва енергија утрoшена на обраду резањем претвара у топлоту, може се очекивати да ће фактори, који утичу на повећање потрошене енергије на резање по јединици запремине уклоњеног материјала, утицати и на повећање температуре резања. Према томе, повећање грудног угла ће, при непромењеним осталим параметрима, смањити потрошену енергију на резање по јединици запремине уклоњеног материјала и температуру резања. Када се разматрају дубина резања и брзина резања ситуација је много сложенија. Повећање дубине резања има тенденцију да утиче на обим топлотне појаве, где топлота која пролази кроз предмет обраде, алат и струготину остаје у константној сразмери и где је промена температуре резања обично мала. Међутим, пораст брзине резања умањује количину топлоте која прелази на предмет обраде што доводи до пораста температуре струготине у примарној зони деформације. Осим тога, секундарна зона деформације је у том случају склона умањењу што утиче на повећање температуре у овој зони. Промена осталих параметара резања практично нема ефекат на енергију утрoшену на резање по јединици запремине уклоњеног материјала, а самим тим практично нема ефекта ни на температуру резања [5].

На **слици 3.10**, приказана је максималне вредности температуре резања θ_{max} на контакту резног алата и струготине у зависности од брзине резања.

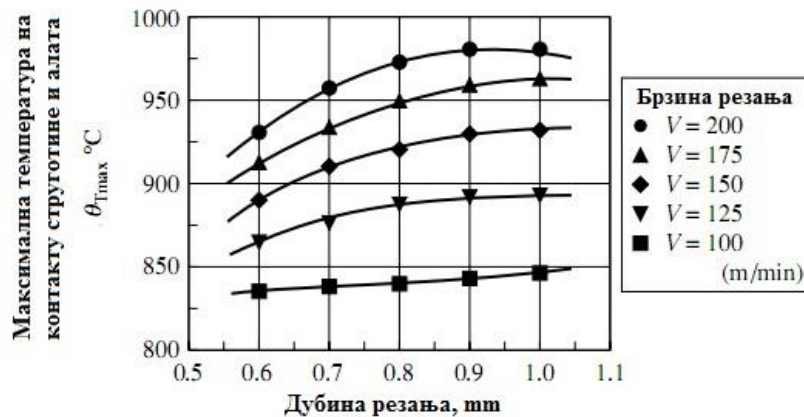


Слика 3.10 Однос максималне температуре резања и контакту струготине и алата и брзине резања за дате дубине резања

У овом случају се ради о обради средње угљеничног челика, тврдоће 250 HV , при кораку 0.2 mm/o , грудном углу -5° , леђном углу 5° и без средства за хлађење и подмазивање.

На **слици 3.11**, приказана је максималне вредности температуре резања θ_{max} на контакту резног алата и струготине у зависности од дубине резања.

Услови резања су исти као у претходном примеру [8].



Слика 3.11 Однос максималне температуре резања на контакту струготине и алата и дубине резања за дате брзине резања

Својства материјала такође јако утичу на температуру резања. Температуре резања су веће за тврђе материјале предмета обраде због тога што су силе резања, а самим тим и расипање енергије веће. За материјале сличне тврдоће, температуре резања расту са повећаном жилавошћу, пошто материјали који се одликују већом жилавошћу могу апсорбовати више енергије путем пластичне деформације.

Топлотне карактеристике предмета обраде које утичу на температуру резања су топлотна проводљивост κ и топлотни капацитет c . Обично долази до пада температуре са порастом ових параметара, због тога што њихов раст указује на то да се топлота лакше одводи кроз предмет обраде (при повећању параметра κ) или да температура расте спорије (при повећању параметра c). Повећање топлотне проводљивости и топлотног капацитета алата исто тако умањује температуру резања.

На крају, максималне температуре на контакту између струготине и алата зависе и од облика, димензија и геометрије резне плочице алата, као и вредности угла клина. Повећањем полупречника врха резне плочице алата долази до смањења максималне температуре, из разлога што се у том случају равномерније распоређује енергија утрошена на трење на резној ивици. Смањењем угла клина (повећања грудног или леђног угла) долази до раста максималне температуре на контакту алата и струготине, што је последица смањења површине кроз коју се може одвести топлота са резне ивице алата [4].

Велики део операција резања се изводи уз примену средстава за хлађење и подмазивање. Топлота и хабање су последица трења које јавља у току стварања струготине. Средства за хлађење и подмазивање имају следећу функцију:

- хлађење резног алата и предмета обраде,
- подмазивање резног алата,
- обезбеђивање бољег квалитета обрађене површине
- смањење хабања алата,
- спречавање корозије предмета обраде
- омогућавање максималне могуће брзине резања, а самим тим смањење времена и цене производње.

Од средстава за хлађење и подмазивање се очекује да одведе топлоту и генерално се базирају на води. Додавање уља и сличних адитива има за циљ да спречи појаву корозије, а некада може послужити и за подмазивање. Хлађење се постиже снабдевањем адекватне количине средства за подмазивање које ће одвести генерисану топлоту током резања. Подмазивањем резног алата се смањује коефицијент трења између струготине и алата. Ово доводи до смањења температуре и хабања алата, због чега процес резања постаје економичнији [6].

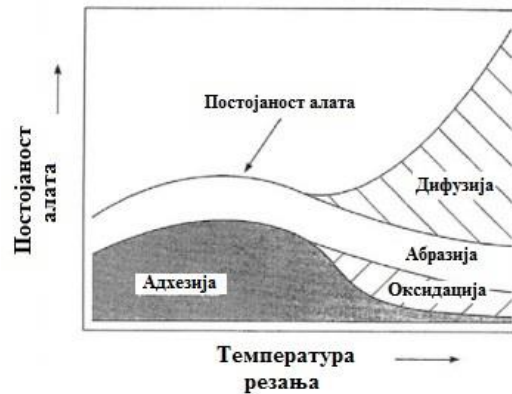
3.2.3. Постојаност алата

Хабање алата, као и механизми отказа су од великог практичног значаја због њиховог утицаја на цену и квалитет обраде. Алати који се спорије хабају имају дуг и предвидив радни век, што резултира смањењем цена производње и конзистентнијим димензијама и квалитетом обрађене површине. Из овог разлога, постојаност алата је најчешћи критеријум који се користи за оцену учинка резног алата и обрадивости материјала.

У пракси, алати се уклањају из употребе када више не могу да произведу задовољавајућ предмет обраде. Ово се може десити уколико су димензије, облик и тачност обраде обрађеног дела ван дозвољених толеранција или уколико дође до пластичних деформација на резној ивици. Алати који се користе при истим условима, а за различите поступке обраде могу показати другачију постојаност у зависности од захтева и дозвољених одступања. Због ове чињенице, методе предвиђања постојаности алата су пре свега корисне у компаративне сврхе, на пример, при рангирању очекиване постојаности алата за различите материјале предмета обраде, алатне материјале или услове резања; од њих се не може очекивати да дају прецизну процену постојаности алата у датој примени осим ако подаци о претходној примени за сличне делове нису доступни.

Механизми, услед којих долази до појаве различитих облика хабања, зависе од употребљених материјала, геометрије алата и услова резања, пре свега брзине резања [4].

У контексту постојаности резног алата могу се идентификовати две групе узрока хабања, приказане на **слици 3.12**: механичко и физичко-хемијско хабање. Механичко хабање, које укључује абразивно хабање, заморно хабање, крзање, одламање или разарање резног клина, практично је независно у односу на температуру. Физичко-хемијско хабање, које узрокује пластичне деформације резног клина, дифузионо хабање и корозију, драстично расте при већим температурама резања и може убрзати отказ алата [10].



Слика 3.12 Механизми хабања алата у зависности од температуре резања

Абразивно и адхезионо хабање су два најзначајнија типа хабања при малим брзинама резања.

Оба поменута вида хабања се могу представити квантитативно једначином облика:

$$V_h = \frac{k_h N L_s}{H}, \quad (3.5)$$

где су:

V_h - запремина уклоњеног материјала,

k_h - коефицијент хабања,

N - сила нормална на контактну површину алата и струготине,

L_s - дужина контакта алата и струготине

H - тврдоћа резног алата.

Ова једначина показује да је ефикасан начин контролисања хабања повећање тврдоће резног алата H . Ово се може урадити директно, коришћењем алата израђених од тврђих материјала, или индиректно, наношењем превлака на резни алат. Једначина такође указује да се смањењем сила резања, чиме се смањује и нормална сила N , смањује и хабање. То се најлакше може остварити повећањем грудног угла, премда ово утиче и на смањење чврстоће резне ивице и може довести до деформисања и лома алата. На крају, из једначине се види да смањење дужине контакта резног алата и струготине, углавном повећањем корака, може бити делотворно при контролисању абразивног хабања.

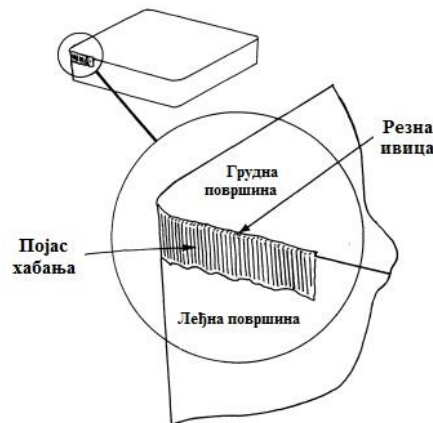
Са повећањем брзине резања степен адхезионог и абразивног хабања се повећава из два разлога. Прво, дужина контакта између резног клина и струготине L_s се за дати временски период повећава са растом брзине. Друго, повећањем брзине резања повећава се и температура резања. Тврдоћа алатних материјала обично опада са повећањем температуре резања, што не само да доводи до појачаног абразивног хабања, него може за последицу имати и пластично деформисање резне ивице.

Са даљим повећањем температуре, физичко-хемијско хабање постаје доминантно. Може се појавити у виду дифузије, оксидације и трибохемијског хабања. Ови облици хабања зависе од хемијске компатибилности алатног материјала и материјала предмета

обrade. Брзине резања, при којима ови облици хабања постају значајни, такође зависе и од температуре контактне површине алата и струготине и температуре топљења струготине. Генерално, овај облика хабања може се смањити обрадом при нижим брзинама чиме се смањује температура резања, или наношењем превлака на резни алат [4].

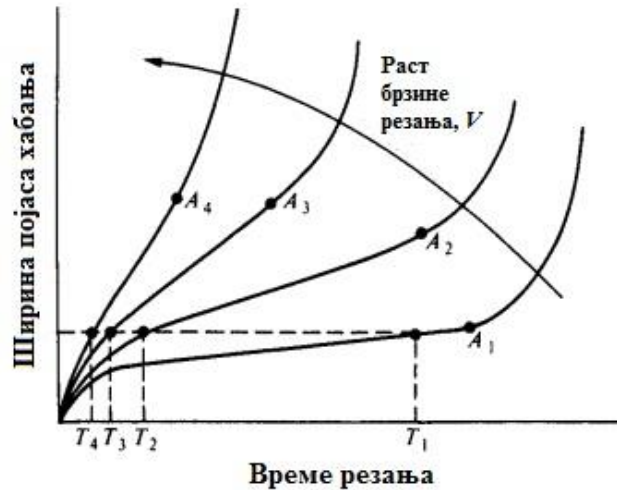
Основни облици хабања могу се класификовати и према положају на резном клину алата на којем се манифестују. Услед већ поменутих механизма, хабање захвата и грудну и леђну површину, што представља општи облик хабања. Хабање на леђној површини резног клина је у облику појаса хабања, **слика 3.13**.

Контакт похабане леђне површине алата и обрађене површине узрокује даље хабање алата и општећење, доводи до повећања сила резања и топлоте услед трења, а све то за последицу има смањење тачности обраде. Као што је већ наведено, појас хабања је најчешће резултат абразивних процеса на површинама резног клина. Појаса хабања се описује његовом средњом или максималном ширином. Раст појаса хабања у току обраде се може пратити повременим визуелним прегледом алата или (много чешће) праћењем промене димензија алата или обрађеног дела. Појас хабања обично има константну дужину, с тим да ширина расте у току времена, а на крајевима је нешто већа. Овај вид хабања се може минимизирати повећањем отпора алатног материјала на абразивне процесе, као и коришћењем тврдих превлака [4].



Слика 3.13 Појас хабања на леђној површини резног клина [5]

Постојаност алата посматрана преко појаса хабања, може се приказати помоћу зависности ширине појаса хабања и времена резања, приказане на **слици 3.14**. Тачке *A* на дијаграму представљају тренутак у којем се достиже критична вредности ширине појаса хабања, док тачке *T* говоре о тренутку у току резања када вредност ширине појаса почиње нагло да расте [8].



Слика 3.14 Зависност ширине појаса хабања од времена резања

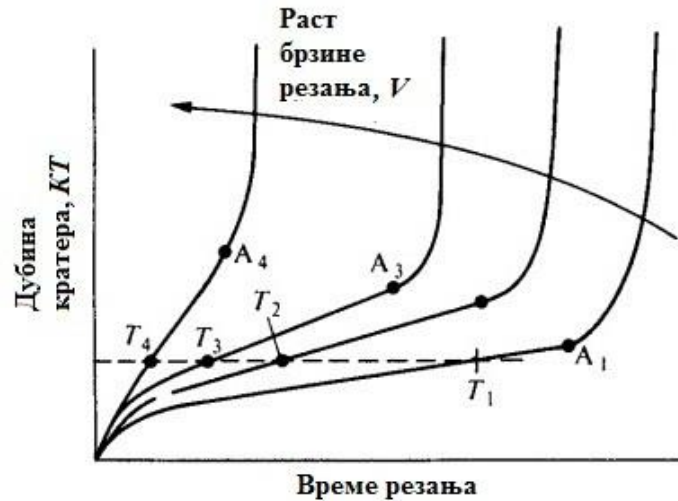
Хабање грудне површине манифестује се појавом кратера, који се може видети на слици 3.15.

Због расподеле напона на грудној површини алата, максимално трење се јавља на почетку контактне површине између струготине и алата, док је на њеном крају једнако нули. Из тог разлога се у овој области јавља абразивно хабање, и то тако што се већи његов део одвија у близини резне ивице, а много мањи око тачке где струготина губи контакт са алатом. Све ово резултира појавом локализованих јама које се обично називају кратери [5].



Слика 3.15 Кратер настао услед хабања на грудној површини [5]

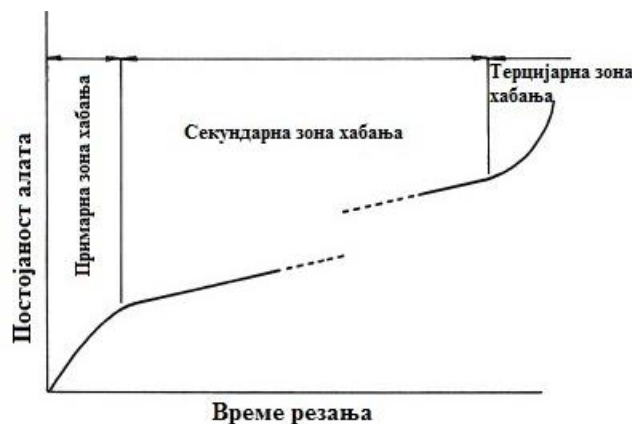
На слици 3.16 приказана је зависност дубине кратера од времена резања, за различите вредности брзина. Како се појава кратера приближава резној ивици температура резања расте, а са њом и дубина кратера. До лома алата долази када се кратер прошири до резне ивице након чега се јавља крзање врха резног клина (тачке A) или уколико вредност дубине кратера достигне критичну вредност (тачке T) [8].



Слика 3.16 Зависност дубине кратера од времена резања

При напредном облику појаса хабања везу између постојаности алата и времена прати фиксан шаблон. Развој процеса хабања резних елемената алата се може приказати кривом која представља промену ширине појаса хабања на леђној површини резног клина у току времена, а која се назива кривом хабања. На кривој се могу уочити три карактеристичне зоне хабања: примарна или зона иницијалног хабања, секундарна или зона устаљеног хабања и терцијарна или зона катастрофалног хабања.

Иницијално, при употреби некоришћених алата, степен хабања је висок и заузима примарну зону. Време, за које је овај степен хабања карактеристичан, зависи од услова резања али је обично, за одређене материјале предмета обраде, величина иницијалног хабања отприлике константна, док се време за које оно настаје смањује са растом брзине резања. Након ове зоне следи зона устаљеног хабања где је степен повећања појаса хабања осетно константнији али значајно мањи него у примарној зони. На крају секундарне зоне хабања, када је појас хабања поприличан и далеко већи од оног који је препоручен као критеријум отказа алата, услови су такви да почиње трећа фаза у којој хабање убрзано расте тј. зона катастрофалног хабања, и која уколико се настави са резањем доводи до лома резног алата. Ове три зоне приказане су на слици 3.17.



Слика 3.17 Крива хабања

Хабање грудне површине, које се обично мери преко дубине кратера, постепено расте у току времена до тачке када кратер прилично слаби алат тако да су силе резања које делују на њега довољне да доведу до лома. [5].

Обично су просечна и максимална вредност ширине појаса хабања, h_s и h_{max} , параметри који се мере у циљу праћења постојаности алата. Запремина алатног материјала који је уклоњен услед појаве појаса хабања, V_{hl} , могу се приближно прорачунати просечне ширине појаса хабања:

$$V_{hl} = \frac{h_s^2 b \tan \rho}{2}, \quad (3.6)$$

где су:

ρ - леђни угао резног алата

b - ширина резања

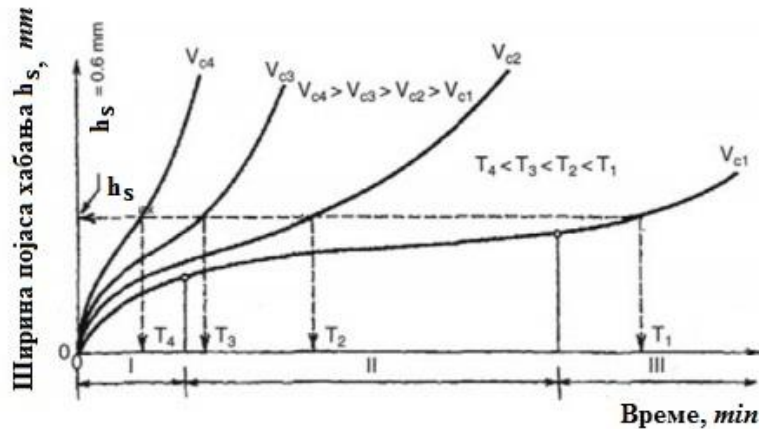
На грудној површини, ширина кратера KB и дубина кратера KT , су најчешће мерени параметри. Укупна запремина алатног материјала уклоњеног услед појаве кратера V_{hg} , може се приближно израчунати коришћењем једначине:

$$V_{hg} = \frac{2b \cdot KB \cdot KT}{3}, \quad (3.7)$$

Умањење запремине резног алата је некада критеријум који се користи за оцену степена постојаности алата. Кратер на грудној површини се увећава и по дубини (KT) и по ширини (KB), а како овај вид хабања напредује ове вредности се мењају. Са смањењем растојања између границе кратера и резне ивице, кратер се стапа са резном ивицом, док редуковање дубине KT слаби резну ивицу и тиме лом алата постаје много извеснији.

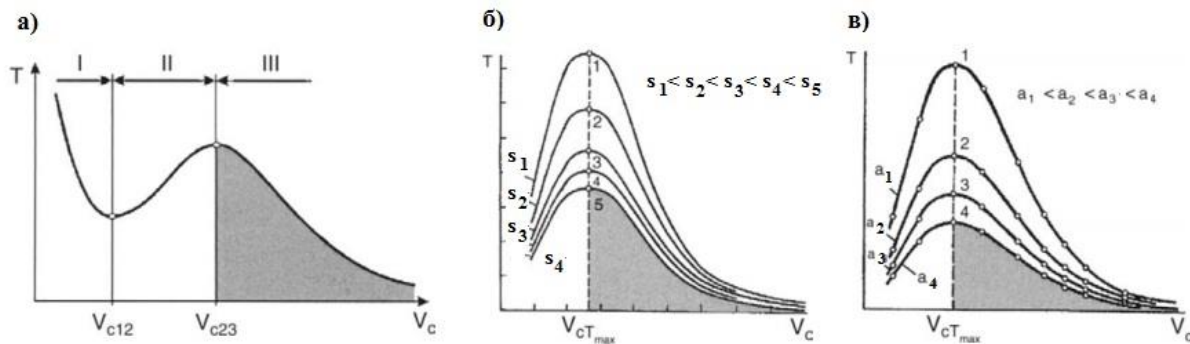
Метод мерења ових облика хабања могу бити прорачуни запремине коришћењем наведених једначина, мерење промене масе алата или коришћењем 3D оптичких микроскопа [4].

Постојаност алата одређена је тренутком када хабање прекорачи одређену границу. Стандардна мера постојаности алата јесте време за које појас хабања достигне ширину $h_s = 0,3 \text{ mm}$ $h_{max} = 0,6 \text{ mm}$, што се може видети на кривој хабања на **слици 3.18**.



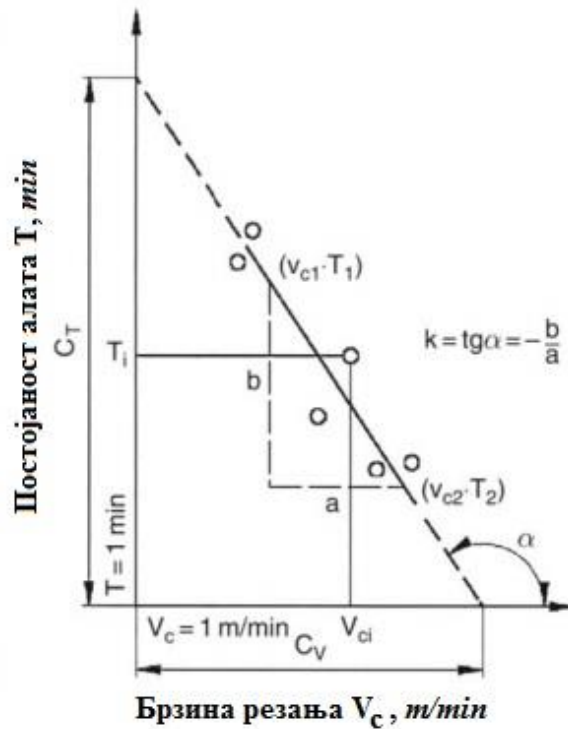
Слика 3.18 Постојаност алата мерена преко промене ширине појаса хабања у току времена

Познато је да постојаност алата зависи од бројних фактора који одликују процес резања, укључујући и оне који се односе на алат (материјал, геометрија итд.), предмет обраде (тврдоћа, чврстоћа, хемијски састав итд.), параметре резања (брзина, корак, дубина) и машину на којој се изводи резање. Отуда је немогуће извести универзалан критеријум постојаности алата за све квалитативне и квантитативне променљиве. У пракси, проблем за дати режим обраде се своди на одређивање утицаја параметра резања, примарно утицај брзине резања ограничене на вредности веће од V_{c23} (област осенчена на слици 3.19). Треба напоменути да на слици у сва три случаја максимална постојаност алата одговара оптималној брзини резања V_{cTmax} .



Слика 3.19 Утицај режима резања на постојаност алата а) брзина резања, б) корак и в) дубина резања

Најчешће коришћена крива хабања базирана је на стандардном ISO тесту спроведеном за две различите брзине резања V_{c1} и V_{c2} . Користећи методу линеарне регресије и дуплологаритамски координатни систем, дијаграм $T-V_c$ на слици 3.20 показује линеарну зависност између постојаности алата и брзине резања.



Слика 3.20 Тејлорова крива зависности постојаности алата и брзине резања у дуплологаритамском координатном систему

Најраспрострањенији модел који се користи за одређивање постојаности алата је Тејлорова једначина:

$$V_c \cdot T^n = C_t, \quad (3.8)$$

где су:

T - постојаност алата

n - експонент који примарно зависи од алатног материјала (нпр. за брзорезни челик $n = 0,1-0,17$ или керамичке алате $n = 0,4-0,6$)

C_t - брзина резања за постојаност алата од 1 min

Уколико $T-V_c$ представља линерану везу, Тејлорова једначина има облик:

$$T = C_T V_c^k, \quad (3.9)$$

где је C_t константа једна T за $V_c = 1 \text{ m/min}$ и k негативан нагиб криве. Нагиб k се може израчунати једначином:

$$\log T = \log C_T + k \log V_c, \quad (3.10)$$

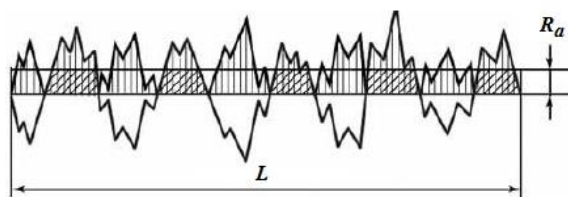
$$k = \tan \alpha = -\frac{b}{a} = \frac{\log T_2 - \log T_1}{\log V_{c2} - \log V_{c1}}, \quad (3.11)$$

3.2.4. Квалитет обрађене површине

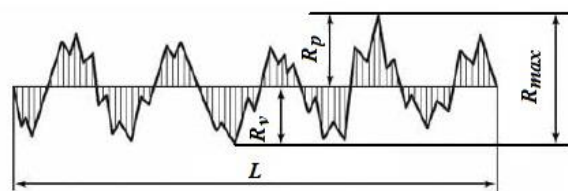
Многи предмети обраде се обрађују тако да имају конзистентне димензије, облик и квалитет обрађене површине. У многим случајевима, а посебно у поступцима завршне обраде, захтевана тачност обрађене површине, као и њен захтевани квалитет, ограничава распон величина алата, његову геометрију и кораке који се могу користити. Штавише, с обзиром да обрађена површина постаје све храпавија и све мање конзистентнија како се постојаност алата смањује, строго захтевани квалитет обрађене површине такође може ограничити животни век алата, а самим тим и имати јак утицај на продуктивност обраде и њену цену. Тачност обраде и валовитост обрађене површине се исто тако мењају са променом постојаности алата јер се дисторзија предмета обраде мења услед повећаног дејства сила резања [4].

Дефинисање и мерење квалитета обрађене површине је веома сложено због тога што карактер обрађене површине укључује тродимензионалан простор. Реална геометрија обрађене површине је толико компликована да коначан број параметара не може пружити њен потпуни опис. Поврх тога, било каква нумеричка процена обрађене површине биће под утицајем правца у којем је изведено мерење у односу на правац простирања профила обрађене површине, као и арбитрарне разлике између храпавости и валовитости [10].

Предлагани су многи параметри преко којих се може описати храпавост обрађене површине. Најчешће коришћени параметри су: средње аритметичко одступање профила од средње линије профила R_a , максимално растојање од средње линије профила до највише тачке профила R_p , максимално растојање од средње линије профила до најниже тачке профила R_v , средња висина профила R_z и максимална висина профила R_{max} . Сви ови параметри дефинисани су у доносу на средњу линију профила m , **слика 3.21** и **слика 3.22**.



Слика 3.21 Аритметичко одступање профила од средње линије профила R_a [15]



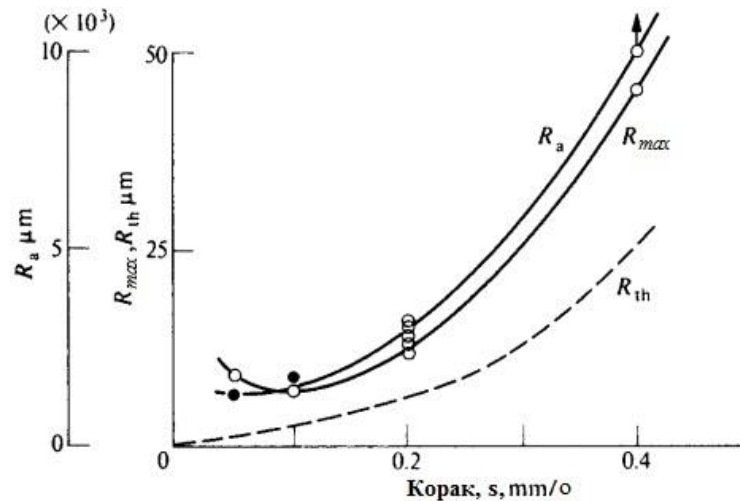
Слика 3.22 Параметри R_p , R_v , и R_{max} [16]

Максимална висина неравнина R_{max} је растојање између две праве паралелне са средњом линијом, а које су повучене тако да додирују највишу и најнижу тачку профила површине. Параметри R_p и R_v представљају максимално одступање највише тачке неравнина од средње линије профила и максимално одступање најниже тачке неравнина од средње линије профила, респективно.

Параметар R_a је најчешће коришћен параметар храпавости обрађене површине и веома је погодан за праћење процеса обраде. Средње аритметичко одступање R_a расте са повећањем хабања алата, а такође је осетљиво и на промене стања хлађења и подмазивања или предмета обраде [4].

Основна геометрија профила обрађене површине је примарно под утицајем резне геометрије алата и корака. У пракси доминантни фактори на квалитет обрађене површине се углавном могу лако дефинисати [5].

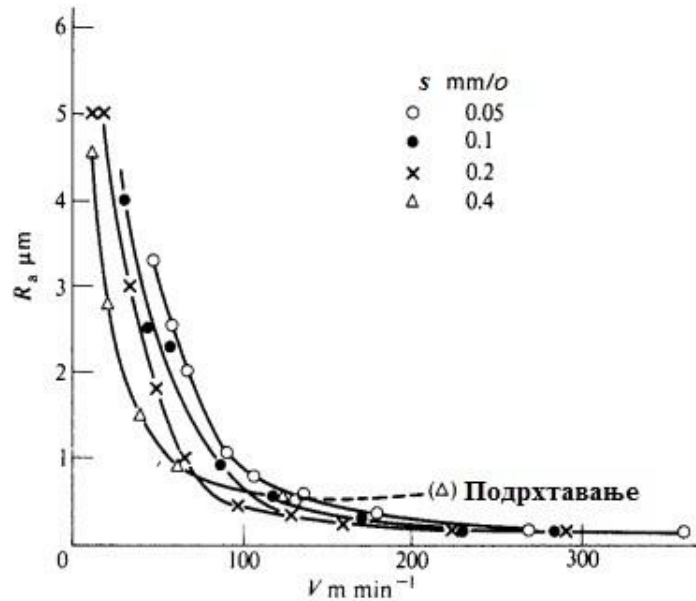
На **слици 3.23** приказан је дијаграм зависности параметара R_{max} (максимална висина неравнина) и R_a (средње одступање профила обрађене површине) од вредности корака s , као и њихово поређење са теоретском вредношћу храпавости R_{th} . Обрада је извршена при дубини резања 2.5 mm , брзини резања 240 m/min , кораку од 0.2 mm/o , вредности леђног угла 6° , вредности грудног угла 0° и употребом алата израђеног од тврдог метала [8].



Слика 3.23 Зависности параметара R_{max} и R_a од корака [8]

Под нормалним условима резања, при обради већине материјала резањем, утицај наслага на резном клину на предмет обраде је мали, посебно уколико се резање изводи керамичким или карбидним резним алатом при економичним брзинама резања. Стога је у пракси деградација обрађене површине, услед неповољних услова резања, изазвана дејством фактора који се могу контролисати, у највећем броју случајева елиминисана. Ако је могуће изводити резање великим брзинама тада штетан утицај малог грудног угла постаје много мање значајан, и као последица стварање додатне храпавости на обрађеној површини. Међутим, при обради жилавих материјала, чак и при великим брзинама, избор грудног угла резног клина је веома важан, и посматрано само са аспекта квалитета обрађене површине повећање грудног угла има тенденцију да побољша услове обраде, као и сам квалитет обрађене површине [5].

На **слици 3.24** је приказан дијаграм односа средњег аритметичког одступања профила обрађене површине R_a и брзине резања V за различите вредности корака s [8].



Слика 3.24 Однос средњег аритметичког одступања површине и брзине резања [8]

Вибрације алата обраде су у прошлости детаљно испитиване, а посебно феномен подрхтавања тј. самопобудних вибрација, али ипак методе којима се оне елиминишу често нису предвидиве. Очигледно је да ће се повећањем и смањењем крутости монтажне базе умањити дејство подрхтавања, због чега је обично прикладно повећати њену крутост. У специфичном случају, када је крутост монтажне базе фиксна, морају се потражити друга решења. Једно од њих је повећање крутости предмета обраде, која се може остварити ефикаснијом употребом стезног прибора.

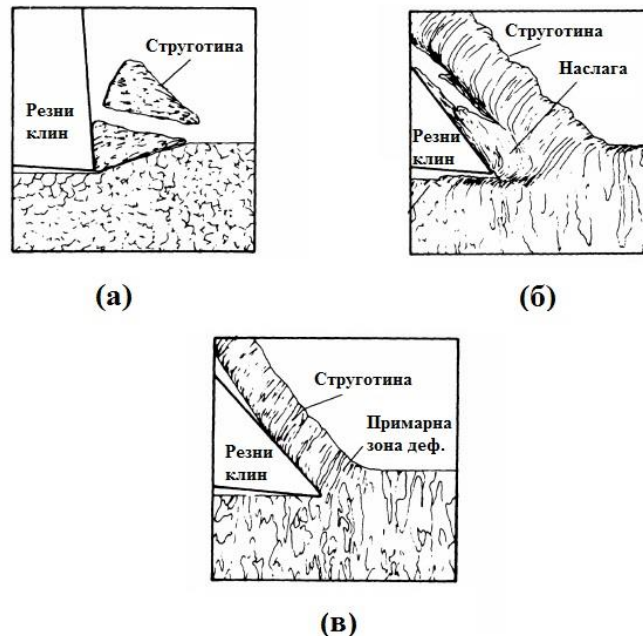
Уколико су стезни прибор и геометрија предмета обраде фиксни онда су промене услова резања неопходне и најчешће се прво испитује утицај промене брзине резања. Ако ове промене не доносе жељени ефекат онда промена корака може бити делотворна, нарочито њено повећање; нажалост овај поступак ће произвести храпавију површину. Следећа алтернатива која може имати повољан ефекат је употреба или промена средства за хлађење и подмазивање [5].

3.2.5. Врсте и облици одвојене честице

Велики део пластичних деформација при обради метала резањем јавља се у процесу формирања струготине, која може бити веома разноврсних облика и величина. Први задатак при анализирању процеса резања јесте идентификација основних облика струготине, приказаних на слици 3.25. Ова три типа су дефинисана од стране Ернста и Мерчанта током њиховог развоја теорије ортогоналног резања; четврти (слика 3.36) је уочен нешто касније са повећањем брзина резања и увођењем нових материјала обраде.

Први тип струготине (слика 3.2а) је прекидна или дисконтинуална струготина знатне величине. Она се формира приликом резања кртих материјала попут ливеног гвожђа и бронзе, као и неких жилавих материјала (под одређеним условима обраде). Крти материјали немају тенденцију да трпе велика смицајна напрезања која се јављају при

резању. Како резни алат долази у контакт са металом, јавља се одређени нормални напони и струготина почиње да клизи уз површину алата. Наношењем све већег напона на крти материјал резањем, метал се сабија све док не дође до његовог лома у равни смицања и струготина почиње да се одваја од предмета обраде. Овај циклус се понавља све док траје процес обраде, а за последицу има слабији квалитет обрађене површине предмета обраде.



Слика 3.25 Типови струготине: а) прекидна или дисконтинуална б) континуална у условима појаве наслага в) непрекидна или континуална (тракаста)

Остали услови обраде који могу довести до формирања овог типа струготине су:

- обрада материјала који садржи нечистоће
- веома мала/велика брзина резања
- велика дубина резања
- веома мала вредност грудног угла при резању
- мала крутост алата
- недостатак ефикасног средства за хлађење и подмазивање.

Други тип струготине (слика б) је континуална струготина са појавом наслага на резном клину алата; овај тип струготине се обично среће при обради меких, жилавих метала, иако многи материјали стварају насlage при малим брзинама резања.

Екпериментални докази указују на то да до појаве наслага долази у следећим условима [6]:

- при обради жилавих материјала
- при мањим брзинама обраде ($<60 \text{ m/min}$)
- уколико је велика дубина резања
- уколико је резна ивица алата тупа
- при великом трењу између струготине и алата
- при малим вредностима грудног угла

Трећи тип струготине (слика в) је континуална или непрекидна струготина која се формира без наслага на резном клину алата. Ово је најпожељнији тип струготине [4].

Овај тип струготине је честа појава при обради већине жилавих материјала, попут кованог гвожђа, нискоугљеничних челика, бакра или алуминијума. Показало се да су карактеристике процеса резања, при обради у оваквим условима, у току времена константне. Из овог разлога већина истраживања, спроведених у области обраде метала резањем, се бавила добијањем континуалне струготине. Стварање овог облика струготине одвија се у зони која се простире од резне ивице алата до споја слободне површине предмета обраде и струготине, тј. у примарној зони деформације. Да би дошло до деформације материјала на овај начин, силе које морају бити пренете на струготину преко њене контактне површине са алатом такође морају бити довољне да се деформишу слојеви струготине који се нађу у секундарној зони деформације, у којој долази до клизања струготине по грудној површини алата [7].

Последњи тип - ламеларна струготина, приказана на **слици 3.26**, представља макроскопску континуалну струготину која се састоји из уских ламела тешко деформисаног материјала. До стварања ове струготине долази када се граница течења предмета обраде смањује са повећањем његове температуре; под погодним условима се материјал ламеле, који се нађе у контакту са алатом, брзо загрева и постаје слабији од материјала остатка ламеле, што доводи до појаве локалних деформација. Овај тип струготине се јавља при обради каљеног и нерђајућег челика и титанијумских легура са великим брзинама резања [4].



Слика 3.26 Ламеларни тип струготине [4].

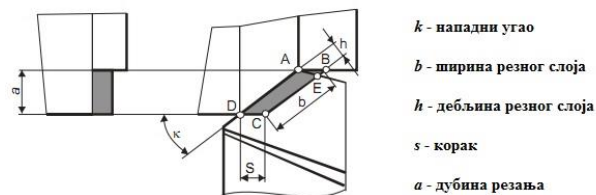
ISO 3685-1977 стандард класификује струготину по њеној величини и облику који се генерално добија при обради метала резањем. Ова класификација, приказана на **слици 3.27**, састоји се од осам група које се односе на облик струготине, од којих сваку чини једна до четири подгрупе које говоре о њеној величини. Поред тога, слика садржи и нумеричке ознаке које за дате облике струготине описују њен смер одвођења (ознака 1-5) или облик при одвођењу (5-8) [10].

Уколико се струготина у току резања не ломи природно, онда се мора користити ломач, повећати корак или се самом предмету обраде мора повећати крстост. Већина ових параметара, не рачунајући корак, има мали или занемарљив утицај на склоност струготине ка лому, осим њиховог утицаја на дебљину деформисане струготине δ_{st} . Најефикаснији начин промене параметра δ_{st} јесте промена дебљине недеформисане струготине.

1. Тракасти облик	2. Цилиндрични облик	3. Спирално цилиндрични облик	4. Завојно цилиндрични облик	5. Завојно конусни облик	6. Неодређени облик	7. Дробљена струготина	8. Игличasti облик
1.1. Дуга	2.1. Дуга	3.1. Равна	4.1. Дуга	5.1. Дуга			
1.2. Кратка	2.2. Кратка	3.2. Конусна	4.2. Кратка	5.2. Кратка			
1.3. Замршена	2.3. Замршена		4.3. Замршена	5.3. Замршена			

Слика 3.27 Класификација облика струготине по ISO 3685-1977 стандарду

Пораст нападног угла κ , приказаног на слици 3.28, даје ниже вредности дебљине деформисане струготине δ_{st} за исту вредност корака, па се одатле може закључити да је тенденција струготине да се ломи смањена са порастом нападног угла κ . Дубина резања има мали утицај на однос дебљине деформисане струготине и корака (δ_{st}/s), а самим тим и занемарљив утицај на лом струготине.



Слика 3.28 Резни слој у обради стругањем [2]

Употреба ефикасног средства за хлађење и подмазивање обично смањује контактну површину између струготине и резног алата, што за последицу има позитиван утицај на лом струготине. Промена грудног угла алата α има мањи утицај на лом струготине. Дебљина деформисане струготине δ_{st} расте са смањењем грудног угла [8].

Са повећањем брзине резања струготина често постаје жилавија и самим тим пораст брзине има тенденцију да узрокује њено неефикасно ломљење, због чега она постаје дуга. Због тога, у циљу одржавања ефикасног лома струготине, повећање брзине резања мора пратити пораст корака [5].

4. МЕТОДЕ ИСПИТИВАЊА ОБРАДИВОСТИ

Сва испитивања којима се утврђује обрадивост неког материјала предмета обраде могу се поделити на две групе:

- она која не захтевају извођење обраде резањем и
- она која то захтевају.

Паралелна подела, која узима у обзир цео систем предмет обраде-резни алат даје још две категорије испитивања:

- коришћењем компаративне методе и
- коришћењем апсолутне методе.

Компаративна метода указује на релативну обрадивост две или више комбинација предмет обраде - резни алат, док апсолутна метода показује релативне вредности обрадивости за бар две комбинације предмета обраде и резног алата за цео спектар услова резања. Резултати добијени спровођењем апсолутне методе, иако су у многим случајевима корисни, имају два главна недостатка. Прво, чак и ако дато испитивање покаже да, на пример, материјал предмета обраде *A* има бољу обрадивост од материјала предмета обраде *B*, а он сам показује бољу обрадивост од материјала предмета обраде *B*, у највећем броју случајева не постоји назнака величине ове разлике обрадивости између њих. С друге стране, чак и да се испитивањима покушају упоредити предмети обраде за дате услове обраде, не постоји гаранција да ће при промени ових услова резања однос обрадивости између предмета обраде остати исти. Резултати ове методе су обично примењиви за испитивања при различитим брзинама резања и у неким случајевима узимају у обзир и промену других параметара резања, као и резну геометрију.

Стога, испитивања обрадивости материјала се у теорији могу сврстати у један од четири типа, а у пракси, она која не захтевају примену неког поступка резањем су увек компаративна, док она која укључују и резање могу бити и компаративна и апсолутна.

Испитивања при којима се не изводи резање предмета обраде и компаративне методе испитивања захтевају мање времена од апсолутне методе и обично имају назив краткотрајна испитивања.

Једна од главних примена испитивања обрадивости јесте процена материјала предмета обраде како би се са сигурношћу избегао превремени лом резног алата при резању под одређеним условима. Такође је врло битно да цена испитивања буде мања од уштеда до којих ће доћи услед анализирања резултата самог испитивања, као и да скупља испитивања резултирају већом ефикасношћу процене материјала предмета обраде. То суштински значи да ће постојати обим испитивања при којем је разлика између уштеда и цене испитивања максимална. У пракси постоји снажно искушење да се испитивања, или не спроведу или да она буду темељна и обимна, што свакако треба избегавати.

Још једна важна примена коју испитивање обрадивости има јесте и евалуација нових алатних материјала, као и материјала предмета обраде. Тако на пример, уколико се развија нови материјал, веома је важно утврдити карактеристике обрадивости тог материјала за широк опсег услова резања, алатних материјала и резних геометрија, као и конзистентност тих карактеристика [5].

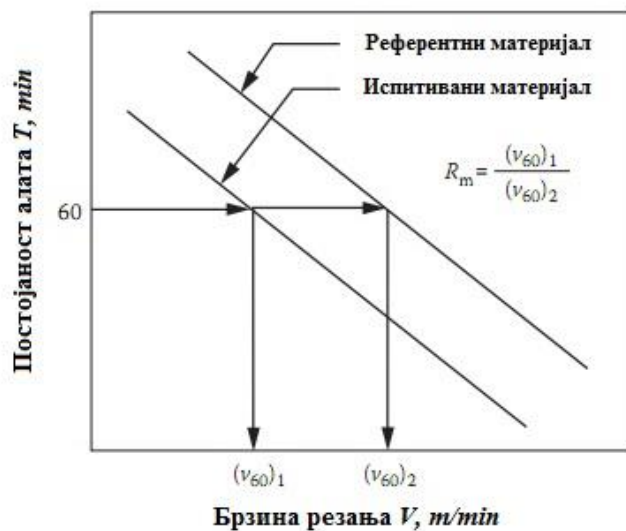
4. 1. Индексне методе испитивања обрадивости

Пре обраде нових материјала, кључно је одабрати праве параметре резања попут алатног материјала, брзине резања, корака и машине на којој ће обрада бити спроведена. Информација која говори о томе колико ће бити лако или тешко обрадити неки материјал, у поређењу са материјалом чија обрадивост је позната, може се добити преко индекса обрадивости. С обзиром да не постоји јединица обрадивости, обично се она процењује упоређивањем два различита материјала, од којих један игра улогу референтног материјала или еталона. Тако се на пример по AISI B1112 стандарду као референтни материјал узима челик са хемијским саставом угљеника 0,08%-0,13%, мангана 0,6%-0,9%, фосфора 0,09%-0,13% и сумпора 0,16%-0,23%, као и тврдоћом од 160 HB. Пошто се ради о референтном материјалу узима се да је вредност његовог индекса обрадивости 1.0. То значи да уколико испитивани материјал има индекс обрадивости мањи од 1 онда ће он бити теже обрађен од референтног. Супротно томе, уколико је вредност индекса већа од 1 онда ће испитивани материјал показати бољу обрадивост од референтног материјала.

Обрадивост референтног материјала се најчешће изражава преко брзине резања V_{60} при којој постојаност алата T износи 60 минута. Обрадивост било ког другог материјала се може одредити на идентичан начин. Одавде се индекс обрадивости испитиваног материјала може израчунати једначином:

$$I_m = \frac{V_{60 \text{ испитиваног материјала}}}{V_{60 \text{ референтног материјала}}}, \quad (4.1)$$

На слици 4.1 приказани су резултати испитивања обрадивости [6].



Слика 4.1 Резултати испитивања индекса обрадивости

Индекс обрадивости материјала може се рачунати и у случају када је индекс обрадивости референтног материјала 100. Тада наведена једначина има облик:

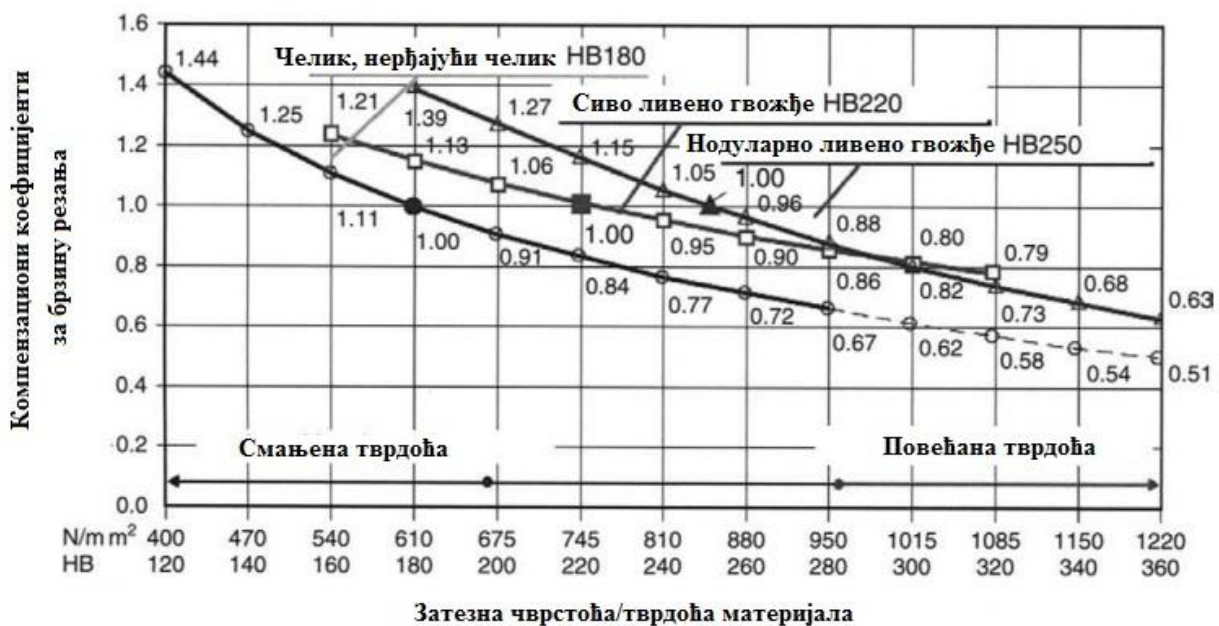
$$I_m = 100 \times \frac{V_{60\text{испитиваног материјала}}}{V_{60\text{референтног материјала}}}, \quad (4.2)$$

Индекс обрадивости може се рачунати и при постојаност алата од 20 или 90 минута, али се овај поступак ређе примењује [4].

Критеријуми за оцену обрадивости материјала предмета обраде, уколико се примењује компаративна метода, заснивају се на основу: постојаности алата, економичне брзине резања, трошкова обраде, отпора резања, температуре резања, храпавости обрађене површине итд. [2].

Да би дошло до имплементације оцена обрадивости, препоручљиво је различитим материјалима дати оцену и класификовати их по групама на основу њихове затезне чврстоће, ако се ради о угљеничним и легираним челицима, или специфичног притиска резања за остале материјале. На пример, по категоризацији коју је извршила компанија *Seco Tools*, меки и угљенични челици (група ISO P) имају оцену 7, нерђајући челици (група ISO M) и ливено гвожђе (група ISO K) оцену 4, а обојени метали и суперлегуре (група ISO A и група ISO N) оцену 5. Овим ће се постићи могућност избора одговарајућих почетних вредности параметара резања за различите групе материјала предмета обраде.

У пракси, такође је неопходно компензовати одступање одабране брзине резања или корака од оне која је препоручена, или уколико се јавља одступање у тврдоћи материјала предмета обраде у односу на почетну вредност постојаности алата. Ово се постиже применом одговарајућих компензационих коефицијената (приказаних на **слици 4.2**) које даје произвођач резног алата.



Слика 4.2 Корекције брзина резања за различите вредности тврдоће материјала предмета обраде класификованих у групе ISO P, M и K

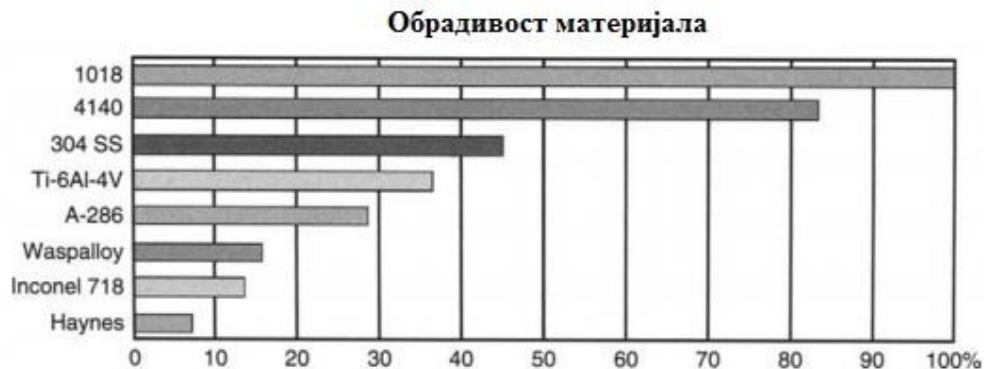
Веза између препоручене и кориговане брзине и дубине резања за различите вредности тврдоће материјала предмета обраде дата је изразом:

$$V_{c2} = V_{c1} (a_{po}/a_p)^p (RC_0/RC)^q, \quad (4.3)$$

где је V_{c1} препоручена брзина резања за дубину резања a_{po} и тврдоћу по Роквелу RC_0 .

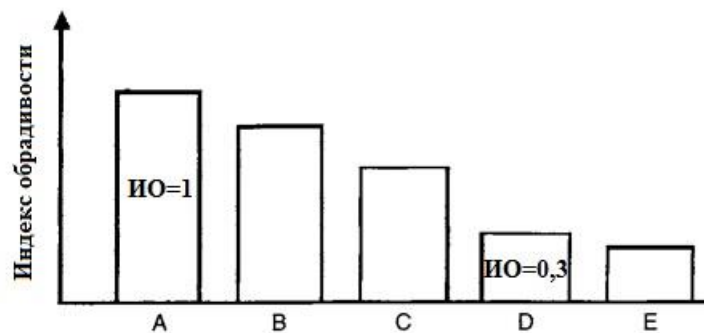
Тако на пример, уколико материјал предмета обраде из групе ISO P има тврдоћу од 240 HB, што је већа вредност од стандардне за ту групу (180 HB), коригована брзина резања ће бити $305 \times 0,77 \approx 235 \text{ m/min}$ ($a_p = 3 \text{ mm}$ и $s = 0,4 \text{ mm/o}$).

На **слици 4.3** приказани су индекси обрадивости материјала који припадају различитим ISO групама. Оно што се може приметити је да суперлегури (*Waspalloy*, *Inconel 718* и *Haynes*), које припадају групи екстремно тешко обрадивих материјала, имају индекс обрадивости 8-15% у односу на AISI 1018 нискоугљенични челик.



Слика 4.3 Поређење индекса обрадивости материјала

На **слици 4.4** приказани су индекси обрадивости за различите техничке легуре гвожђа, почетно са сивим ливеним гвожђем (A) које има индекс 1, па све до нодуларног ливеног гвожђа (D, индекс 0,3) и белог ливеног гвожђа (E) који има још мању вредност индекса обрадивости. Према подацима из ASTM стандарда, индекс обрадивости нодуларног ливеног гвожђа зависи ће од његове тврдоће, па ће за вредности 183, 200 и 230 HB износити 0,6, 0,5 и 0,4, респективно [10].



Слика 4.4 Индекс обрадивости техничких легура гвожђа: A - сиво ливено гвожђе, B - темперовано ливено гвожђе C - вермикуларни лив, D - нодуларно ливено гвожђе E - бело ливено гвожђе

4.2. Испитивања обрадивости материјала без извођења резања

Механичка и физичка својства материјала предмета обраде имају утицај на количину утрошене енергије на резање, као и на температуре које се јављају приликом резања. Због тога је битно познавати стање предмета пре његове обраде тј. факторе стања који утичу на обрадивост [6]:

- *Микроструктура* се односи на кристалну структуру материјала предмета обраде. Метали сличне микроструктуре имаће сличне карактеристике обрадивости. Свака промена микроструктуре неког материјала утицаће на његову обрадивост.
- *Величина кристалних зрна* материјала је општи показатељ његове обрадивости. Метали код којих су зрна мале величине и која немају дефекте у својој структури склони су лакшем резању, као и постизању бољег квалитета обрађене површине.
- *Термичка обрада* материјала представља поступак који за циљ може имати смањење кртости, уклањање напона, постизање одређене жилавости, повећање чврстоће, као и промену микроструктуре, тврдоће или других карактеристика које имају директан утицај на обрадивост.
- *Хемијски састав* материјала је један од главних фактора који одређују његову обрадивост.
- *Начин добијања предмета обраде*, било да се ради о топлом ваљању, хладном ваљању, хладном извлачењу, ливењу или ковању, утицаће на величину зрна, жилавост, чврстоћу, тврдоћу, структуру, а самим тим и на обрадивост.
- *Тврдоћа* материјала је у узајамној вези са величином зрна и генерално се користи као показатељ његове обрадивости. Што тврдоћа материјала већа то му је обрадивост мања.
- *Граница течења*. Висока вредност границе течења материјала указује на његову смањену обрадивост, јер ће у том случају силе резања и потрошња енергија бити повећани.
- *Затезна чврстоћа*. Велика затезна чврстоћа утицаће на смањење обрадивости материјала.

Један од фактора на који треба обратити пажњу при разматрању обрадивости јесте конзистентност предмета обраде. На обрадивост материјала предмета обраде утицај имају различите карактеристике (попут тврдоће, микроструктуре, итд.) које зависе од начина на који је он фабрикован. Уколико се при испитивању обрадивости користе узорци материјала који су добијени на различите начине резултати испитивања могу бити нејасни. Препоручљиво је да величина узорка на којем се врши испитивање буде стандардизована уколико је то могуће, како би се избегле варијације услед пораста температуре при резању. Такође треба тежити да карактеристике материјала буду униформне у свим деловима узорка. Уколико унутар материјала постоје озбиљне промене у микроструктури од његове спољашњости ка његовој унутрашњости, онда је потребно одабрати одговарајућу величину узорка и процес обраде [4].

4.2.1. Испитивање хемијског састава предмета обраде

Многа испитивања овог типа развијана су тако да резултати осталих компаративних метода испитивања буду у корелацији са примарним састојцима разматраног материјала предмета обраде. Сматра се да су резултати добијени овом методом валидни само за материјале истог типа и исте топлотне историје, али упркос томе ова испитивања, као и многе компаративне методе, могу бити веома корисна при провери материјала предмета обраде пре његове употребе, под претпоставком да су ограничења самог испитивања позната.

Ова испитивање се могу спровести на два начина. Оба упоређују разматрани материјал предмета обраде у односу на брзину резања при којој постојаност алата износи 60 минута (V_{60}) и индекс обрадивости износи 100 [5].

Први начин испитивања дефинисао је Цаплицки преко везе брзине резања V_{60} и хемијског састава предмета обраде:

$$V_{60} = 161,5 - 141,4 \times \%C - 42,4 \times \%Si - 39,2 \times \%Mn - 179,4 \times \%P + 121,4 \times \%S$$

Овај начин најчешће се користи при испитивању челика.

Други начин испитивања, према Болгеру, дефинише везу између индекса обрадивости и хемијског састава материјала предмета обраде као:

$$\text{Индекс обрадивости} = 146 - 400 \times \%C - 1500 \times \%Si + 200 \times \%S$$

4.2.2. Испитивање микроструктуре предмета обраде

Вероватно најкориснија евалуација утицаја микроструктуре предмета обраде на обрадивост челика развијена је од стране Златина и Филда. Резултати тог испитивања сумирани су на **слици 4.5** где се може видети да челици који садрже више од 50% перлита приказују комбинацију добрих карактеристика обрадивости са високом тврдоћом.

УТИЦАЈ МИКРОСТРУКТУРЕ ЧЕЛИКА НА ЊЕГОВУ ОБРАДИВОСТ

Тип микроструктуре	Тврдоћа по Бринелу	Брзина резања V_{20} (m/min)	Индекс обрадивости
			Постојаност алата при константној брзини резања (min)
10% Pearlite + 90% Ferrite	100–120	290	8
20% Pearlite + 80% Ferrite	120–140	260	6
25% Pearlite	150	—	—
Spheroidised	160–180	180	5
50% Pearlite + 50% Ferrite	150–180	—	4
50% Fine pearlite + 50% Network ferrite	202	—	—
75% Pearlite + 25% Ferrite	170–190	140	3
100% Pearlite	180–220	145	2
Tempered martensite	240	—	—
"	280–320	105	1
"	350	—	—
"	370–420	46	0.2

Слика 4.5 Утицај микроструктуре челика на његову обрадивост

Такође указују на то да постојаност алата примарно зависи од релативних пропорција перлита и ферита, као и да ли оптималан однос између њих постоји.

Новија истраживања показују да за комерцијалне материјале мање заступљени елементи имају значајан утицај на обрадивост - где су вероватно највише испитивани утицаји мангана и сумпора, и то у облику честица манган-сулфида, хемијског једињења које они формирају. Различите студије показују да, док је количина мангана и сумпора у челику очигледно важна, облик, величина и расподела честица манган-сулфида утичу на обрадивост. Тако је утврђено да крупне честице манган-сулфида које су равномерно распоређене у материјалу дају добру обрадивост, а додавањем фосфора највише до 0,7% такође помаже њеном повећању.

У теорији, испитивање микроструктуре предмета обраде би боље требало да укаже на својства обрадивости материјала од случаја када се испитује само хемијски састав. Међутим у овим испитивањима јављају се два главна проблема. Пре свега, тешко је за кратко време измерити, чак и приближно, саставне делове неког материјала, а чак и када се они могу одредити, оцена обрадивости тежи да буде субјективно описана попут добре, осредње или лоше. Поред тога, опрема и људство који су неопходни да би се извршила потребна мерења нису увек лако доступни [5].

4.2.3. Испитивање физичких својстава предмета обраде

Неке од физичких карактеристика које утичу на обрадивост материјала су [6]:

- *Модул еластичности* материјала користи се као показатељ његових еластичних својстава када се нађе под дејством спољашњих сила. Што је већа његова вредност то ће обрадивост материјала бити мања.
- *Топлотна проводљивост* материјала представља његову ефикасности провођења топлоте. Тако на пример, узимајући у обзир ово својство титанијум показује лошу обрадивост јер поседује слабу топлотну проводљивост, па ће се при његовој обради јављати високе температуре резања, као и тенденција ка настанку наслага на резном клину.
- *Термичка дилатација* представља меру у којој се материјал шири са повећањем његове температуре и дефинисана је преко коефицијента ширења. Што је овај коефицијент већи то ће бити веће ширење материјала са порастом његове температуре. Материјали који имају велики коефицијент ширења показују мању обрадивост јер је теже контролисати њихове димензије током обраде.
- *Отврдњавање*. Многи метали показују физичко својство које узрокује драстични пораст тврдоће. У току резања, унутрашњи напони у металу могу деловати тако да изазову повећање његове тврдоће. Интензитет отврдњавања варира у зависности од тога о каквом материјалу се ради. Такође, топлота настала у току резања има битну улогу у процесу отврдњавања. Што је степен отврдњавања у току обраде већи, то је обрадивост мања.

Потрага за једноставним, а опет поузданим критеријумом за одређивање обрадивости, базираним на физичким карактеристикама материјала предмета обраде, довела је до развоја опште једначине обрадивости:

$$V_{60} \propto \frac{B}{LH_B} \left(1 - \frac{A_r}{100}\right)^{1/2}, \quad (4.4)$$

где су:

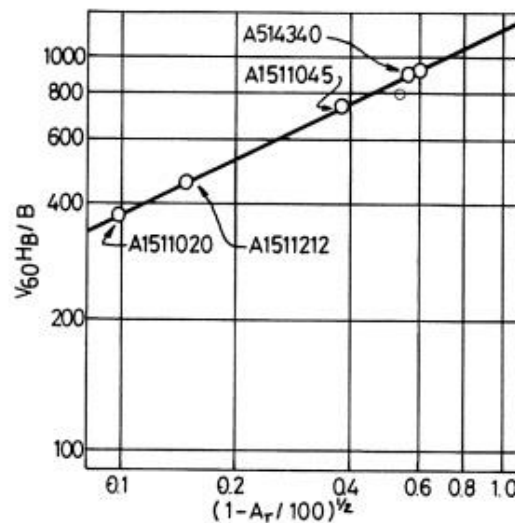
B - топлотна проводљивост материјала,

L - карактеристична дужина испитиваног дела,

H_B - тврдоћа материјала по Бринелу,

A_r - процентуално умањење површине материјала добијено конвенционалним испитивањем затезањем.

Неки од резултата овог испитивања графички су приказани на **слици 4.6**, где се може видети да за одабране челике постоји добра корелација.



Слика 4.6 Компарација опште једначине обрадивости и експерименталних података за различите легуре гвожђа

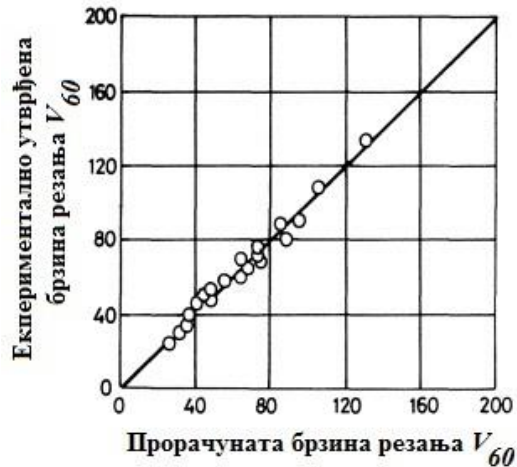
Сличним испитивањем Јанички је дошао до израза:

$$V_{60} \propto \frac{D}{H_B A_r}, \quad (4.5)$$

где параметар D представља константу која зависи од величине испитиваног одсечка материјала.

Резултати добијени коришћењем ове једначине приказани су на **слици 4.7**, где као и код претходно дефинисаног израза постоји добра корелација са експерименталним подацима.

Као што је случај са већ наведеним методама, под претпоставком да је опрема неопходна за извођење испитивања доступна, као и то да је састав испитиваних материјала сличан, постоји веома велика вероватноћа да ће брзина резања V_{60} бити одређена са прихватљивом прецизношћу [5].

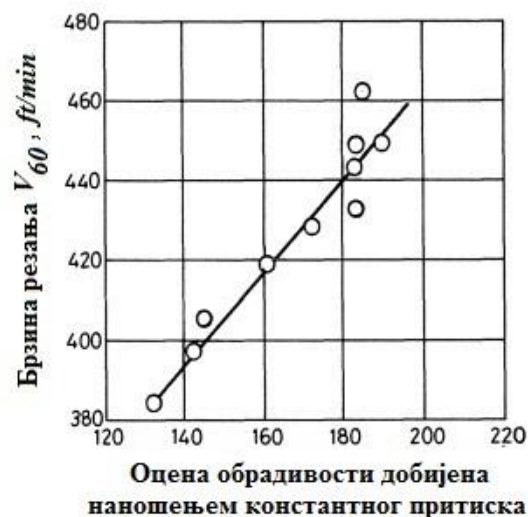


Слика 4.7 Компарација експериментално утврђене постојаности алата и постојаности утврђене прорачуном на основу података о физичким својствима, за 20 различитих челика

4.3. Испитивања обрадивости материјала са извођењем резања

4.3.1. Метода константне силе

Вероватно најпознатније, од свих испитивања која укључују извођење обраде резањем, јесте испитивање наношењем константног притиска развијено од стране Болгера. Испитивање се врши при обради стругањем на стругу специјално адаптираном тако да је главна сила резања константна, а корак, остварен резањем алатом који има претходно дефинисану геометрију, се узима као мерило обрадивости материјала предмета обраде. Ова метода практично мери контактну трење између струготине и алата, али с обзиром да је оно уско везано за температуру резања (која опет има изражен утицај на постојаност резног алата), може се очекивати да ће добијени резултати бити корисни. Карактеристични резултати добијени серијом ових испитивања приказани су на **слици 4.8** [5].



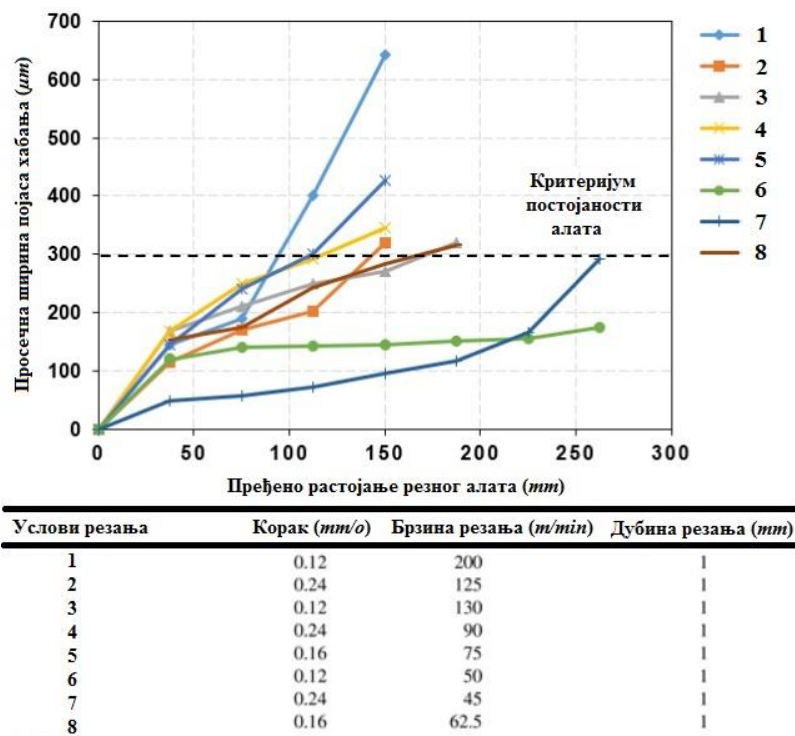
Слика 4.8 Поређење индекса обрадивости за два типа испитивања

Овај начин испитивања је такође прилагођен и за поступке обраде глодањем и тестерисањем. Као што се може очекивати, ограничења која важе за обраду стругањем важе и за ове поступке. У пракси, главни недостатак овог испитивања је тај што за брзо генерисање резултата, специјално адаптирана машина на којој се испитивање изводи је неопходна.

4.3.2. Метода интензивног стругања

Испитивање се врши тако што се алат поставља насупрот средишта чеоне стране предмета обраде цилиндричног облика. Пожељно је да предмет обраде има што већи пречник. Мерило обрадивости представља растојање које алат пређе радијално ка ободу предмета обраде или дужина резања до тренутка лома алата, а све то у поређењу са испитивањима изведеним на референтном предмету обраде. Испитивање је ограничено на коришћење брзорезних челика као алатног материјала с обзиром да катастрофални лом алата није валидан критеријум при коришћењу тврдых метала. Иако се испитивање обавља брзо, а поред тога се може вршити и на стандардним струговима, јављају се два велика недостатка. Прво, пречник испитиваног предмета обраде у пракси може бити значајно мањи од оног који је потребан за испитивање, а поред тога, уколико тестирани материјал нема хомогену структуру, испитивање ће дати процену својстава материјала за различите пречнике, која неће неминовно указивати на понашање материјала на растојању на којем ће се изводити обрада. Овај недостатак се делимично може савладати бушењем отвора, одговарајућег пречника, у средишту предмета обраде (на његовој чеоној страни) [17].

На **слици 4.9** приказан однос просечне ширине појаса хабања и пређеног растојања резног алата за различите услове резања.



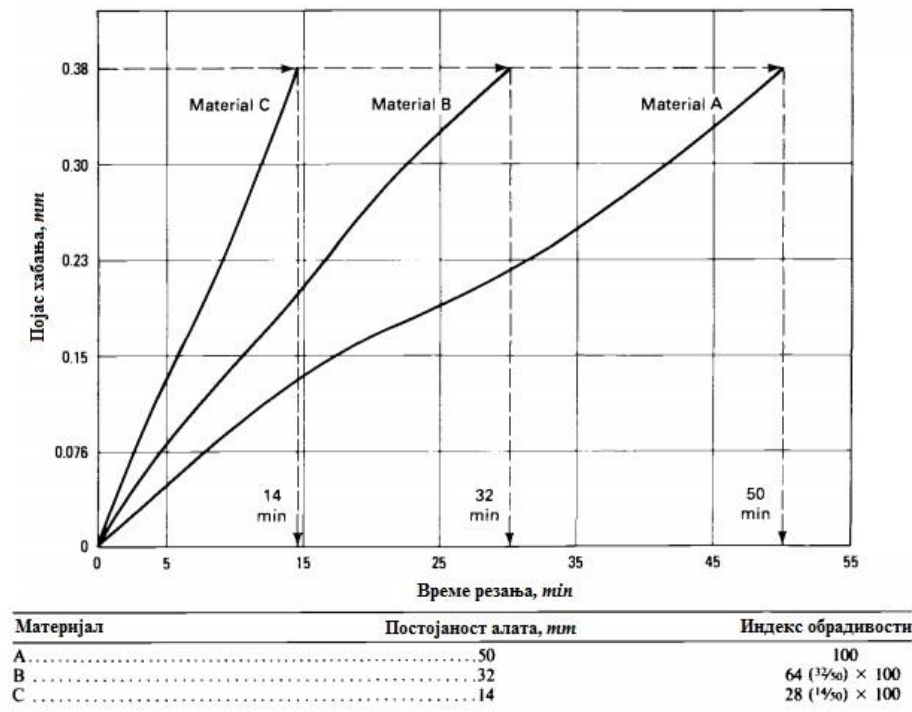
Слика 4.9 Однос просечне ширине појаса хабања и пређеног растојања резног алата за различите услове резања

Материјал на којем су реализована претходна испитивања је легура титанијума Ti-6Al-4V. Може се видети да се ширина појаса хабања повећава са применом већих вредности брзина резања. Резање је извођено до тренутка када ширина појаса хабања износи $300 \mu m$, за сваку од наведених варијација услова обраде [21].

4.3.3. Метода хабања деградираног алата

Креирана су многа испитивања која за циљ имају процену обрадивости предмета обраде применом алатних материјала који имају мању тврдоћу од стандардно примењиваних. Према испитивању Милса и Редфорда, спроведеном на α и β месингу са додатком олова обрађеном уз помоћ резног алата смањене тврдоће, утврђено је да је тврдоћа алата изузетно кључна, у смислу да уколико се користи превише мек алатни материјал до катастрофалног лома долази за врло кратко време, док при истим условима тврд алатни материјал не показује знаке хабања. Несумњиво, уколико је испитивани материјал теже обрадити и уколико се тврдоћа резног алата не мора драстично смањивати, онда би сама тврдоћа имала много мање важну улогу [17].

На слици 4.10 приказани су резултати испитивања обрадивости за три различита материјала праћењем појаве појаса хабања на резном клину. При овом испитивању брзина, корак и дубина резања су константне. Укупан број пролаза резне плочице који је потребан да се достигне ширина појаса хабања од 0.38 mm или дубина кратера од 0.13 mm , се узима као критеријум постојаности алата. За дато испитивање са слике параметри резања су: брзина резања 275 m/min , корак 0.4 mm/o и дубина резања 1.6 mm [20].



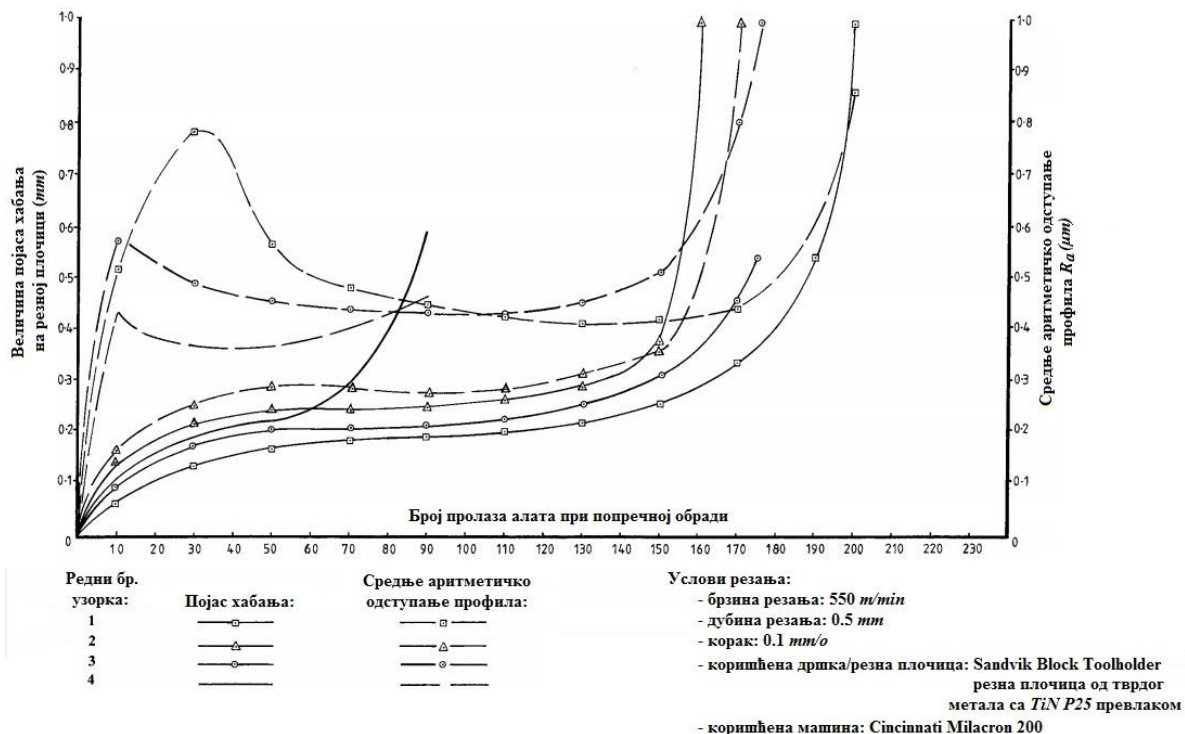
Слика 4.10 Обрадивости различитих материјала које су утврђене методом хабања деградираног алата

За овај тип испитивања критеријум отказа алата је исти као и код већине других испитивања постојаности алата, тј. величина појаса хабања на леђној површини резног алата или кратера на грудној површини или потпуни отказ алата. Уколико се врши поређење више материјала онда је основна претпоставка испитивања да се обрадивост материјала може одредити уколико се користи исти резни алат стандардне тврдоће. Нажалост, ово не мора бити случај, различити материјала најчешће захтевају различите алате различитих карактеристика (материјал, геометрија и др.). Уколико се испитивања ограниче на сличне материјале, може се очекивати да ће се добити прихватљиви резултати. Уколико се испитивање врши са циљем утврђивања обрадивости одређеног материјала у односу на неки стандардни, онда је потребно утврдити везу између резултата добијених коришћењем мекшег резног алата и оних који су добијени употребом стандардних резних алата [5].

4.3.4. Метода наглог хабања алата

Алтернатива смањењу тврдоће резног алата, као начину да се достигне већи обим његовог хабања, јесте повећање параметара резања, првенствено брзине. С обзиром да је постојаност алата за брзорезне челике пропорционална брзини резања подигнутој на степен између 4 и 5 (док је вредност истог степена за алате од тврдог метала између 2 и 3), значајно повећање хабања се обично може постићи умереним повећањем брзине резања.

На слици 4.11 приказане су криве постојаности алата добијене као резултат ове методе испитивања [17].

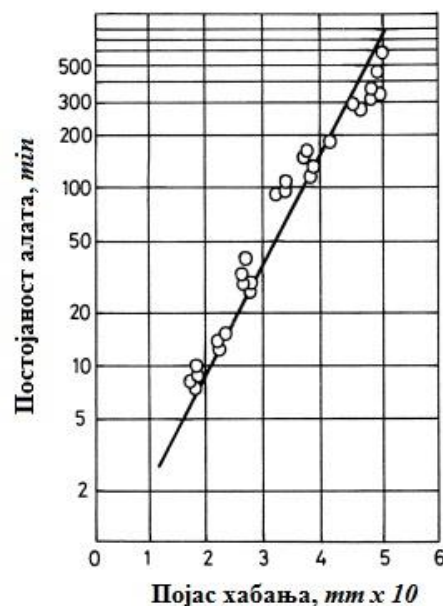


Слика 4.11 Графички резултати добијени применом методе наглог хабања алата

Нажалост, иако Тејлорова једначина за одређивање постојаности алата ($VT^{1/k} = C$) често важи за практичне брзине резања, постоје одступања уколико се резање обавља при веома малим или веома великим брзинама. При великим брзинама ово одступање се најчешће приписује промени стања материјала предмета обраде која је последица појаве високе температуре. Због тога није препоручљиво примењивати податке о односу постојаности алата и брзине резања уколико је циљ добијање квантитативних података о постојаности резних алата за оне брзине које нису биле у распону испитиваних брзина. Из тог разлога, већа је вероватноћа да ће ово испитивање дати корисну информацију о поређењу низа сличних материјала, или може бити од помоћи при одређивању обрадивости материјала у поређењу са предодређеним стандардом [5].

4.3.5. Метода хабања алата од брзорезног челика

Као алатни материјал код ових испитивања користи се брзорезни челик, а испитивање се врши према ISO стандарду. Као што се може очекивати, време за које ће се јавити катастрофални лом алата је мање са повећањем брзине, али оно што је још важније, количина хабања која је настала до тренутка када се јавља катастрофални лом (тј. на крају секундарне зоне хабања), смањује се са повећањем брзине резања. Утврђено је да се цртањем полулогаритамског дијаграма, који показује однос ширине појаса хабања на леђној површини и постојаности алата, добија права линија која указује на линеарну промену. Пример таквог дијаграма показан је на **слици 4.12**. Испитивање је обављено на пет различитих материјала и трајало је 60 минута за сваки од њих. Иако су за потребе испитивања коришћени сродни материјали предмета обраде они су и даље били прилично различити, што значи да веза између хабања и постојаности алата представља својство резног алата пре него предмета обраде, због чега је ово испитивање примењиво за широк спектар предмета обраде [5]. Ово испитивање спроводи се на сличан начин као испитивање по ISO 3685:1977 стандарду и врло ретко има предност у односу на остале методе испитивања обрадивости [17].



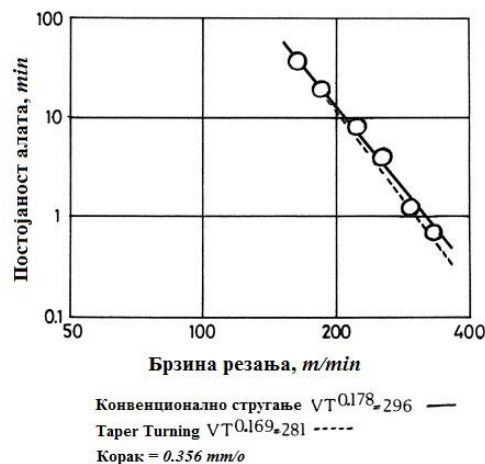
Слика 4.12 Однос између степена појаса хабања на крају секундарне зоне хабања и постојаности резног алата израђеног од M2 брзорезног челика

4.3.6. Метода обраде конусног обрадка

Ово испитивање представља једно од три практично сличних испитивања, заједно са испитивањем преко променљивог степена резања и ограниченог броја брзина резања. Као што и само име каже, предмет обраде конусног облика се обрађује на стругу дуж конуса са циљем постизања услова резања при којима брзина резања расте пропорционално времену резања. Уколико је позната почетна брзина резања, промена брзине резања у времену, време резања, величина појаса хабања на леђној површини, као и уколико је испитивање изведено два пута, онда је могуће поставити изразе преко којих се може доћи до вредности константи k и C_1 из једначине $VT^{-1/k} = C_1$ [5].

Сматра се да је главна предност ове методе испитивања то што релативно кратко траје, док у исто време обухвата све брзине резања изабраног опсега, с обзиром да све оне учествују у настанку хабања резног алата. Поред тога, резултати добијени овом методом показали су одлично слагање са резултатима неких дужих и темељнијих испитивања. Неке од мана овог испитивања везане су за конусни предмет обраде, из разлога што он мора бити припремљен пре испитивања, што захтева поседовање и коришћење посебног додатка за његову израду на стругу. Такође, због тога што алат резање обавља при различитим пречницима предмета обраде, може се десити да резултати не буду репрезентативни као у случају када је пречник предмета обраде константан [17].

Поређење експерименталних и теоријски резултата за ову методу испитивања приказано је на **слици 4.13**.



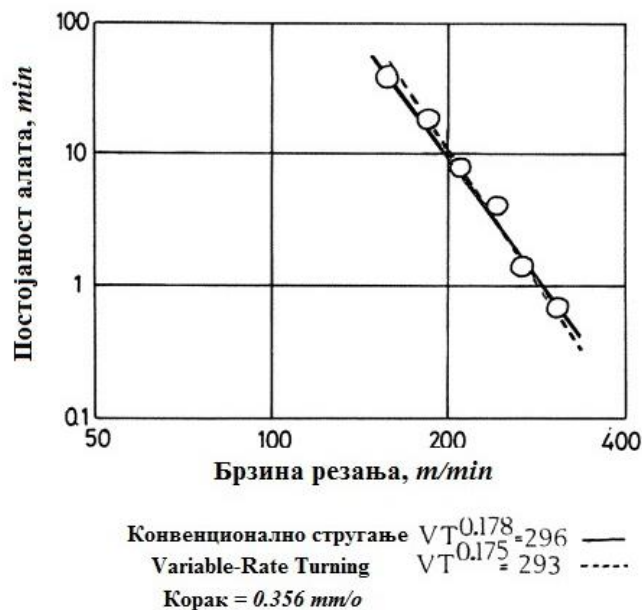
Слика 4.13 Компарација односа брзине резања и постојаности алата при конвенционалном стругању и при испитивању методом обраде конусног обрадка

4.3.7. Метода променљивог степена резања

Принципијелна разлика између ове и претходно описане методе испитивања обрадивости јесте у томе што се повећање брзине резања у току времена постиже уздужним стругањем предмета обраде и постепеним повећањем његове брзине обртања. Као што је то случај за претходну методу, и овде се константе k и C_1 из Тејлорове једначине постојаности алата могу добити спровођењем два испитивања.

Предност ове методе у односу на претходну је пре свега у томе што се може користити предмет обраде стандардног облика, као и то што нема проблема везаних за обраду при променљивим пречницима. Главни недостатак ове методе огледа се у неопходности прогресивног пораста брзине обртања предмета обраде при резању, што у пракси није увек лако извести [5].

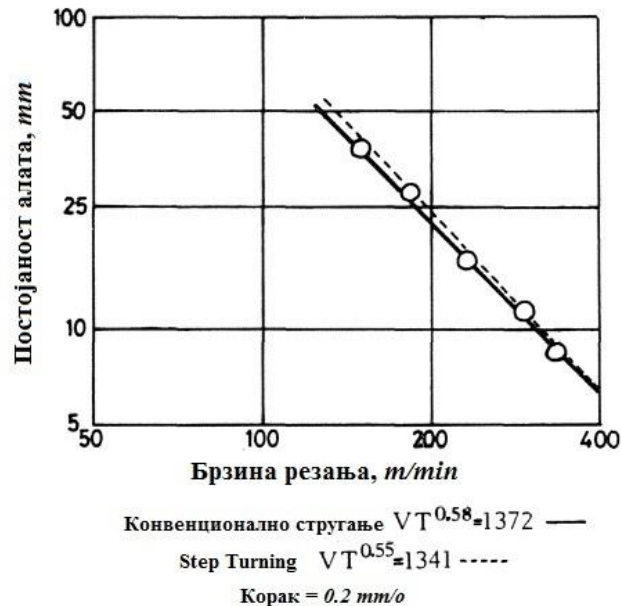
Поређење експерименталних и теоријски резултата за ову методу испитивања приказано је на **слици 4.14**.



Слика 4.14 Компарација односа брзине резања и постојаности алата при конвенционалном стругању и при испитивању методом променљивог степена резања

4.3.8. Метода лимитираног распона брзина резања

Овај вид испитивања развијен је са намером да се превазиђу потешкоће које се у пракси јављају при испитивању методом променљивог степена резања, као и методом обраде конусног предмета, тако што је омогућено да се оно изведе на стандардним струговима. То се постиже коришћењем ограниченог броја различитих брзина резања, као и пречника предмета обраде, а све у циљу проналажења константи из Тејлорове једначине постојаности алата [17]. Поређење експерименталних и теоријски резултата за ову методу испитивања приказано је на **слици 4.15**.



Слика 4.15 Компарација односа брзине резања и постојаности алата при конвенционалном стругању и при испитивању преко методе лимитираног распона брзине резања

Испитивања методом променљивог степена резања, као и методом ограниченог броја брзина су показала да се валидни подаци могу прикупити и без улагања у испитивања која временски дуже трају, али треба имати у виду да се ова испитивања врше у лабораторијским условима где се лако може контролисати конзистентност материјала и геометрије резног алата, материјала предмета обраде и услова резања, што у пракси не мора увек бити случај [5].

4.4. Комбиновање параметара обраде

Познато је да при разматрању постојаности алата далеко најбитнији параметар обраде представља брзина резања. Међутим, корак, дубина резања, вредност леђног угла, полупречник заобљења врха резног клина итд. такође имају утицај на постојаност алата и уколико би се сваки од њих посебно разматрао, број неопходних испитивања којима би се само адекватно истражио цео спектар параметара резања био би превелики и прескуп, чак и ако би се спроводила временски најкраћа испитивања. Због тога, значајни напори уложени су у покушај комбиновања параметара обраде тако да резултати добијени спровођењем неколико испитивања могу да се примене на шири избор услова резања.

Теоретски је, као и експериментално, утврђено да се комбиновањем брзина резања са односом између активне ширине резне ивице (она ширина резне ивице која је у контакту са струготином) и површине попречног пресека струготине, може утврдити постојаност резног алата. Постоје различите формуле за рачунање поменутог односа, све у зависности какви су услови резања. Тако су развијени изрази који се могу применити за различите облике резних плочица (округли, троугласти, квадратни...) који узимају у обзир најчешће примењиване комбинације корака и дубине резања.

Постоји приличан број доказа који указују на то да за дати систем предмет обраде-алат, постојаност алата представља функцију температуре резања. Температура резања се може измерити на више начина, а најчешће коришћена је метода природних термопарова помоћу које се долази до средње температуре резања на резној ивици. Типичан однос температуре резања и постојаности алата показан је на **слици 4.16**. На њој се могу видети да за варијације два параметра резања, корака и брзине, постоји јединствен однос температуре и постојаности алата који се може приказати изразом:

$$\theta T^n = C, \quad (4.6)$$

где су:

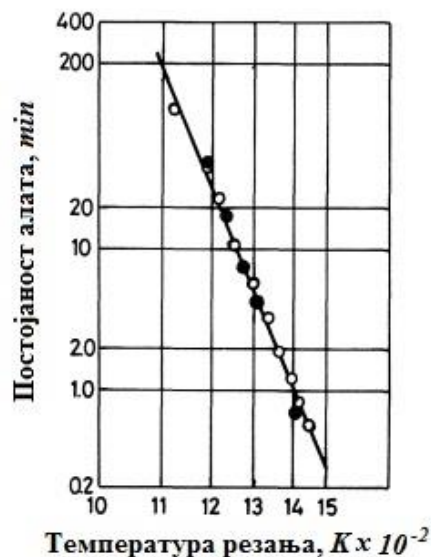
θ - измерена температура

T - постојаност алата

n и C - константе

Обично за обраду челика на стругу без коришћења средства за хлађење и подмазивање и применом брзорезног челика као алатног материјала, вредност константе n се креће од 0,05 до 0,1, што значи да мала промена температуре резања има видљив утицај на постојаност алата.

Уколико је правилно измерена, температура се поред процене постојаности алата може применити и при утврђивању обрадивости материјала, што може довести до значајне уштеде времена. Након што се за дату комбинацију предмет обраде-алат утврди однос између температуре и постојаности алата, утицај промене услова резања се врло брзо може одредити. Као и за многе друге методе преко којих се утврђује обрадивост, специјалан прибор је неопходан за спровођење овог испитивања [5].

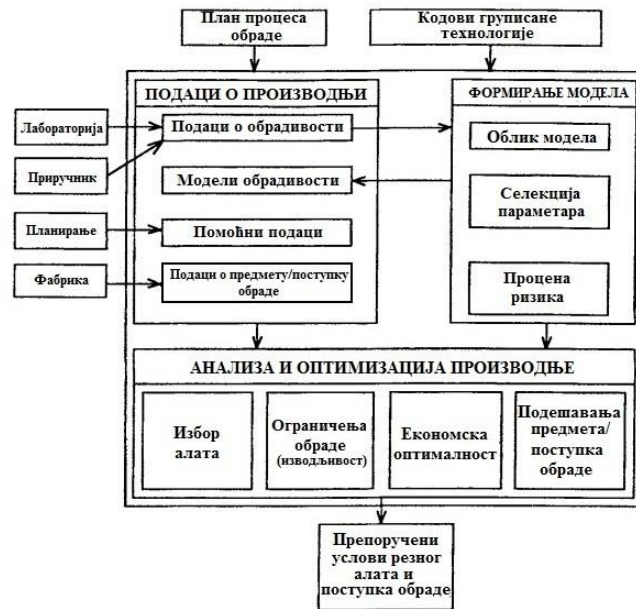


Слика 4.16 Однос између температуре резања и постојаности алата

4.5. Комплексна метода испитивања обрадивости

Проблем који се јавља у пракси јесте да су за аналитичке методе, преко којих се одређују препоручени услови резања и процењује цена обраде, неопходни подаци о обрадивости за широки спектар материјала како би њихова примена била ефикасна. Утврђивање једначине постојаности алата, за одређене услове резања, захтева извођење дугих испитивања и мерења постојаности алата која се морају спровести за цео опсег алатних и материјала предмета обраде који су узети у разматрање. Обим овог поступка се значајно може смањити коришћењем података из приручника или компјутерски подржаних система база података о обрадивости. Могу се развити два различита типа система: базе података о обрадивости и математички модели.

Базе података о обрадивости развијане су са циљем да асистирају нумерички управљаним машинама не само при одабиру препоручених брзина резања, корака и дубине резања, већ и при одабиру алатних материјала, прикладне расположиве геометрије алата, стезног алата, редоследа поступака резања и оптималних услова резања базираних на економским захтевима и захтеваној продуктивности. Како би обавиле своју функцију, базе података могу користити алгоритме према којима се подаци складиште и позивају, уопштене емпиријске формуле, математичке моделе или комбинацију ових метода. Уопштене емпиријске формуле нарочито могу ограничити количину прикупљених података за сваку од многих могућих комбинација материјала, алата и поступака обраде. Из разлога што су емпиријске формуле често неупотребљиве услед великог броја релевантних улазних величина, коришћење *математичких модела* може бити ефикасније уколико се примењује вишеструка линеарна регресија. На основу прикупљених података о обрадивости, утврђују се константе одговарајућих једначина за постојаност алата, а затим се одређују оптимални кораци и брзине резања уз помоћ одговарајућих формула за степен продуктивности и економичности разматраних поступака обраде. Пример система базе података о обрадивости, који се састоји из три модула: подаци о производњи, формирање модела и анализа и оптимизација производње - приказан је на **слици 4.17**. Модул формирања модела нарочито помаже при развоју математичких модела уз помоћ којих се неопходни параметри обрадивости, попут постојаности алата, квалитета обрађене површине, снаге, силе резања или лома алата, доводе у везу са различитим улазним променљивим. Модул оптимизације садржи засебан алгоритам преко којег се она изводи [10].



Слика 4.17 Систем базе података о обрадивост сачињен од три модула

4.6. Универзална обрадивост

Проучавање обрадивости материјала има за циљ што боље искоришћење свих података и информација прикупљених различитим испитивањима, а све у намери да целокупни процес обраде буде што продуктивнији и економичнији. С обзиром да је број фактора који утичу на обрадивост неког материјала велики, дефинисање и анализа овог феномена представља врло комплексан задатак.

Обрадивост материјала обично је дефинисана према једном главном критеријуму. Овај критеријум представља излазну величину процеса обраде, попут: постојаности алата, квалитета обрађене површине, сила резања, облика струготине итд., која зависи од улазних параметара резања. Међутим, неки материјали могу показати добру обрадивост дефинисану преко једног критеријума, а много слабију обрадивост уколико је она дефинисана преко неког другог критеријума.

Дефинисању обрадивости неког материјала може се приступити и на другачији начин. Метода дефинисања универзалне обрадивости базира се на дефинисању вектора обрадивости, који узима у разматрање неколико критеријума обрадивости.

Први корак при дефинисању вектора обрадивости јесте избор одговарајућег правоуглог координатног система. У овом случају координатни систем представља просторни правоугли координатни систем чије су три осе параметри одабраних критеријума обрадивости на основу којих се формира универзална обрадивост дефинисана као просторни вектор. При формулацији универзалне обрадивости, за сваки примарни критеријум постоји критеријуми нижег нивоа који се посматрају као његов описни елемент. Из разлога што критеријума нижег нивоа има више, сваки од њих има свој ранг важности. На слици 4.18 приказан је пример односа примарних критеријума и критеријума нижег нивоа.

Критеријуми нижег нивоа	Примарни критеријуми	Цена обраде	Хабање алата	Квалитет обрађене површине
Главни отпор резања		I	-	-
Интензитет хабања резног алата		II	I	-
Храпавост обрађене површине		III	-	I
Триболошке карактеристике		-	II	-
Температура резања		-	III	II
Тачност обраде		-	-	III

Слика 4.18 Однос примерних и критеријума нижег нивоа

Дефинисању обрадивости помоћу вектора обрадивости може се приступити на два начина. У првом начину, који је универзалнији, на осе координатног система наносе се реалне вредности параметра који тај критеријум описује (на пример, вредност отпора резања, сила трења, средња температура резања итд.). Други начин се састоји од наношења индексних вредности обрадивости на осе координатног система, које су добијене испитивањима одговарајућих критеријума (на пример, индекс обрадивости са аспекта отпора резања, са аспекта постојаности алата, са аспекта квалитета обрађене површине итд.). Свака оса просторног координатног система има одговарајући јединични вектор чија дужина одговара јединици којом се мери параметар, тј. одговара проценту индекса обрадивости.

У досадашњим приступима дефинисања обрадивости материјала при резању, обрадивост је најчешће дефинисана преко главних отпора резања, хабања алата и квалитета обрађене површине. Ова три параметра истовремено представљају три најважнија елемента обрадног система који су међусобно уско повезани и не могу се издвојено анализирати. Универзална обрадивост материјала као интегрална метода директно је везана за претходно дефинисање обрадивости користећи наведене параметре.

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 губи у изразу за универзалну обрадивост материјала. На осе се могу наносити само мерљиве величине, односно величине које се могу изразити неком јединицом.

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

$$\overrightarrow{K_i^{KO}} = \overrightarrow{k_i^{ko}} \cdot K_i, \quad (4.7)$$

где су:

$\overrightarrow{K_i^{KO}}$ - вектор i -тог критеријума,

KO - ознака критеријума,

$\overrightarrow{k_i^{ko}}$ - јединични вектор i -тог критеријума

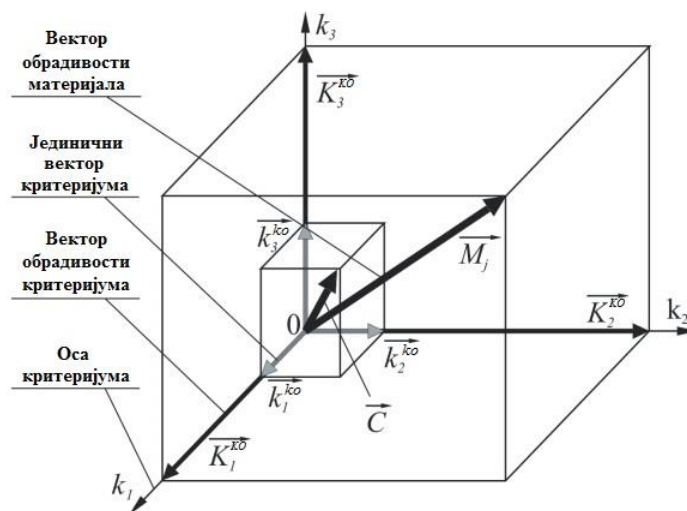
K_i - скаларна вредност параметра i -тог критеријума.

Вредности свих параметара могу се добити експерименталним мерењем или прорачуном уз помоћ аналитичких модела, уз коришћење препоручених алата, режима обраде.

Вектор обрадивости материјала, приказан на **слици 4.19**, представља векторски збир вектора критеријума, на основу којих се дефинише обрадивост.

$$\overrightarrow{M_j} = \sum_{i=1}^3 \overrightarrow{K_i^{ko}}, \quad (4.8)$$

где је $\overrightarrow{M_j}$ - вектор обрадивости i -тог материјала.



Слика 4.19 Вектор обрадивости материјала приказан у правоуглом координатном систему [19]

У вектору обрадивости материјала садржане су интегралне информације о параметрима критеријума на основу којих је он формираан и анализом положаја овог вектора може се утврдити склоност материјала према хабању алата током обраде, формирању квалитетније обрађене површине при одговарајућим параметрима обраде и сл. [18].

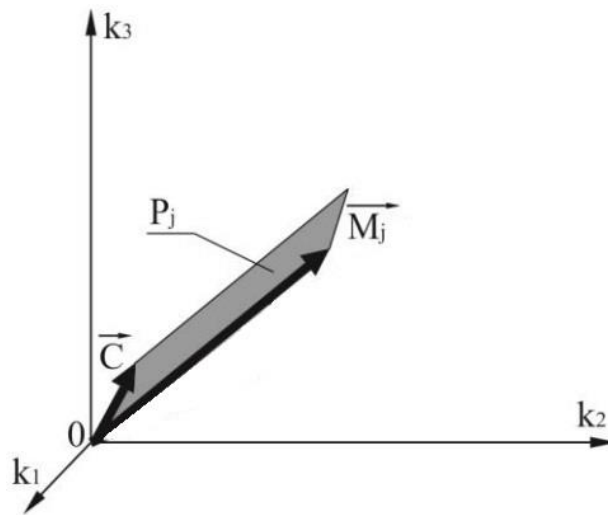
Вредност показатеља обрадивости материјала је веома важан фактор анализе. Међутим, уједначеност обрадивости по свим критеријумима у неким случајевима је пресудан фактор у експлоатацији одређеног материјал. Вредност показатеља обрадивости исказује се преко интензитета вектора обрадивости, док се уједначеност показатеља обрадивости може се дефинисати положајем вектора обрадивости у простору. Што су показатељи уједначенији, односно имају једнак утицај на обрадивост, то се и вектор обрадивост приближава правцу референтног вектора који се добија сабирањем јединичних вектора свих критеријума:

$$\vec{C} = \sum_{i=1}^3 \overrightarrow{k_i^{ko}}, \quad (4.9)$$

где је: $\vec{C}$ - референтни вектор.

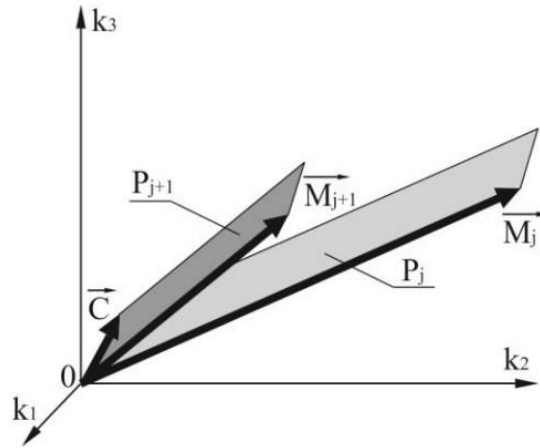
Може се закључити да материјал чији вектор обрадивости има мањи интензитет и који заклапа мањи угао са референтним вектором има и бољу обрадивост. Пошто се на осе наносе различите величине, референтни вектор има правац који одређује најбољу уједначеност показатеља обрадивости. Успоставом вектора обрадивости закључује се да јединични вектори могу имати различите дужине, што зависи од мере у којој се представљају јединице мере параметара одговарајућег критеријума.

Величина која најбоље показује колико је вектор обрадивости датог материјала уједначен са правцем референтног вектора и колики је његов интензитет, јесте величина површине паралелограма, приказаног на **слици 4.20**, коју стварају вектор обрадивости и референтни вектор.



Слика 4.20 Паралелограм конструисан помоћу вектора обрадивости и референтног вектора

Добијена површина директно се може повезати са обрадивости материјала. Што је мањи интензитет вектора обрадивости посматраног материјала и што је мањи угао који он заклапа са референтним вектором, то је боља и његова обрадивост у односу на друге материјале са дефинисаним векторима обрадивости. На **слици 4.21** приказан је однос обрадивости два материјала, где материјал са мањом датом површином има бољу обрадивост у односу на материјал са већом површином.



Слика 4.21 Однос обрадивости два материјала приказан преко површина паралелограма

Успостављени однос се може описати вредношћу векторског производа референтног вектора и вектора обрадивости материјала:

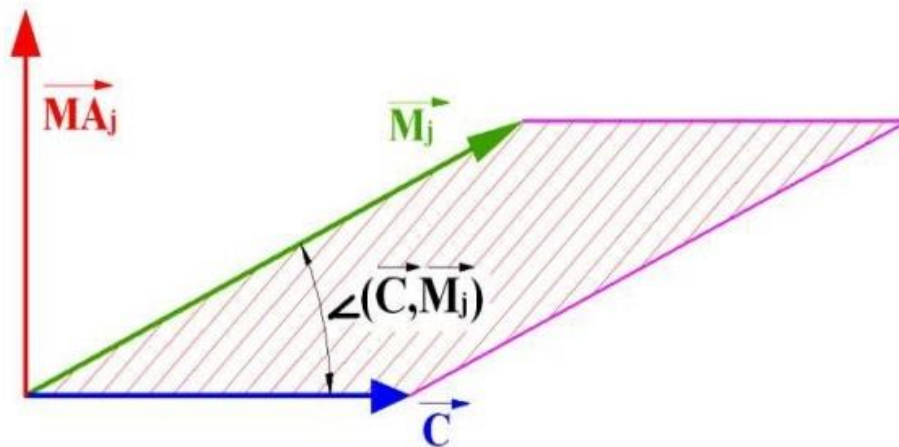
$$P_j = |\vec{C} \times \vec{M}_j| = |\vec{C}| \cdot |\vec{M}_j| \cdot \sin \angle(\vec{C}, \vec{M}_j), \quad (4.10)$$

Синус угла између ова два вектора добија се помоћу изведеног израза:

$$\sin \angle(\vec{C}, \vec{M}_j) = \left| \sqrt{1 - \frac{(K_1 + K_2 + K_3)^2}{(k_1^2 + k_2^2 + k_3^2) \cdot (K_1^2 + K_2^2 + K_3^2)}} \right| + s, \quad (4.11)$$

где број s представља коефицијент сигурности у случају да се векторски правци поклапају, те стварају паралелограм чија је површина једнака нули. Овај коефицијент сигурности обично у општем случају износи $0 \div 0,001$. У овом случају, анализа се заснива само на интензитету вектора обрадивости, јер је уједначеност критеријума потпуна.

Векторски производ референтног вектора и вектора обрадивости даје вектор који је управан на претходно дефинисан паралелограм, док се његов смер одређује правилом десне руке. Овај вектор, приказан је на **слици 4.22**, се назива вектор анализе обрадивости $\vec{MA}_j$ и помоћу њега се може директно вршити поређење обрадивости материјала.



Слика 4.22 Вектор анализе обрадивости

Вектор анализе садржи податак о утицајима појединих критеријума на оцену обрадивости. Он има онај интензитет, правац и смер који говори о правцима и интензитету корекционих коефицијената при корекцији технолошких параметара при обради материјала. Коефицијенти имају задатак да коригују улазне параметре да би се добила максимална вредност обрадивости, односно оптимални технолошки параметри. Корекцијом су превасходно обухваћени брзина резања, корак и материјал и геометрија резног алата.

Теоретски посматрано, површина паралелограма би могла да има исту вредност при различитој дужини обрадивости и угла који он заклапа са референтним вектором. Међутим, анализа обрадивости се увек врши на групи сличних материјала (конструкциони челици, високолегирани челици, титанијумске легуре и сл.) тако да је искључена могућност појаве истих површина. Ако се такве ипак појаве, анализу је потребно провести на основу других информација и параметара садржаних у вектору обрадивости.

Поређење обрадивости помоћу методе вектора обрадивости даје приближне резултате у односу на резултате добијене на основу индекса обрадивости са различитих аспеката. Предности ове методе су у објективнијем прорачуну међусобних односа критеријума, поједностављени математички апарат, као и директна повезаност коефицијената вектора анализе са корекционим факторима технолошких параметара.

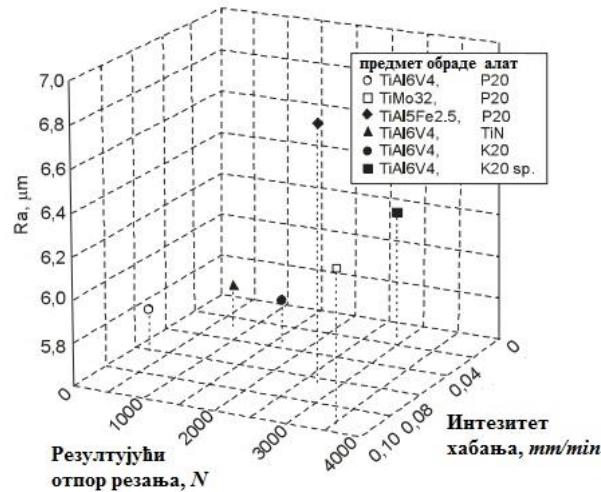
Начин поређења обрадивости материјала помоћу вектора универзалне обрадивости дат је у **табели 1**, док је графички приказ положаја ових вектора приказан на **слици 4.23** [18].

Табела 1. Поређење обрадивости материјала помоћу вектора универзалне обрадивости

Комбинација		Интензитет хабања алата mm/min	Рангирање	Резултућни отпор резања, N	Рангирање	Храпавост површине, μm	Рангирање	Резултат методом вектора обрадивости	Помножено са 1000 ради боље опсервабилности	Рангирање
Материјал	Алат									
TiAl6V4	P20	0.061	4	219.74	1	5.8	1	0.005647	56.47	I
TiMo32	P20	0.093	6	3523.74	6	6.3	5	0.000347	3.48	VI
TiAl5Fe2.5	P20	0.064	5	2693.21	4	6.8	6	0.000455	4.55	IV
TiAl6V4	TiN	0.028	2	761.46	2	5.8	1	0.001614	16.15	II
TiAl6V4	K20	0.034	3	1593.48	3	5.8	1	0.000770	7.70	III
TiAl6V4	K20 sp.	0.013	1	2849.15	5	6.2	4	0.000430	4.30	V

Многа истраживања су спроведена при обради материјала у различитим условима, као и различитим резним алатима, поступцима обраде, начинима подмазивања и хлађења итд. Из података сакупљених овим испитивањима развијени су различити модели уз помоћ којих се може анализирати обрадивост датог материјала.

У конкретном примеру, експеримент и евалуација обрадивости су спроведени на групи челика. Током извођења експеримента коришћени су исти услови резања за сваки од материјала.



Слика 4.23 Положај вектора обрадивости

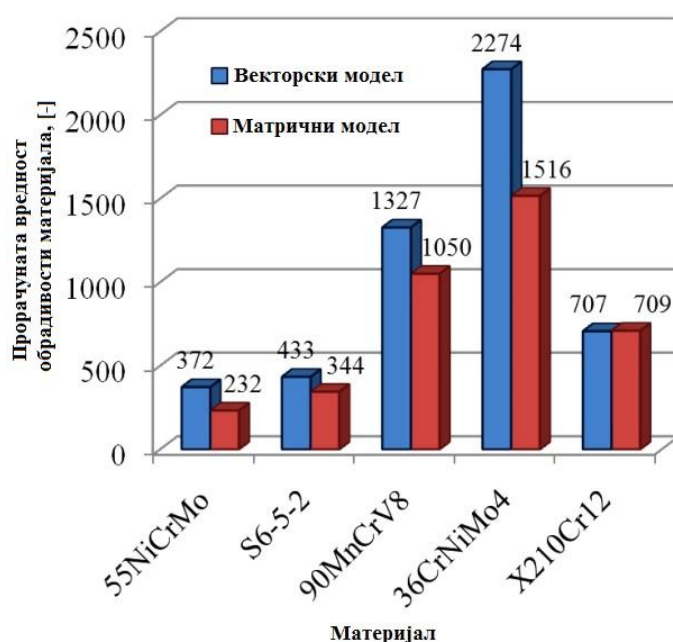
Излазни параметри који су у току процеса обраде праћени су: главни отпор резања F_1 , сила продирања F_2 и отпор помоћном кретању F_3 , ширина појаса хабања (V_B) и интензитет хабања алата (I_{VB}), и средње аритметичко одступање профила од средње линије профила R_a као параметар квалитета обрађене површине. Експеримент је изведен на универзалном стругу, при чему је обезбеђено добро стезање и постављање предмета обраде. Резни алат је израђен од тврдог метала, а коришћени услови резања су: дубина резања $a = 1 \text{ mm}$, корак $s = 0.18 \text{ mm/o}$ и брзина резања $V_c = 130 \text{ m/min}$. Сва испитивања су изведена уз коришћење средства за хлађење и подмазивање.

Кључни излазни параметри процеса резања који су узети у разматрање у овом испитивању су главни отпор резања, интензитет хабања алата и средње аритметичко одступање профила. Измерене вредности ових параметара за различите моделе анализирања обрадивости приказани су у **табели 2**.

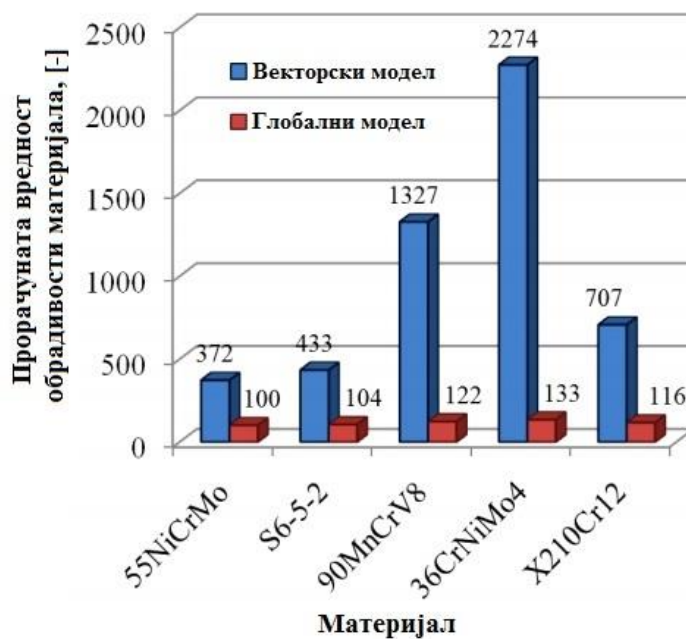
Табела 2. Измерене вредности излазних параметара експеримента

Материјал DIN	F_1 [N]	I_{VB} [μm/min]	R_a [μm]	Матрични модел	Векторски модел
55NiCrMo	725	21	6.8	232	372
S6-5-2	726	19	6.6	344	433
90MnCrV8	654	15	5.9	1050	1327
36CrNiMo4	516	14	6.2	1516	2274
X210Cr12	659	16	6.3	709	707

На **слици 4.24** и **слици 4.25** приказане су прорачунате вредности обрадивости тестираних материјала, добијене уз помоћ векторског модела дефинисања обрадивости и раније успостављених модела, Рао-Гандијевог матричног и Инакеовог глобалног модела.



Слика 4.24 Поређење векторског и Рао-Гандијевог матричног модела евалуације обрадивости



Слика 4.25 Поређење векторског и Инакеовог глобалног модела евалуације обрадивости

Вредност излазних величина добијених векторским моделом одговара претходно развијеним моделима, па се може закључити да резултати добијени методом универзалне обрадивости имају добру подударност са резултатима глобалног и матричног модела. Са дијаграма се може закључити да челик 36CrNiMo4 показује најбољу обрадивост у поређењу са осталим челицима из групе. Најмању обрадивост је показао челик 55NiCrMo.

Испитивања обрадивости се могу извршити и на једном материјалу, а при различитим условима обраде. Током овог експеримента анализиране су три различите технике хлађења и подмазивања: стандардни поступак обраде резањем са обливањем СХП-а, специјални поступак обраде резањем са минималном употребом СХП-а и напредни поступак обраде резањем потпомогнут млазом СХП-а високог притиска.

Као и код претходног експеримента, излазни параметри који су у току процеса обраде праћени су: главни отпор резања F_1 , сила продирања F_2 и отпор помоћном кретању F_3 , ширина појаса хабања (VB) и интензитет хабања алата (I_{VB}), и средње аритметичко одступање профила од средње линије профила R_a као параметар квалитета обрађене површине.

Материјал предмета обраде који је коришћен је конструкциони угљенични челик С45Е, чија је затезна чврстоћа $\sigma = 820 \text{ N/mm}^2$, модул еластичности $2 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ и тврдоћа 45 HRC.

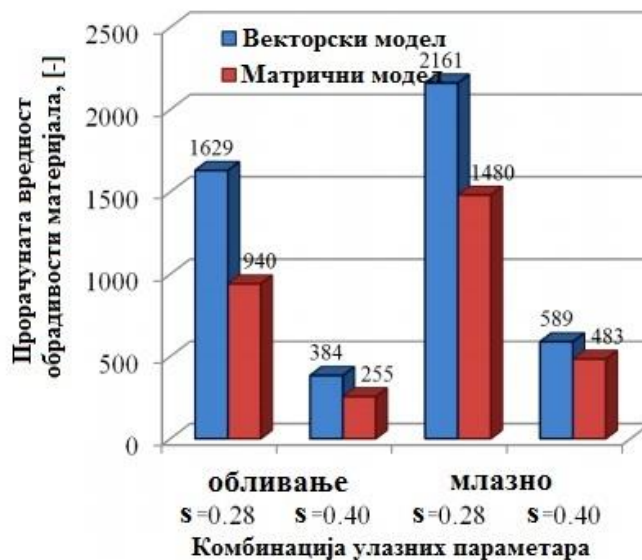
Обрада је изведена на стандардном стругу са максималним бројем обртаја предмета обраде $n_{max} = 2240 \text{ o/min}$ и коракном $s_{max} = 1.6 \text{ mm/o}$. Коришћени су резни алат SNMG 1204 08 NMX и стезни алат PSDN 2525 M12.

Измерене вредности излазних параметара, за различите моделе анализирања обрадивости и технике хлађења и подмазивања, приказане су у табели 3.

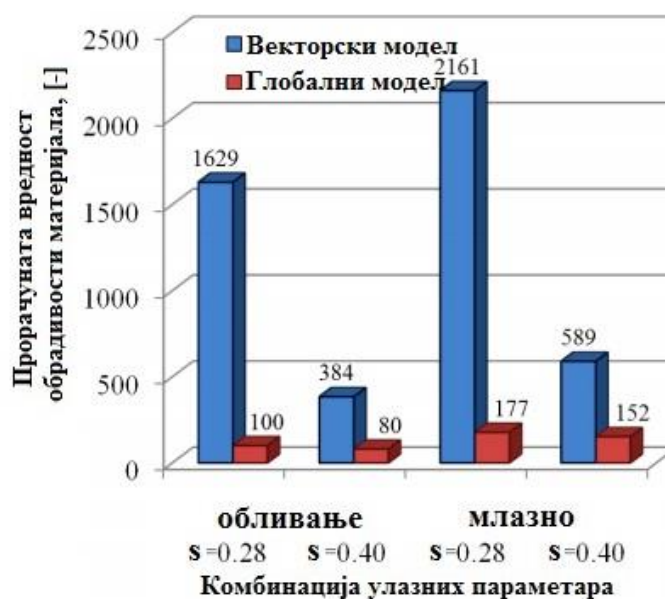
Табела 3. Измерене вредности излазних параметара експеримента

Комбинација улазних параметара	F_1 [N]	I_{VB} [$\mu\text{m/min}$]	R_a [μm]	Матрични модел	Векторски модел
обливање $s=0.28$	1137	27	3.55	940	1629
обливање $s=0.40$	1599	32	4.23	255	384
млазно $s=0.28$	1142	8	3.82	1480	2161
млазно $s=0.40$	1569	9	4.26	483	589

На слици 4.26 и слици 4.27 приказане су прорачунате вредности обрадивости истог материјала за различите услове обраде (параметре резања и технике хлађења и подмазивања). Са дијаграма се може видети да стругање при малим вредностима корака и напредним резањем потпомогнутим млазом СХП-а високог притиска даје најбољу обрадивост у свим случајевима. Такође треба поменути и да резултати добијени методом универзалне обрадивости имају добру подударност са резултатима глобалног и матричног модела [22].



Слика 4.26 Поређење векторског и Рао-Гандијевог матричног модела евалуације обрадивости



Слика 4.27 Поређење векторског и Инакеовог глобалног модела евалуације обрадивости

5. ЗАКЉУЧАК

Обрадивост материјала представља једну од најважнијих карактеристика коју је потребно испитати пре коришћења датог материјала у производњи. Најједноставније објашњење појма обрадивости може се свести на то колики је напор потребан да се одређени материјал обради. Иако се сам појам обрадивости може једноставно описати, ова карактеристика материјала представља врло сложен концепт који је сачињен од различитих фактора. Сваки од ових фактора носи одређени утицај на то какву ће обрадивост одређени материјал поседовати, због чега је веома битно приступити целокупној проблематици из различитих углова.

Један од циљева овог рада јесте да приближи и опише најважније параметре преко којих се може одредити обрадивост предмета обраде. Постојаност алата, температура резања, квалитет обрађене површине су само неки од њих, и подробно су били тема различитих испитивања.

Оно што утврђивање обрадивости чини још сложенијим проблемом, јесте чињеница да она нема изведену јединицу. Због тога су осмишљене различите методе које имају за циљ да дају праву слику обрадивости испитиваног материјала, од индексне методе, па све до методе универзалне обрадивости.

Може се рећи да је један од главних закључака овог рада истицање важности обрадивости као карактеристике потенцијално одабраних материјала, као и важност самог поступка одређивања обрадивости, пре свега јер ће многи фактори обраде зависити од ње, закључно са економичношћу целокупног процеса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Митровић А., *Моделирање процеса обраде резањем*, Докторска дисертација, Факултет техничких наука у Новом Саду, Нови Сад, 2016.
2. Недић Б., Лазић М., *Производне технологије, обрада метала резањем, скрипта*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2007.
3. Недић Б., *Динамика процеса резања*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2006.
4. Stephenson D., Agapiou J., *Metal cutting theory and practice*, CRC Press, New York, 2016.
5. Mills B., Redford A. H., *Machinability of engineering materials*, University of Salford, UK, 1983.
6. El-Hofy H., *Fundamentals of machining processes*, CRC Press, New York, 2014.
7. Boothroyd G., *Fundamentals of metal machining and machine tools*, CRC Press, New York, 1988.
8. Shaw M., *Metal cutting principles*, Oxford University Press, New York, 2005.
9. Kalapakijan S., Schmid S., *Manufacturing engineering and technology*, Pearson Education, New Jersey, 2010.
10. Grzesik W., *Advanced machining processes of metallic materials*, Elsevier Science, Amsterdam, 2008.
11. Davim J. P., *Machinability of advanced materials*, ISTE Ltd. and John Wiley & Sons Inc., London, 2014.
12. Trent E., Wright P., *Metal cutting*, Butterworth Heinemann, Boston, 2000.
13. [Tool Wear: Meaning, Types and Causes](#), Debarpriya M. (приступљено 20.5.2019)
14. [Tool Wear Mechanism](#) (приступљено 20.5.2019)
15. [Surface Roughness Parameters - Arithmetical Mean Height](#) (приступљено 14.6.2019)
16. [Surface Roughness Parameters - Maximum Height of Profile](#) (приступљено 14.6.2019)
17. Smith G. T., *Cutting tool technology - Industrial handbook*, Springer-Verlag, London, 2008.
18. Средановић Б., Глобочки-Лакић Г., Недић Б., Чича Ђ., *Нови приступ дефинисању универзалне обрадивости материјала при резању*, Зборник радова 37. Јупитер конференције, Београд, 2011.
19. Средановић Б., Глобочки-Лакић Г., Чича Ђ., Крамар Д., *Influence of different cooling and lubrication techniques on material machinability in machining*, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, Љубљана, 2013.

20. ASM International Handbook Committee, *Metals handbook - Volume 16 Machining*, ASM International, USA, 1989.
21. Muhammad Y., Syed J., Mushtaq K., Riaz A., Liaqat A., Zarak K., Aftab K., *Tool wear progression and its effect on energy consumption in turning of titanium alloy (Ti-6Al-4V)*, Peshawar, 2019.
22. Средановић Б., Глобочки-Лакић Г., Боројевић С., *A novel method for material machinability evaluation*, Proceedings of the MIT&SLIM, Fiesa, 2013.