

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Машине алатке

Број индекса: 95/2017

Радован Д. Костић

Обрадивост бушењем специјалних челика

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **др Богдан Недић-ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Основнестудије: **Машинско инжењерство**

Студијскоподручје (усмерење): **Производно машинство**

Име и презиме: **Радован Костић**

Бројиндекса: **95/2017**

ПРИЈАВА ЗАВРШНОГ РАДА

Тема рада: **Обрадивост бушењем специјалних челика**

Задатак: У оквиру завршног рада потребно је да кандидат изврши прикупљање и систематизацију података за дефинисање обрадивости бушењем. Потребно је извршити одговарајућа мерења при обради бушењем и у виду извештаја приказати резултате.

Рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања,
2. Дефинисање обрадивости код обраде бушењем,
3. Карактеристике специјалних челика,
4. Испитивање бушењем,
5. Анализа резултата,
6. Закључци,
7. Литература.

Ментор:

Крагујевац, 09.03.2020.

Др Богдан Недић, редовни професор

Резиме рада:

У раду приказане су основне дефиниције обрадивости челика и дате информације о метода испитивања и одређивања обрадивости бушењем. У посебном поглављу су дате основне информације о специјалним челицима који се користе у одбрамбеној индустрији за челичне конструкције. На крају рада су представљена мерења аксијалне силе и момента резања при обради бушењем, као и анализа добијених резултата са аспекта одређивања обрадивости ових челика бушењем..

Кључне речи: обрадивост бушењем, специјални челик.

Summary of work:

The paper presents the basic definitions of machinability of steel and provides information on methods of testing and determining machinability by drilling. A separate chapter provides basic information on special steels used in the defense industry for steel structures. At the end of the paper, measurements of axial force and cutting moment during drilling are presented, as well as analysis of the obtained results from the aspect of determining the machinability of these steels by drilling.

Key words: drilling workability, special steel.

САДРЖАЈ

1. УВОД.....	7
2. ОБРАДИВОСТ МАТЕРИЈАЛА.....	9
2.1. Дефинисање обрадивости.....	9
2.2. Критеријуми обрадивости	11
2.3. Методе испитивања обрадивости.....	13
2.3.1. Компаративне методе испитивања обрадивости.....	13
2.3.2. Комплексне методе испитивања обрадивости	16
2.4. Одређивање универзалне обрадивости.....	17
2.5. Индекс обрадивости	20
2.6. Утицај улазних параметара на обрадивост материјала	22
2.7. Испитивање физичких својстава предмета обраде.....	25
2.8. Квалитет обрађене површине.....	26
3. ОСНОВЕ ПРОЦЕСА ОБРАДЕ БУШЕЊЕМ.....	28
3.1. Геометријски параметри обраде.....	29
3.2. Производне операције у обради бушењем.....	30
3.3. Отпори резања при бушењу	32
4. КАРАКТЕРИСТИКЕ СПЕЦИЈАЛНИХ ЧЕЛИКА	34
4.1. Уопште о челику	34
4.2. Специјални челици	35
4.3. Врсте специјалних челика	35
4.3.1. Weldom 700	36
4.3.2. Hardox 400.....	38
4.3.3. Protac 500	39
4.3.4. Armox 500T	40
4.3.5. ST 52-3 (Č0563)	41
5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА И РЕЗУЛТАТИ.....	42
5.1. Експериментална испитивања.....	42
5.2. Резултати мерења.....	44

5.3. Обрадивост материјала	46
6. ЗАКЉУЧАК	48
ЛИТЕРАТУРА	49

1. УВОД

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

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

По неким дефиницијама обрадивост се може сматрати и као степен потешкоћа које настају као последица обраде материјала неком од производних метода. Најбоље обрадив материјал јесте онај који дозвољава најбрже одношење највеће количине материјала са задовољавајућим квалитетом обрађене површине, са што мањим силама резања и што мањим трошењем алата. Обрадивост материјала је технолошка особина којом се изражава подобност обраде неког материјала, а оцењује се низом параметара обрадивости користећи се методама провере обрадивости.

Адекватне дефиниције термина обрадивости обично су фокусиране на једну или више специфичних карактеристика процеса резања, попут постојаности алата, квалитета обрађене површине. 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.

Улога обрадивости такође спада у једну од категорија које треба разматрати уколико се тежи остваривању ефикасне и економичне производње. Под појмом обрадивости подразумева се скуп свих карактеристика обрађиваног материјала, алата, алатног строја који има утицај на процес обраде. Утврђивањем обрадивости одређеног материјала, која се увек посматра у контексту са методом обраде која се примењује, обрађиваног материјала, могуће је остварити утицај на смањење укупног времена обраде, проблема трошења алата и тиме остварити значајан утицај на смањење трошкова и повећање продуктивности.

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.

Обрада бушењем је технологија обраде отвора и рупа одвајањем честица која је у сталном развоју. Како напредује развој резних материјала, машина за обраду, нове резне геометрије алата, као и производња резног алата, тако напредује и развој и примена технологија обраде бушењем. Неки од утицајних фактора на процес обраде бушењем приказани су у даљем раду.

Основни циљ овог рада је дефинисање појма обрадивости бушењем, као и указивање на значај утврђивања обрадивости специјалних челика.

У другом поглављу овог рада је представљена дефиниција, као и начини одређивања обрадивости и методе испитивања, утицајни фактори и критеријуми. Такође је детаљно представљена дефинија обрадивости код обраде бушењем.

Треће поглавље садржи информације о карактеристикама специјалних челика, њихову поделу и својства.

У четвртом поглављу су представљени резултати мерења аксијалне силе и момента резања при обради бушењем специјалних челика који се користе у одбрамбеној индустрији и индекси обрадивости бушењем испитиваних челика.

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

2. ОБРАДИВОСТ МАТЕРИЈАЛА

2.1. Дефинисање обрадивости

Обрадивост материјала је релативна особина материјала предмета обраде, која се дефинише као лакоћа којом се изводи обрада. Као технолошка особина материјала, представља склоност материјала да се лакше или теже обрађује одговарајућим процесима обраде резањем у уском спектру и услова режима обраде. Обрадивост материјала се дефинише као способност неког материјала да се обрађује економичним методама. Обрадивост материјала се дефинише преко параметара који карактеришу процес обраде резањем јер су параметри процеса обраде резањем истовремено и функције обрадивости.

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 у 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.

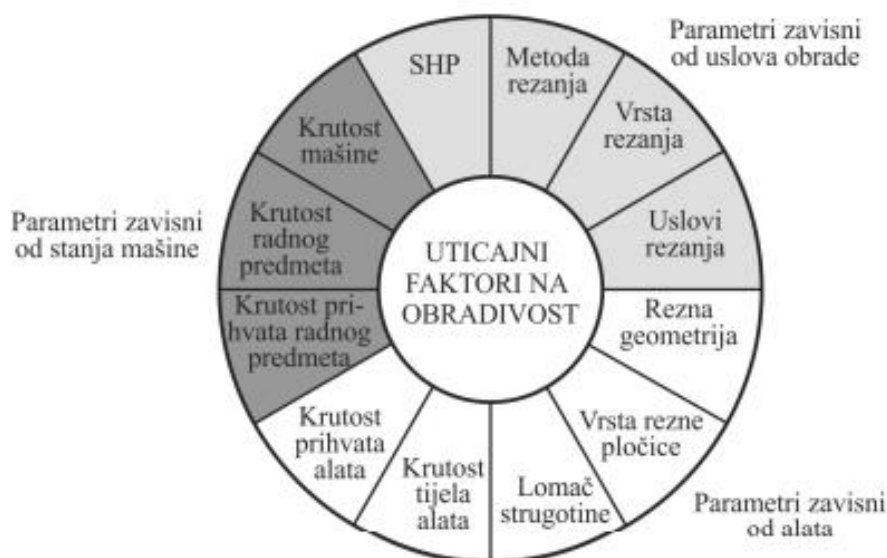
Обрадивост се не може јединствено дефинисати у квантитативном смислу и може имати различита значења у различитим контекстима. Материјал може имати добру обрадивост по једном критеријуму, али слабу обрадивост по неком другом. Такође, релативна обрадивост се може променити и када се изводе различити поступци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

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.

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 [2].

Обрадивост материјала зависи од великог броја и интеракције фактора [1].

Циљ испитивања обрадивости јесте проналажење оптималних геометријских и технолошких услова обраде и ефикасно управљање процесом обраде. Анализа процеса обрадивости материја представља изузетно компликован процес због великог броја утицајних фактора који су међусобно повезани [5].



Слика 1. Утицајни фактори на обрадивост [1]

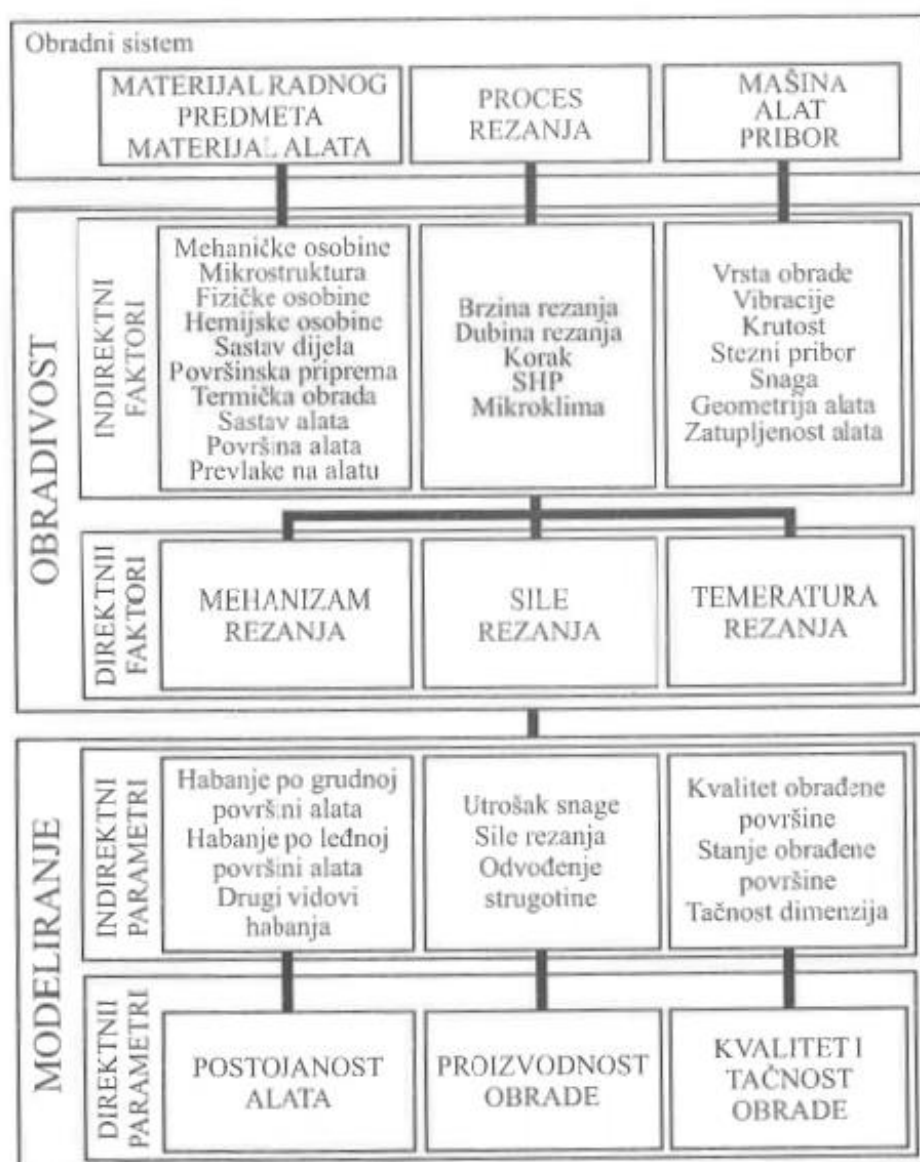
Из тих разлога познавање обрадивости материјала има водећи значај у областима:

- о производњи материјала,
- о пројектовању технологија обраде
- о техноекономској оптимизацији,
- о конструкцији нових алата,
- о испитивању СХП-а, итд. [1].

Обрадивост материјала предмета обраде, као релативна особина материјала, зависи од услова обраде, посебно од:

- врсте производне операције,
- врсте и особина материјала предмета обраде (физичко-механичке особине, хемијски састав и структура),
- режима обраде,
- триболошких и геометријских карактеристика алата,
- врсте и квалитета средства за хлађење и подмазивање и сл.

На слици 2 је приказана веза између утицајних фактора на обрадивост и параметара за одређивање обрадивости.

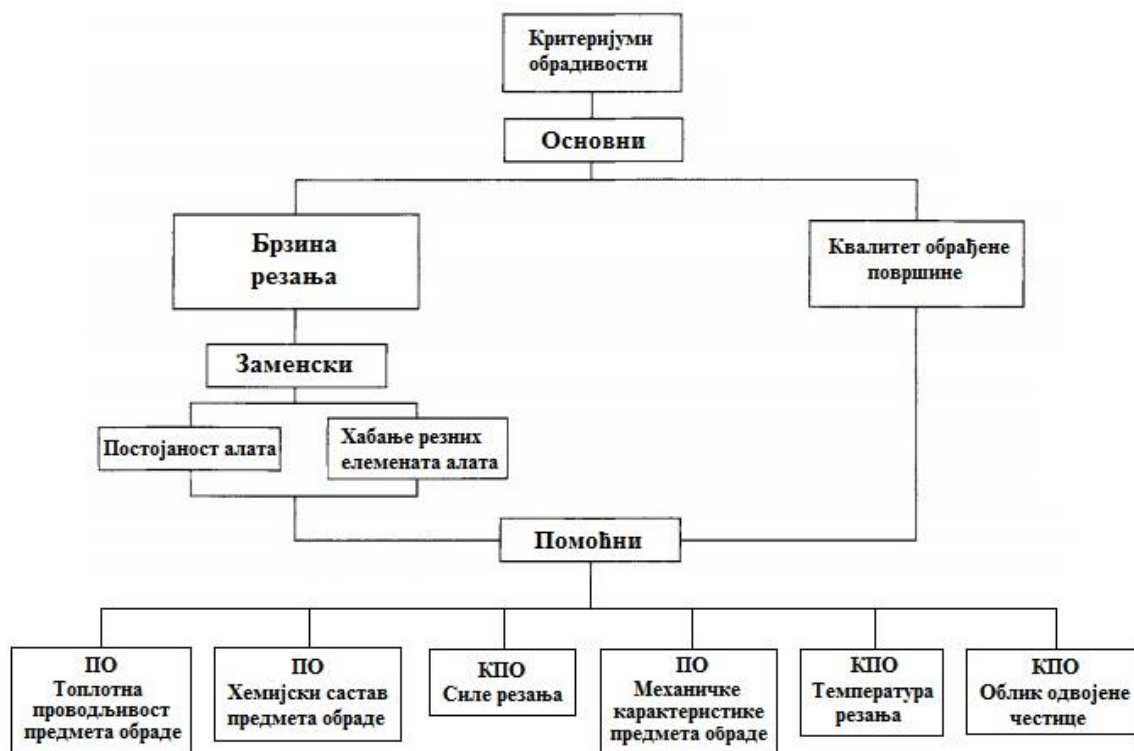


Слика 2. Директни и индиректни фактори који се разматрају при моделирању обрадивости [3]

2.2. Критеријуми обрадивости

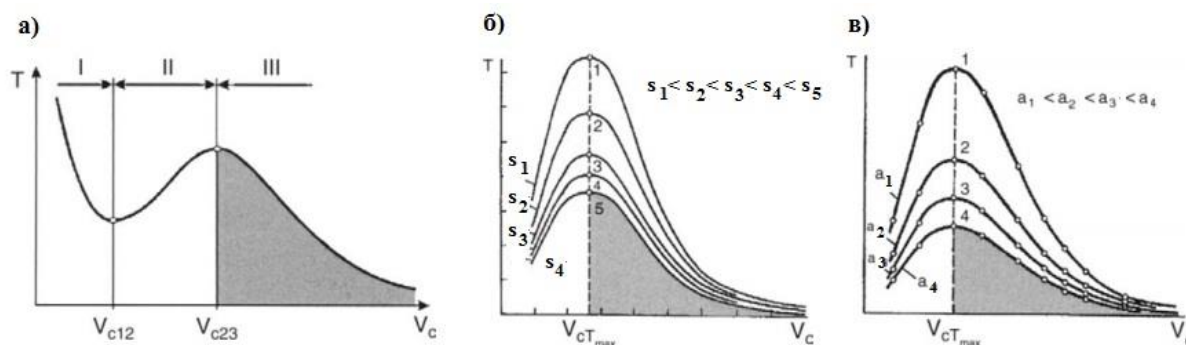
Критеријуми обрадивости материјала се формирају на основу функција обрадљивости, слика 3:

- постојаности алата,
- отпора или сила резања,
- температуре резања,
- параметара храпавости обрађене површине ,
- тачности обраде,
- облика струготине,
- економичне брзине резања и
- трошкова обраде [3].



Слика 3. Критеријуми који утичу на обрадивост [2]

Постојаност алата или животни век алата. Ово је најважнији 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. 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 освенена на **слици 4**). Треба напоменути да на слици у сва три случаја максимална постојаност алата одговара оптималној брзини резања V_{cTmax} .



Слика 4. Утицај режима резања на постојаност алата а) брзина резања, б) корак и в) дубина резања

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 [2].

2.3. Методе испитивања обрадивости

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

Испитивање обрадивости материјала се заснива на применама две групе метода [4]:

- Компаративне (индексне) методе и
- Комплексне методе.

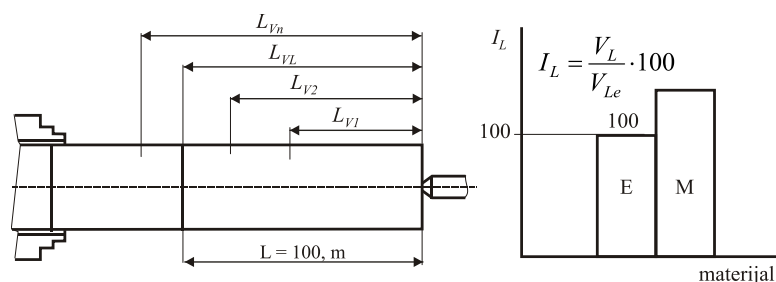
2.3.1. Компаративне методе испитивања обрадивости

Компаративне или индексне методе су методе релативне обрадивости засноване на упоређивању обрадивости испитиваног и референтног (еталон) материјала, чији је индекс обрадивости 100.

Компаративне методе су: метод константног пута резања, променљивих брзина резања, константних сила резања, попречне обраде, радиоактивни метод, метод испитивања облика струготине и индиректни методи (анализе хемијског састава и анализе микроструктуре) [3].

Метод константног пута резања

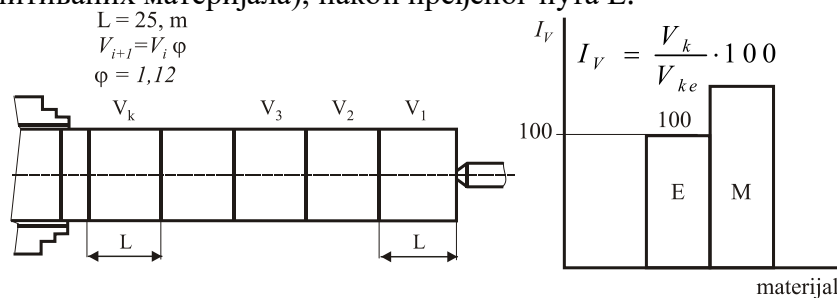
Користи се при спољашњој уздужној обради на стругу. Испитивања се изводе при константним вредностима дубине резања, корака и референтне дужине пређеног пута врха алата по спирали - завојници $L = 100$ м. Експеримент се понавља до тренутка одређивања брзине резања V_L при којој долази до затупљења алата на референтној дужини L .



Слика 5. Илустрација методе константног пута резања [3]

Метод променљивих брзина резања

Испитивања се изводе при константним вредностима дубине резања, корака и референтне дужине пређеног пута врха алата по спирали - завојници $L = 25$ м. Процес испитивања се састоји у резању константном брзином резања V на дужини L . Почетна брзина V_1 се ступњевито повећава (најчешће 6 - 8 ступњева промене у циљу финије градијације испитиваних материјала), након пређеног пута L .



Слика 6. Илустрација методе променљивих брзина резања [3]

Метод испитивања облика струготине

Основ метода чини идентификовање функције облика струготине на основу коефицијента запремине струготине (Z_k). На основу израчунате вредности Z_k идентификује се класа струготине, односно степена уситњености или крупноће струготине испитиваног материјала. Према класи струготине оцењује се погодност материјала за обраду (обрадљивост). Са становишта обрадљивости и квалитета обраде најповољнији класе струготине су означене бројевима 8 - 10, табела 1 [3].

Табела 1. Вредности запреминског коефицијента Z_k за поједине типове струготине

Класа	Тип	Z_k	Кл.	Тип	Z_k
Неповољни облик струготине			5	Ивераста - кратка	5 - 6
1	Глатка - дуга	300 - 400	Повољни облик струготине		
2	Замршена	200 - 300	6	Цилиндрична - кратка	40 - 50
Задовољавајући облик струготине			7	Кратка тракаста	16 - 20
3	Цилиндрична - дуга	60 - 80	8	Spiralna	10 - 15
4	Ивераста - дуга	6 - 9			

Метод анализе хемијског састава

Хемијски састав материјала предмета обраде утиче и на обрадљивост материјала. Познат је утицај легирајућих елемената као што су: угљеник, силицијум, манган, фосфор, сумпор и др. Утицај угљеника (C) је значајан, јер материјали са мањим садржајем угљеника (0,1 - 0,2 %) имају висок индекс обрадљивости и обезбеђују највећу постојаност алата. Манган (Mn) доводи до повећања тврдоће и чврстоће и смањења пластичности челика. То значи да повећање садржаја мангана доводи до знатног смањења обрдиљвости. Фосфор (P) смањује пластичност материјала, тако да материјали са садржајем фосфора до 0,15 % имају слабу обрадљивост. Сумпор (S), посебно када нема мангана, ствара сулфид гвожђа (FeS) и доводи до повећања индекса обрадљивости, јер се љуске сулфида издвајају на границама зрна. Олово (Pb), у малим количинама до 0,2 %, доводи до погоршања обрадљивости. Обезбеђује и формирање добре крупнокидане струготине, јер ремети непрекидност зрнасте структуре материјала. Силицијум (Si) смањује индекс обрадљивости због стварања силикатних, абразивних зрна у материјалу. Молибден (Mo), ванадијум (V) и хром (Cr) доводе до повећања чврстоће и жилавости материјала, уз смањење индекса обрадљивости.

Полазећи од ових чињеница развијани су и развијају се модели за оцену обрадљивости засновани на утврђивању функционалне зависности брзине резања и хемијског састава материјала предмета обраде. Упоређивањем тако добијених брзина, за испитивани и еталон материјал, формира се индекс обрадљивости материјала [3].

Метод анализе микроструктуре

Основне карактеристике микроструктуре материјала предмета обраде су:

- врста припремне термичке обраде (отпуштање, жарење, побољшање и сл.),
- структура материјала (ситнозрна, крупнозрна и сл.),
- тип структуре (феритна, перлитна и сл.),
- димензије карбида и сулфида,
- садржај оксида,
- облик сулфида и оксида,

- садржај укључака (мангана, азота, фосфора и сл.) итд.

Могуће је формирати методологију оцене обрадљивости кроз успостављање математичког модела анализе утицаја елемената микроструктуре на функцију обрадљивости, најчешће брзину резања. Идентификовањем функције обрадљивости, брзине резања за усвојену или оптималну вредност постојаности алата, обезбеђено је прогнозирање обрадљивости испитиваног материјала, кроз анализу микроструктуре материјала [3].

2.3.2. Комплексне методе испитивања обрадивости

Комплексне методе су методе испитивања обрадивости и формирања технолошких база података. Комплексне методе су методе утврђивања скупова функција обрадивости, која обезбеђују комплексна знања о механици, термодинамици, трибологији и економици резања, као и квалитету обраде [3].

Комплексним методама утврђују се зависности функција обрадљивости и параметара обраде (постојаност алата T , дубина резања a , корак S , брзине резања V итд.), као што су функције чији је основни облик за [3]:

- Постојаност алата:

$$T = \frac{C_T}{a^p \cdot S^q \cdot V^z}$$

- Брзина резања:

$$V = \frac{C_v}{T^m \cdot a^x \cdot S^y},$$

- Силе резања:

$$F_i = C_{ki} \cdot a^{x_i} \cdot S^{y_i},$$

- Температура резања:

$$\theta = C_\theta \cdot a^k \cdot S^m \cdot V^n.$$

Функције могу садржати и корекционе факторе утицаја услова обраде на вредност функција обрадивости. Експериментална испитивања и мерења изводе се према правилима и поставкама теорије планирања експеримената, применом методологије једно- или вишефакторног плана експеримената [3].

2.4. Одређивање универзалне обрадивости

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.

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 доношења 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[17].

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: [17]

$$\overrightarrow{K_i^{KO}} = k_i^{ko} \cdot K_i$$

Где су:

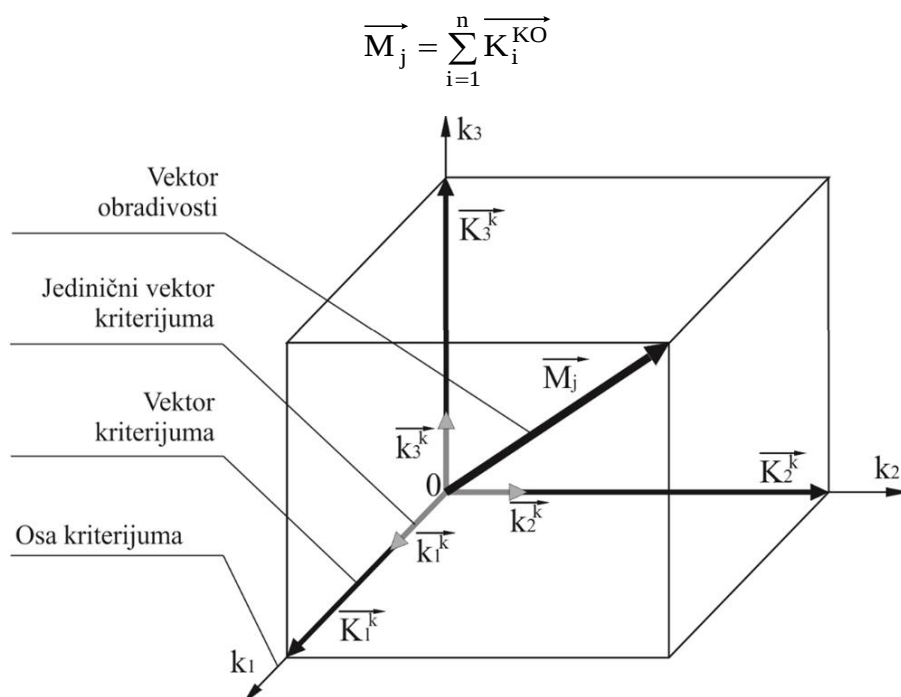
K_i^{KO} - вектор i критеријума;

KO - симбол критеријума;

K_i - скаларна вредност параметра i критеријума;

k_i^{ko} - јединични вектор i критеријума;

Вектор обрадивости представља векторски збир вектора критеријума (слика 7) и дат је релацијом [17]:



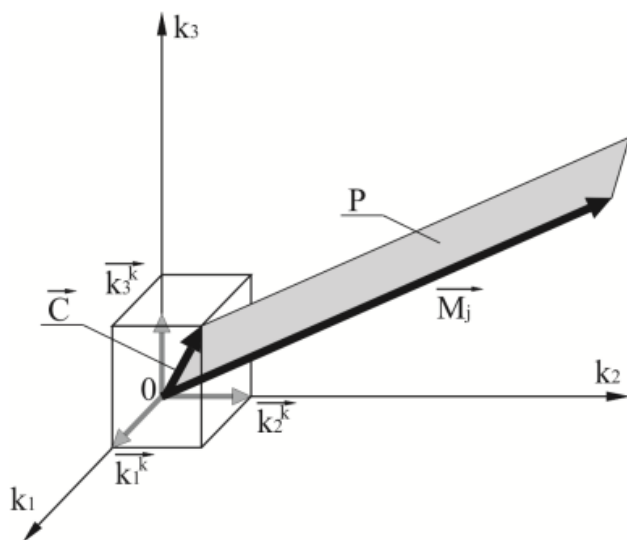
Слика 7. Вектор обрадивости у правоуглом координатном систему [17]

Анализом вектора положаја обрадивости могу се извести закључци о испитиваним материјалима и понашању појединих критеријума. Неки од тих критеријума су:

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

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

Да би дошло до модела оцене универзалне обрадивости потребно је формирати јединични вектор критеријума обрадивости- вектор који показује најповољнији (уједначен) правац и има минималну дужину. Што су вредности параметара уједначеније, односно имају једнак утицај на обрадивост, то ће се и вектор обрадивости приближити правцу контролног вектора и тежити његовом интензитету (слика 9.). Може се закључити да материјал чији вектор обрадивости има мањи интензитет и који затвара мањи угао са контролним вектором има и бољу обрадивост. Величина која најбоље показује колико је вектор обрадивости уједначен са правцем контролног вектора и колики је његов интензитет је величина површине паралелограма коју стварају вектор обрадивости и контролни вектор[17].



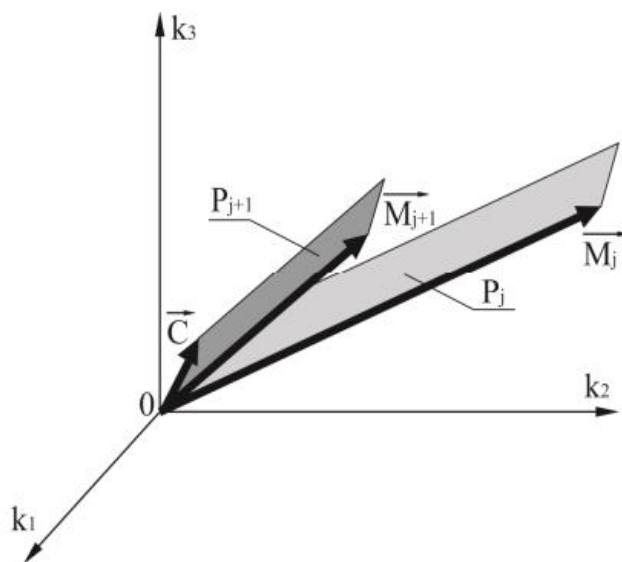
$$\vec{C} = \sum_{i=1}^3 \vec{k}_i^k$$

Слика 8. Јединични вектор критеријума обрадивости [17]

Приказана површина паралелограма може се директно повезати са обрадивости материјала. Што је мањи интензитет вектора обрадивости посматраног материјала и што је мањи угао који он затвара са контролним вектором, толико је боља и његова обрадивост у односу на друге материјале са дефинисаним вектором обрадивости. Материјал са мањом датом површином има бољу обрадивост у односу на материјал код ког се формира паралелограм са већом површином [17].

Анализа обрадивости може се спровести и за више материјала, што није случај код индексне методе испитивања обрадивости (слика 9). Коначно, површина паралелограма за сваку улазну комбинацију износи:

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



Слика 9. Анализа обрадивости за више материјала [17]

Универзална обрадивост је обрнуто пропорцијална површини паралелограма формираног над вектором моћи и контролним вектором. Формула за универзалну обрадивост, у том случају, би се могла написати у облику [17]:

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

2.5. Индекс обрадивости

Најчешћи начин исказивања обрадивости јесте индекс обрадивости. Индекс обрадивости представља релативну меру обрадивости у односу на унапред усвојени одговарајући материјал- еталон материјал. За еталон се усваја материјал који се највише користи у пракси. Индекс обрадивости је мера обрадивости материјала исказана према следећим критеријумима [3]:

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

Могу се користити и друге величине које у мањој или већој мери исказују обрадивост материјала.

Индекс обрадивости испитаног материјала може се представити изразом:

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

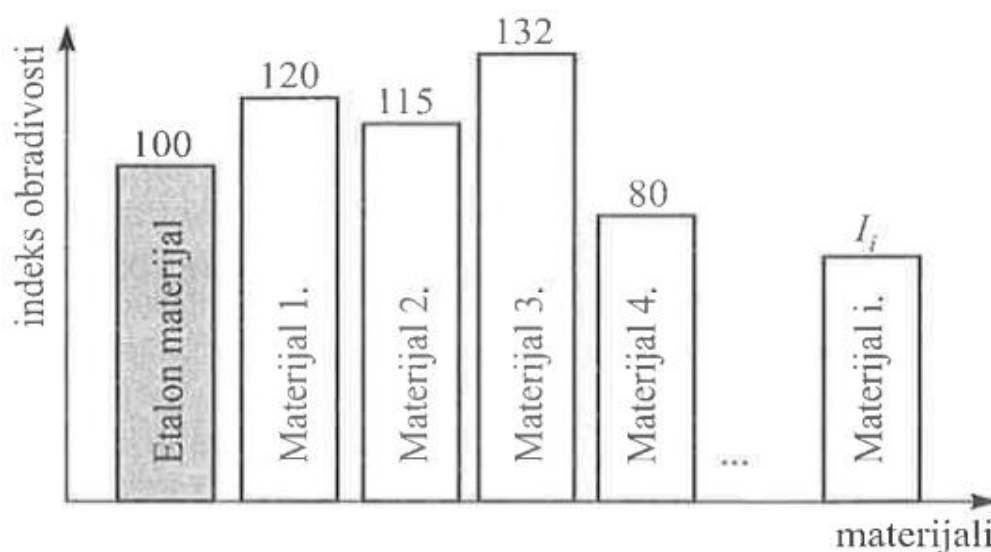
Где су:

I_i – индекс обрадивости испитаног материјала;

p_i – величина параметра усвојеног за оцену обрадивости испитаног материјала;

p_r – величина параметра усвојеног за оцену обрадивости референтног материјала;

Експонент односа (p_i / p_r) има вредност +1 ако пораст изабраног параметра има позитиван ефекат на лакоћу одбијања процеса обраде. У обрнутом случају експонент има вредност -1. Углавном се поређење преко индекса обрадивости представља помоћу хистограма (слика 10), код којих сваки стубац представља по један испитивани материјал. Материјалу који је усвојен као еталон материјал додељује се индекс обрадивости 100. Информације добијене дефинисањем обрадивости путем индекса обрадивости имају практичан значај у праћењу квалитета датог материјала пре и у току његове експлоатације. На основу добијене вредности индекса обрадивости могу се утврдити оптимални режими за посматрани материјал.



Слика 10. Хистограмски приказ индекса обрадивости [3]

Ако се познају оптимални режиме рада еталон материјала, нпр. економична брзина резања, онда се оптимални режими (економична брзина) за посматрани материјал добија из односа:

$$I_i / I_r = V_i / V_r$$

Где су:

- I_i - Индекс обрадивости испитиваног материјала;
 I_r - Индекс обрадивости референтног материјала;
 V_i - Економична брзина резања испитиваног материјала;
 V_r - Економична брзина резања референтног материјала [3].

Универзалније дефинисање обрадивости може се исказати помоћу израза:

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

Где су:

- I_{uni} – универзални индекс обрадивости;
 I_i – индекс обрадивости по i – том критеријуму;
 d_i – коефицијент утицаја i – тог критеријума[3].

2.6. Утицај улазних параметара на обрадивост материјала

Од великог броја утицајних параметара којим обрадни систем делује на обрадивост, посебно се издвајају они параметри који су директно повезани са карактеристикама радног предмета и алата. Такође веома је битно и нагласити утицај технологије обраде и машине на којој се врши обрада. Основне особине обрађиваног материјала које имају велики утицај на обрадивост материјала су:

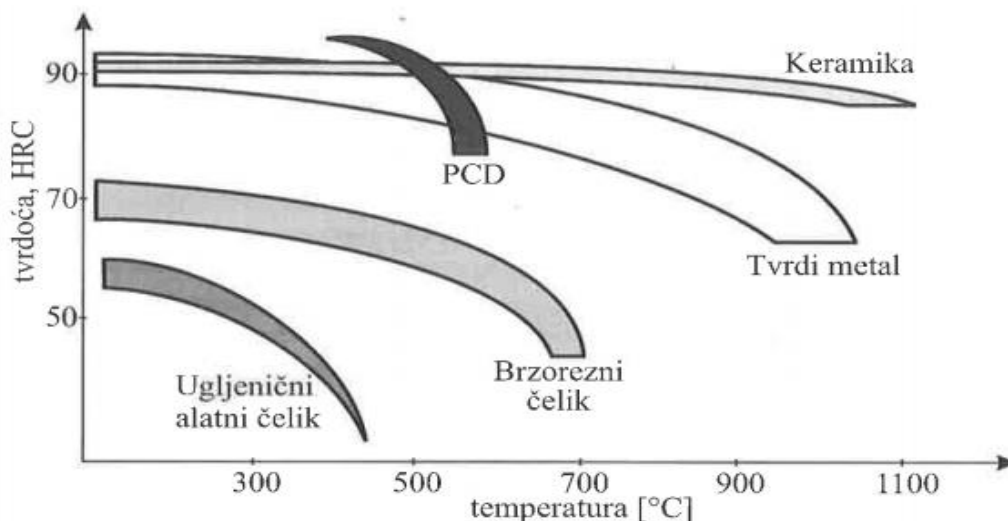
- затезна чврстоћа,
- тврдоћа, жилавост,
- топлотна проводљивост,
- структура.

Материјали са већом затезном чврстоћом имају лошију обрадивост у односу на материјале за мањом чврстоћом, јер је много теже раскинути међуатомске и међукристалне везе унутар такве структуре за време продирања алата у материјал. Легирани челици имају боље механичке особине од конструкционих челика јер имају већу затезну чврстоћу. Утицај тврдоће на обрадивост материјала је та да материјали са малом тврдоћом и великом тврдоћом имају лошију обрадивост у односу на материјале чија се тврдоћа креће у границама 40-55 HRC. Жилавост се такође може довести у везу са тврдоћом радног предмета. Материјал са ниском тврдоћом, односно, жилавији материјал, приликом процеса обраде ствара наслаге које негативно утичу на квалитет обрађене површине. Исто тако, специфична тежина се може повезати са тврдоћом, јер тврђи материјал због своје компактне и уређене структуре има и већу специфичну тежину, па се на основу тога изводе и закључци о утицају специфичне тежине на обрадивост материјала.

Проценат легирајућих елемената у материјалу радног предмета има значајан утицај на обрадивост материјала при резању. Проценат силицијума, мангана, фосфора и сумпора, негативно утиче на затезну чврстоћу и тврдоћу, при чему материјал са већим процентом ових елемената има бољу обрадивост при резању. Облик кристалне решетке нема значајан утицај на обрадивост материјала при резању, али се може закључити да

челици са површинском кубном решетком имају бољу обрадивост од просторно кубних и хексагоналних решетака.

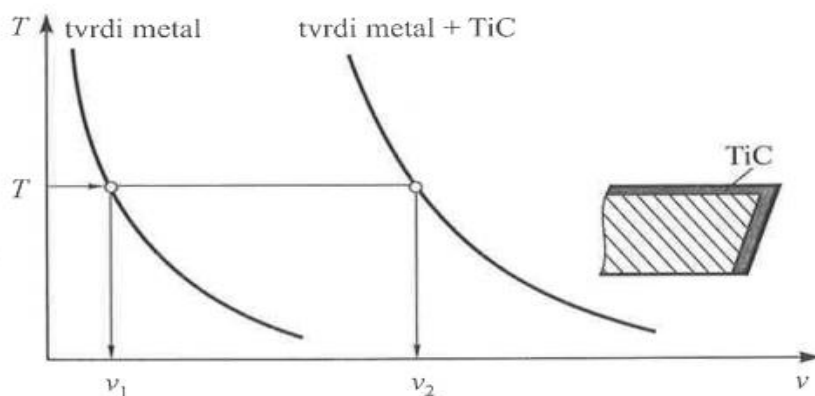
Висока температура у зони резања има низ негативних утицаја на квалитет обрађене површине и на карактеристине алата. Висока температура мења површинску структуру алата, тако што му повећава кртост и смањује отпорност на лом. Генерисана топлота изразито лоше утиче на алат тако што доприноси хабању грудне и леђне површине алата (слика 11) [6].



Слика 11. Промена тврдоће алатних материјала услед повећања температуре обраде [6]

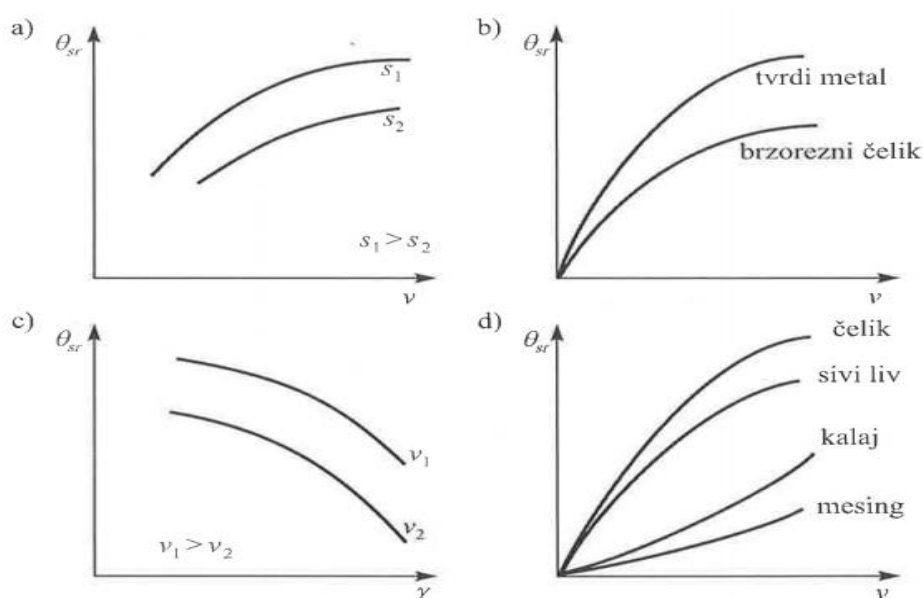
Велики утицај на обрадивост материјала има термичка обрада, па су зато каљени припремци неповољнији за обраду, јер приликом каљена долази до отврђивања материјала. Док на пример ваљање, доприноси анизотропности структуре материјала припремка, па је са тог аспекта материјал неповољан за обраду резањем.

Физичко – механичке карактеристике и геометрија алата имају велики утицај на обрадивост материјала. Употребом тврдог метала са превлакама и резне керамике дошло је до знатног повећања обрадивости материјала. Наношењем превлака на алате (слика 12) обезбеђује се повећање отпорности на хабање површинских слојева при непромењеној жилавости. На овај начин се обезбеђује већа брзина резања и повећава постојаност алата. Свако побољшање механичких особина алата, као и термичких особина, доприноси повећању обрадивости материјала.



Слика 12. Утицај превлака од TiC на постојаност алата од тврдог метала [6]

Геометријски параметри алата: углови радног клина, нападни углови алата, радијус врха алата, облик алата и др. имају велики утицај на обрадивост материјала са аспекта алата којим се обрада изводи. На силе резања велики утицај има геометрија алата, посебно вредност грудног угла. Смањењем вредности грудног угла смањују се и компоненте силе резања, али при томе долази и до опадања чврстоће алата што може довести до његовог лома. Најјача резна оштрица се постиже са негативним грудним углом. Алатни материјал као и структура нанесених превлака на резни део алата, такође могу значајно утицати на силе резања (промене области контакта између алата и струготине, смањујући дужину контакта и струготине са грудном површином алата). Утицај главног нападног угла на обрадивост манифестује се кроз процес формирања струготине. Мањи главни нападни угао значи и већу површину попречног пресека струготине, па према томе и већу силу резања, слика 13.



Слика 13. Утицај параметара обраде на температуру резања: а) брзина резања, б) материјал алата, ц) грудног угла резног клина, д) материјала предмета обраде [6]

Угао нагиба резне ивице утиче на отпоре резања и смер одвођена струготине, а самим тим и на вибрације у току обраде. Ломачи струготине доприносе бољем одвођењу струготине, чиме доприносе повећању обрадивости материјала. Значајан утицај на обрадивост материјала при резању има генерисана топлота у зони резања. Са порастом температуре резања смањује се тврдоћа алатног материјала па тиме и његова постојаност. На вредност температуре резања највећи утицај има материјал алата и предмета обраде, брзина резања и средство за хлађење и подмазивање. Температура резања је нижа при обради кртијих материјала, јер се они лакше деформишу а мања је и дужина контакта алата-струготина, што позитивно утиче на обрадивост. Важан критеријум за оцену обрадивости материјала јесте храпавост обрађене површине. Вредност параметара храпавости зависи од дубине и брзине резања, корака, радијуса врха алата и времена рада алата (слика 13).

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

2.7. Испитивање физичких својстава предмета обраде

Неке од физичких карактеристика које утичу на обрадивост материјала су [18]:

- *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 ефикасност 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 [18].

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

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

где су:

B - топлотна проводљивост материјала,

L - карактеристична дужина испитиваног дела,

HB - тврдоћа материјала по Бринелу,

A_r - процентуално умањење површине материјала добијено конвенционалним испитивањем затезањем [18].

2.8. Квалитет обрађене површине

Квалитет обрађене површине одређује се низом геометријских, физичко-механичких и хемијских показатеља који се могу упоређивати код одређивања обрадивости неког материјала [5].

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

Квалитет обрађене површине зависи од [5]:

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

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

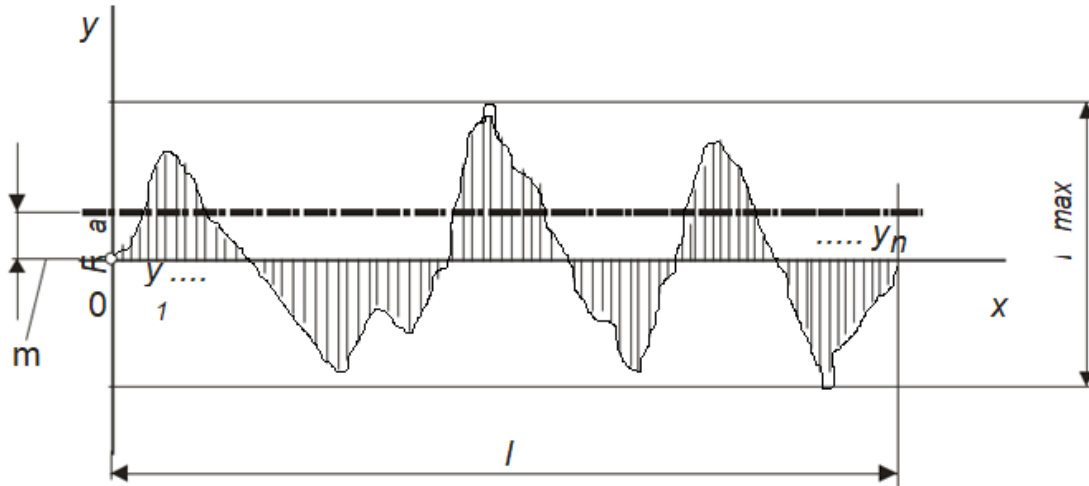
Дубина резања a , mm је вредност дебљине слоја материјала који се уклања у процесу резања, одређена растојањем обрађиване (1) и обрађене површине (2) [5].

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

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

Три основна параметра храпавости су:

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

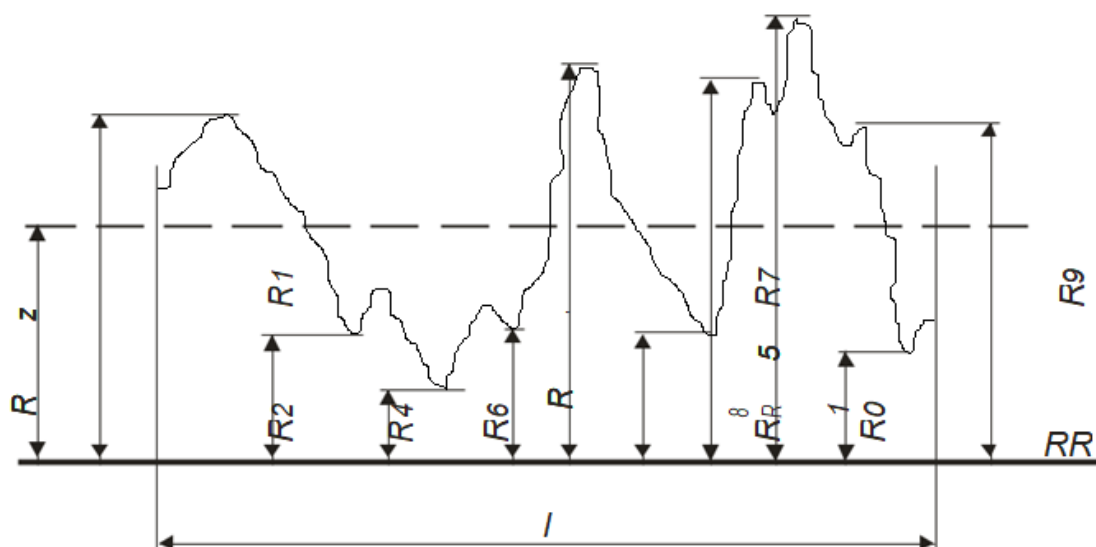


Слика 14. Храпавост површине [5]

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

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

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

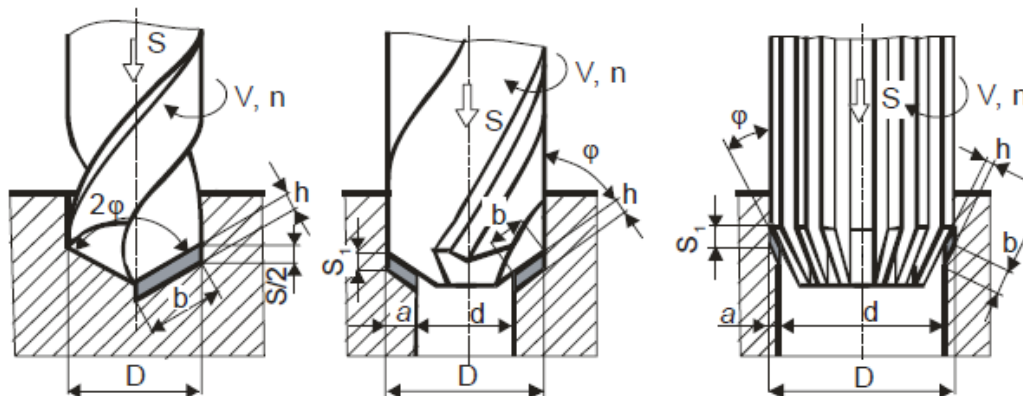


Слика 15. Средња висина неравнина [5]

3. ОСНОВЕ ПРОЦЕСА ОБРАДЕ БУШЕЊЕМ

Бушење је поступак израде обраде отвора и рупа.

Главном обртно и помоћно праволинијско кретање изводи алат. Главно кретање је дефинисано брзином резања ($V, m/min$) или бројем обрта ($n, o/min$), а помоћно кораком ($S, mm/o$ – аксијалним померањем алата за један обрт алата) или брзином помоћног кретања ($V_p = n \cdot S, mm/min$), слика 16 [4].



Слика 16. Основна кретања и резни слој у обради бушењем [4]

Бушење се најчешће изводи спиралним сврдлом. Бушење спада у најпримењивији поступак обраде до 25% у односу на остале поступке обраде, одмах после стугања. Обрада отвора бушењем се може вршити на разним алатним машинама, нпр. стона бушилица, стубна бушилица, радијална бушилица, координатна бушилица, специјалне бушилице за дубоко бушење, стугови, глодалице и др. [6].

Најчешће операције обраде бушењем су:

- бушење
- проширивање
- развртање
- упуштање

Бушење је врста машинске обраде одвајањем честица којим се посебним алатом (сврдлом) израђују ваљкасте (цилиндричне) рупе у обратку. Бушење је повезано с предрадњом забушивања и накнадним операцијама проширивања, упуштања, развртања и избушивања.

Забушивањем се врши означавање средишта рупе специјалним алатима - забушивачима. Сврха забушивања је израда рупе за позиционирање алата за наредну операцију бушења како не би алат (бургија) приликом бушења рупе направило отклон, односно грешку положаја. Забушивање се користи и за израду средишњег гнезда код

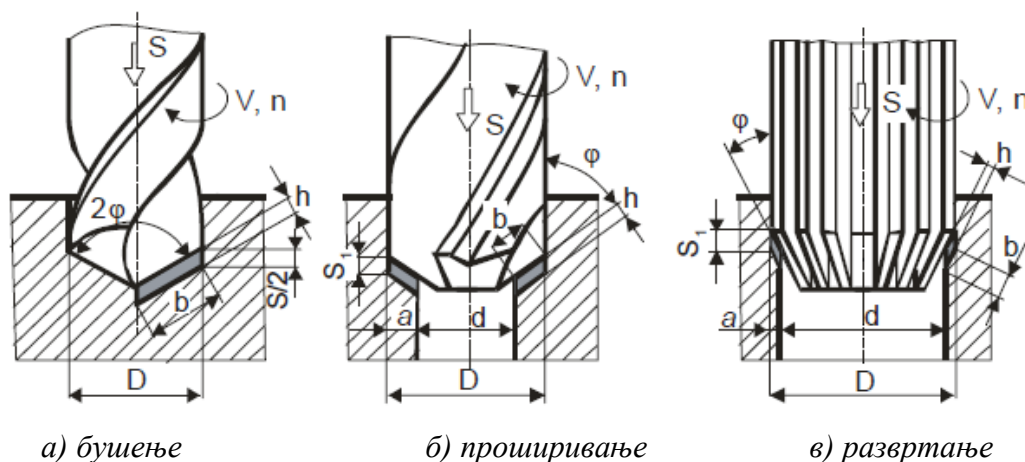
цилиндричних предмета, као што су вратила, осовине и др., као технолошка база за позиционирање и стезање при завршног обради површина ових делова.

Проширивање је поступак обраде претходно избушеног отвора у циљу повећања пречника и добијања квалитетније обрађене површине отвора веће тачности димензије. Проширивање се може обавити већи број пута, али је препоручљиво да пречник сваке наредне рупе буде већи око 25% од претходне рупе.

Развртање отвора је завршна обрада отвора у циљу добијања отвора високе тачности и веома високог квалитета обрађене површине. Развртање се изводи са веома малим додацима за обраду (0.2 - 0.5 мм).

Упуштање је поступак обраде улазног дела отвора или рупе. Упуштачи су резни алати који се употребљавају за поравнавање улазног дела отвора и цилиндрично, конусне или профилно проширивање улазног дела. Упуштање је средња до фина обрада метала. Њима се обрађују челне површине равно или под углом. Служе за проширивање, упуштање за главе вијка, обраду косих крајева рупе и за поравнавање уздигнутих делова обратка [7].

3.1. Геометријски параметри обраде



Слика 17. Резни слој у обради бушењем

Ширина и дебљина резног слоја при бушењу(слика 17-а):

$$b = \frac{D}{2 \cdot \sin \varphi} \quad \text{и} \quad h = \frac{S}{2} \cdot \sin \varphi,$$

Површина попречног пресека резног слоја је:

$$A = b \cdot h = \frac{D \cdot S}{4}, \text{ mm}^2.$$

Код проширивања и развртања ширина и дебљина резног слоја је(слика 17-б,в):

$$b = \frac{a}{\sin \varphi} = \frac{D-d}{2 \cdot \sin \varphi} \text{ и } h = S_1 \cdot \sin \varphi = \frac{S}{Z} \cdot \sin \varphi,$$

Површина попречног пресека резног слоја:

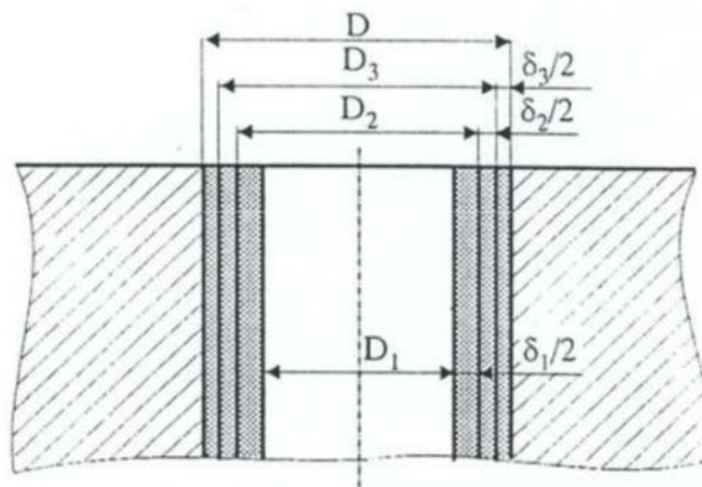
$$A = b \cdot h = \frac{(D-d) \cdot S}{2 \cdot Z}, \text{ mm}^2$$

Дубина резања у обради проширивањем и развртањем је:

$$a = \frac{D-d}{2}, \text{ mm}$$

Додаци за обраду проширивањем и развртањем, слика 18, су:

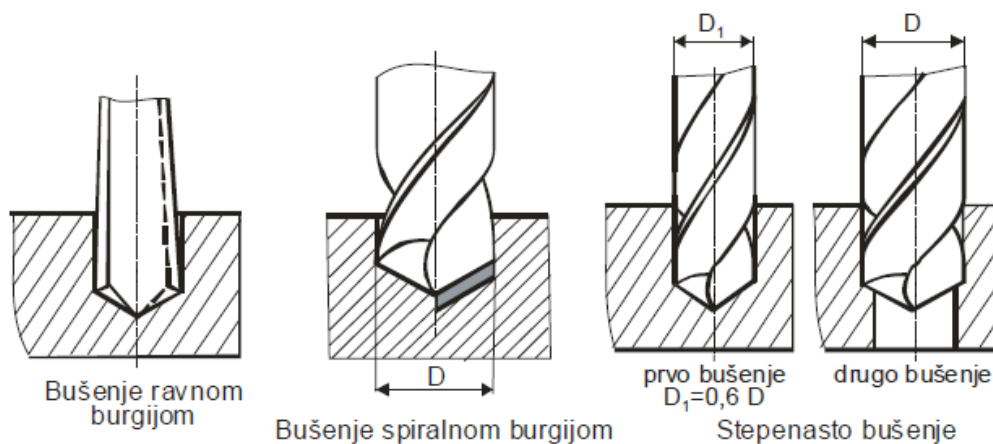
- δ_1 - додатак за обраду проширивањем,
- δ_2 - додатак за обраду грубим развртањем и
- δ_3 - додатак за обраду финим развртањем[4]



Слика 18. Додаци за обраду у обради бушењем[10]

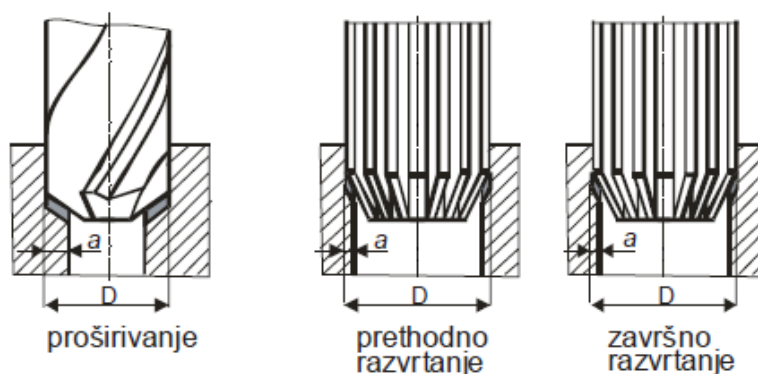
3.2. Производне операције у обради бушењем

Поред основних операција (бушења, проширивања, упуштања и развртања) бушењем се могу вршити и друге операције израде и обраде отвора и рупа као што су: забушивање, бушење дубоких отвора и израда навоја. Бушење отвора и рупа се изводи у пуном материјалу једним алатом или, код већих пречника, степенасто у неколико фаза, бургијама различитог пречника, слика 19 [4].

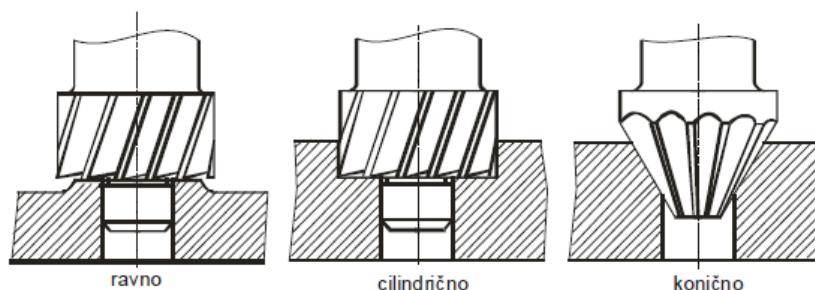


Слика 19. Производне операције бушења [4]

Бушење отвора спиралним бургијама је ефикасно код отвора мање дубине (односа дубине и пречника отвора $l/D \leq 5$). Код отвора већих дубина примењује се поступак дубоког бушења, коришћењем бургија за дубоко бушење. Коначна обрада отвора остварује се операцијама проширивања и развртања (слика 20), које обезбеђују остварење задатих димензија отвора и прописаног квалитета површина. Обрада крајева отвора се изводи упуштањем (слика 21). Равно упуштање се користи за обраду чеоних упуштених површина отвора кроз који пролази вијак са равним седиштем [4].



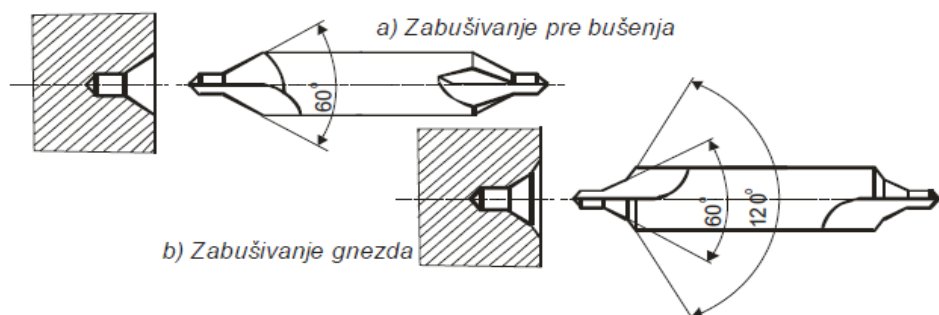
Слика 20. Производне операције проширивања и развртања [4]



Слика 21. Производне операције упуштања [4]

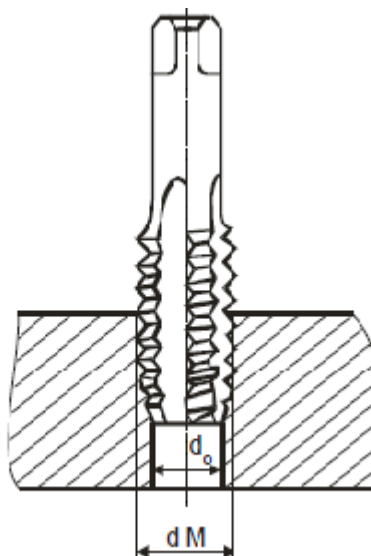
Забушивање пре бушења отвора или гнезда за центрирање (слика 22) се користи пре бушења или пре обраде осовина и вратила. Изводи се забушивачима са једноструким

конусом (слика 22.а). Забушивање гнезда за центрирање, на вратилима и осовинама, обезбеђује правилно центрирање и стезање осовина и вратила у обради стругањем и брушењем [4].



Слика 22. Производне операције забушивања [4]

Израда унутрашњег навоја се остварује коришћењем једноструких урезника (слика 23). Пре израде навоја буши се отвор чији пречник одговара унутрашњем пречнику навоја [4].



Слика 23. Израда унутрашњег навоја на бушилици [4]

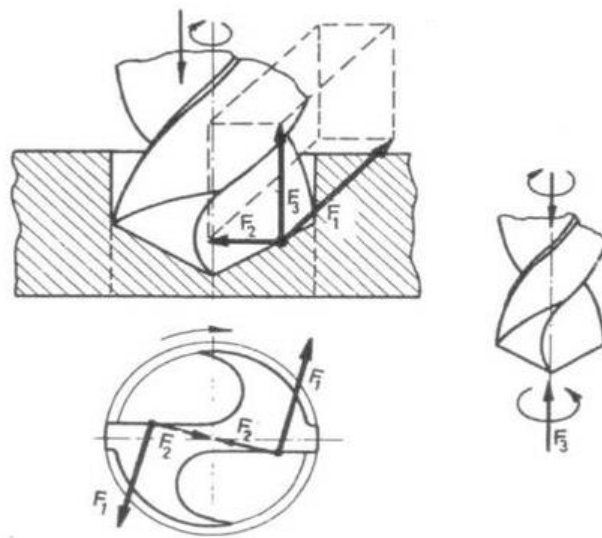
3.3. Отпори резања при бушењу

При бушењу бургија трпи висока напрезања због дејства отпора резања, значајних допунских деформација струготине и трења између струготине и површине отвора. При бушењу на сечиво резног алата делује резултујући отпор резања који се може разложити на три компоненте. На свако сечиво посебно, делују по три компоненте отпора (слика 25). То су:

- F_1 - главни отпор резања, који је нормалан на радијус тачке попречног сечива у којој делује резултујући отпор,

- F_2 - отпор продирања који је нормалан на обрађену површину и
- F_3 - отпор помоћног кретања који је паралелан са осом бургије [11].

Отпоре резања у обради бушењем се најчешће представљају аксијалном силом резања F_3 (односно F_a , F_z или F_3) и моментом резања M кога образују главни отпори резања који делују у хоризонталној равни управно на главно сечиво (слика 24). Аксијалну силу резања у вертикалној равни чини збир компоненти отпора који делују на две резне ивице и попречно сечиво. Отпори продирања делују у хоризонталној равни на главна сечива, имају супротан смер и њихова резултанта је једнака нули.



Слика 24. Компоненте отпора резања при бушењу [11]

4. КАРАКТЕРИСТИКЕ СПЕЦИЈАЛНИХ ЧЕЛИКА

4.1. Уопште о челику

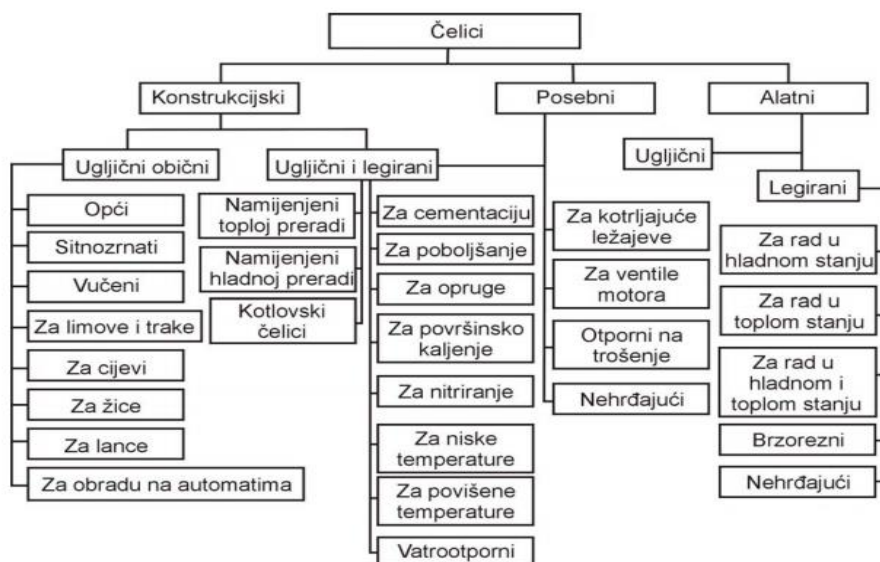
Челик је метастабилно кристализована $Fe-C$ ($Fe-Fe_3C$) легура са садржајем угљеника мањим од 2,11%. Додавањем волфрама, хрома, молибдена, ванадијума, мангана, никла, кобалта и других метала, појединачно или у комбинацијама, добијају се легирани челици за специјалне сврхе, изузетно механички, хемијски или топлотно постојани. Ако је масени удео легирајућих елемената већи од масеног удела гвожђа, или се гвожђе налази само у траговима, онда се не говори о челику већ о новим типовима легура [12]. Ту спадају:

- нежелезне легуре на бази Al , Mg , Ti , и Zr ,
- легуре тешко топивих метала на бази Mo , W , Co , и Ta ,
- легуре племенитих метала на бази Pt , Pd , Rh , Ru , и Ir ,
- специјалне легуре,
- супер легуре [12].

По DIN EN 10020 постоје само две главне класе челика:

- квалитетни челици и
- специјални (племенити) челици.

Данас је регистровано негде око 2.500 различитих врста челика [12]. Општа подела челика приказана је на слици 25.



Слика 25. Општа подела челика према намени [13]

4.2. Специјални челици

Специјални челици због свог хемијског састава имају својства која се увелико разликују од својства обичних масовно примењених челика. Ради се о железним легурама којима се на три начина могу променити својства:

- Променом у хемијском саставу,
- Променом у процесу производње,
- Променом у преради.

Специјални челици су по правилу легирани челици који у себи садрже неколико различитих хемијских елемената [15].

Најчешће се ради о силицијуму, мангану, хрому, никлу, волфраму, молибдену, ванадијуму, кобалту, титану, баку, алуминијуму, бору, ниобијуму и танталу. Такви елементи, као и код свих осталих врста легираних челика, морају бити заступљени у одређеној вредности да би се могли сматрати легираним [15].

4.3. Врсте специјалних челика

По правилу се посебни челици могу сврстати у три категорије:

- Нерђајући челици: Они су отпорни на киселине и корозију. Међутим, у неким условима се догађају корозијски процеси. По правилу, сваки нерђајући челик са садржајем хрома већим од 12% сматра се отпоран на киселину или базу. Могу се поделити према начину производње на ваљане и ливене.
- Челици за рад на повишеним температурама: користе се у производњи разних механичких делова који су под сталним утицајем повишених температура.
- Челици отпорни на хабање су челици који се најчешће користе при изради конструкција од којих се захтева велика отпорност на хабање. Поред тога, користе се у рударству, изради дробилица, радних машина, итд. [15].

Неки од специјалних челика који се користе у наменској индустрији, посебно за израду конструкција од којих се захтевају специјална својства као што су висока затезна чврстоћа, висока отпорност на ударна оптерећења, велика тврдоћа, својства добре балистичке заштите, добра заваривост, итд. Специјални челици чија су својства описана у наредном делу рада су:

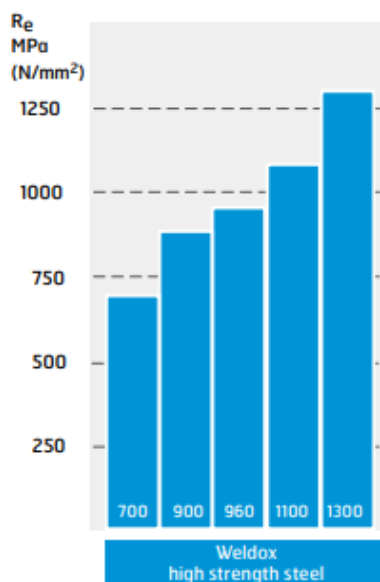
- Weldom 700
- Armoх 500Т
- Hardox 400
- Protac 500

Ови челици су испитивани са аспекта могућности обраде бушењем. Поређење својстава обрадивости је вршено према често коришћеном челику негарантованог хемијског састава:

- St 52-3 (Č0563)

4.3.1. Weldom 700

Челици *Weldom* су развијени да пруже одличну завариваност у комбинацији са великом чврстоћом и тврдоћом, слика 25. Металургија на бази руде и напредна прерада у фабрици челика обезбеђују веома низак садржај заосталих напона у челику. *Weldom* челици високе чврстоће имају одлична својства савијања и обрадивости [14].



Слика 26. *Weldom* – челик повишене чврстоће[14]

Челик *Weldom 700* је општи структурални челик са минималном чврстоћом од 650 до 700 МПа у зависности од дебљине. *Weldom 700* испуњава захтеве EN 10025 за одговарајуће димензије и дебљине табле. Типична примена је за конструкције које захтевају ношење великих оптерећења [14].

Weldom 700 E је доступан у дебљини плоча од 4 до 160 mm, а *weldom 700 F* доступан је у дебљинама плоча од 4 - 130 mm. Обе дебљине су доступне у ширинама до 3350 mm и дужинама до 14630 mm. За дебљине преко 100 mm жељена ширина је 1650 mm са неоштећеном ивицом.

Табела 2. Механичке карактеристике челика *Weldom 700* [14]

Дебљина mm	Жилавост $R_{p0.2}$, min МПа	Затезначврстоћа R_m , МПа	Издужење A_5 , min %	Тврдоћа по Бринелу HBW
4 – 53	700	780 – 930	14	260 – 310
(53) – 100	650	780 – 930	14	260 – 310
(100) – 160	650	710 – 900	14	240 – 290

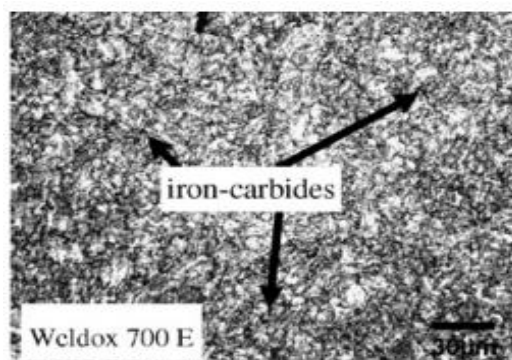
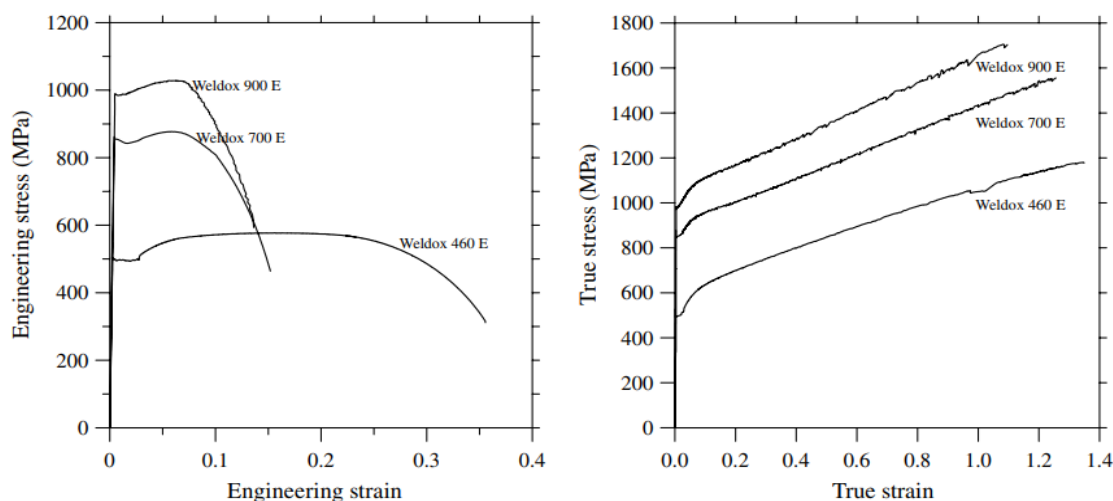
Према EN 10025-6, хемијски састав челика S690QL (комерцијална ознака **Weldom 700**) је дефинисан за петнаест елемената (табела 3), при чему је еквивалент угљеника максимално $CEV=0,65$ [14].

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$$

Табела 3. Хемијски састав S690QL у процентима (%) [14]

C	Si	Mn	P	S	N	B	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V	Zr
0,20	0,80	1,70	0,02	0,01	0,015	0,005	1,50	0,50	0,70	0,06	2,0	0,05	0,12	0,15

Weldox 700 E је материјал у групи која пролази кроз значајан процес гашења и каљења (назван као QT), а микрографије показују да се састоје од каљеног мартензита, слика 26. Мартензит даје већу чврстоћу, али и смањује дуктилност. Да би се легуре учиниле дуктилнијим, материјали су подвргнути каљењу, слика 27 [14].

Слика 27. Оригинална микроструктура челика *Weldox 700 E* [14]Слика 28. Криве напона и напрезања у квази-статичком стању на собној температури за *Weldox 460 E*, *Weldox 700 E* и *Weldox 900 E* [14]

Weldox 700 је своје механичке особине постиже накнадном термичком обрадом. Накнадним довођењем топлоте губе се махичке карактеристике за је зато препоручљивије сечење абразивним воденим млазом него било којим другим сечењем. При заваривању, сечењу, брушењу или на било који други начин на овом материјалу морају се предузети одговарајуће мере заштите и здравља. Брушење, посебно слојева

превучених темељним премазом, може произвести прашину са високом концентрацијом честица [14].

Код *Weldox* челика, ради ефикаснијег контролисаног ваљања легирање се врши са мањим количинама *Nb*. Овај елемент подиже подручје рекристализованог аустенита ка вишим температурама, што омогућава извођење већих пластичних деформација аустенита приликом ваљања.

4.3.2. *Hardox 400*

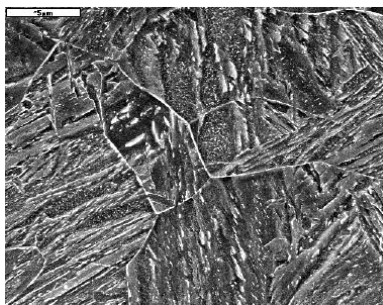
Челици *Hardox* испуњавају строге захтеве за чврстином, сталним квалитетом, равномерношћу и стањем површине. Јединствена комбинација константно високе тврдоће, високе чврстоће и одличне отпорности на ударна оптерећења чини *Hardox* врло погодним материјалом за широк спектар примене. Производ је на тржишту од 1970.-их и континуално се развија како би задовољио захтеве купаца. Плоче се производе у дебелинама од 3 до 130 мм и тврдоћи до 600 HBW.

Одликује их висока тврдоћа и отпорност на хабање. Због своје високе чврстоће, производи могу бити једноставнији и лакши, али могу да носе и веће корисне носивости. Штавише, *Hardox* плоча има добру отпорност на удар и на ниским температурама. Његова добра својства заваривања и обрадивости поједностављују производњу и поправке. Већа корисна оптерећења, нижи трошкови одржавања, добра расположивост и дужи радни век комбинују да би се обезбедила боља укупна економичност.

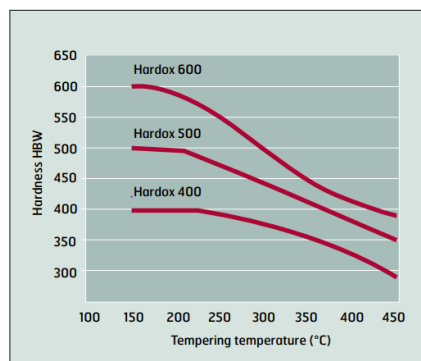
За *Hardox* челике контролисано ваљање завршава се у аустенитном подручју. Температуре загревања слабова обично су ниже у поређењу са уобичајеним ваљањем. Први део ваљања обавља се у подручју рекристализованог аустенита, (изнад 950 °C), где се рекристализација врши већ при ваљању, док се аустенитно зрно смањује редукцијом дебелине улошка. Ваљање се затим наставља у подручју метастабилног аустенита (између A_{T3} и A_{T1}), где долази до хладне деформације, а аустенитна зрна остају деформисана. У овој фази не долази до рекристализације, или не до потпуне рекристализације [14].

Током трансформације свако деформисано аустенитно зрно даје многе феритне зачетке по кристалним границама и деформацијским појасевима који настају у унутрашњости кристалних зрна. После завршене трансформације ствара се велики број феритних зрна који побољшавају чврстоћу и жилавост [14].

Hardox 400 је челик отпоран на абразију са номиналном тврдоћом од 400 HBV. Типичне примене су компоненте за конструкције подложне хабању [14]. *Hardox 400* није предвиђен за даљу топлотну обраду. Своја механичка својства стекао је гашењем, а по потреби и накнадним каљењем. Својства услова испоруке не могу се задржати након излагања температурама већим од 250 °C [14].



Слика 29. Микроструктура челика *Hardox 400*; увеличана 5000x [14]



Слика 30. Површинска тврдоћа у зависности од температуре каљења [14]

Нема разлике код ласерског резања *Hardox* у поређењу са обичним челиком, тј. користе се исти параметре процеса. Прајмер смањује брзину сечења, али то се може решити тако што ће се прво испаравати темељни премаз, а затим резати контура.

Hardox челик, спада у групу нисколегираних борних челика, углавном је пожељан у бродској и рударској индустрији, наменској индустрији, за тешку грађевинску опрему, дробилице и примену код транспортних средстава због високе жилавости, добре обрадивости и заваривања. Међутим, триболошке карактеристике ових челика су неадекватне у неким апликацијама које укључују корозивно окружење [14].

Из тог разлога је потребна површинска обрада да би се превазишао овај недостатак. Површине материјала могу се модификовати помоћу неколико техника као што су термохемијски третмани уз помоћ плазме и премази са танким филмом у циљу побољшања отпорности на хабање и корозију.

Абразивно резање воденим млазом је најбоља метода када постоји ризик од појаве прслина при резању, и зато се препоручује за дебеле лимове *Hardox* челика [14].

4.3.3. *Protac 500*

Због својих механичких својстава челик *Protac 500* се сврстао међу висококвалитетне материјале у опсегу тврдоће 480 – 540 HB. Пошто га карактерише велика чврстоћа, дуктилност и специфична тврдоћа, погодан је за коришћење за балистичку заштиту лаких оклопних возила, специјалних возила, врата и заштитних конструкција зграда,

итд. Његова хемијска и основна механичка својства према произвођачи су представљени у табелама 4 и 5 респективно [14].

Табела 4. Хемијски састав *Protac 500* према дефиницији произвођачау процентима (%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0.3	0.7	1.2	0.8	0.7	0.35

Табела 5. Основна механичка својства *Protac 500*

Густина	7850 , kg/m ³
Жилавост	1400 , МПа
Затезна чврстоћа	1800 , МПа
Издужење A ₅	10 , %
Тврдоћа	470 – 540 НВ

4.3.4. *Armox 500T*

Armox 500T се најчешће користи за израду балистичких заштитних плоча, са номиналном тврдоћом од 500 HBV. Припада висококвалитетним нисколегираним челицима. Услед финозрне мартензитне микроструктуре и средњег садржаја угљеника има високу чврстоћу и тврдоћу са својствима добре жилавости потребне за панцирну заштиту. Користи се за израду делова возила, зграда...

Предности *Armox 500T*:

- Водећи производ на тржишту за балистичку заштиту,
- Има својства трансформације
- Оптимизована решења
- Одлична равнотежа између тврдоће и отпорности за заштиту против продора ваздуха...

Доступан је у дебљини од 3 и 80мм. Остале димензије се добијају у Шведској фабрици за производњу челика.

Armox 500T није предвиђен за даљу термичку обраду [16].

Табела 6. Механичка својства *Armox 500T*:

Дебљина, mm	Тврдоћа HBV	Charpy-V, 10x10 mm, узорак, Min	Снага Rp0,2 Min Мпа	Затезна чврстоћа Rm, Мпа	Елонгација A5 Min %	Елонгација A50 Min %
3.0-80.0	480-540	32J/ -40°C	1250	1450-1750	8	10

Табела 7. Хемијски састав *Armoх 500Т* у процентима (%) [16]

C	И	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
max0,32	max 0,4	max1,2	max0,010	max0,003	max1,0	max1,8	max0,7	max0,05

4.3.5. ST 52-3 (Č0563)

Челик *ST 52-3* припада групи конструкционих челика који се користе за одговорне заварене конструкције изложене динамичким оптерећењима и ниским температурама, до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Челик *ST 52-3N* је челик са ниским садржајем угљеника кога одликује висока чврстоћа и лака заварљивост са другим заварљивим челицима.

Са својим ниским еквивалентом угљеника, поседује добра својства хладног обликовања. Испоручује се у шипкама у нормализованом или контролисано ваљаном стању.

Примењује се за делове машина за које је потребан челик за заваривање, каошту су опрема за транспорт, дизалице, носачи, шасије, сидрене вијке, клипњаче, мостови, као и у грађевинарству [14].

Табела 8. Хемијски састав *ST 52-3 (Č0563)* у процентима (%)

C	Si	Mn	P	S	Nb	Al	N
max 0.20	0.15-0.50	max 1.60	max 0.035	max 0.035	0.02-0.04	min 0.02	max 0.009

Ако је челик рафиниран зрном са Al, N = max 0,015% [14].

Табела 9. Механичке карактеристике *ST 52-3 (Č0563)*

Жилавост R_{eH} , N/mm ²	Затезна чврстоћа R_m , N/mm ²	Издужење A_5 %
355 min	490 min	20 % min

5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА И РЕЗУЛТАТИ

У оквиру овог рада извршена су експериментална испитивања са циљем одређивања обрадивости обрадивости бушењем описаних материјала.

5.1. Експериментална испитивања

Сва испитивања су изведена у истим условима:

- пречик бургије: 6 mm, SRPS K.D3.022, ФРА Чачак,
- корак $s = 0.056 \text{ mm/o}$
- број обртаја $n = 630 \text{ o/min}$
- брзина резања $v = 11.9 \text{ m/min}$
- дубина бушења 10 mm
- бушење је вршено без средства за хлађење и подмазивање.

Сва испитивања су изведена на радијалној бушилици 2N55, снаге 10 kw, у Лабораторији за обраду метала резањем на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

Експериментална испитивања су обухватила мерење отпора резања и пречника добијеног отвора.

Мерење отпора резања је вршено вишекомпонентним динамометром „КИСТЛЕР“ са пиезо давачима који обезбеђује мерење три компоненте отпора резања (F_x , F_y и F_z) и момента резања M . Динамометар постављен на машину са предметом обраде и алат су приказани на слици 31.

При испитивањима мерени су аксијална сила резања F_a (компонента F_z) и момент резања M . Положај обрађиваног отвора на предмету обраде при мерењу опора резања увек је био исти у односу на динамометар, односно, на истом растојању од осе предмета обраде. Предмети обраде од различитих материјала су били димензија 50 x 50 мм дебљине 10 мм.

За мерење отпора резања коришћен је вишекомпонентни динамометар Kistler. Дејством силе, пијезоелектрични давачи у динамометру генеришу напон, који се повећавају помоћу појачавача сигнала Kistler 5007. Као излаз из појачивача добија се сигнал који даље иде у АД картицу, која претвара аналогни сигнал у дигитални. На крају, из АД картице, сигнал стиже у рачунар, помоћу кога се врши мониторинг процеса и чување података. Помоћу софтверског пакета National Instruments LabVIEW врши се читање сигнала и аквизиција података. Програм је написан тако да омогућава графички и нумерички приказ тренутних вредности силе F_a и момента M . Истовремено са мониторингом процеса бушења врши се и снимање сигнала у рачунар. На слици 32 су

приказани пиезо појачивач са рачунаром и одговарајућом апликацијом за мониторинг процеса бушења.



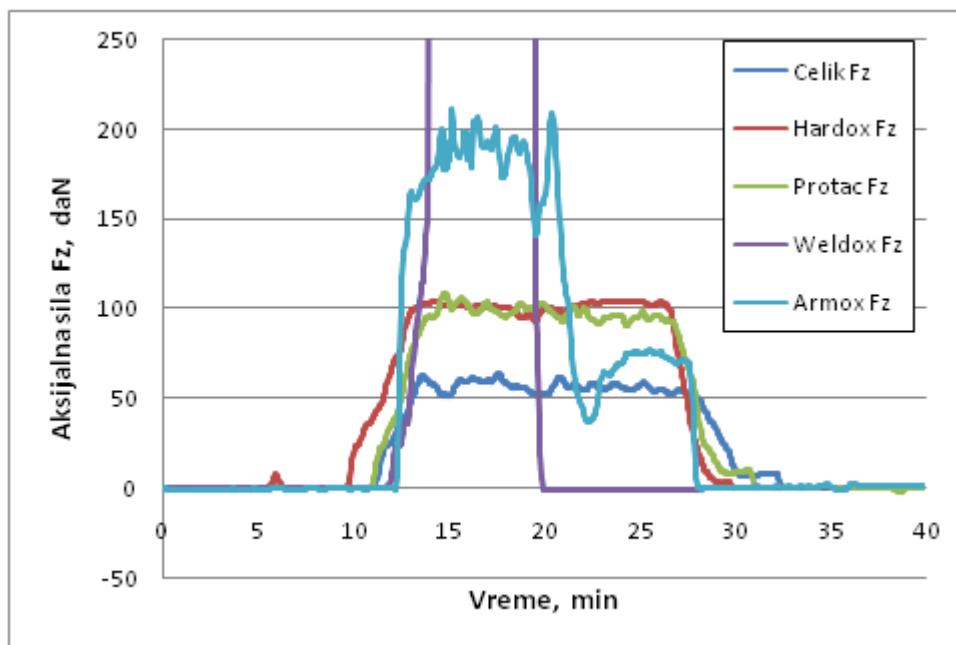
Слика 31. *Алат и динамометар са предметом обраде*



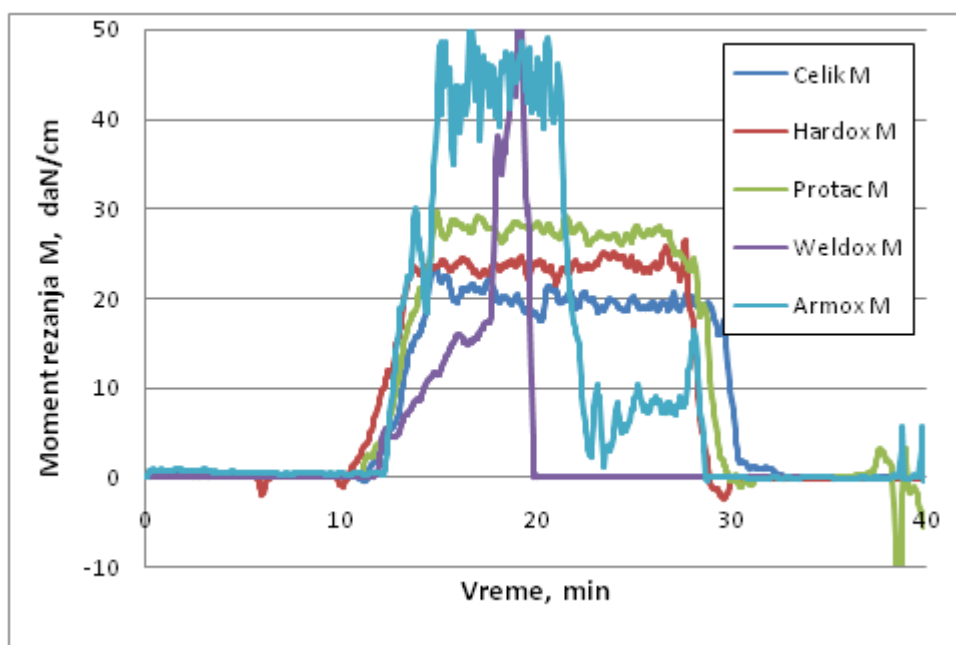
Слика 32. *Пиезо појачивач и рачунар коришћени за мерење отпора резања*

5.2. Резултати мерења

Након завршеног испитивања на машини помоћу програма *Excel* начињен је графички приказ снимљених сигнала аксијалне силе резања и момента резања и израчунате њихове средње вредности, слике 33 и 34.



Слика 33. Дијаграм аксијалне силе резања F_z



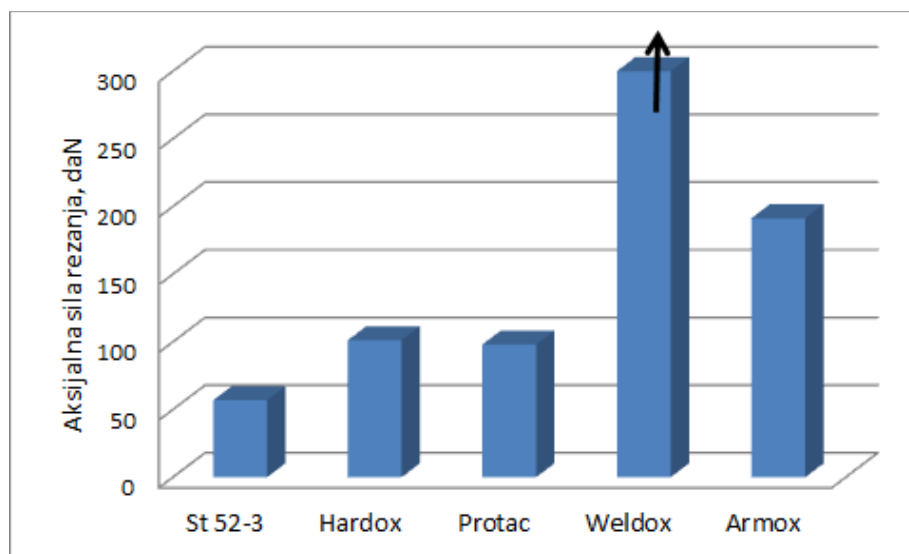
Слика 34. Дијаграм момента резања M

У табели 10 су дате израчунате средње вредности аксијалне силе и момента резања у периоду стабилне обраде бушењем. Са ових дијаграма се може закључити да су

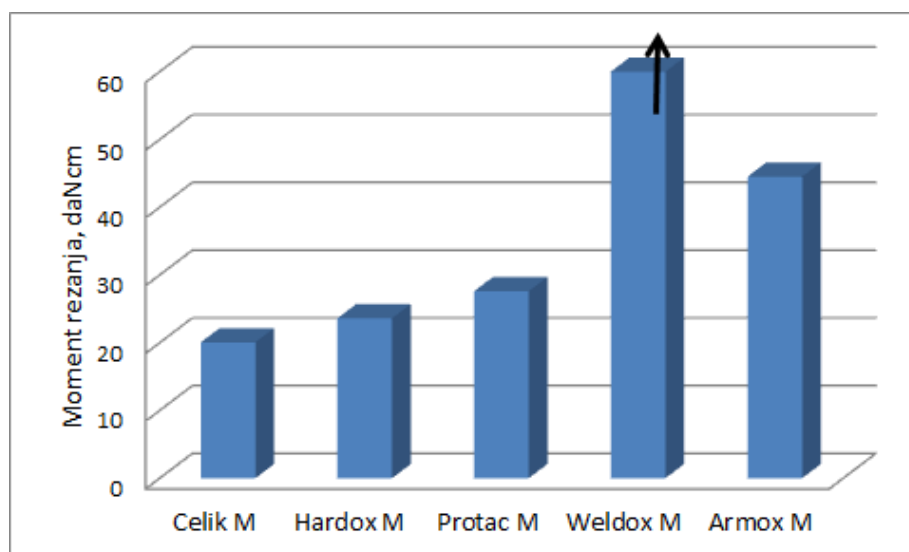
најмање вредности аксијалне силе и момента резања код бушења челика St 52-3. Обрада бушењем није могла да се изводи код Weldom, одмах су се јавиле вибрације и вредности аксијалне силе и момента су веома порасле тако да је обрада заустављена и пре почетка бушења отвора пречника 6 мм. Код обраде Armoх није извршено бушење отвора целом дубином јер је након дубине од 5 мм дошло до повећања вибрација, буке и бушење је заустављено.

Табела 10. Средње вредности аксијалне силе резања и момента резања

	St 52-3	Hardox	Protac	Weldom	Armoх
Fz, daN	56.9	101.2	98.1	-	191.4
M, daNcm	20.05	23.6	27.66	-	44.5



Слика 35. Средње вредности аксијалне силе резања Fz



Слика 36. Средње вредности момента резања M

5.3. Обрадивост материјала

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

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

Где су:

I_i – индекс обрадивости испитаног материјала;

p_i – величина параметра усвојеног за оцену обрадивости испитаног материјала;

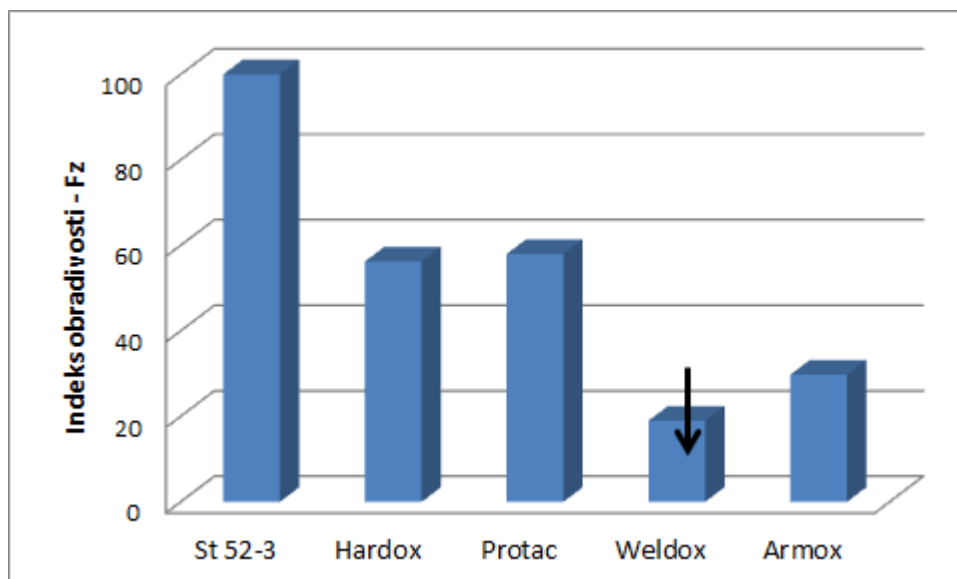
p_r – величина параметра усвојеног за оцену обрадивости референтног материјала;

На основу резултата мерења приказаних у табели 10 израчунати су индекси обрадивости испитиваних материјала према претходном изразу. За референтни материјал је изабран челик St 52-3. У Табелама 11 и 12 и сликама 38 и 39 су дате вредности израчунатих индекса обрадивости са аспекта аксијалне силе и момента резања.

Табела 11. Индекси обрадивости различитих челика са аспекта аксијалне силе резања

Челик	St 52-3	Hardox	Protac	Weldox	Armoх
F_z, daN	56.9	101.2	98.1	-	191.4
I_i	100	56,2	58,0	-	29,7

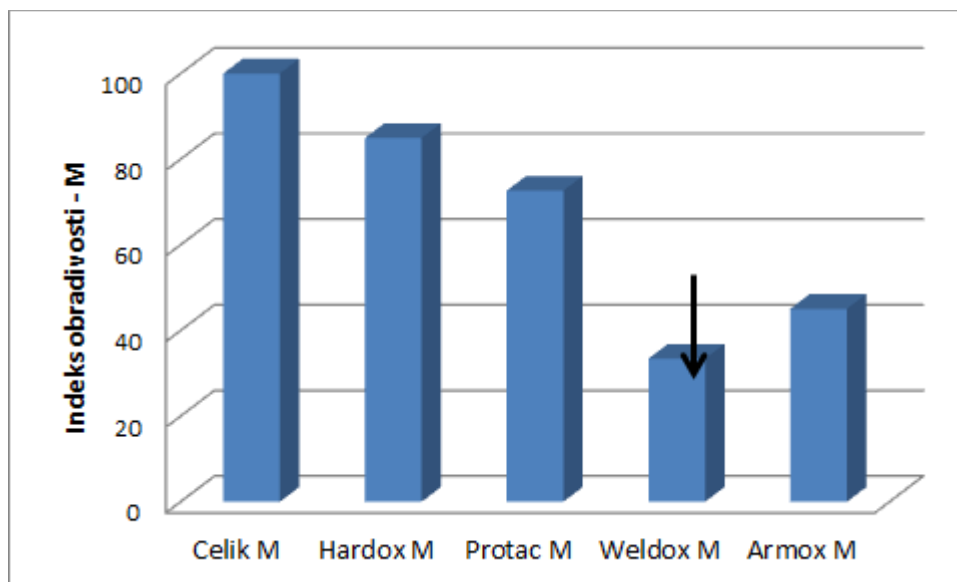
За челик *Weldox* није могуће израчунати индекс обрадивости са аспекта аксијалне силе и момента резања јер за дате услове испитивања нису измерене њихове вредности.



Слика 37. Индекс обрадивости са аспекта аксијалне силе резања F_z

Табела 12. Вредности различитих челика са аспекта момента резања

Челик	St 52-3	Hardox	Protac	Weldox	Armox
M, daNcm	20.05	23.6	27.66	-	44.5
I_i	100	84.9	72.6	-	45.1

**Слика 38.** Индекс обрадивости са аспекта момента резања M

Посматрајући обрадивост са аспекта аксијалне силе резања и момента резања најбољу обрадивост има челик St 52-3, а најмању обрадивост челик Weldox.

6. ЗАКЉУЧАК

Обрадивост материјала представља веома важну карактеристику коју је потребно испитати пре коришћења датог материјала у производњи. Појам обрадивости може се свести на то колики је напор потребан да се одређени материјал обради.

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

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.

Други циљ овог рада је да опише и дефинише обрадивост бушењем и свих операција које под њу спадају, као и обрадивост специјалних челика, који су у овом раду детаљно описани и анализирани.

На основу изведеног експеримента и анализе резултата може се закључити да су најмање вредности аксијалне силе и момента резања код бушења челика St 52-3, а при бради бушењем код Weldoh није могла да се изведе јер су се одмах јавиле вибрације, тј. вредности аксијалне силе и момента су веома порасле тако да обраду није било могуће извести. На основу овога може се закључити да је наведених испитиваних материјала најбоље обрадив конструкциони челик St 52-3, а најтеже челик Weldox.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] http://mf-bl.com/upload/documents/laboratorije/laboratorija%20za%20tehnologiju%20obrade%20rezanjem%20i%20obradne%20sisteme/Sredanovic_OBRADIVOST.pdf, април 2020.
- [2] Mills B., Redford A. H., *Machinability of engineering materials*, University of Salford, UK, 1983, април 2020.
- [3] Глобочки Лакић Г. Обрада метала резањем – теорија, моделирање и симулација, Машински факултет Бања Лука 2010, април 2020.
- [4] Лазић М., Недић Б. Технологија обраде метала резањем, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, април 2020.
- [5] Саша Д. Јовановић, *Обрадивост челика са аспекта топографије обрађене површине глодањем*, Завршни рад, април 2020.
- [6] <https://zir.nsk.hr/islandora/object/vuka:973/preview>, април 2020.
- [7] <https://sr.wikipedia.org/sr-el/Bu%C5%A1enje>, април 2020.
- [8] <https://simapastor.files.wordpress.com/2015/09/01-06-burgije.pdf>, мај 2020.
- [9] https://dlscrib.com/download/busilice_5a2bbdd4e2b6f5fb418c7c8e_pdf, мај 2020.
- [10] <https://vdocuments.mx/alati-za-obradu-otvora.html>, мај 2020.
- [11] <http://automatizacija1.etf.rs/poglavlja/Rezanje%201.htm>, мај 2020.
- [12] <https://sr.wikipedia.org/wiki/%D0%A7%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D0%BA>, мај 2020.
- [13] https://www.simet.unizg.hr/hr/nastava/predavanja/diplomski-sveucilisni-studij-metalurgija/2-godina-diplomskog-studija/specijalni-celici/at_download/file, мај 2020.
- [14] SPEC MATERIJALI, април 2020.
- [15] <http://www.laser-ing.hr/blog/specijalni-celici-svojstva-karakteristike/>, мај 2020.
- [16] https://www.ssab.com/products/brands/armox/armox-500t?accordion=mechanical_properties, август 2020.
- [17] Development of Mathematical Model of Universal Material Machinability, Глобочки Лакић Г., Средановић Б., Недић Б., Чича Ђ. Машински факултет Бања Лука, Машински факултет Крагујевац, август 2020.
- [18] El-Hofy H., *Fundamentals of machining processes*, CRC Press, New York, 2014, април 2020.