

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**

Љубомир Д. Стевић

Обрадивост бушењем полимерних материјала

Завршни рад

Крагујевац, 2020.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Број индекса: 77/2017

Љубомир Д. Стевић

Обрадивост бушењем полимерних материјала

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **др Богдан Недић-ментор**
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Основне студије: **Машинско инжењерство**

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

Име и презиме: **Љубомир Стевић**

Број индекса: **77/2017**

ПРИЈАВА ЗАВРШНОГ РАДА

Тема рада: **Обрадивост бушењем полимерних материјала**

Задатак: У оквиру завршног рада потребно је да кандидат изврши прикупљање и систематизацију података о полимерним материјалима, технологијама обраде бушењем и начинима дефинисања обрадивости материјала. Уколико постоје услови извршити експериментална испитивања обрадивости бушењем различитих полимерних материјала, при чему мерити отпор и момент резања, тачност обраде, квалитет обрађене површине отвора. У противном извршити прикупљање и анализу експерименталних испитивањима обрадивости бушењем полимерних композита.

Завршни рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања,
2. Полимерни материјали,
3. Обрада бушењем,
4. Дефинисање обрадивости бушењем,
5. Експериментална испитивања (Преглед и анализа радова из области обрадивости бушењем полимерних композита),
6. Закључци,
7. Литература.

Ментор:

Крагујевац, 12.03.2020.

Др Богдан Недић, редовни професор

Резиме рада:

У раду су приказане основне дефиниције обрадивости полимерних материјала и дате информације о методама испитивања и одређивања обрадивости бушењем. Дате основне информације о најчешће коришћеним полимерима и полимерним композитима. У посебном делу рада је дат преглед и анализа радова из области обрадивости бушењем полимерних композита.

Кључне речи: обрадивост бушењем, полимерни материјали

Summary of work:

The paper presents the basic definitions of workability of polymeric materials and provides information on methods of testing and determining workability by drilling. Basic information on the most commonly used polymers and polymer composites is given. In a special part of the paper, an overview and analysis of works in the field of workability by drilling polymer composites is given.

Key words: drilling workability, polymeric materials

САДРЖАЈ

1. Увод	1
2. Полимерни материјали	3
2.1 Структура полимера	6
2.1.1. Молекуларна грађа	6
2.1.2. Процес полимеризације	7
2.1.3. Уређеност структуре	8
2.2 Својства полимера	9
2.2.1 Механичка својства полимера	10
2.2.2 Топлотна својства полимера	17
2.2.2.1. Пластомери	18
2.2.2.2 Дуромери	23
2.2.2.3 Еластомери	23
2.2.2.4 Композитни материјали	24
2.2.3 Триболошка својства полимера	28
2.2.4 Хемијска постојаност полимера	28
2.2.5 Електрична и остала својства полимера	29
3. Обрада бушењем	30
3.1 Геометрија алата за бушење	31
3.2 Развртање	32
3.3 Нарезивање и урезивање навоја	34
3.4 Деламинација	34
4. Обрадивост материјала	37
4.1 Дефинисање обрадивости	37
4.2 Критеријуми обрадивости	38
4.3 Методе испитивања обрадивости	41
4.3.1 Компаративне методе испитивања обрадивости	42
4.3.2 Комплексне методе испитивања обрадивости	43
4.4 Одређивање универзалне обрадивости	44
4.5 Индекс обрадивости	47
4.6 Испитивање физичких својства предмета обраде	48
4.7 Квалитет обрађене површине	49

5. Преглед и анализа радова из области обрадивости бушењем полимерних композита...	52
6. Закључак	63
Литература	64

1. Увод

Глобални и брзи развој производа и индустрије подстиче развој нових врста процеса, нових радних материјала, нових алата за резање, нове алатне машине, хлађење и подмазивање, течности и принципи испоруке у зону резања. Побољшање постојеће и развој нове технологије кроз експериментална истраживања су стални задаци за истраживачке центре. Истраге и експериментална истраживања у области резања метала су пресудни задаци у развоју Производног машинства. Често истраживање резања, процеси се заснивају на дефинисању обрадивости материјала. Циљ испитивања обрадивости је проналажење оптималних технолошки и геометријских услова на обради и ефикасно управљање резним процесом. Такође, са знањем о обрадивости материјала, основа је за пројектовање обрадних система.

Обрадивост је такође врло сложена категорија размотрена са неколико аспеката различитих услова резања. Обрадивост зависи од већег броја утицајних фактора као што су механички, структурни и топлотне особине материјала обратка, материјала алата и геометрија, својства хлађења и подмазивања, динамичке карактеристике система, обрада, услови и др. Циљ испитивања обрадивости је проналажење оптималног технолошког и геометријског услова обраде и ефикасно управљање процеса резања.

Обрадивост је дефинисана основним скупом функција, која укључују: животни век алата и триболошке карактеристике процеса, сила резања, квалитет површине, облика струготине и температуре резања. Додатна функција је продуктивност обраде која је изражена кроз обим уклоњеног чипа по јединици времена. Ова функција је директно повезана са резањем (брзина додавања, брзина резања и дубина реза). Општа дефиниција обрадивости је следећа и може узимати: највеће вредности обрадивости има материјал, до чије обраде долази најмања сила резања, хабање алата и површина храпавост.

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.

Под појмом обрадивости подразумева се скуп свих карактеристика обрађиваног материјала, алата, алатних машина 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.

Под појмом апсолутне обрадивости материјала подразумева се скуп аналитичких израза који описују пропратне појаве у зони резања испитиваног материјала. Под појмом релативне обрадивости подразумева се поређење стања обраде неког материјала с познатим / еталонским / материјалом.

Обрадивост материјала је веома важна у индустрији прераде метала резањем. Од ње зависи брзина резања, трошкови потрошње алата, тражени квалитет обрађених површина и др. Уопштено се обрадивост материјала може дефинисати као његова способност да се може обрађивати скидањем материјала.

О обрадивости се може говорити и као о карактеристици обратка у погледу могућности претварања тог материјала у струготину или о резној способности као карактеристика алата у погледу његових временских издржљивости при обради резањем, али и могућности извођења завршних обрада као последице заједничког деловања низа утицаја на остварену микрогеометрију и макрогеометрију површине.

Критеријуми вредновања обрадивости у појединим случајевима су различити, тако да се за различите материјале могу добити потпуно различите оцене према појединим критеријумима. Често се дешава да су силе резања код једног материјала мање него код другог, а да је постојаност алата већа и сл.

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 обрадивости полимерних материјала.

У другом поглављу рада приказано је уопштено о полимерима, грађа, структура, својства полимера, као и подела полимера.

У трећем поглављу рада је описана обрада бушења као и понашање полимерних материјала и карактеристике при бушењу.

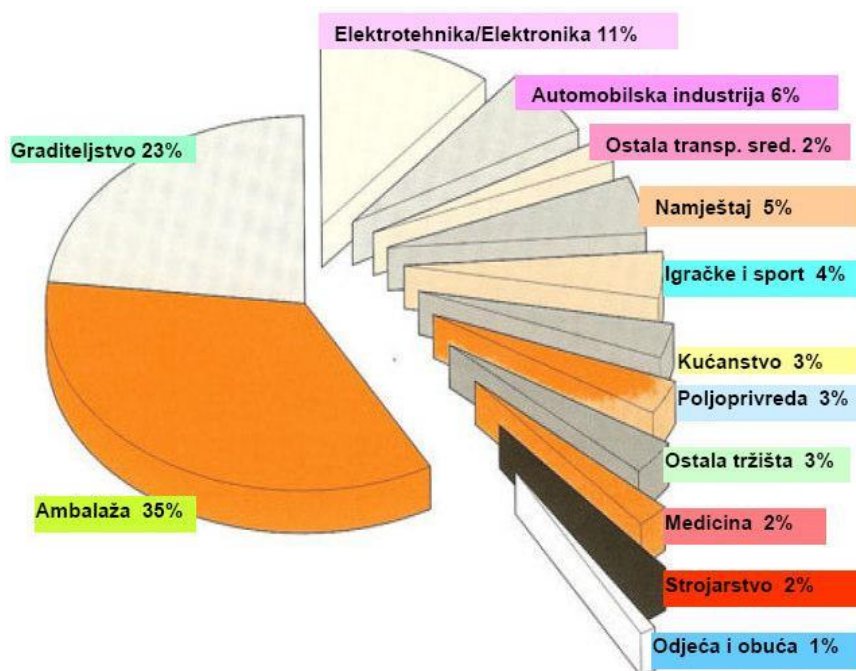
У четвртом поглављу је представљена дефиниција, као и начини одређивања обрадивости и методе испитивања, утицајни фактори и критеријуми.

У петом поглављу рада су анализирана експериментална испитивања обраде бушењем полимерних композита.

На крају рада дати су закључци као и литература које је употребљена у раду.

2. Полимерни материјали

Полимерне материјале човек користи од својих најранијих почетака, а од њих је правио алате, оруђа и оружје како би олакшавао своје свакодневне активности. То су били природни полимери, односно биополимери, попут дрвета, природне гуме, смола и неких животињских и биљних влакана. Развој полимерних материјала током историје био је значајно ограничен непознавањем њиховог макромолекуларног састава и тек 1920. године започело је систематско проучавање полимера, које траје и данас. Средином 20. века употреба нафте као сировине у односу на претходни угаљ и фракција алкана из које су почели да се добијају полиетилен, полипропилен и поливинил-хлорид довели су до процвата индустрије синтетичких полимерних материјала. У периоду од 1952. до 2004. производња полимера порасла је са милион тона годишње на преко 260 милиона тона, што је пораст који није доживео ни један други материјал у историји. Данас је полимерна индустрија већа од индустрије алуминијума, бакра и челика заједно, а полимерни материјали се користе у свим гранама људске делатности, посебно у техничким наукама што је приказано на слици 2.1 [1].



. Слика 2.1. Подручја примене полимерних материјала [1]

Једно од највећих подручја примене полимерних материјала је у електротехници и електроници. Упркос чињеници да полимере највише карактеришу изолациона својства, могу имати улогу структурних компоненти, па чак и проводних материјала, због чега све више замењују метале и керамику. Полимерни материјали се користе због својих добрих својства у односу на неке друге материјале приказаних у табели 2.1.

Предности	Недостаци
Мала густина	Лака запаљивост
Добро пригушење вибрација	Подложност старењу
Добра хемијска постојаност	Утицај прераде на својства
Добра отпорност на хабање	Зависност својста од спољних утицаја
Мали фактор трења	Мали модул еластичности
Лако обликовање	Неисплатива израда мањег броја производа

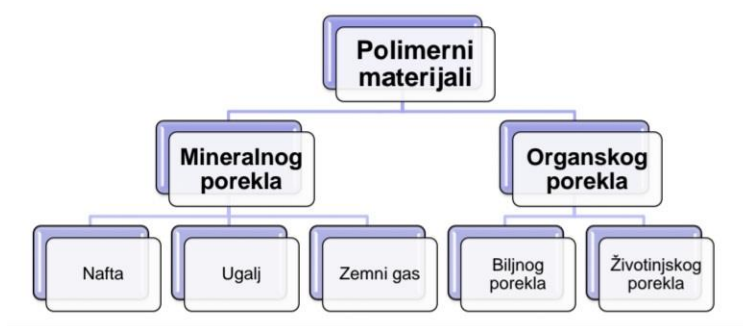
Табела 2.1. Предности и недостаци полимера у односу на метале и керамике [1]

Њихова електрична и топлотна изолациона својства, мала густина и велика чврстоћа, отпорност на хабање и ценовна конкурентност су предности које доводе до замене других материјала полимерима. У многобројним применама долази и до мешања полимера са разним адитивима, арматурама чија је сврха побољшања неког од својства полимера.

Полазне сировине за производњу полимера могу бити **минералног** и **органског** порекла.

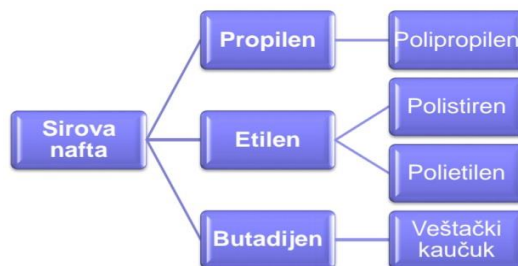
Минералне сировине су нафта, угаљ и земни гас, од којих се најпре израђују основна хемијска једињења за даљу прераду. Ова се једињења различитим процесима прераде у полупроизводе који могу бити у облику гранула, тегности, смола, таблета. Даљи процеси прераде ових полупроизвода у финалне производе (ливењем или пресовањем) утичу не само на промену облика и структуре, већ такође и на промену хемијских веза које чине основу материје.

Органске сировине за израду пластика могу бити биљног и животињског порекла [2].



Слика 2.2. Подела полимерних материјала према пореклу [2]

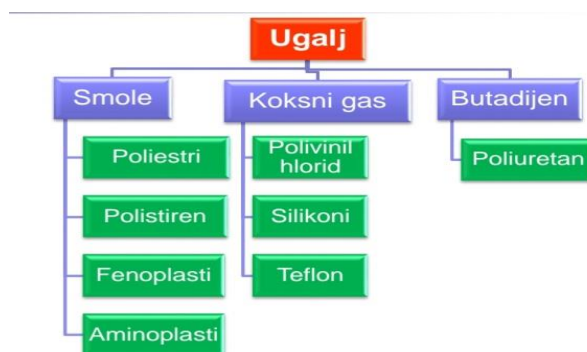
Полупроизводи и финални производи добијају се из фракција сирове нафте високе температуре кључања (око 300°C), тако што се те фракције загревају под високим притиском и при високој температури, те настаје распад великих молекула (макромолекула) на мање погодне за индустрију вештачких производа. Врсте полупроизвода и финалних производа који се добијају из сирове нафте дати су на следећој слици 2.3.



Слика 2.3. Добијање полупроизвода и готових производа из нафте [2]

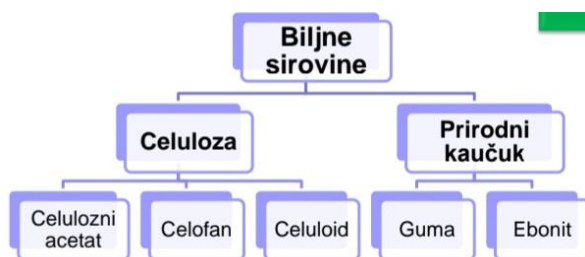
Земни гас се прерађује непотпуним сагоревањем или термичким разлагањем (пиролизом при око 700 степени).

Из угља добијају се разна хемијска једињења путем такозване суве дестилације (коксовања). Она се заснивају на загревању угља без присуства ваздуха при температури 1100- 1300 степени. У том процесу настају гасни производи, течни производи (тзв. смоле) и чврсти производи (кокс).



Слика 2.4. Добијање производа из угља[2]

Поред наведених минералних сировина, у индустрији полимерних материја употребљавају се биљне и животињске сировине од којих се добијају финални производи приказани на слици 2.5.



Слика 2.5. Добијање производа из биљних сировина [2]

Хемијским и физичким процесима као што су оксидација, филтрирање, центрифугирање, дестилација, из основних сировина добијају се органске хемикалије-мономери, као што су на пример етилен, винилхлорид и слично.

Полимеризација се састоји од низа хемијских процеса синтезе мономера. Постоји више начина полимеризације. Тај сложен процес може почети једино када се на основној маси дода иницијатор- хемикалија која иницира процес синтезе.

При процесима прераде, најчешће на одређеној температури, мења се надмолекуларна структура, а у одређеним случајевима и структура макромолекула [1].

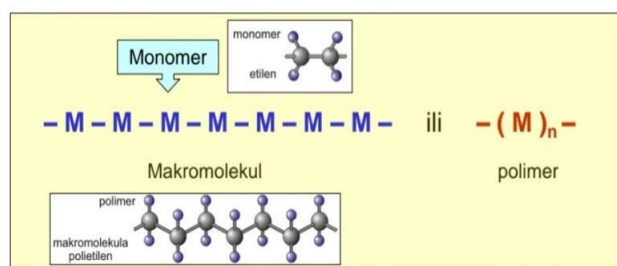


Слика 2.6. Технолошки процес производње полимера [2]

2.1 Структура полимера

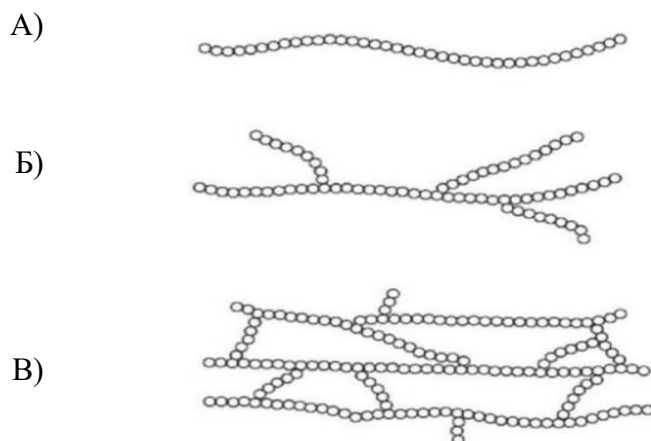
2.1.1. Молекуларна грађа

Реч полимер је сложеница грчког порекла од речи poly и meros које престављају „много делова“. Полимери су макромолекули састављени од неколико стотина до неколико хиљада структурних јединица које се називају мономери. Мономери, хемијски спојеви мале молекуларне масе и једноставне грађе, улазе у процес полимеризације у којем се повезују ковалентном везом између заједничког електронског пара и тако стварају полимере. Вештачке (синтетичке) материје које имају аморфну макромолекуларну структуру чине велику групу конструкционих материјала који се једном речју називају полимерним материјалима.



Слика 2.7. Грађа полимера [2]

Макромолекули који граде полимере могу бити линеарног, разгранатог и умреженог типа.



Слика 2.8. а) линеарни, б)гранати, в) умрежени тип макромолекула [1]

Линеарни макромолекули се састоје од мономера у једном ланцу који су повезани ковалентном везом, док су ланци међусобно повезани Van der Waalsovим везама.

Код гранатих молекула долази до местимичног бочног одвајања ланаца ковалентно повезаних са основним ланцем.

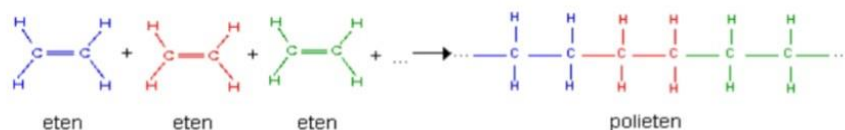
Просторно умрежене полимерне структуре формирају мономерни ланци са три везна угљеникова атома повезаним ковалентним везама.

2.1.2. Процес полимеризације

Хемијска реакција у којој од мономера настају полимери се према механизму реакције може поделити на ланчану и постепену.

Ланчане реакције се састоје од минимално три дела: иницијације, пропагације и терминације. Иницијацијом реакције у однос ступају мономер и активне честице. Током пропагације долази до адиције великог броја мономера на активне центре и стварања дугих ланаца, те се услед пораста концентracије активних честица процес сходно томе терминаира, односно завршава.

Постепене реакције полимеризације се дуготрајније, те се одвијају при вишим температурама, најчешће преко 200 степени. Спајање мономера доводи до постепеног настанка димера, тримера, тетрамера итд. Односно процес траје све до настанка макромолекула полимера.



Слика 2.9. Процес у којем одређен број молекула етена ствара макромолекуле полиетилена [2]

Из процеса полимеризације излази производ макромолекула полимеризат, који преставља основни део полимера. Полимеризат се у правилу све мање користи као самостални материјал. Применом различитих хемијско-физичких поступака на тај материјал побољшавају се својства, односно мешају се са разним додацима како би се на крају процеса добио технички употребљив производ и уклони могући недостаци. Постоје разни типови додатака, а њихова примена зависи о својству који се жели поправити или недостацима којесе желе уклонити.



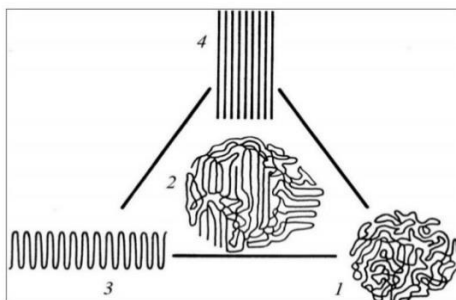
Слика 2.10. Преглед и примена додатака полимерима [2]

Неке од најчешћих сврха додатака су:

- Побољшања својства прерадивости, за што се највише користе мазива, стабилизатори топлоте, пунила и сепаратори
- Мењање карактеристика површине полимера, за шта се додају спољња мазива, додаци за уклањање неравнина, регулатори адхезивности и антистатичи
- Мењање маханичких својства омекшивача, пунила, лепкова и разинх адитива за јачање и повећање жилавости
- Промена оптичких својства, за шта се користи разни пигменти и боје
- Очување основних својства, уз помоћ антиоксиданса, биоцида, УВ стабилизатора и антистатика
- Остале примене, попут парфема, дезадоранса, смањивања запаљивости и слично.

2.1.3. Уређеност структуре

Полимерна макромолекуларна структура може имати различите врсте уређености. Разликујемо аморфну и кристалну структуру. Аморфни полимери имају неравномерно распоређене молекуле, те упркос одсуству кристалног тродимензионалног уређења имају одређени степен макромолекуларске организације на нижим нивоима. Кристалну структуру имају полимери са правилним тродимензионалним молекулским распоредом који се понавља. То је уређенији састав од аморфних полимера, а предуслов за његов настанак је постојање конформација које одликује геометријска правилност. Полимери са кристалном структуром се још зову и кристалима [1].



Слика 2.11. Структуре полимера: 1. аморфна, 2. аморфно-кристална, 3. савијена кристална, 4. издужена кристална [1]

Однос кристалне и аморфне фазе те њихова структура одређује главнину својства полимера. Што је већи удео кристалне фазе, већа су тврдоћа, чврстоћа и густина, а већи удео аморфне структуре доводи до повећања еластичних својстава и лакше прераде.

2.2 Својства полимера

Својства се могу дефинисати као промене стања, реакције или другачије појаве у материјалу које су изазване деловањем разноврсних унутрашњих и спољашњих фактора. Уз својства, битна ставка је и појам одлика. То су сва битна и бројчано мерљива својства која се могу нумерички исказати, а одређена су нормираним поступцима испитивања. Полимере је могуће описати са великим бројем својстава и одлика, а најважнија подела је са обзиром на функцију, односно употребна својства у чијем се оквиру налазе следеће целине: механичка, електрична, термичка, триболошка и својства постојаности [3].

Функцијска (употребна) својства	Назив својства
МЕХАНИЧКА	Чврстоћа, истегљивост, модул еластичности
ТРИБОЛОШКА	Фактор трења, отпорност на хабање
ТЕРМИЧКА	Топлотна проводност, топлотна продорност, топлотна растегљивост, температурна омекшања, постојаност облика
ЕЛЕКТРИЧНА	Електрична проводност, ел. отпор, диелектрична својства
ПОСТОЈАНОСТ	Хемијска постојаност
ОСТАЛА СВОЈСТВА	Густина, индекс лома, удео додатака, пропусност светлости

Табела 2.2. Својства полимера [2]

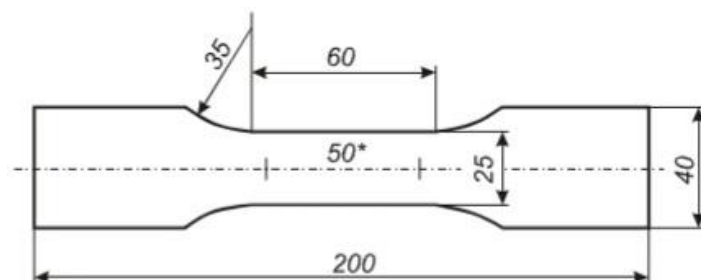
Механичка и термичка својства треба посебно издвојити због њихове важности при описивању полимерних материјала.

2.2.1 Механичка својства полимера

Механичка својства описују како ће се материјал понашати кад се на њега примени одређена сила, односно механичко оптерећење. Механичка својства полимера се због њиховог високо-еластичних својстава увелико разликују од метала и кермике. Како би задржали своју функцију, употребљивост и облик полимери се морају носити са механичким оптерећењем на прикладан начин. Најважнија механичка својства која се испитују код полимера су:

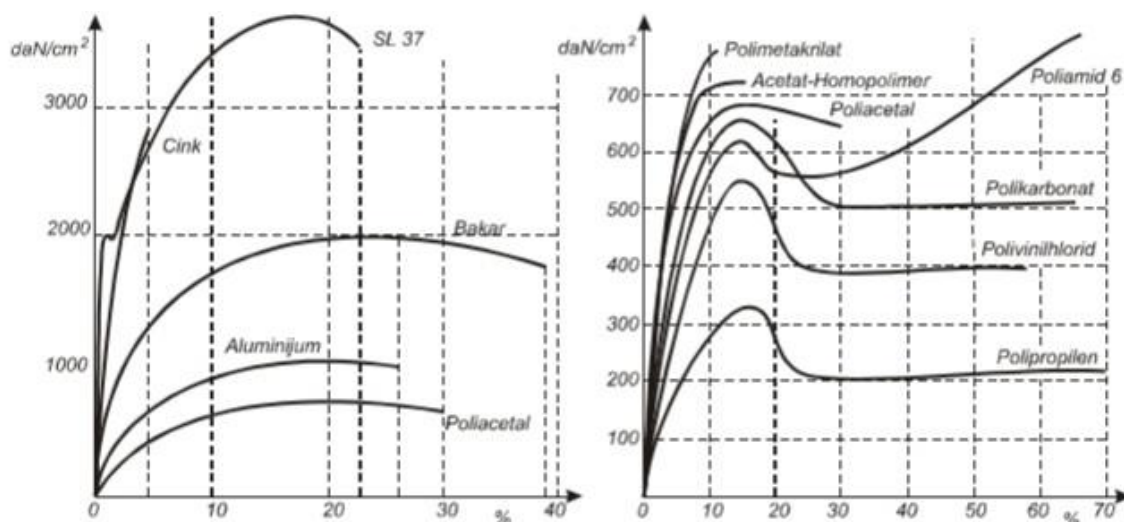
Чврстоћа – најчешће се проучава испитивањем статичке вучне чврстоће. Материјал се испитује помоћу кидалице па се одређује његова отпорност да се унутрашњим силама опире деловању спољашњих оптерећења. Очекивано, у дијаграму „напрезање-истезање“ савитљиви еластомери показују највеће истезање за једнаку вредност напрезања, док највећу прекидну чврстоћу имају тврди и крути пластомери.

Поступак при испитивању затесањем своди се на познат принцип затезања одговарајуће епрувете, слика 2.12 и израчунавање одређених величина.



Слика 2.12. Епрувета за испитивање термопластичних маса [4]

Основни дијаграми при испитивању затезањем, дијаграм кидана, из кога се види положај силе истезања за обичан челик, бакар, алауминијум и пластичну масу (слика 2.13), односно сила затезања за различите пластичне масе [4].



Слика 2.13. Дијаграми кидана [4]

Затезна чврстоћа- то је максимални напон при прекиду испитиване епрувете, а преставља количник највеће силе кидања F и попречног пресека епрувете A_0 пре кидања, односно:

$$R_m = \frac{F}{A_0}, \text{ daN/cm}^2$$

Затезна чврстоћа пластичних маса дописана је стандардима: JUS G.S2.612, DIN 53454, GOST 4651-63 и др.

Издужење- то је однос између прираста почетне дужине епрувете у односу на почетну дужину, сведено на проценте, односно:

$$A = \frac{l_1 - l_0}{l_0} * 100, \%$$

У наведеном изразу l_1 је дужина епрувете у тренутку лома а l_0 почетна дужина епрувете. Поред наведених основних својства, при испитивању затезањем, може се мерењем малих деформација одредити и модул еластичности E .

Испитивања истискивањем пластичних маса омогућује одређивање притисне чврстоће и скраћења.

Чврстоћа на притисак- је највећи напон настао у тренутку лома епрувете :

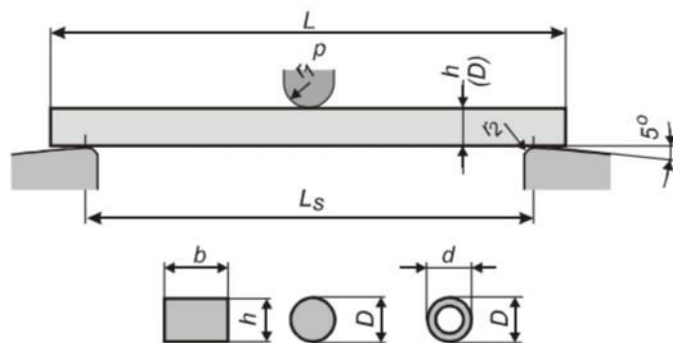
$$R_c = \frac{F}{A_0}, \text{ daN/cm}^2$$

Скраћење- прествља количник смањења радне дужине епрувете у односу на почетну:

$$A_c = \frac{l_1 - l_0}{l_0} * 100, \%$$

У наведеном изразу l_1 је мерна дужина епрувете у тренутку лома а l_0 почетна мерна дужина епрувете. Испитивање притискивањем пластичних маса дефинисано је стандардима JUS G.S2.613, DIN 53454, GOST 4651-63 и др.

Испитивање савијањем се изводи савијањем епрувете у три тачке, слика 2.14, према стандардима: JUS G.S2.614, DIN 53452, GOST 4648-63 и др.



Слика 2.14. Испитивање савијањем [4]

Савојна чврстоћа. Савојна чврстоћа је највећи напон настао у тренутку лома савијањем и представља количник момента савијања M и отпорног момента пресека W , изражава се према изразу:

$$R_b = \frac{M}{W}, \text{ daN/ cm}^2$$

У току испитивања савијањем може доћи до лома епрувете при максималној сили [4].

Модул еластичности представља крутост материјала и зависи од времена оптерећења те опада са порастом температуре. Највеће модуле еластичности имају ојачани аморфни и кристални пластомери, а најмање еластомери [4].

Скуп полимерних материјала	Модул еластичности , Мра
ПЛАСТОМЕРИ - аморфни	2100...3500
ПЛАСТОМЕРИ - кристални	150...3200
ЕЛАСТОМЕРИ	50...150
ДУРОМЕРИ	5000...12000

Табела 2.3. Модули еластичности полимера [4]

Жилавост. Жилавост материјала је способност материјала да разгради напрезања помоћу пластичне деформације и на тај начин смањи могућност кртог лома. Престављена је површином испод дијаграма „напрезање и истезање“. Највећу жилавост такође имају еластомери и неки пластомери.

Постоје три поступка за одређивање осетљивост крутих пластичних маса, термопластичних и термоочвршћавајући, на лом при удару, а то су:

- Метода Šarpi, када се примењују епрувете са зарезом или без њега,
- Метода Izod, када се примењују епрувете са зарезом
- Метода Dinstat, за смањене епрувете са зарезом

Резултати испитивања по наведеним методама се не могу поредити.

Шарпијева метода

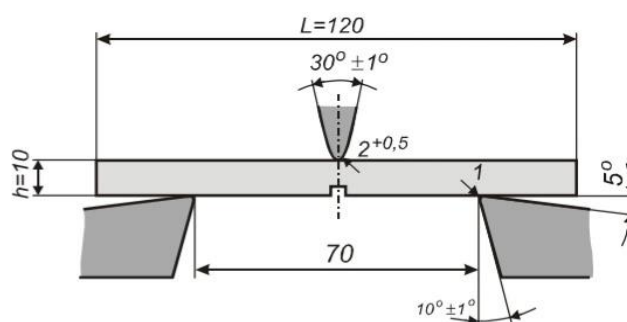
Ударна жилавост по Шарпију, која се најчешће користи при испитивању, изводи се на епруветама са или без зареза , према тебели 2.4.

Врста епрувете	Дужина, mm	Ширина, mm	Дебљина- висина, mm
Нормална	120	15	10
Смањена	50	6	4

Табела 2.4. Димензије епрувета за испитивање ударне жилавости према Шарпи методи [4]

Епрувете које имају зарез исти је ширине 2 mm, са радијусом заобљења у дну зареза 0,2 mm за нормалне епрувете односно 0,1 mm за смањене епрувете.

Шема оптерећења по Шарпи методи дата је на слици 2.15.



Слика 2.15. Шема оптерећења по Шарпију за нормалне епрувете [4]

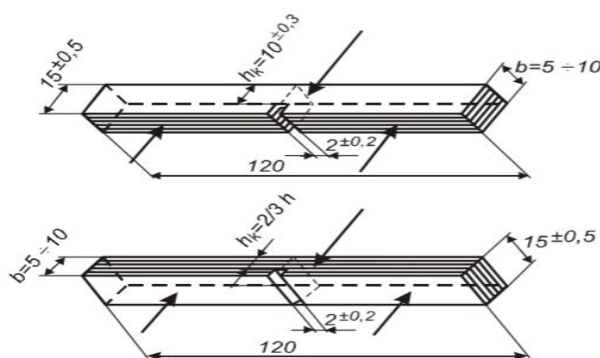
До одговарајуће дебљине епрувета долази сеслагањем више слојева пластичне масе, а сам зарез се изређује према слици 2.16.

Ударна жилавост према Шарпију утврђује се на основу израза:

а) За епрувету без зареза
$$a_n = \frac{A_n}{b h}$$

б) За епрувету са зарезом
$$a_k = \frac{A_k}{b h_k}$$

У наведеним једначинама A_n и A_k су утрошене енергије удара, b -ширина епрувете, а h и h_k је висина епрувете. Симбол у индексу n означава рад са епруветама без зареза, а индекс k рад са епруветама са зарезом.



Слика 2.16. Слагање слојева пластичне масе за сложене епрувете[4]

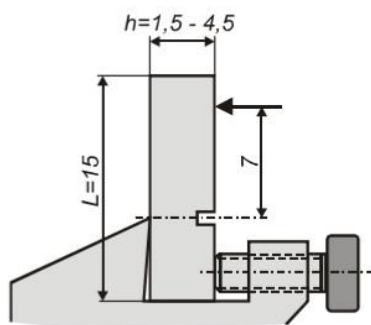
Изод метода

Метода испитивања ударне жилавости по Изоду, састоји се из удара маља клатна на висини 22 од слободно укљештене епрувете.

Резултати испитивања по методи Изод је утрошена енергија удар по јединици површине епрувете испод зареза, у kJ/m^2 .

Дистант метода

Дистант проба је метода испитивања ударне жилавости на малим епруветама са заезом, слика 2.17.



Слика 2.17. Шема испитивања Дистант епрувете са зарезом [4]

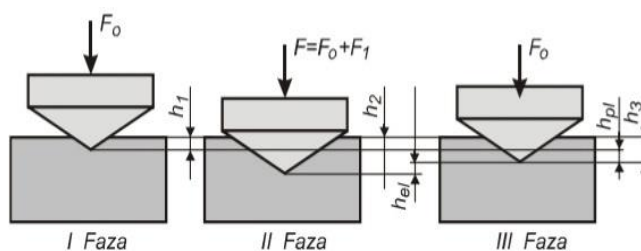
Резултати испитивања ударне жилавости по Дистанту је утрошена енергија удара по јединици површине епрувете испод зареза, у kJ/m^2 .

Тврдоћа. Тврдоћа односно отпорност материјала према продирању неког страног тела кроз његову структуру, односно површину. Најчешће методе испитивања су утискивање тврде куглице кроз површину материјала и Шхоерове методе, а највећу тврдоћу углавном показују пластомери и дуромери.

Постоје 4 методе испитивања тврдоће, а то су: Роквел, Бринел, Викерс и метода по Шору.

Испитивања по методи Роквел

Мерило тврдоће по Роквелу, за разлику од других метода, је дубина отиска, изражава се Роквел јединицама, а шема испитивања је дата на слици 2.18. Ова испитивања су дефинисана стандарима: JUS C.A4.031, ISO 2029, ASTM 785, EURONORM 4-55 и др.



Слика 2.18. Поступак испитивања по Роквел методи [4]

Како је поступак испитивања веома упрошћен те је ова метода најраспрострањенија. Подесним избором утискивача могуће је мерење меких и веома тврдых материјала. Само испитивање се одвија у три фазе, и то:

- У првој фази се изводи нашоње предоптерећење које има за циљ да отклони утицај неравнина по површини испитиваног предмета до дубине h_1 .

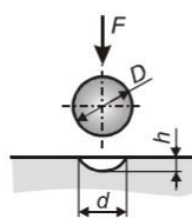
- У другој фази наноси се укупно оптерећење на утискивач услед чега се он продире до дубине h_2 , која у себи садржи изазване пластичне и еластичне деформације односно да је $h_2 = h_p + h_E$.
- У трећој фази изводи се растерећење, односно оптерећење на утискивач се смањује на предоптерећење, услед чега настају еластичне деформације како испитиваног материјала тако и самог уређаја за испитивање, а дубина утискивања се смањује на h_3 . Мерило тврдоће је дубина утискивања, сведена на Роквел јединице, при чему дубина од 0.002 одговара једној Роквел јединици, према изразу:

$$\varepsilon = \frac{h_3 - h_1}{0,002}$$

Методе испитивања пластичних маса су: HRL, HRM и HRR, при чему се користе куглице пречника 1/8 и 1/4 инча.

Бринел метода

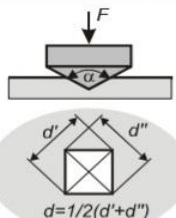
Мерење тврдоће по Бринел методи је количник силе која делује на утискивач облика челичне куглице и површине калоте отиска који је оставио утискивач на испитиваној површини, табела 2.5. Изражава се бездимензионим бројем, а испитивања се спровode према стандардима: JUS C.A4.031, DIN 50251, GOST 4670-62 и др. Примењена сила утискивања за дату куглицу мора задовољити услов $0,25D < d < 0,5$.

	Oznaka	Naziv	Jedinica
	D	Prečnik kuglice	mm
	F	Sila utiskivanja	N
	d	Prečnik otiska	mm
HB	Tvrdoća po Brinelu $HB = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$		HB

Табела 2.5. Тврдоћа по Бринелу [4]

Викерс метода

Мерило тврдоће по методи Викерс је количник силе утискивања и површине отиска кога оставља дијамантска четворострана порапида са углом од 136° , табела 2.6.

	Oznaka	Naziv	Jedinica
	α	Ugao prizme, 136°	°
	F	Sila utiskivanja	N
	d	Dijagonala otiska (srednja)	mm
HV	Tvrdoća po Vickersu $HV = \frac{0,102 \cdot 1,854 \cdot F}{d^2} = 0,189 \frac{F}{d^2}$		HV

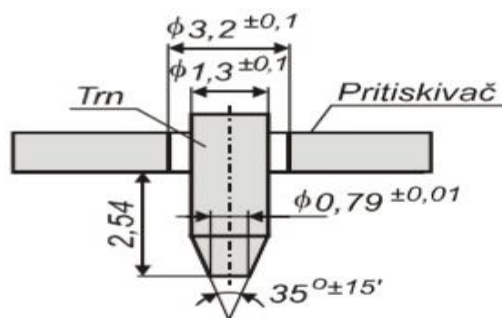
Табела 2.6. Тврдоћа по Викерсу [4]

Испитивање тврдоће по методи Шор

Мерило тврдоће довољно пластифицираних маса је дубина продирања утискивача одређеног облика и димензија, слика 2.19 под дејством одређеног оптерећења. Епрувета на којој се изводи испитивање је облика плоча чија најмања дебљина је 8 mm, са равним, глатким, и паралелним површинама. Ширина епрувете не би смела бити мања од 16 mm.

У овој фази предоптерећења игла из апарата, и ако је оптерећење за 0,56 N, вири за 2,54 mm, а казаљка је у нултом положају.

У другој фази наноси се главно оптерећење које износи 8,22 N, када је казаљка на 100 јединица, а врх игле је повратан са равнином притискивача.

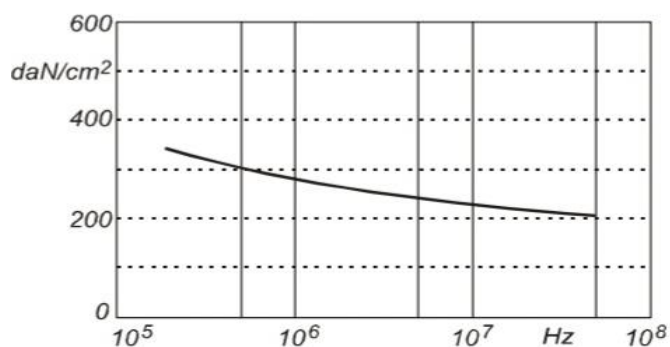


Слика 2.19. Шема уређаја за испитивање тврдоће по Шору [4]

Очитавање вредности тврдоће по методи Шор, која се креће од 0 до 100 јединица, се изводи после 15 секунди од тренутка наношења силе.

Испитивање динамичке чврстоће

Испитивање динамичке тврдоће пластичних маса, слично као и испитивање металних легура, изводи се на пулзаторима на којима се могу мењати како средњи тако и амплитудни напони. Резултат испитивања низа епрувета са примењеним различитим средњим или амплитудним напонима је Велерова крива, слика 2.20.



Слика 2.20. Велерова крива за пластичну масу типа Хостаформ [4]

Гранични број промена за пластичне масе је 10^7 циклуса.

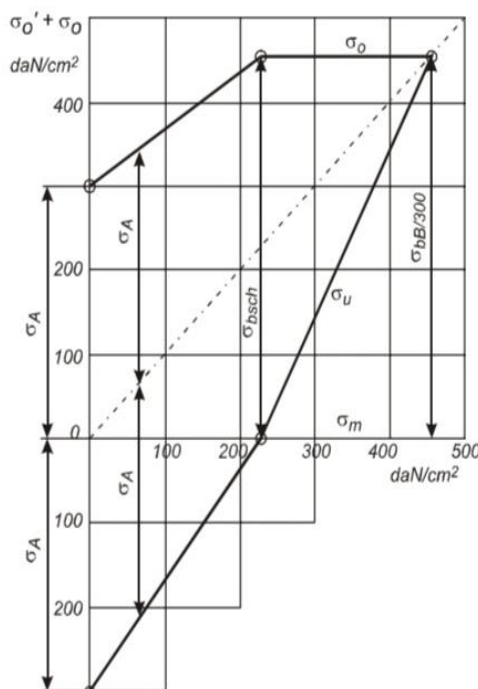
На основу резултата низ Велерових криви конструише се Смитов дијаграм, приказан на слици 2.21.

Испитивање трењем

Испитивање трењем је дефинисаном стандардима: JUS G.S2.128, DIN 53754, Tabel-CS-Rad (SAD), метода DIPON и др.

Висока тврдоћа и ниски коефицијент трења доприносе да се конструктивни елементи могу израђивати од пластичних маса, када неки пут посебно није ни потребно подмазивати.

Јединица мере је губитак материјала у процесу трења плочице од пластичне масе у односу на тарујући елемент од различитих материјала.



Слика 2.21. Изглед Смитовог дијаграма за пластичну масу Хостаформ С9020, за радну температуру **23°C** и гранични број циклуса **10⁷** [4]

2.2.2 Топлотна својства полимера

Међу топлотним својствима посебно се истичу:

- Топлотна растезљивост α , дефинисана као промена дужине у функцији температуре при сталном притиску.

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \left(\frac{\Delta l}{\Delta T} \right) p$$

где је l_0 даљина при температури T_0 .

- Топлотно ширење γ , које се односи на мењање специфичне запремине (v) са температуром (T) код константног притиска (p).

$$\gamma = \frac{1}{v_0} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$$

- Специфичност полимера χ , односно мењање густине (ρ) и притиска (p) при сталној температури (T).

$$\chi = \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T$$

- Специфични топлотни капацитет C_p , односно количина топлоте која је потребна за пораст температуре од 1 Келвина за јединичну масу неке ствари.

$$C_p = \frac{dQ}{m dT}$$

Где је Q- количина топлоте, T- температура, m- маса.

- Топлотна проводност λ , мера количине топлоте коју се у одређеном времену може провести кроз тело при некој температури.

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x}$$

Где је q- топлотни ток, k- топлотна проводност, $\partial T / \partial x$ – температурни градијент који иде кроз медијум.

- Топлотна продорност b , односно мера брзине којом топлота продире у тело.

$$b = \sqrt{\lambda C_p \rho}$$

Где је C_p – специфични топлотни капацитет, λ топлотна проводност, ρ густина ствари.

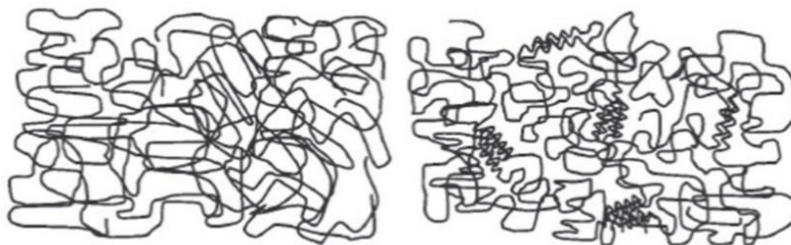
Једна од најважнијих подела полимера се заснива на њиховом понашању при високим температурама, односно при топлотним утицајима. Сходно томе, полимере можемо поделити на 3 велике групе:

- Пластомере(термопласте)
- Еластомере и елестопластомере
- Дуромере (дурупласте)[3]

2.2.2.1. Пластомери

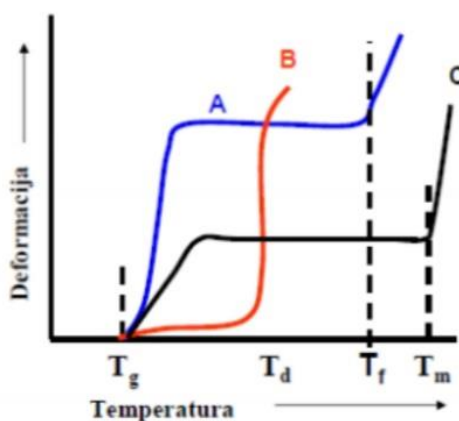
Пластомери, односно термопласти, су група полимера на коју отпада преко 90% од укупне производње, сто их чини најзаступљенијом полимерном групом. При уобичајним температурама могу бити пластични, крти или еластични.

Специфичност ове групе полимера је што загревањем омекшавају. Њиховим загревањем секундарне везе попуштају, макромолекули се почињу слободно кретати а пластомери са временом топе. Тада, доведени до температуре мекшања, постају пластични и на њих се примењују обраде бризгања у калуп, екструдирање и заваривање. При промени структуре пластомере можемо поделити на кристалне и аморфне [3].



Слика 2.22. Приказ аморфне и кристалне структуре пластомер [3]

Преко 50% од комерцијално коришћених пластомера се сврставају у групу аморфних пластомера. Углавном су крти, прозирни и смањене хемијске постојаности. Кртос и крутос је обрнуто пропорционална температури, односно пада са њеним порастом. Кристални пластомери уз кристални део сардже и аморфни, а удео кристалне структуре им се изражава коришћењем степена кристалности.



Слика 2.23. Утицај мере сређености структуре на термодинамичку криву [3]

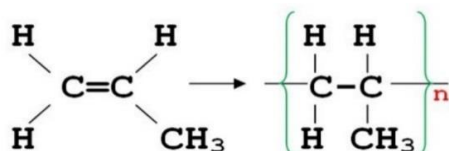
Слика 2.23 показује колико сређеност макромолекуларне структуре може утицати на изглед термодинамичке криве. Две специфичне температуре повезују структуру пластомера са његовим својствима те одређују понашање пластомера у зависности од температуре. Код аморфних пластомера реч је о температури стакластог прелаза T_g , односно на температури на којој аморфни полмери из стакластог стања прелазе у еластично и савитљиво стање, узроковано брзим ротацијама аморфних сегмената, при чему се губе битна механичка својства, односно опадају тврдоћа и крутост. Код кристалних полимера важна је критична температура тачке топљења T_m која представља температуру при којој долази до топљења кристалне фазе пластомера. Код кристалних полимера у градивним улогама, такође радно подручје не сме прелазити температуру T_m јер ће доћи до слабљења њихових механичких својстава.

Међу пластомерима се по опсегу производње и примени највише истичу полипропилен (PP), полиетилен (PE), поливинил-хлорид (PVC), полистирен (PS). Могућност лаког пластичног обликовања, отпорност трошењу, рециклабилност, добра и постојана

основна својства и ниска цена, међу осталима, су заслужни што су пластомери коришћени у свим сегментима људске делатности, па тако и у електротехници и електроници.

Полипропилен

Полипропилен (PP) је пластомер грађен од молекула пропилена повезаних у линеарне макромолекуларне ланце.



Слика 2.24. Полимеризација пропилена [3]

С обзиром на оријентацију метилних група у макромолекулама, разликујемо изотактичан полипропилен, код ког се оријентирају на један начин, те атактичан полипропилен, код којег је оријентација насумична. Најбоља својства имају изотактичне структуре јер она погодује кристализацији, а комерцијални полипропилен садржи преко 90% изотактичности. Данас се полипропилен производи поступком координативне полимеризације, те пропилен који улази у процес мора да буде ослобођен свих нечистоћа и воде. У комерцијалном облику обично је гранулат или прашкаст.

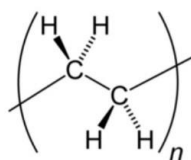


Слика 2.25. Гранулирани полипропилен [3]

Полипропилен је један од лакших полимерних материјала и има малу густину те високо топљење које омогућује широку примену у температурном подручју. У индустрији се РР захваљујући својим механичким својствима користи за израду спољњег заштитног плашта електричних водова који их штити од спољних утицаја.

Полиетилен

Полиетилен (PE) је најједноставнији полиугљениководник који се у индустрији добија полимеризацијом етилена, а у индустрији од диазометана. Преставља један од најкоришћенијих и најпознатијих полимерних материјала данашњице. Мономери етилена се повезују у ланчасте макромолекуле великих молекуларних маса, а пошто је структура једноставна макромолекули полиетилена врло лако кристалишу.



Слика 2.26. Мономер полиетилена, етилен [3]

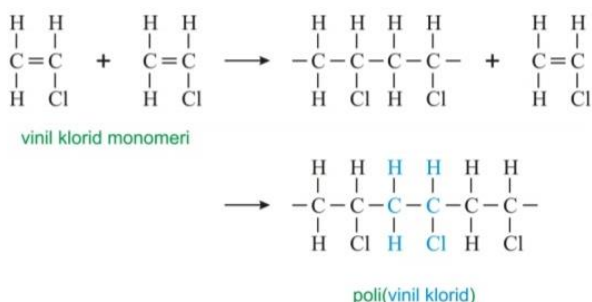
О молекуларној маси зависи способност прераде полиетилена. Што је она већа, боља су му механичка својства и хемијска постојаност, али се теже прерађује. Главне врсте полиетилена на темељу молекуларне масе и разлике у густини су:

- Полиетилен ниске густине (LDPE)
- Линеарни полиетилен ниске густине (LLDPE)
- Полиетилен високе густине (HDPE)
- Полиетилен са ултра високом молекуларном масом (УНМВРЕ)

Својства полиетилена зависе од врсте полимеризације, уз висок или низак притисак, па се прилагођавањем притиска, температуре и кристализације подешава микромолекуларна структура и степен кристалости. Полиетилен има разноврсну примену с обзиром да се одликује својим механичким својствима и хемијском постојаношћу и непропусношћу за воду и агресивне медије. У електроиндустрији се користи као спољни изолатор каблова високих напона.

Поливинил-хлорид

Поливинил-хлорид (PVC) је група пластомера која настаје полимеризацијом молекула винил-хлорида. Познато је преко стотину модификација овог полимера, па његова физичка својства могу варирати од меканог и еластичног до тврдог и жилавог. По потрошњи је други најзаступљенији пластомер иза полиолефина.



Слика 2.27. Мономер и макромолекул PVC-а [3]

Макромолекули су му ланчани, а могу и имати кратку или дугу разгранатост. Температура при којој се проводи полимеризација је значајна што је она мања већи су степени кристализације и молекуларна маса, што одређује његова својства али и својства његових топљења, суспензија. Након полимеризације је постојан у облику праха, од којег се производе две основне врсте PVC-а:

- Меки, односно флексибилни PVC
- Тврди, односно крути PVC

С обзиром на то да је PVC слабе постојаности у односу на друге пластомере те је подложен светлосној, топлотној, и механичкој деградацији, додају се разна средства за повећање стабилности, пластификатори, мазива и други модификатори међу којима су и други полимери.

У електроиндустрији се PVC користи у многобројним применама, од електроизолације вођица за изрду траке за изолацију, као изолацијски материјал за разводне кутије, разводне ормаре, па све до изолације различитих кућних апарата.

Полистирен

Полистирен (PS) је пластомер израђен од мономера стирена, па настаје процесом ланчасте полимеризације, због чега има линеарну макромолекуларску структуру. У процесу производње му се додају разни антистатистици, боје, стабилизатори и пигменти, зависно по потреби. Производи од полистирена се могу накнадно механички и термички обрађивати. У електротехници и електроиндустрији користи се у производњи кућишта и апарата, носача сијалица, изолатора инструмената, подножја електричних цеви и као подлога за штампане кругове.

Разликујемо 5 главних подела полистирена:

- Хомополимерни полистирен
- Модификовани полистирен високе жилавости (HIPS)
- Стирен/акрилонитрил (SAN)
- Терполимер акрилонитрил/бутадиен/стирен (ABC)
- Пенасти (целуларни) полистирен (EPS)

У електроиндустрији подтипови полистирена налазе многе примене, а једна од најпознатијих је свакако примена за утичницу, које су најчешће израђене од ABC-а.



Слика 2.28. Утичница израђена од полимера ABC-а [3]

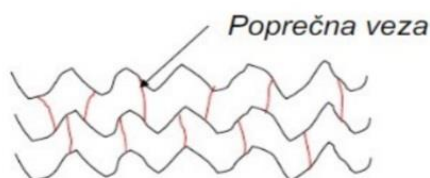
SAN примену налази за израду кућишта акумулатора што га такође чини важним у електроиндустрији.



Слика 2.29. Кућиште акумулатора израђено од полимера SAN-а [3]

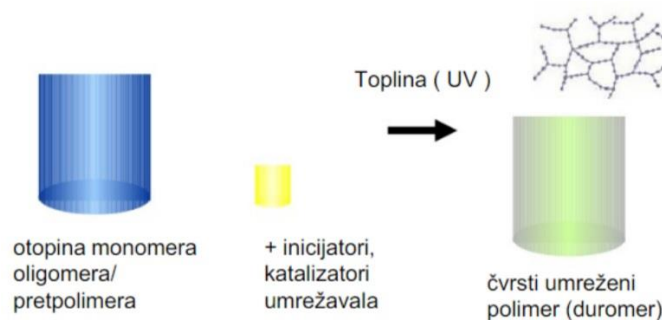
2.2.2.2 Дуромери

Дуромери, односно дурупласти, имају просторно умрежену густу структуру, а могу бити у стакленом или кристалном стању. Грађени су од макромолекуларних ланаца који се међусобно повезују примарним попречним везама.



Слика 2.30. Густо тродимензионална умрежена структура дууромера [2]

Процес добивања дууромера се састоји из две фазе: прва фаза је формирање олигомерне реактивне вискозне масе или чврсте супсанце која се лако топи. У овој фази дууромери су погодни за обраду, јер имају способност топљења и омекшавања. У овој фази су обликовани у потребан како би се наставио процес производње. У облику топљења називају се и вештачким смолама. Друга фаза је поступак умрежавања и полимеризације, уз помоћ различитих катализатора и умрежача. Кроз процес умрежавања дууромери добијају свој коначан облик.



Слика 2.31. Умрежавање дууромера помоћу додатака и топлоте [3]

Због својства хемијских веза којим су им макромолекули повезани, дууромери се након производње грејањем не могу нити раставити нити омекшати. Због тога се дууромери најчешће примењују као изолатори у грађевинарству, аутомобилској индустрији...

2.2.2.3 Еластомери

Еластомерни материјали, често названи гуме, имају грађу молекула која је делимично умрежена, односно макромолекули се осим примарним повезују и секундарним везама, док им је структура аморфна или слабо сређена. С обзиром да постоје секундарне везе, еластомери се могу омекшати. Омекшавање је омогућено тиме што довођењем топлоте, односно загревањем, секундарне везе попуштају па се сегментима макромолекула повећава покретљивост, па тиме доводи до мекшања еластомера. Због присутности примарних веза, еластомери се више не могу раставити.

То су материјали који се при собној температури могу вишеструко продужити, односно имају способност врло високих еластичних деформација па ће се након престанка напрезања вратити у свој првобитни облик. Најпознатији примери еластомера су природни каучук (NP) бутадиенски каучук (PBS) , полиуретански каучук и др.

Као посебна целина могу се још издвојити еластопластомери, који на собним температурама поседују својства попут еластомера, али се обрађују поступцима својственим за пластомере [3].

2.2.2.4 Композитни материјали

Композити су материјали састављени из других, већ готових материјала, углавном као њихова мешавина, како би заједно имали нова својства, тј. она својства која сваки материјал сам не би имао. Састављени су из најмање два материјала (компоненте, фазе). Компоненте се међусобно не мешају нити растварају тако да се унутар композита јасно разликују две или више фаза [25].

Једна фаза се назива **матрица, основа** или **везиво** (*Matrix* – енг.) и она окружује и држи заједно групе влакана или фрагменте ојачивача. Основна улога матрице је да:

- осигура добро повезивање са осталим компонентама,
- формира и осигурава спољашњи облик конструктивног елемента,
- осигура заштиту осталих компоненти од спољашњег утицаја.

Остале фазе у композитима се називају **побољшивачи** и њихов задатак је да побољшају хемијске и физичке особине (механичке, триболошке, електричне, ...). Побољшивачи који пре свега појачавају механичке особине (јачину, тврдоћу, ...) називају се **ојачивачи**. Карактеристике ојачивача је да обезбеђује композиту:

- велику чврстоћу и тврдоћу,
- велику еластичност или крутост,
- остале захтеване карактеристике (електропроводљивост, топлотна проводљивост, ударна живавост, ...).

У инжењерском пројектовању под композитним материјалом се подразумева материјал који се састоји од чинилаца у опсегу микро-макро величина, с тим да преовлађује опсег макро величина. Циљ је да се побољшају структурне, термичке, хемијске или неке друге карактеристике појединачних материјала [25].

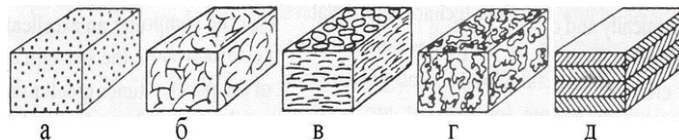
Подела композита на основу ојачивача

Влакна као саставни део полимерних композита имају функцију да повећају чврстоћу и крутост материјала матрице у циљу задовољавања одређених конструкцијских захтева. У принципу, влакна као носиоци оптерећења требају да буду што чвршћи и крући. Стога се за влакна преферирају материјали високе специфичне чврстоће и високе специфичне крутости (специфични модул еластичности) [26].

Посматрано у односу на микроструктуру грађе композита (слика 2.32), може се извести подела на:

- композите ојачане дисперзним честицама (Particulate composite) (слика 2.32.a);

- композите ојачане влакнима (Fiber composite) (слика 2.32.б)
- композите ојачане љускама/плочицама (Flake composite) (слика 2.32.в)
- композите ојачане зрнима (Filed composite) (слика 2.32.г)
- композите ојачане тракама-ламелама (Laminar composite) (слика 2.32.д) – слојевити (ламинарни) композити [25]



Слика 2.32. Подела композита према грађи [25]

Једна од најважнијих разлика између композита са честицама и оних са влакнима директно произлази из њихове грађе. Композити са честицама углавном су изотропни, тј. њихова својства (чврстоћа, крутост итд.) идентична су у свим смеровима, за разлику од композита са влакнима који су често анизотропни па својства варирају с обзиром на положај влакна.

Као ојачавач полимерне матрице користе се синтетичка влакна, највише: стаклена, угљенична и арамидна. Од неорганских се користи бор у мањој мери, а од органских полиамид, полиакрил, полиестер и полиетилен.

Стаклена влакна су најчешће коришћена ојачања за пластомерне и дуромерне композите. Главне предности употребе стаклених ојачања су: висок однос чврстоће / тежине, димензионална стабилност, отпорност на повишену температуру и корозију, добра електрична својства и релативно једноставна производња, а самим тим и ниска цена. Стаклена нит се добија различитим технолошким поступцима из стаклене талине, затим се наноси завршна обрада која штити влакна од оштећења и омогућава везу између површине влакана и различитих смола. Најпознатије три врсте стаклених влакана су Е-стакло, С-стакло и S-стакло. Е-стакло је најчешће коришћено стакло. Има ниску еластичну проводљивост, добру чврстоћу и крутост и добру отпорност на временске утицаје. С-стакло карактерише висока хемијска отпорност, али је много скупље од Е-стакла и има мању чврстоћу. S-стакло има већи модул еластичности, већу температурну отпорност, али и изузетно високу цену. Употреба одговарајуће врсте арматуре зависи од примењеног процеса обраде и захтева квалитета крајњег производа.

Угљенична влакна се добијају процесима оксидације и карбонизације, почевши од поликарбилних и целулозних влакана или битумена. У зависности од почетних компоненти и услова производње, разликују се два основна типа:

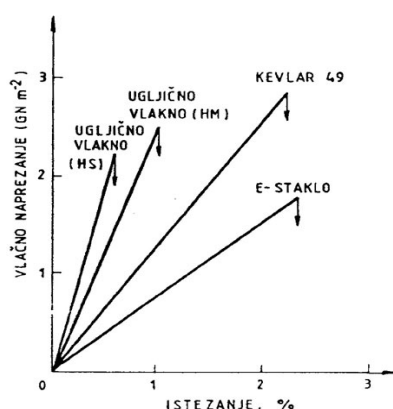
- влакна високе чврстоће (HS)
- влакна високог модула (HM)

Угљенична влакна карактеришу изванредна својства: велика густина, велика чврстоћа и модул, добра хемијска отпорност, па се у комбинацији са епоксидним смолама користе за структурне композите. Цена ових влакана је и даље висока - 30 до 40 пута већа од стаклених влакана. Уз високу цену, недостатак му је мала жилавост и мало испрекидано истезање. Поступци обраде слични су примени арматура од стакла: бризгање под притиском, пресовање, пултрудирање итд. Користе се у ваздухопловству, војној индустрији, електроници, хемијским и нафтним погонима и за производњу спортске опреме.

Арамидна влакна (ароматични полиамиди) су синтетичка влакна која у линеарном макромолекулу имају ароматичне групе повезане са арамидним групама. Висок однос чврстоће и модула еластичности према тежини, велика жилавост, добре диелектричне особине, добра хемијска отпорност, добра толеранција на обраду и вибрације, пружају арамидним влакнима широке могућности употребе. Најпознатије арамидно влакно под трговачким именом Кевлар производи DuPont. Два најпознатија типа су:

- а) Кевлар 29 - користи се за израду каблова и ужади, материјала отпорних на трење, тканина за заштитне (панцир) кошуље итд.
- б) Кевлар 49 - служи као појачање за производњу чамаца, аутомобила и у авионској и ракетној индустрији.

Полимерна матрица која се користи са кевларовим влакнима је иста као и код стаклених влакана. Поред горе наведених предности, недостаци Кевлар-а су мала чврстоћа на притисак, немогућност бојења и отпорност на УВ зрачење [25].



Слика 2.33. Криве истезања - напрезања различитих врста влакана. Вертикална линија означава прелом [25]

Влакна од силицијум карбида производе се сличним поступком као и борова влакна - напаравањем на језгру од угљеничног влакна (енгл. Chemical Vapor Deposition - CVD). Ова су влакна посебно погодна за ојачавање метала (алуминијских и титанијумских легура) као и ојачавање керамике у форми влакна од силицијум угљеника, силицијумовог нитрида или стакла. У другом се облику ова влакна израђују од полимера који садрже силицијум и угљик, једно од таквих влакана познато је под трговачким именом Nicalon или у побољшаној верзији Hi-Nicalon. Ова влакна имају и својство полупроводност - отпор им је завистан од количине нечистоћа које садрже. Nicalon влакна су знатно јефтинија него влакна произведена CVD поступком али нису погодна за примене на повишеним температурама [25].

Подела композита на основу матрице

Основне функције матрице јесу:

- преношење оптерећења на влакно,
- одвајање влакана једних од других у сврху спречавања ширења пукотина у материјалу,
- формирање спољашњег облика композитне конструкције,
- заштита композита од утицаја околине.

Својства матрице (табела 2.7) изразито су важна за одређивање уздужне притисне чврстоће, попречне влажне чврстоће као и међуслојне смицајне чврстоће и обично се

каже да су ова својства условљена матрицом. У ваздухопловним конструкцијама, матрица мора бити отпорна и на погонско гориво, хидрауличне флуиде као и различите хемикалије које се користе при одржавању (нпр. средства за скидање боје). За композите се тражи да добро подносе температуре до 150 °С, изузетно и до 200 °С. Својства матрице најчешће одређују и својства композита, као и ограничења у примени. У случају изложености композита хемијским или утицајима околине, матрица је она која је прва изложена смањењу механичких својстава, те њена својства значајно одређују понашање композита. Врло је битно физичко својство температура преласка у круто стање - ГТТ (енгл. Glass Transition Temperature - GTT) која дефинише тачку преласка из вискозног у круто стање матрице. Ова температура битно дефинише коначна својства матрице. Наиме, при употреби изнад ГТТ, својства матрице знатно се снижавају. Влага у композиту (понајвише матрици) знатно снижава ГТТ. Технологија израде композита знатно утиче на његова својства, јер мора осигурати добру везу влакна и матрице као и минималан удео шупљина или пукотина у композиту.

Врста смицања	Густина	Истежање	Затезна чврстоћа	Модул еластичности	Модул смицања
	ρ [g/cm ³]	ϵ [%]	Rm [MPa]	E [GPa]	G [GPa]
Полиестер	1,50	5	90	4,5	2
Винил естер	1,15	5	90	4	-
Епокси	1,40	8,5	130	6	2,2
Бизмалеимид (BMI)	1,32	6,6	78	3,6	1,8
Полиимид	1,89	3	120	4,9	-
Полиетер имид	1,27	60	105	3	-
Полиамид имид	1,40	12-18	95-185	5	-
PPS	1,34	3	70-75	3,3	-
полиетеретеркетон (PEEK)	1,32	150	92-100	-	-
Полисулфон (PS)	1,24	50-100	70-75	2,5	-
Полипропилен (PP)	0,90	300	25-38	1-1,4	-
Поликарбонат (PC)	1,20	50-100	45-70	2,4	-
Алуминијум	2,70	-	200	70	-
Ti-6Al-4V	4,50	-	1000	110	-
Боросиликатно стакло	2,30	-	100	60	-
MgO	3,60	-	97-130	210-300	-
Al ₂ O ₃	4,00	-	250-300	360-400	-
SiC	3,20	-	310	400-440	-

Табела 2.7. Механичка својства неких материјала матрице [25]

Конституенти композита могу бити разнородни материјали (слика 2.34): неметали, керамике и стакла, метали и легуре, полимери. У зависности од врсте конституента разликују се:

- металне композите ММЦ (MMC Metal-Matrix Composite),
- композите ПМЦ (PMC Polymer-Matrix Composite),
- керамичке композите ЦМЦ (CMC Ceramic-Matrix Composite).



Слика 2.34. Групе композитних материјала [25]

Од њихових особина, заступљености, расподеле и везивања зависиће својства новонасталога материјала. Све композите карактеришу неке заједничке одлике које их чине посебним и издвајају од других материјала: велика јачина и крутост - могу бити јачи од челика, мала густина и маса, отпорност на корозију и високе температуре, хемијска инертност, могућност обраде и обликовања у разноврсне облике, издржљивост и постојаност.

2.2.3 Триболошка својства полимера

Под појмом триболошка својства подразумева се њихова отпорност на хабање и мали фактор трења, а важне су при примени полимера у конструкцијске сврхе. Предности које полимерни материјали имају над другим конструкцијским материјалима су:

- Нема микрозаваривања спојева
- Неравнине и удубљења се попуњавају продукцијом хабања полимера
- Стране честице не нарушавају конструкцију

2.2.4 Хемијска постојаност полимера

Једна од главних предности полимера над осталим материјалима је њихова хемијска постојаност, која произилази из следећих својстава полимера:

- Нема агресивног деловања медија на полимер због малог или непостојећег афинитета између полимера и медија
- Деловање тиг агресивних медија је спорије на полимере него на друге конструкцијске материјале

- Одређена деловања агресивних медија су повратни процеси као нпр. бубрење

Најопасније хемијско деловање се јавља при постојању пукотина код полимера када медијум има корозионо деловање на полимер који тада показује већи ниво хемијске непостојаности [3].

2.2.5 Електрична и остала својства полимера

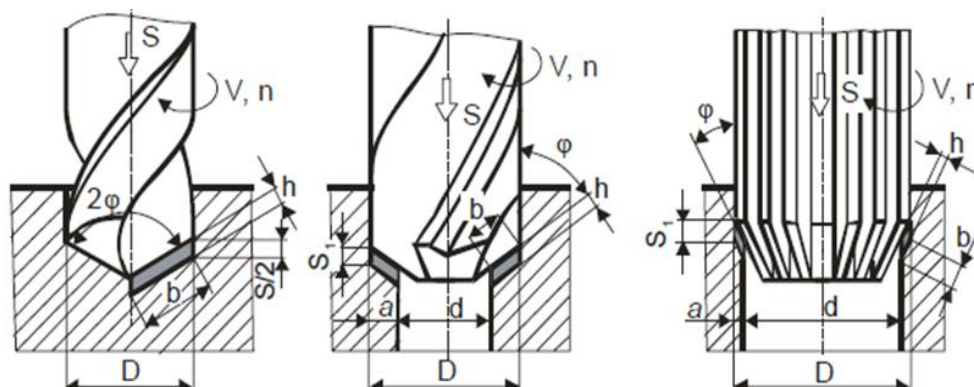
Полимери су лоши проводници електричне струје, па се најчешће користе у својству изолационих материјала. Најважније електрично својство полимера је диелектрична константа. Полимери имају претежно ниске вредности диелектричне константе, што их чини добрим изолатором. Најниже вредности су највише одређене хемијском структуром полимера.

Осим структуре вежни фактори код електричних својства полимера су: температура, нечистоће, влага, механичко оптерећење. Од осталих својства меже се споменути удео додатака, индекс лома и густина полимерних материјала, који такође представљају битну ставку при одабиру одговарајућег материјала за одређену намену.

3. Обрада бушењем

Бушење је поступак израде обраде отвора и рупа.

Главно 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 3.1 [5].



Слика 3.1. Основна кретања и резни слој у обради бушењем [5]

Обрада отвора бушењем се може вршити на разним алатним машинама, нпр.стона бушилица, стубна бушилица, радијална бушилица, координатна бушилица, специјалне бушилице за дубоко бушење, стругови, глодалице и др.

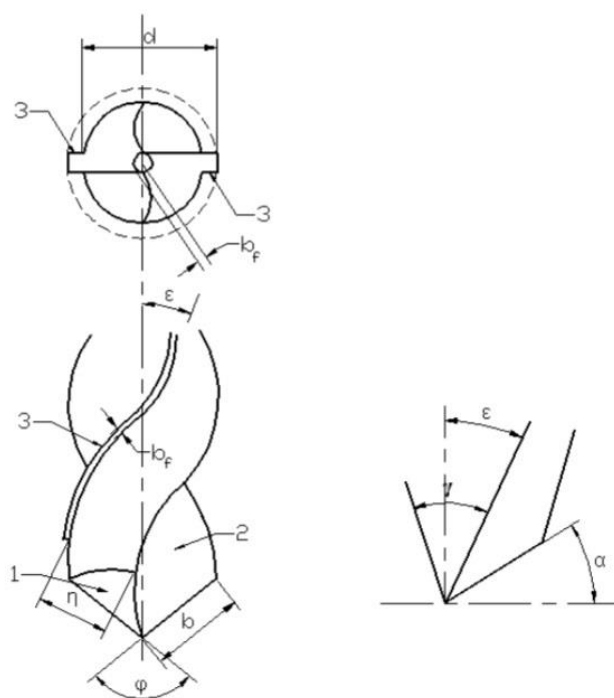
Полимери су лоши проводници топлоте, што свакако треба узети у обзир приликом обраде одвајањем честица. Главни проблем код обраде полимерних материјала одвајањем честица је повећање температуре услед трења, што смањује обрадивост. Прекомерним загревањем алата односно полимера, може доћи до нарушавања квалитета полимера као и његовог топљења. Последица тога је лош квалитет обрађене површине, могућност запињања алата и могућност цепања полимера односно настанак пукотина. Постоје специјално израђени алати за елиминисање проблема са загревањем. У глобалу висока тачка топљења, континуално подмазивање, висока тврдоћа и крутост су фактори који повећавају обрадивост.

Основни облик алата са сечивом је клин. Алат се разликује са једним (ножеви), више (бушилице, секачи) и мноштво сечива (брусне плоче). За алате који служе обради полимера карактеристичан је велики угао предњег алата сто смањује потребни рад резања. Низак модул растегљивости је разлог зашто се мора користити врло оштар алат. Због ниске топлотне проводљивости полимер се углавном испушта у алате за резање (99,2-99,8%) и остатак се задржава у површинском слоју самог радног предмета. То доводи до повећања температуре на површини радног предмета и до смањења обрадивости. Стога постоји потреба за интензивним хлађењем површине обратка. Количина развијене топлоте такође се може смањити полирањем предње површине сечива алата за резање. При обради пластомера радне температуре су до 60 °C, а при обради дурометара око 150 °C. Важно је ускладити се током сваке обраде материјал алата и његова геометрија са врстом полимера који се обрађује. Алат мора бити

направљен или од карбида или са дијамантским уметком, јер састојци који служе као појачање или пунила узрокују велико хабање сечива алата.

3.1 Геометрија алата за бушење

Овде су посебно критични расипање топлоте и уклањање остатака растопљене. Бушити површине у додиру са обратком, као и површине канала морају бити високо полиране и хромиране. Бушилице произведене специјално за прераду полимерних материјала су комерцијално доступне, али нису нужно погодне за све полимерне материјале. Брзине ротације бушилице су обично смањују се повећањем пречника рупе или повећањем њене дубине. Обично су брзине ротације више са јачим материјалима, како са пластомерима, тако и са дуромерима. Геометрија алата за бушење полимерних материјала приказано је на слици 3.2 [6].



Слика 3.2. Геометрија алата за бушење [6]

1 - задња површина, 2 - предња површина, 3 - фурнир, b - ширина главне оштрице, d – пречник сврдла, b_f - ширина фурнира, α - задњи угао, ε - угао завојнице, γ - предњи угао, η – угао попречне лопатице, ϕ - вршни угао

Режими рада услед бушења полимерних материјала приказани су у табели 3.1.

Полимер	Чврстоћа	Стање	Брзина резања (m/min)	Посмак (mm/обртај)
Akrili, acetali, polistiren, polikarbonat	60-120 Rm	Ливене, екструдирани или истиснут	30-60	A
ABS, polipropilen, polietilen, celulozni acetat	50-120 Rr	Ливене, екструдирани или истиснут	46-76	A
Najloni	78-120 Rr	Екструдирани или истиснуте	30-76	A
Епоксиди, malamini, fenoli	100-128 Rm	Ливене или истиснути	30-60	B
Silikoni	15-65 Rm	Ливени или истиснути	20-38	B
Poliuretan	55-75 Rm	Ливени	30-60	A
Polibutadien, tiofen	40-100 Rr	Ливени	30-60	B

Табела 3.1. *Режими рада приликом бушења [7]*

У табели 3.2 су приказани нормални пречник отвора

	Нормални пречник отвора							
	1,5	3	5	12	18	25	35	50
A	0,025	0,050	0,10	0,13	0,15	0,20	0,25	0,30
B	0,025	0,050	0,075	0,10	0,13	0,15	0,20	0,25

Табела 3.2. *Нормални пречник отвора [7]*

3.2 Развртање

Након бушења, бушење се може обавити и конвенционалним алатима, али такође морамо пазити да алати буду оштри. Препоручује се навијање канала развртача и хлађење водом. Режији развртавања приказани су у табели 3.3.

Полимер	Чврстоћа	Стање	Брзина резања (m/min)	Посмак (mm/обртај)
Akrili, acetali, polistiren, polikarbonat	60-120 Rm	Ливени, истискивани или екструдирани	20-40	A
ABS, polipropilen, polietilen, celulozni acetat	50-120 Rr	Ливени, истискивани или екструдирани	30-50	A
Najloni	78-120 Rr	Истискивани или екструдирани	20-50	A
Epoksidi, malamini, fenoli	100-128 Rm	Ливени и истискивани	20-40	A
Silikoni	15-65 Rm	Ливени и истискивани	14-26	A
Poliimid	40-50 Re	Истискивани или екструдирани	20-40	A
Poliuretan	55-75 Rm	Ливени	30-50	B
Polibutadien, tiofen	40-100 Rr	Ливени	20-40	A

Табела 3.3. *Режими рада приликом развртања [7]*

При чему посмази зависе од пречника развртача и наведени су у табели 3.4.

	Пречник развртача					
	3mm	6mm	12mm	25mm	35mm	50mm
A	0,050	0,050	0,10	0,15	0,20	0,25
B	0,050	0,050	0,075	0,075	0,25	0,25

Табела 3.4. *Посмази приликом развртања [7]*

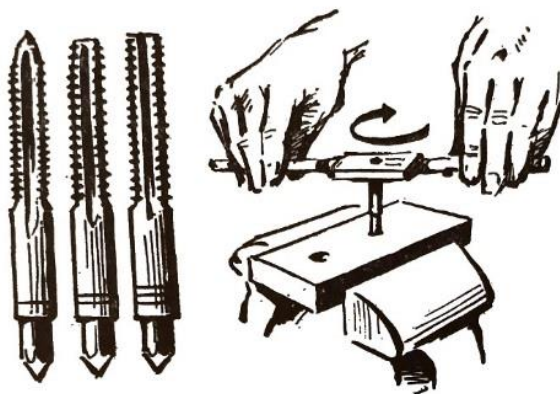
3.3 Нарезивање и урезивање навоја

Ширина обраде навоја треба бити благо повећана, а висина обраде навоја благо смањена ради еластичног поврата материјала. То се посебно односи на мекше пластомере. Навоји требају бити добро полирани и препоручује се хромирање.



Слика 3.3. Пример нарезаног навоја на пластичном завртњу [8]

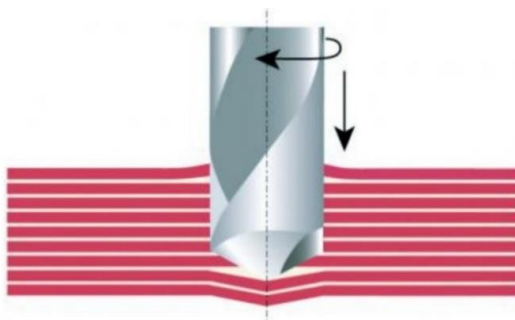
Урезивање навоја је поступак израде спиралних жлеба у постојећој рупи. Урезница улази вертикално у округлу рупу и одређеним бројем окрета, одређеним посмаком, који мора одговарати кораку навоја.



Слика 3.4. Урезивање навоја [9]

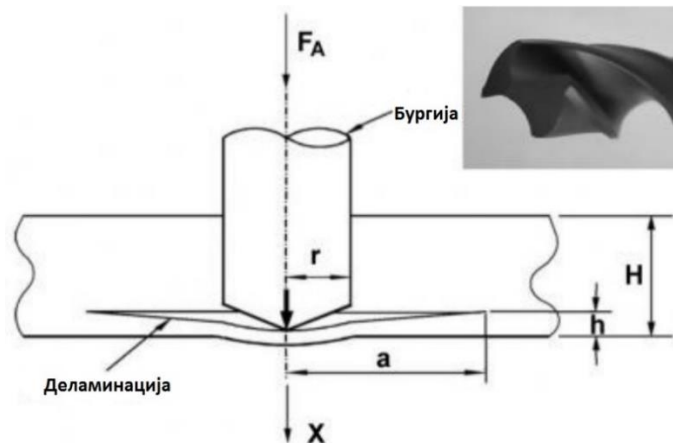
3.4 Деламинација

Најчешћи тип оштећења полимерних материјала је деламинација, која је углавном повезана са бушењем и може се јавити како на улазу (љуштење површинског слоја), тако и на излазу (љуштење необрађеног слоја испод алата) бургије из материјала.



Слика 3.5. Деламинација површинских слојева током бушења композита [10]

Настанак и развој деламинације током бушења конвенционалним увртањем одвија се постепено у две фазе (фаза деловања попречног сечива и фаза деловања главне оштрице). Прва фаза започиње када сила притиска од попречне оштрице до још необрађеног слоја материјала достигне критичну вредност и завршава се након што попречна оштрица продре напоље. Током деформације прво се формира мала избочина око осе бушења, а затим се даље шири у правцу влакана у површинском слоју [10].



Слика 3.6. Модел формирања делатација [10]

Када испупчење достигне граничну вредност, површински слој се отвара, попречни нож продире напоље и тада започиње друга фаза. Раслојавање започето у првој фази развија се даље због притиска и ротације бургије. Попречно сечиво сече материјал обратка са великим негативним углом и генерише преко 50% силе увлачења (тако играјући кључну улогу у процесу). У тренутку када попречна оштрица продре на површину, деламинација достиже велики део своје коначне величине. Не механизовани део материјала испод алата обликован је као изотропна кружна површина, подржана око њеног обода ради поједностављења. Под претпоставком оптерећења постојеће пукотине у режиму (примењено напрезање делује вертикално на раван лома), односно:

$$F_A(h) = \pi \sqrt{32MG_{IC}} = \pi \sqrt{\frac{8G_{IC}Eh^3}{3(1-\nu^2)}}$$

где је G_{IC} критична брзина ослобађања енергије (живавост лома), E модул еластичности, h дебљина необрађеног материјала испод алата а ν је Поиссонов број. Критична сила притиска је према томе само функција неизбушене дебљине h и својстава материјала који се обрађује. Овако изведена „континуирана“ једначина може се применити на композитне материјале произведене, на пример, пултрузијом (цртање). Деламинација у композитним материјалима, чија се потребна дебљина постепено гради из слојева (тзв. Ламинати), не јавља се унутар слоја, већ само између појединачних слојева ламината. У овом случају, критична сила притиска узима само дискретне вредности према једначини:

$$F_A(n) = \pi \sqrt{\frac{8G_{IC}E(nh_t)^3}{3(1-\nu^2)}}$$

где је h_t дебљина једног слоја ламината, а n број необрађених слојева испод алата. У пракси то значи да је за спречавање раслојавања потребно смањити вредности додавања тако да сила додавања из сврдла не достигне вредности дате једначинама. Поред услова резања, стање ивице алата такође има значајан утицај на раслојавање. Ако алат није довољно оштар, влакна се не подвргавају деформацији смицања, тј. имају тенденцију да се савијају испред алата, извлаче се из калупа, а хабање алата такође повећава силу храњења и самим тим и раслојавање материјала.

Обрада композитних материјала је тешка и избор погодних алата за резање обично захтева велику пажњу и селективан приступ. Тренутно су на тржишту доступне бушилице са геометријом, које пружају погоднији распоред смицања, омогућавајући бушење композита без деламинације. Генерално, да би се постигао већи квалитет обрађених површина, препоручљиво је користити бушилице са најмањом могућом дужином попречне ивице, позитивне геометрије и оштре резне ивице која ће дуго трајати. Ово је такође повезано са правилним одабиром материјала алата, најприкладнији су финозрнати синтеровани карбиди и поликристални дијамант [10].

4. Обрадивост материјала

4.1 Дефинисање обрадивости

Брзи развој нових материјала, алата за резање и течности за сечење промовишу истраживање обрадивости нових материјала и триболошких карактеристика алата за резање и течности за сечење. Обрадивост материјала је врло сложена категорија и мора се разматрати са различитих гледишта и са различитим захтевима обраде. Зависи од низа утицајних фактора, пре свега повезаних са механичким, структурним и топлотним карактеристикама радног материјала, а изражава се кроз излазне параметре из процеса обраде (хабање алата, силе резања, квалитет површине обраде итд.). Резултат испитивања обрадивости материјала омогућава ефикасно и поуздано управљање процесом обраде тих материјала и даје ефикасне одговоре на високе захтеве тржишта и производње.

Појам обрадивости материјала је засигурно један од недовољно дефинисаних, али и најважнијих појмова у метало-прерађивачкој индустрији. Кад кажемо обрадивост мислимо на скуп фактора којима се може описати одређена способност материјала (заварљивост, ковност, ливност, резивност).

Обрадивост материјала је технолошка особина којом се изражава подобност обраде неког материјала, а оцењује се низом параметара обрадивости користећи се методама провере обрадивости.

Конкретно, 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.

Могућ је случај да један материјал има добру постојаност алата, али да сама обрађена површина услед кидања делова материјала није довољно добра. Зато се обрадивост дефинише низом параметара и што више позитивних оцена материјал има, то је његова обрадивост боља.



Слика 4.1. Утицајни фактори на обрадивост[11]

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. [11].

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

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

4.2 Критеријуми обрадивости

Обрадивост материјала приказује се кроз четири основна параметра:

- Постојаност алата
- Силе резања
- Квалитет обрађене површине
- Облик одвојених честица (струготине) [13]

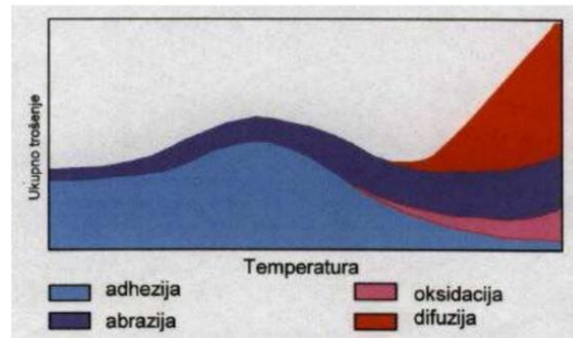
Ови фактори немају подједнак значај у различитим процесима и технолошким поступцима обраде неког материјала. То значи да је потребно рангирати критеријуме за сваки поједини случај сходно техничким захтевима.

Постојаност алата. Трошкови производње и време израде зависе од постојаности алата, па се може рећи да је одређени материјал боље обрадив ако је постојаност алата већа. Животни век алата је време резања током којег алат врши резање док се не затупи, тј. до унапред одређеног степена хабања након чега се не препоручује даља употреба истог алата. Најчешће се изражава у временским јединицама, мада јединице константности могу бити и неки други показатељи (нпр. број обрађених комада).

Величина и удео појединих механизма у одређеном случају зависи од својстава радног предмета, својстава алата и параметара и услова обраде, али генерално удео појединих механизма хабања највише зависи од температуре која се развија у интеракцији алата и обрадка током резања слика 4.2.

Према слици 4.2. може се закључити да су абразивно и адхезионо хабање заступљено у при свим температурама, што значи да је неопходна смањити приликом обраде резањем при нижим брзинама, док нема развоја високих температура, како би алат

могао провести довољно времена до дозвољене истрошености сечива. Високе температуре појачавају преостале две врсте хабања сечива - дифузију и оксидацију. Будући да је главни циљ осигурати дужи век трајања алата, потребно је одабрати алат који ће показати највећу могућу отпорност на присутне механизме хабања. Ово ће зависити од параметара обраде и врста хабања које ће се догодити под таквим условима.



Слика 4.2. Удели појединих фаза хабања у зависности од температуре [12]

Силе резања. Хабање резног алата, као и потрошња енергије током резања одређује се силама резања, ако је приликом обраде одређеног материјала мање сила резања онда је исти боље обрадив. Одвајање површинских слојева материјала резним алатом је могуће ако се на алат примени сила F_r што је једнака снази и силама трења. Најчешће се вектор силе резања разлаже на компоненте силе резања као што је приказано на слици 4.3. Тако су у случају косог резања дефинисане три компоненте силе резања:

- **F_c** - главна сила резања која се поклапа са главним правцем вектора главне брзине резања;
- **F_f** - сила смицања резања која делује у правцу смицајног кретања алата;
- **F_p** - повратна сила резања која делује у смеру вертикално на силе F_c и F_f ; [12]

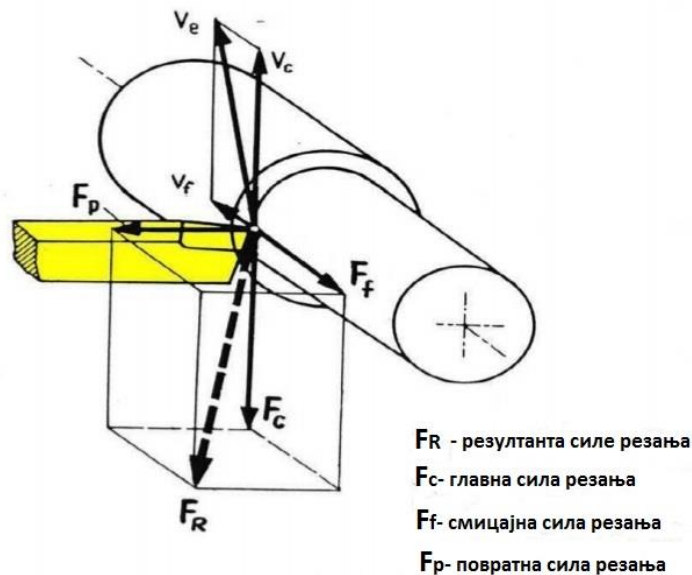
Резултанта сила се рачуна према изразу:

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

Односи појединих компонената значајно се мењају променом дубине и одступања, геометрије алата, хабања алата и механичких својстава алата, али главна сила резања увек има доминантну вредност. Мерење сила је други најчешћи начин за процену обрадивости, посебно ако су испитивања трајности алата из неког разлога ограничена (временски услови, недовољне залихе алата).

Процене сила резања су такође веома важне за процену потребне снаге алатних машина и лежачева. За одређени материјал силе резања првенствено зависе од вредности помака и ширине реза. Смањење сила резања може се постићи употребом алата са већим предњим углом и коришћењем горионика честица. Из контекста зависности од хабања, главне и повратне силе резања повећавају се са већим степеном хабања задње површине алата. Промене брзине резања за већину материјала и услови обраде немају значајан утицај на промену сила резања. Изузетак су легуре титана и неке посебне врсте челика које се одликују осетљивошћу на високе температуре, где се примећују значајне промене сила резања при промени брзине резања. Утицај је такође изражен у

обради меких материјала при малим брзинама резања (легуре алуминијума), где се због могућности стварања етикете повећава предњи угао алата, а тиме и промене сила резања. Мерење сила резања врши се посебно дизајнираним динамометрима, а мерења су прилично тачна.



Слика 4.3. Компоненте сила и брзине резања [12]

Квалитет обрађене површине. Постоје 2 показатеља квалитета обрађених површина, а то су:

- Геометријски (валовитост, храпавост и одступање облика)
- Физичко-механичке карактеристике површинског слоја (структура, микротврдоћа, заостала напрезања)

Бољи квалитет обрађене површине и самим тим нижа храпавост резултира квалитетнијим производом, па се за материјале који постижу бољи квалитет обрађене површине може рећи да су боље обрадиви. Квалитет обрађене површине важан је критеријум за процену обрадивост материјала. Такође има велики утицај на карактеристике перформанси машинских елемената: отпорност на хабање, коефицијент трења итд. Зависи од материјала за обраду, топлотне обраде и технолошког процеса обраде.

Постигнута храпавост може се смањити обрадом при већим брзинама резања, што је посебно изражено када се обрађују мекши материјали (ниско-угљенични, феритни челици) склони стварању етикета. Полирање сечива у неким случајевима омогућава бољу храпавост, посебно у случају материјала за обраду који су склони стварању етикета. Такође избором алата са већим предњим углом и одговарајућим SHIP-а могуће је добити повољније вредности храпавост.

Облик одвојених честица (струготине). У зависности од механизма и карактера стварања струготине, формирају се струготине различитог облика и типа. Облик и врста струготине зависи од врсте и физичко-механичких својстава материјала предмета који се обрађује (пре свега пластичност) и услова пластичне деформације резног слоја: карактер напрезања (повремено или непрекидно сечење), време, степен и брзина деформације.



Слика 4.4. Облици струготине [13]

Разноликост услова обраде, према спектру обрађених материјала и њиховим својствима, начинима обраде итд., доводи до великог броја облика и врста струготине, сврстаних у три основна типа:

- Прекидна или дисконтинуална- кидна
- Ламеларна- резана
- Непрекидна или континуална- тракаста [13]

Прекидна или дисконтинуална струготина (кидна, ломљена, сегментна итд.) настаје при обради ливеног гвожђа, ливене бронзе, и других кртих материјала. Настаје при обради жилавих материјала малим брзинама резања и великим корацима. Процес формирања прекидне струготине прате ломови материјала нестационарне природе између којих тече процес пластичног деформисања дела материјала који се претвара у струготину.

Ламеларна (резна, кратка) струготина настаје при нешто већим вредностима грудног дела алата. Јавља се у виду већих делића материјала, што зависи од самог материјала и стања оштрице алата. Најбоље се одводи из зоне резања, и најпожељнија је у процесу рада.

Непрекидна или континуална (тракаста) струготина је најчешће жељен облик струготине при обради већине материјала. Њено формирање је последица углавном пластичног деформисања у зони смицања. Одвајање материјала се врши континуално у виду трака одређене дебљине, а квалитет обрађене површине веома добар. При обради на аутоматима овај облик струготине није пожељан, због опасности по безбедност радника (нагомилава се) [13].

4.3 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 [5]:

- Компаративне (индексне) методе и
- Комплексне методе.

4.3.1 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) [14].

Метод континуално пута резања

Користи се при спољашњој уздужној обради на стругу. За одабрану референтну дужину резања се при константном кораку и дубини резања врше поновљена испитивања са различитим брзинама резања при чему се прати трошење алата. Испитивање се понавља све док се не нађе брзина код које долази до затупљења управно на референтној дужини резања. Ако се зна брзина резања v_{Lr} при којој долази до затупљења алата на дужини L за референтни материјал и ако се добије брзина резања за испитивани материјал v_{Li} онда је индекс обрадивости [14]:

$$I = \frac{v_{Li}}{v_{Lr}}$$

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 градације испитиваних материјала), након пређеног пута L .

Метода попречне обраде

Састоји се од интензивнијег хабања алата. На диску од испитиваног материјала, пречника од обично 300 до 350 mm, претходно се избуши пролазни отвор и такав диск се причврсти у чељустима. Попречна обрада се врши кораком кретања алата од центра према рубу константном дубином резања, кораком и при константном броју обртаја диска. При помицању алата ка рубу се на рачун повећања пречника повећава брзина резања чиме се повећава хабање алата. Тренутак потпуног затупљења алата одговара некој брзини резања која се користи за рачунање индекса обрадивости [12].

Индиректне методе

Обухватају релативно оцењивање обрадивости према експериментално истраженим везама између обрадивости неког материјала и његових физичко-механичких и металорушких-микроструктурних карактеристика. Карактеристике које се најчешће доводе у везу са обрадивошћу: тврoћа, чврстоћа, жилавост, топлотна проводљивост, микроструктура, хемијски састав...

Метода испитивања облика струготине

Састоји се у квантативном изражавању облика одвојене струготине помоћу тзв. коефицијента запремине:

$$S_k = \frac{v_{st}}{V_m}$$

где је v_{st} запремина одвојене честице измерена стављањем одвојене честице у одређену посуду, али без притиска, само деловањем силе земљине теже и V_m , запремине материјала обратка која је претворена у одвојену честицу.

4.3.2 Комплексне методе испитивања обрадивости

Комплексне методе добиле су назив по томе што су засноване на експерименталном истраживању према потпуним вишефакторским плановима експеримената. Дакле сврха комплексних метода је добивање математичких модела процеса обраде односно функција обрадивости. Функције обрадивости су математички модели којима се описује узајамна зависност улазних и излазних параметара процеса обраде и представљају апроксимацију стварног облика функције процеса [14].

Комплексним методама утврђују се зависности функција обрадивости и параметара обраде (постојаност алата T , дубина резања a , корак S , брзине резања V итд.), као што су функције чији је основни облик за [14]:

- 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 [12].

4.4 Одређивање универзалне обрадивости

Обрадивост материјала дефинише се као лакоћа обраде материјала различитим алатима и условима у оквиру економских режима. Као општа дефиниција обрадивости материјала користи се: највеће вредности обрадивости су код оних материјала са најмањим силама резања, вибрације, хабање алата и храпавости површине. Циљ испитивања обрадивости је проналажење оптималног режима обраде материјала и ефикасно управљање поступком резања. Побољшање постојећих технологија и развој нових технологија резања кроз експериментална истраживања су у току задаци за истраживаче [11].

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.

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.

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:

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

Где су:

K_i^{KO} - вектор i критеријума;

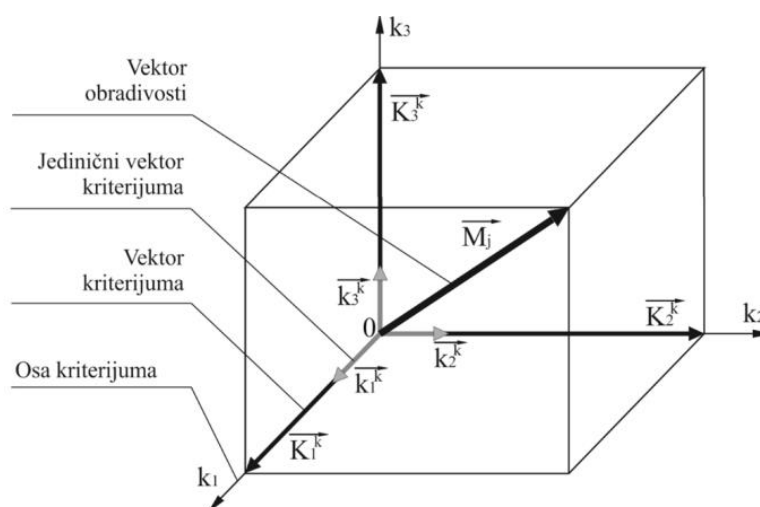
KO – симбол критеријума;

K_i - скаларна вредност параметра i критеријума;

k_i^{ko} - јединични вектор i критеријума;

Вектор обрадивости представља векторски збир вектора критеријума (слика 4.5) и дат је релацијом [14]:

$$\overrightarrow{M_j} = \sum_{i=1}^n \overrightarrow{K_i^{KO}}$$



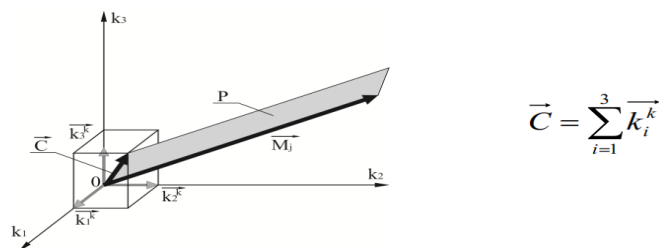
Слика 4.5. Вектор обрадивости у правоуглом координатном систему [15]

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.

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 4.6). 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 [15].

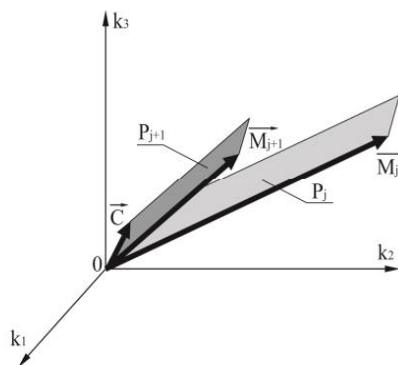


Слика 4.6. Јединични вектор критеријума обрадивости [15]

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 [15].

Анализа обрадивости може се спровести и за више материјала, што није случај код индексне методе испитивања обрадивости (слика 4.7). 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 4.7. Анализа обрадивости за више материјала [15]

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 [15]:

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

4.5 Индекс обрадивости

Упоређивањем величина различитих параметара могуће је преко индекса обрадивости вршити поређење различитих материјала. Обрадивост оваквог прилаза поређењу материјала по обрадивости лежи у зависности лакоће обраде од величине ових параметара. Према томе обрадивост материјала резањем се може дефинисати преко:

- Постојаност алата;
- Отпор резања;
- Температура резања;
- Параметри храпавости обрађене површине;
- Економична брзина резања
- Трошкови обраде
- Стања материјала у површинским слојевима предмета обраде [16]

Индекс обрадивости два материјала даје се као однос њихових параметара усвојених за меру обрадивости што се може приказати релацијом:

$$I_i = (P_i / P_o) \cdot 100 \%,$$

Где су:

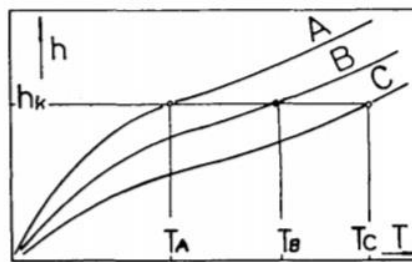
I_i – индекс обрадивости испитаног материјала;

P_i – параметар обрадивости (постојаност алата, отпори резања...) испитаног материјала, при одређеном степену иступљености алата;

P_o – параметар обрадивости референтног материјала; [16]

За најпотпуније дефинисање обрадивости користи се постојаност алата до које се долази експерименталним путем било праћењем развоја процеса хабања резног клина преко изабраног параметра хабања (крива хабања), било мерењем отпорности на хабање при различитим степенима похабаности алата.

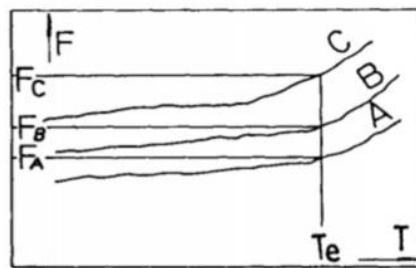
На основу добијених кривих хабања различитих материјала при константним условима обраде индекс обрадивости се може одредити преко постојаности алата за одговарајућу вредност критичне постојаности алата (слика 4.8) [16].



Слика 4.8. Криве хабања различитих материјала [16]

$$I_{OA} = T_{KA}/T_{KC} \text{ и } I_{OB} = T_{KB}/T_{KC}$$

Очигледно је да индекс обрадивости формиран на овај начин зависи од критеријума похабаности алата. Идеја о одређивању обрадивости материјала мерењем отпора резања заснива се на разликама које постоје у зависностима $F_i = f(T)$ за различите материјале обрађиване при непромењеним осталим условима обраде (слика 4.9).



Слика 4.9. Отпори резања [16]

За одређен степен постојаности алата, или нов алат, могуће је исказати индексе обрадивости материјала:

$$I_A = F_{iA}/F_{iC}$$

$$I_B = F_{iB}/F_{iC}$$

$$I_C = 1$$

За коришћење овог прилаза потребно је познавати и везу $F_i = f(h)$.

4.6 Испитивање физичких својства предмета обраде

Неке од физичких карактеристика које утичу на обрадивост материјала су [17]:

- **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.

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 [17].

4.7 Квалитет обрађене површине

Површине машинских делова никада не могу бити идеално глатке, оне увек имају микронеравнине у облику брегова, које настају као последица обраде.

Квалитет обрађених површина у великој мери утиче на радну способност машинских делова. Неравнине на површини машинског дела не могу се избећи јер настају као последица примене одговарајућег поступка израде.

Према степену неправилности одређује се квалитет обрађене површине који утиче на смањење трења код клизних површина, спречавање појаве концентрације напона, херметичност, отпорност на корозију и коначно естетски изглед производа. За одређену површину се у односу на њену функцију дефинише оптималан квалитет обраде, јер се захтевима за финије обрађеним површинама поскупљује производња. Уколико се обрађена површина у попречном пресеку увећа могу да се уоче микрогеометријске неправилности површине у односу на геометријски идеално равну површину [18].

Квалитет обрађених површина утиче на:

- смањење трења код клизних површина
- спречавање појаве концентрације напона
- херметичност
- отпорност на корозију
- естетски изглед производа

За одређену површину се у односу на њену функцију дефинише оптималан квалитет обраде.

Квалитет обрађене површине најчешће се идентификује са храпавошћу површине која настаје као резултат обраде и чије се карактеристике одређују мерењем параметара профила храпавости.

Квалитативна метода контроле површинске храпавости заснована је на поређењу обрађених површина са еталоном.

Квантитативна метода контроле је заснована на мерењу микрогеометрије специјалним прибором.

Квалитет обрађене површине зависи од [18]:

- 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.

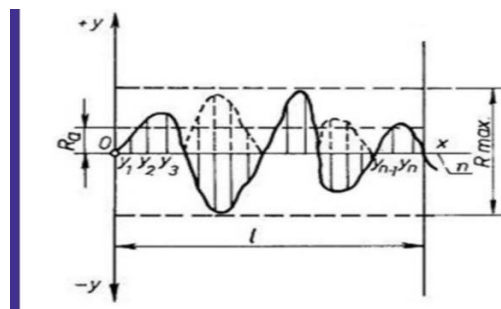
Дубина резања a , mm је вредност дебљине слоја материјала који се уклања у процесу резања, одређена растојањем обрађиване (1) и обрађене површине (2) [19].

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 [19].

Брзина резања v , mm/min v , m/s (брушење) је пређени пут главне резне ивице алата у јединици времена [19].

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

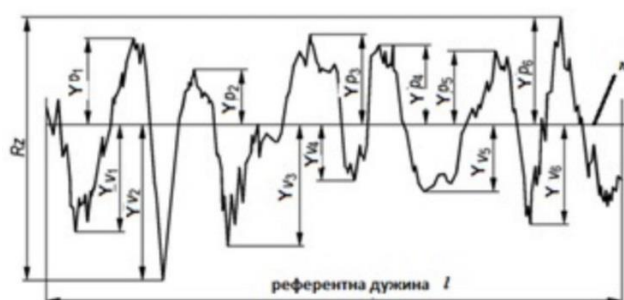


Слика 4.10. Храпавост површине [18]

Средње аритметичко одступање од средње линије профила - R_a (слика 4.10) је средња аритметичка вредност одступања свих тачака ефективног слоја ($y_1, y_2, \dots, y_n$) од средње линије профила у границама референтне дужине [19].

Максимална висина неравнина – R_{max} (слика 4.10) 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 4.11) је разлика средњих аритметичких вредности пет највиших и пет најнижих тачака профила у границама референтне дужине [19].



Слика 4.11. Средња висина неравнина [18]

Класе површинске храпавости

Класе површинске храпавости се одређују на основу средње аритметичка вредност одступања. Мањи број показује финији квалитет обрађене површине. Класе храпавости су приказане у следећој табели:

$R_a \text{ max}$ (μm)	Број класе храпавости површина
0,025	N1
0,050	N2
0,1	N3
0,2	N4
0,4	N5
0,8	N6
1,6	N7
3,2	N8

Табела 4.1. Класе храпавости [18]

5. Преглед и анализа радова из области обрадивости бушењем полимерних композита

У оквиру обог поглавља рада извршена је анализа неколико радова из области експерименталних испитивања која су имала за циљ одређивања обрадивости бушењем полимерних материјала, односно полимерних композита. Испитивањима је утврђиван утицај режима обраде на квалитет обрађене површине, хабање алата, могућност високобрзинске обраде, утицај различитих превлака на алатима, могућност смањења раслојавања, итд.

У испитивањима приказаним у раду [20] циљ је био анализа оштећења која настају при бушењу композита угљеник-угљеник.

Композити угљеник-угљеник су јединствени материјали који се састоје од угљеничних влакана уграђених у угљеничну матрицу. Бушење композита угљеник-угљеник је тешко изводити због анизотропности, високе специфичне крутости и кртости, нехомогене унутрашње структуре композита и велике абразивности њихових ојачавајућих састојака. Бушење овог материјала обично најчешће доводи до недостатака у обрадак и врло брзим развојем хабања алата за бушење. Дефекти настају изслед не одговарајућих параметара бушења или хабања алата. У раду су прво детаљно анализирани главни недостаци - дефекти настали при бушењу композита угљеник-угљеник. Друго, појава извлачења и пуцања влакана дефинисани су у раду као дефекти обраде бушењем. Експерименти су изведени помоћу конвенционалних бургија, а резултати показују да су структуре материјала, спојеви и брзине резања најзначајнији фактори који доприносе појави ових дефеката.

Обрадак који је коришћен у експерименту у раду [20] је композит угљеник-угљеник (C-C) добијен пресовањем. Предформа од угљеничних влакана израђена је методом ткања. Употребљено угљенично влакно је T300. Добијена дебљина обратка је 6 mm. Однос дебљине тканог влакна и нетканог материјала је око 1: 3. Запремински удео влакана је око 25%. Проценат шупљина је око 10%, а густина око $1,73 \text{ g/cm}^3$. За импрегнацију угљеничних влакана коришћен је поступак *CVI (Chemical vapor infiltration)* са угљоводоничним гасом. Механичка својства обратка приказана су у табели 5.1 [20].

Затезна чврстоћа, <i>MPa</i>	Аксијални правац Радијални правац	58,9 89,8
Чврстоћана притисак, <i>MPa</i>	Аксијални правац Радијални правац	130 212
Интерламирана чврстоћа на смицање, <i>MPa</i>		14,2

Табела 5.1. Механичка својства обратка [20]

Експериментална испитивања су реализована на CNC троосном обрадном центру YHVT-850. Пречник бургије је био 6 mm. Материјал бургије за бушење је тврди метал у квалитету K40. Угао врха је 160° , угао завојнице је 40° , а угао нагиба 120° . Аксијална сила резања је мерена помоћу Кистлеровог динамометра. Сигнали силе се преносе на

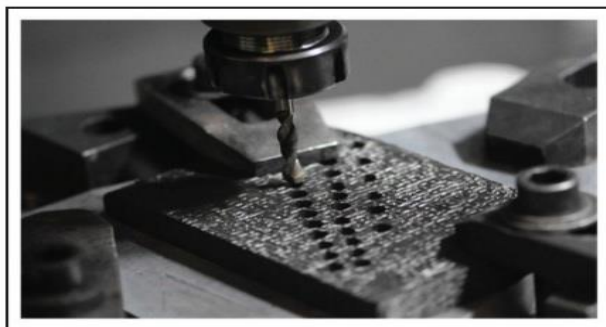
рачунар и анализа је вршена помоћу софтвера DEWEsoft. За процену дефеката коришћене су две методе: оптичка микроскопија и СТ. Оптичка микроскопија је вршена помоћу микроскопа Leica S6D. СТ инспекција је вршена коришћењем индустријског метрولوшког СТ система са рендгенским извором од 120 кV, минималном величином жижне тачке од 2,5 μm и равним детектором са 1024 x 1024 пиксела на 8 бита.

Параметри бушења дати су у табели 5.2.

Предмет	Параметри
Брзина резања, m/min	56.55; 75.40; 94.25; 113.10
Брзина помоћног кретања, mm/min	30; 60; 90; 120
Пречник бургије, mm	Ø 6
Режим хлађења	Суво резање

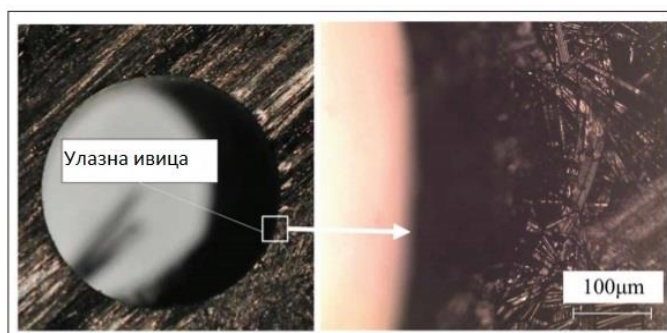
Табела 5.2. Параметри бушења [20]

На слици 5.1 је приказан поступак бушења узорака.



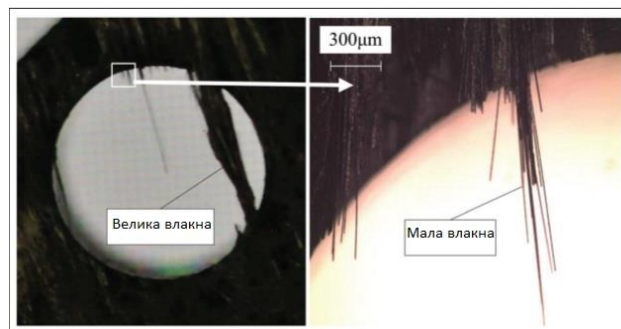
Слика 5.1. Поступак бушења [20]

Све улазне и излазне ивице избушених рупа прво се прегледају помоћу микроскопа Leica S6D. Резултати инспекције показују да се на улазним ивицама рупа налази само мало влакана. Сва влакна на улазним ивицама мања су од 50 μm , као што се види на слици 5.2.



Слика 5.2. Изглед влакна на улазној ивици [20]

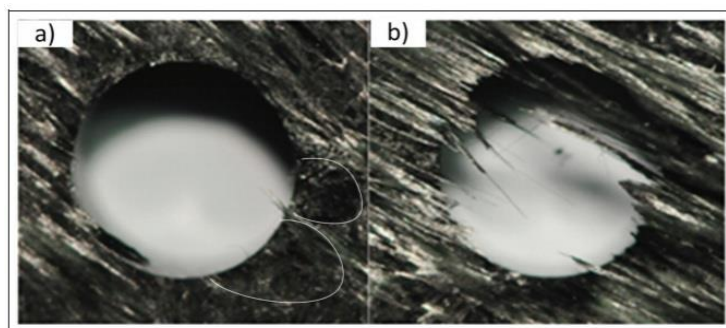
Ова врста влакана нема утицај на могући склоп и функцију дела и могу се прихватити у индустрији. Међутим, за разлику од улазних ивица, многа извучених влакана постоје на излазним ивицама рупа, као што је приказано на слици 5.3.



Слика 5.3. Изглед влакна на излазној ивици [20]

Може се видети да се велика и мала извучена влакна јављају заједно.

До кидања нетканог материјала и дробљења матрице долази увек заједно, као што је приказано на слици 5.4.



Слика 5.4. Дефекти избушене рупе: (а) дробљење матрице и (б) кидање нетканог текстила [20]

Слика 5.4 показује да се фактори пуцања влакана повећавају са повећањем брзине помоћног кретања и брзине резања. Резултати указују да је повећање брзине помоћног кретања главни фактор који узрокује пуцање влакана код бушеним С-С композитима. Главни разлог је што се аксијална сила резања повећава са повећањем брзине помоћног кретања када се брзина резања не мења. Када је брзина помоћног кретања веома мала, аксијална сила резања је мала да би савладала чврстоћу слоја при бушењу. Због тога се у овом случају пукотине тешко шире, а пуцање влакана је нежно. Супротно томе, када се зада велика брзина помоћног кретања, аксијална сила резања ће се значајно повећати, а настале пукотине ће бити велике. У овом случају, након дробљења матрице, долази до великог кидања влакана.

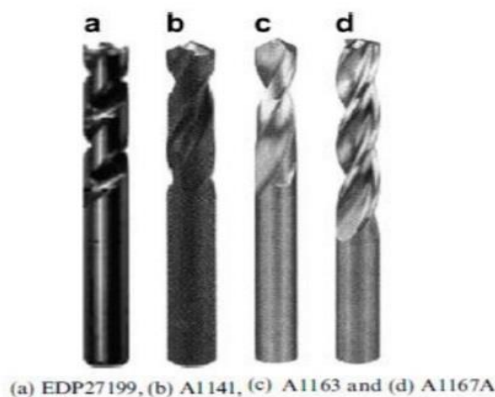
Слика 5.5 показује да постоје шупљине различитих величина распоређених случајно на зиду рупе. Ове шупљине нису настале у процесу бушења већ у припреми С-С композита.



Слика 5.5. *Површина бушене рупе [20]*

У експерименталним испитивањима у раду [21] коришћен је композит са епоксидном смолом ојачан стакленим влакнима. Произведен је ручним полагањем, а месени удео влакна је око 50%.

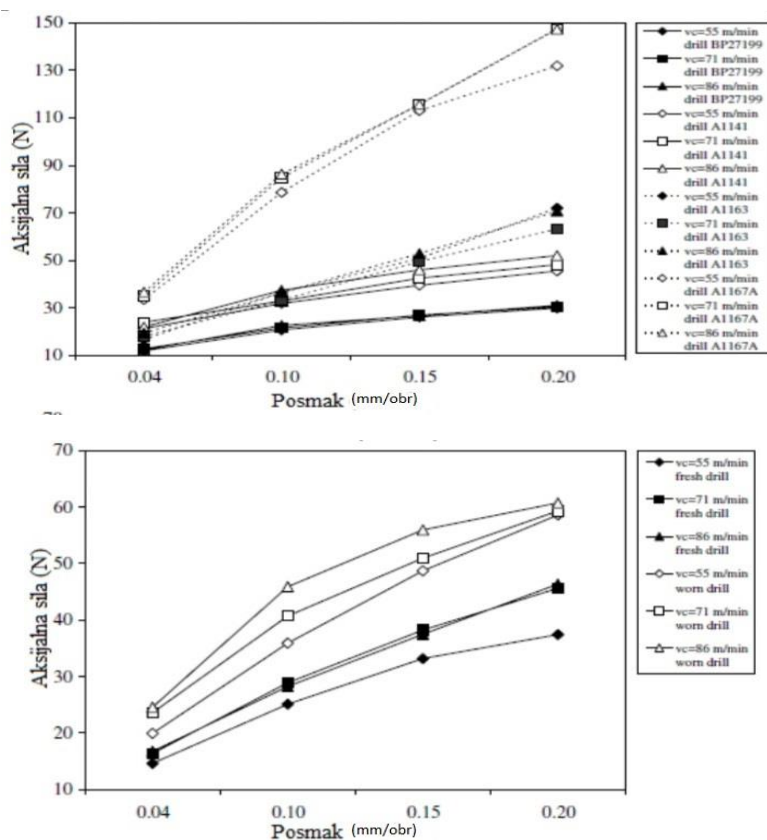
Циљ испитивања у овом експерименту је утврђивање утицаја геометрије алата на аксијалну силу резања и раслојавање. Испитивање је спроведено са 4 бургије различите геометрије од различитих материјала, слика 5.6 [21].



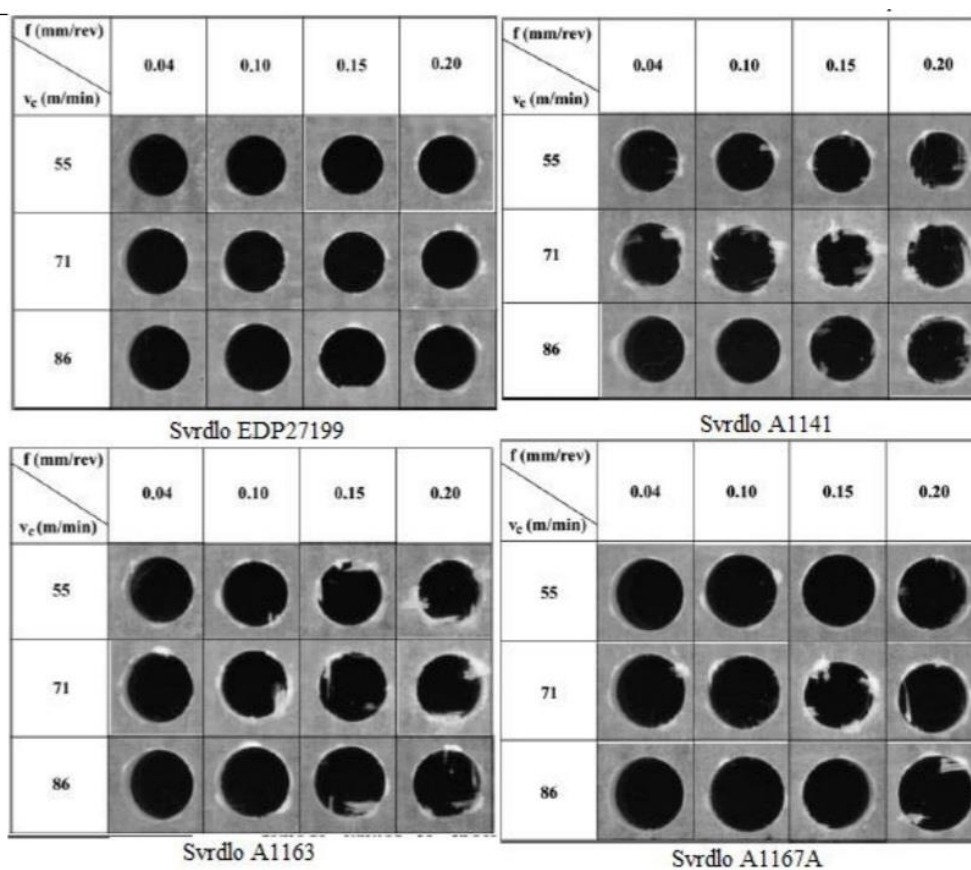
Слика 5.6. *Бургије коришћене у испитивањима [21]*

На слици 5.6 приказан је утицај корака и брзине резања на аксијалну силу резања, као и утицај похабаности алата на исту. Уочено је да аксијална сила резања расте како се повећава корак, док је утицај брзине резања мали. Такође је уочен значајан утицај геометрије алата на аксијалну силу резања. Најмања сила резања је приликом бушења бургијом а) EDP27199, док је највећа забележена код бушења са бургијом d) A1167A. Стручњаци сматрају да је то због тога што резање почиње на периферији па нема значајне пластичне деформације у оси бургије где је брзина резања 0, као код класичне бургије.

На слици 5.7 се такође може видети утицај корака и брзине резања на раслојавање (бели делови око рупа) код обраде са различитим геометријама бургије. Може се закључити да на раслојавање највећи утицај има корак, односно да са повећањем корака расте и величина раслојавања. Најмање раслојавање забележено је код рупа бушених бургијом а) EDP27199, са којом је приликом бушења остварена најмања аксијална сила. Нешто веће раслојавање је остварено обрадом са бургијом d) A1167A, што је било својеврсно изненађење због тога што је приликом бушења са том бургијом забележена највећа вредност аксијалне силе резања. Може се закључити да нема директне везе између вредности аксијалне силе резања и раслојавања.

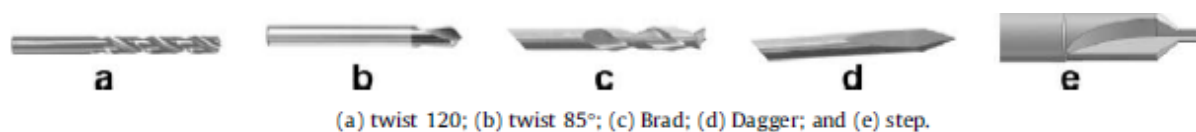


Слика 5.7. Утицај корака, брзине резања и похабаности алата на аксијалну силу [21]



Слика 5.8. Оштећење на улазним странама бушених рупа [21]

У другом испитивању у оквиру овог рада осим геометрије бургија, одређиван је и утицај различитих корака на раслојавање, аксијалну силу резања и квалитет површине рупе. Коришћено је пет различитих бургија које су приказане на слици 5.9.



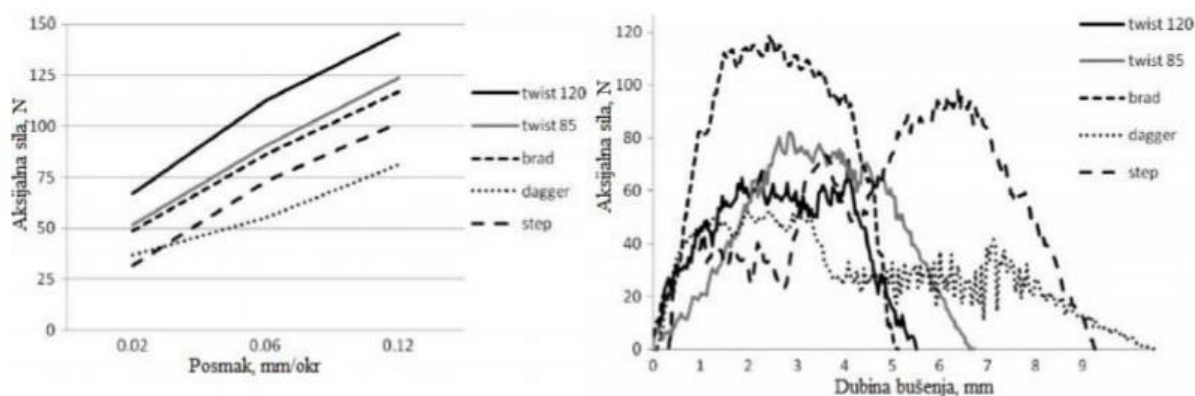
Слика 5.9. Бургије коришћене у експерименту [21]

Параметри обраде приказани су у табели 5.3.

Пречник бургије, mm	Брзина резања, m/min	Број обртаја главног вретена, min^{-1}	Посмак, mm/obr	Брзина помоћног кретања, mm/min
6	53	2800	0,02	56
			0,06	168
			0,12	336

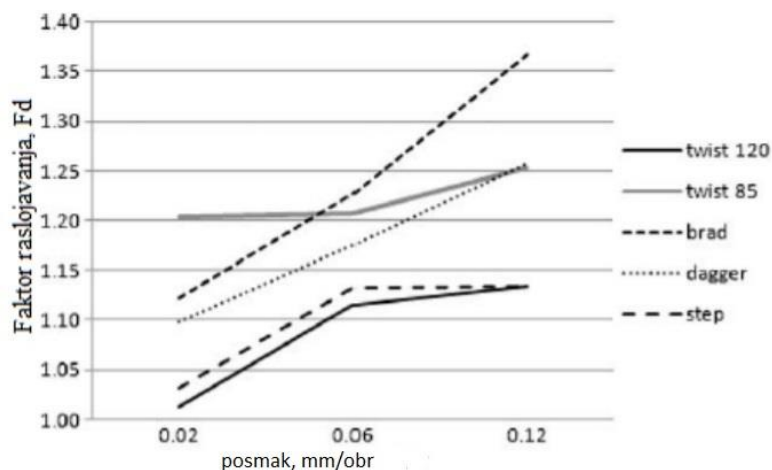
Табела 5.3. Параметри обраде [21]

Испитани узорци израђени су од композитног материјала комерцијалне ознаке CC1 60 ET 443. Дебљина узорка била је 4 mm, састављена од 24 слоја. Очвршћавање узорака је било под притиском од 300 kPa на температури 130°C у трајању од један сат. Као што је очекивано, највећи утицај на вредност аксијалне силе резања има посмак, односно вредност аксијалне силе резања расте са порастом посмака. Испитивања су показала да је температура алата виша код мањих посмака, конкретно након 6 избушених рупа већим посмацима температура бургије је била 50°C док је код мањих посмака износила 80°C. На слици 5.10 поразан је утицај посмака на аксијалну силу резања.



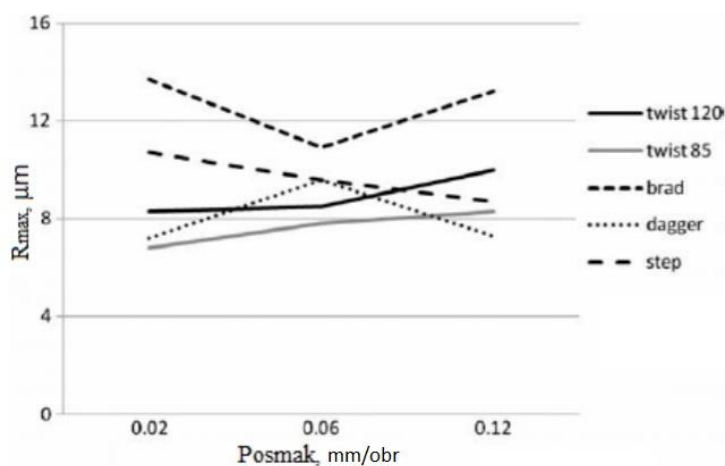
Слика 5.10. Зависност аксијалне силе резања од посмака и дубине бушења [21]

Експериментом је утврђен тренд пораста фактора раслојавања са повећањем посмака, што је приказано на слици 58. Фактор раслојавања F_d дефинисан је као $F_d = \frac{D_{max}}{D}$, где D преставља пречник отвора, а D_{max} најудаљенију тачку раслојавања од средишта отвора. Уочено је да се обрада са класичним бургијама са углом врха 120°, за које је аксијална сила резања била највећа, имају најмање раслојавање. То значи да аксијална сила резања и раслојавање нису нужно директно повезани.



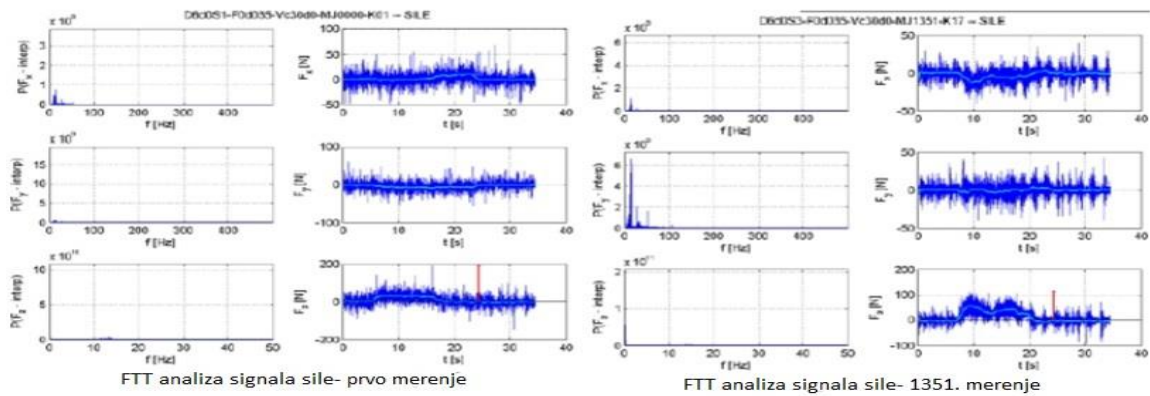
Слика 5.11. Утицај посмака на фактор раслојавања [21]

Дијаграм на слици 5.12 приказује зависност квалитета површине рупе од посмака. Отвори бушени обичним спиралним бургијама имали су најмању храпавост површине. Закључак је да се лошији квалитет обрађене површине постиже обрадом на средњим вредностима посмака, али утицај посмака на квалитет рупе није велики [21].

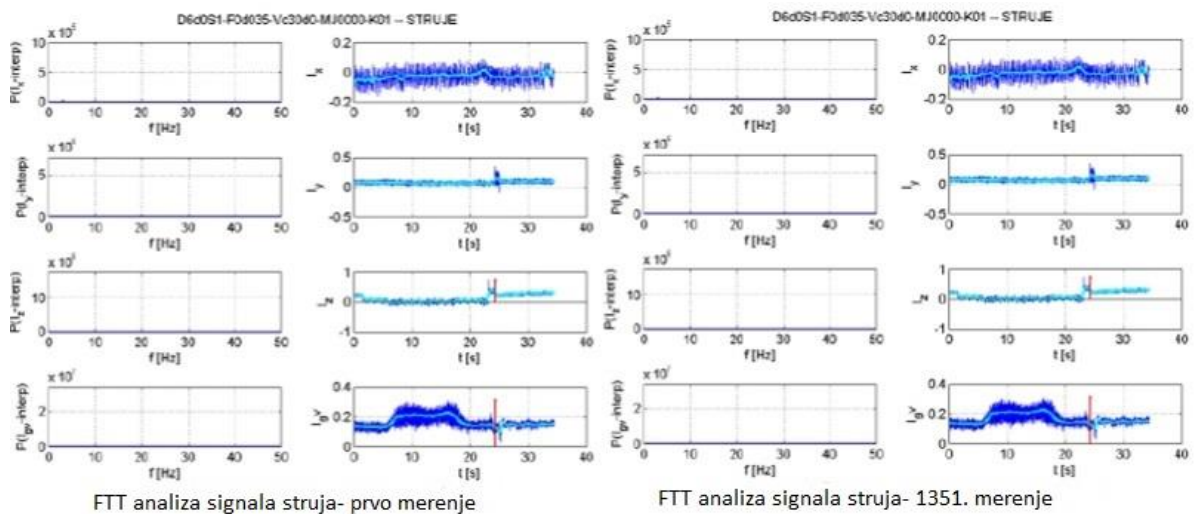


Слика 5.12. Зависност квалитета рупе од посмака [21]

У раду [23] испитивања су имала за циљ истраживање утицаја параметра обраде и степена похабаности бургије на раслојавање током бушења композита. Током екперимента снимани су сигнали струје помоћног и главних мотора, силе резања (X, Y, Z ose) и вибрације (X, Y, Z ose). Коришћен је сензор акутичне емисије и систем са видео камером. Коришћени алат је спитална бургија произвођача Walter Titeх, модел A1163. Испитани узорци су били израђени од полимерног композита ојачаног стакленим влакнима. Најпре је изведен прелиминарни експеримент са циљем утврђивања параметра за које је раслојавање најмање, пошто је при бушењу са препорученим параметрима раслојавање било неприхватљиво велико. Најмање раслојавање је било при брзини резања 30 m/min и посмаку 0,035 mm/obr, па су ти параметри одабрани за главни експеримент. У главном експерименту вршено је бушење током којег су снимани директни и индиректни сигнали са циљем издвајања значајних осетљивих на хабање алата. На сликама 5.13 и 5.14 приказане су неки издвојени значајни сигнали силе и струје.

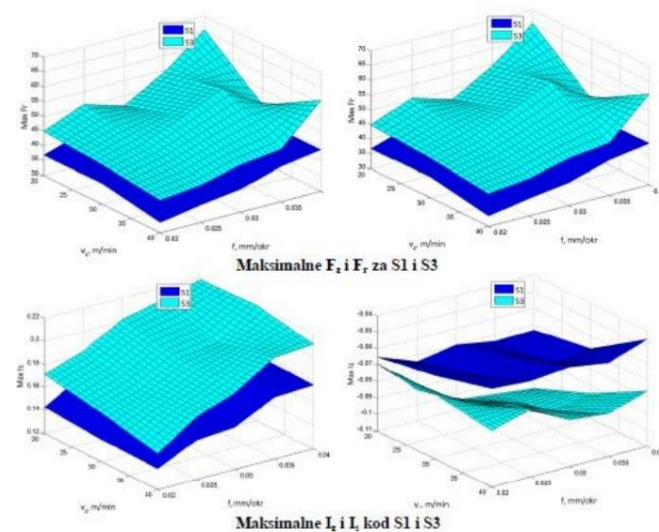


Слика 5.13. Сигнали сила [23]

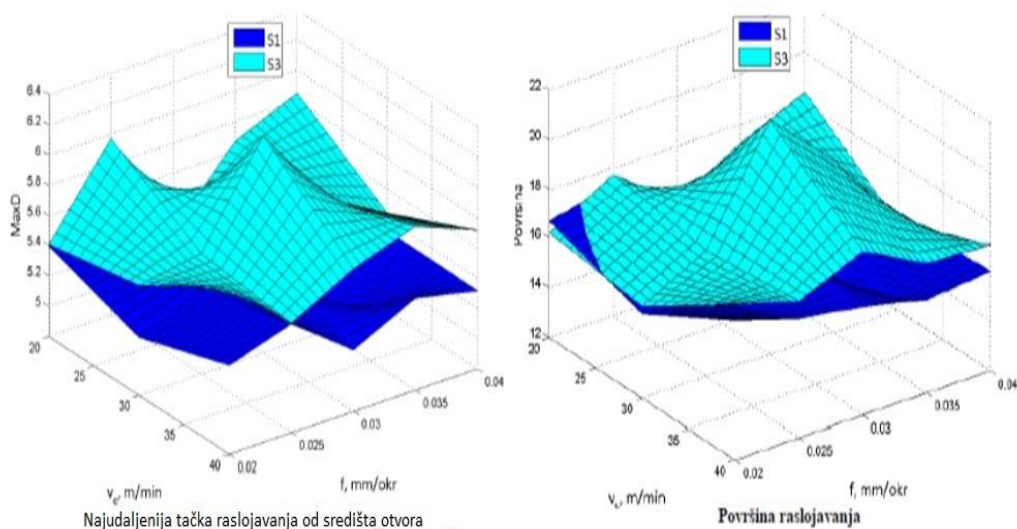


Слика 5.14. Сигнали струје [23]

Након главног експеримента, спроведен је још један експеримент, чији су резултати упоређени са оним из прелиминарног експеримента. Као што се види на 3D дијаграмима (слика 5.15) површине се нигде не преклапају, односно струје и силе су веће након главног експеримента него пре њега, што је и логично због хабања бургије.



Слика 5.15. Поређење сила и струје пре и после главног експеримента [23]



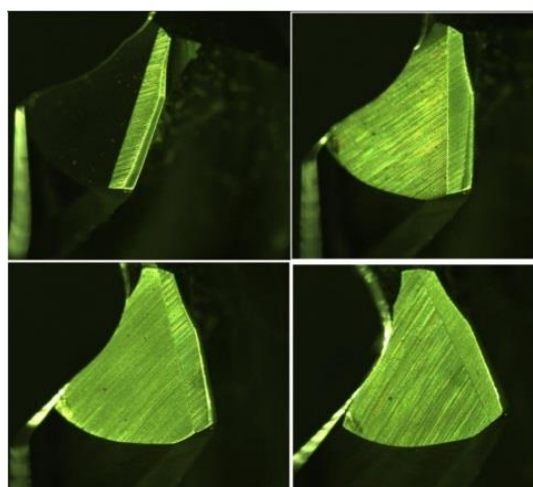
Слика 5.16. Утицај брзине резања и посмака на раслојавање [23]

Закључак је тај да се раслојавање показало као нелинеаран процес. Такође се показало да постоји утицај промене похабаности алата на раслојавање које је израженије при мањим посмацима, па је посмак препознат као утицајан параметар обраде на величину раслојавања.

У експериментима реализованим у раду [24] као испитивани материјал коришћен је узорак исечен од композита са полимерном матрицом (незасићена полиестерска смола) ојачана стакленим влакнима. Узорак је димензија 180x100x10 mm, са уделом од 60%. Композитна цев је направљена поступком намотавања континуалног влакна на ротирајући калуп.

За експеримент је коришћена бургија од тврдог метала, тип A1163, произвођача Walter Titex. Пречник бургије је 6 mm, угао врха 118°. Испитана су 4 степена похабаности бургије. Коришћене су 4 брзине резања и 4 брзине помоћног кретања, дајући 16 различитих комбинација. Укупно је постављено 64 експеримента, односно свака од 16 комбинација је поновљена за сва 4 нивоа похабаности алата (S1, S2, S3 и S4).

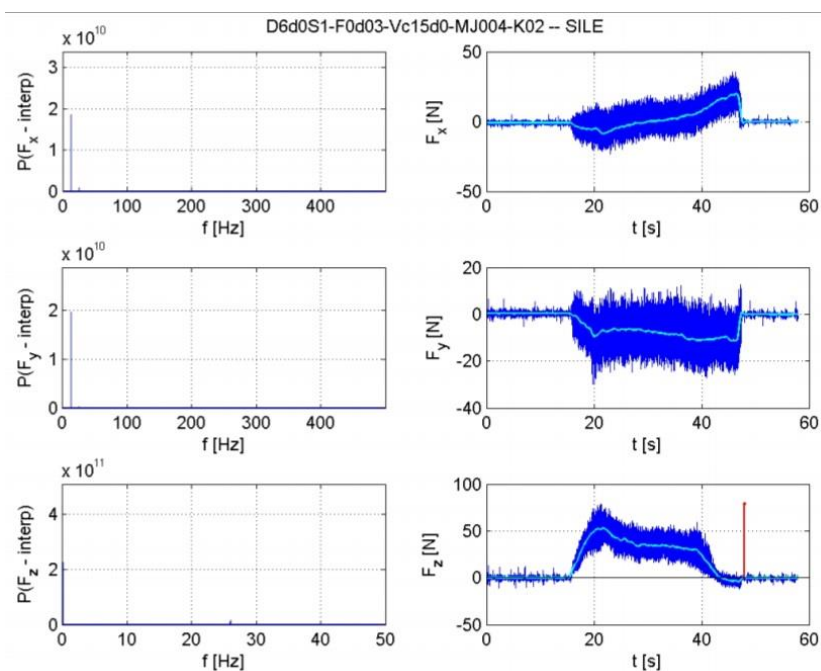
Хабање је одређено директно користећи фотографије сечива бургије.



Слика 5.17. Изглед резне оштрице [24]

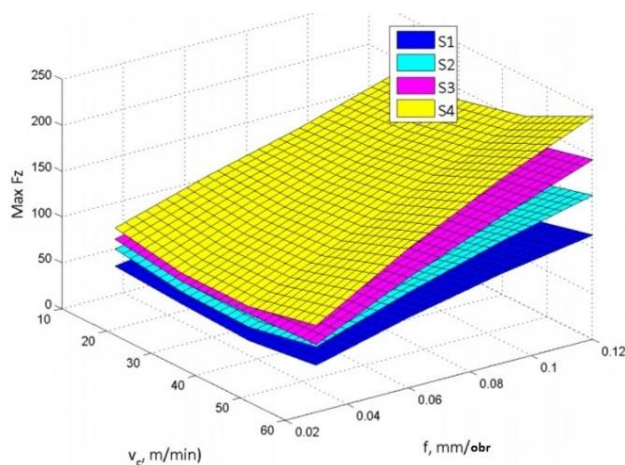
Након тога, фотографије резног врха бургије са одређеним степеном хабања повезане су са референтном равнима и референтним координатним системом, и исцртане су ивице зоне хабања. Тиме су добијене карактеристичне криве хабања за сваки степен похабаности алата. Прегледом фотографија откривено је да је доминантан облик хабања било хабање леђне површине сечива. Поред хабања леђне површине алата, примећено је и заобљавање сечива. У даљем разматрању у раду коришћена је средња и максимална ширине похабаног појаса леђне површине сечива.

Сигнали сила резања снимљени су у правцима X, Y и Z осе. Добијени сигнали су анализирани у временском и фреквенцијском опсегу. Као што се и очекивало, доминантна је била аксијална сила резања F_z . На слици 5.18 приказани су примери сила резања сигнала у фреквенцији и временском опсегу.



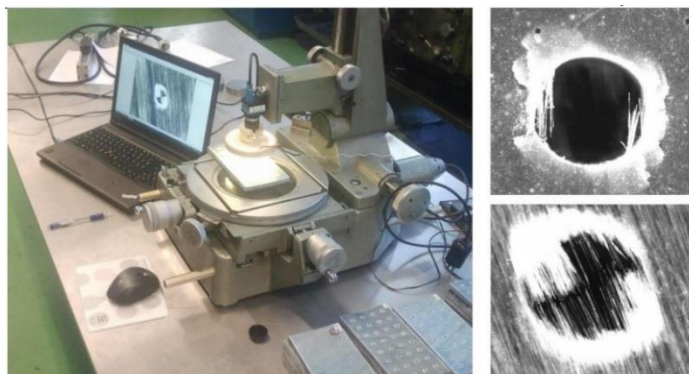
Слика 5.18. Сигнали сила резања у фреквентном и временском домену [24]

Као што се може видети са слике 5.19, постоји јасна зависност између степена похабаности бургије и повећања аксијалне силе резања (F_z), што је и очекивано.



Слика 5.19. Зависност максималне величине аксијалне силе од помака и брзине резања [24]

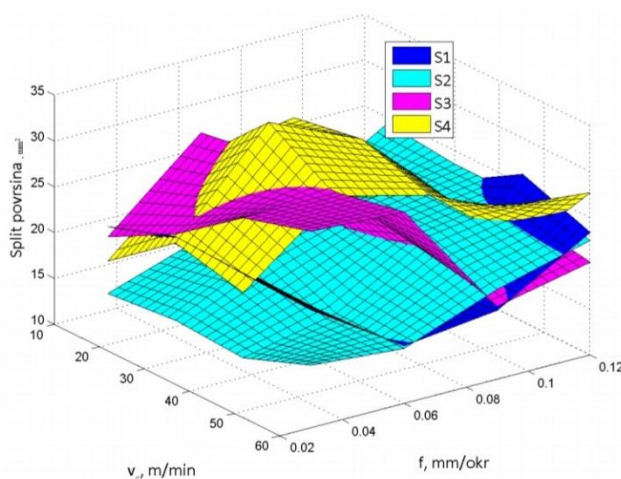
Раслојавање је утврђивано на основу фотографија отвора направљених након главног експеримента. Отвори су фотографисани на микроскопу са камером. Поступак снимања приказан је на слици 5.20.



Слика 5.20. Изглед отвора са улазне и излазне стране [24]

Након прикупљања фотографија, уследила је обрада у Catia V5R20. Параметри који одређују количину раслојавања су површина раслојавања и најудаљенија тачка на кривој раслојавања у односу на средиште отвора.

Највећи утицај хабања бургије видљив је при нижим и средњим брзинама помоћног кретања, кроз готово читав опсег брзина резања, при чему се види да су површине слојева значајно мање за степен хабања S1 и S2 у поређењу са S3 и S4. Добијена је максимална величина површине слоја за степен хабања S4 при средњим брзинама и помацима сечења. За степен хабања S1 и S2 забележен је пораст раслојавања са повећањем офсета, док је утицај брзине резања релативно мали. Овај тренд није примећен за нивое хабања S3 и S4 где се примећују изразито нелинеарне зависности раслојавања од параметара обраде. Међутим, приметно је да је раслојавање при овим степенима хабања барем при већим брзинама сечерезања и већим помацима.



Слика 5.21. Зависност најудаљеније тачке раслојавања од средишта отвора од помака и брзине резања [24]

6. Закључак

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

Конкретно, 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.

Први циљ овог рада је био да се детаљно приближе и опишу најважнији параметри преко којих се може одредити обрадивост предмета обраде. Постојаност алата, температура резања, квалитет обрађене површине су само неки од њих и били су тема раличитих иситивања.

Други циљ овог рада јесте да опише и дефинише обрадивост бушењем и свих операција које ту спадају, као и обрадивост разних полимерних материјала који су детаљно описани и анализирани.

На основу анализираних експеримената и резултата који су добијени у истим може се закључити се раслојавање показало као нелинеаран процес. Затим, да се фактори пуцања влакана повећавају са повећањем брзине додавања и брзине резања. Уочљиво је да аксијална сила расте како се повећава корак, док је утицај брзине резања мали. Такође је уочљив утицај геометрије алата на аксијалну силу. Најмања сила била је потребна приликом бушења бургијом EDP27119, док је највећа забележена код бушења са бургијом A1167A. Најмање раслојавање забележено је код рупа бушених бургијом EDP27119, са којом је приликом бушења остварена најмања аксијална сила. Други најбољи резултат у погледу минималног износа раслојавања остварен је бургијом A1167A, што је било својеврсно изненађење због тога што је приликом бушења са том бургијом забележен највећи износ аксијалне силе. На основу тога може се закључили да нема директне везе између износа аксијалне силе и раслојавања.

Литература

1. М. Шерцер, Б. Крижан, Р. Басан, Конструирање полимерних производа, Факултет стројарства и бродоградње, Свеучилиште у Загребу, Технички факултет, Свеучилиште у Ријеци, јун 2020
2. https://nastavnimaterijalvtsz.files.wordpress.com/2018/12/predavanjepolimerni_materijali.pdf, јун 2020
3. Домафој Хорват, *Полимерни изолацијски материјали*, Завршни рад, Факултет електротехнике, рачунарства и информацијских технологија у Осјеку, јун 2020
4. Богдан Недић, Владислав Ђукић, Технологија обраде пластичних маса, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, јун 2020.
5. Лазих М., Недић Б., Технологија обраде метала резањем, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, јул 2020
6. Рогић А., Чатић И., Ињекцијско прашење полимера, Друштво пластичара и гумараца Загреб 1996, јул 2020.
7. Игор Барић, *Обрада полимерних материјала одвајањем честица*, Завршни рад, Факултет стројарства и бродоградње у Загребу, јул 2020.
8. <https://www.mikroprinc.com/sr/proizvodi/vijci-plasticni>, јул 2020.
9. <https://www.savokusic.com/blog/basta-kuca-stan/od-zavrtnja-do-zavarivanja/zakivanje-pritezanje-zakivaka-zavrtnji>, јул 2020.
10. Tomáš Kroupa, Obrábění kompozitních materiálů, Завршни рад, Универзитет у Западној Чешкој, Машински факултет, септембар 2020
11. http://mfbl.com/upload/documents/laboratorije/laboratorija%20za%20tehnologiju%20obrade%20rezanjem%20i%20obradne%20sisteme/Sredanovic_OBRADIVOST.pdf, септембар 2020.
12. Изидор Деметер, *Утицај материјала обрадкa на хрпавост обрађене површине код токарења*, Завршни рад, Факултет стројарства и бродоградње у Загребу, септембар 2020
13. <https://struganje.rs/2018/12/12/obradivost-materijala/>, септембар 2020
14. Глобочки Лакић Г. Обрада метала резањем – теорија, моделирање и симулација, Машински факултет Бања Лука 2010, септембар 2020.
15. Development of Mathematical Model of Universal Material Machinability, Глобочки Лакић Г., Средановић Б., Недић Б., Чича Ђ. Машински факултет Бања Лука, Машински факултет Крагујевац, септембар 2020.
16. Б. Ивковић, Трибологија у индустрији, Југословенско друштво за трибологију, Машински факултет, Крагујевац, 1988.
17. El-Hofy H., *Fundamentals of machining processes*, CRC Press, New York, 2014, септембар 2020
18. <https://tolerancije.wordpress.com/2011/01/08/толеранције-квалитета-површине/>, октобар 2020

19. Саша Д. Јовановић, Обрада метала резањем- теорија, моделирање, и симулација, Машински Факултет Бања Лука 2010, октобар 2020
20. Defect analysis in drilling needlepunched carbon–carbon composites perpendicular to nonwoven fabrics, Универзитет Сиан у Кини, новембар 2020
21. A.M.Abrao, J.C.Campos Rubio, P.E.Faria, J.P. Davim; The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite; 2007; Materials & Design, str.509-513, новембар 2020
22. Luis M. P. Durao, Joao M. R.S. Tavares, Victor C. de Albuquerque, Jorge F. S. Marques, Oscar N. G. Andrade, Drilling Damage in Composite Material, Materials, vol 7 (2004), 3802-3819, новембар 2020
23. Domagoj Lovrić: Utjecaj parametara obrade i trošenja svrdla na raslojavanje kompozitnih materijala, Diplomski rad, Fakultet Strojарstva i brodogradnje, Zagreb 2014, новембар 2020
24. Ivan Bartolin, Uticaj trošenja alata i parametara obrade na raslojavanje pri бушењу kompozitnih materijala, dplomski rad, Fakultet Strojарstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
25. Марко Раденковић , *Композитни материјали*, Завршни рад, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, новембар 2020
26. https://nastavnimaterijalvtsz.files.wordpress.com/2019/10/glava_14_2.pdf , новембар 2020