

Optimizacija tehnologije probijanja

Hajsok, Dino

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:041340>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

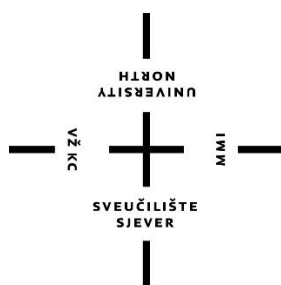
Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





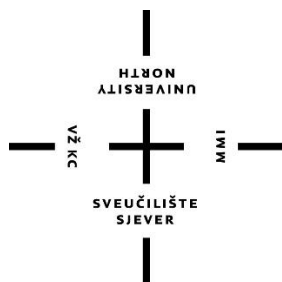
**Sveučilište
Sjever**

Diplomski rad br. 005/STR/2020

Optimizacija tehnologije probijanja

Dino Hajsok, 0910/336D

Varaždin, rujan 2020. godine



Sveučilište Sjever

Odjel za strojarstvo

Diplomski rad br. 005/STR/2020

Optimizacija tehnologije probijanja

Student

Dino Hajsok, 0910/336D

Mentor

Matija Bušić, doc. dr. sc.

Varaždin, rujan 2020. godine

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za strojarstvo		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Strojarsvo		
PRISTUPNIK	Dino Hajsok	MATIČNI BROJ	0910/336D
DATUM		KOLEGIJ	Suvremene proizvodne tehnologije
NASLOV RADA	Optimizacija tehnologije probijanja		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Punching technology optimization		
MENTOR	Matija Bušić	ZVANJE	Dr.sc.
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. Izv. prof. dr. sc. Sanja Šolić, predsjednica povjerenstva		
	2. doc.dr.sc. Matija Bušić, mentor, član		
	3. doc.dr.sc. Zlatko Botak, član		
	4. prof.dr.sc. Živko Kondić, rezervni član		
	5.		

Zadatak diplomskog rada

BROJ	005/STR/2020
OPIS	Pristupnik u diplomskom radu treba na temelju literaturnih podataka proučiti tehnologiju obrade materijala rezanjem bez odvajanja čestica. Potrebno je proučiti i opisati princip i faze postupka štancanja te opisati strojeve i pomoćne uređaje koji se koriste u štancanju. Postupak štancanja potrebno je podijeliti na sve podvrste i svaku detaljno obraditi uz skicirane prikaze mogućih oblika izradaka. Opisati alate i pojasniti odabir alata za štancanje određenog oblika proizvoda. Ustanoviti vrste materijala koji se mogu obrađivati štancanjem i utvrditi materijale iz kojih su izrađeni alati. U eksperimentalnom dijelu rada na odabranom proizvodu prikazati faze u optimizaciji obrade. Definirati vrstu materijala koji se obrađuje i odabir alata za obradu. Objasniti proces određivanja parametara obrade i optimizacije putanje alata prema zadanoj tehničkoj dokumentaciji. Detaljno objasniti rad u upravljačkom programu i izradu NC koda potrebnog za rad stroja prema prethodno određenoj tehnologiji. U zaključku dati vlastita razmišljanja na temelju iskustva dobivenog kroz provedbu eksperimentalnog dijela rada.

ZADATAK URUČEN	07. 07. 2020.	POTPIS MENTORA	M. Bušić
----------------	---------------	----------------	----------



Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Matiji Bušiću na prihvaćanju mentorstva, strpljenju, na konzultacijama i savjetima koji su omogućili da uspješno završim ovaj rad. Želio bih se zahvaliti prvenstveno svojim roditeljima, Božici i Damiru koji su mi bili bezuvjetna moralna i financijska podrška. Hvala i ostatku obitelji na svakom ohrabrenju i razgovoru.

Zahvaljujem se i kolegama iz tvrtke LCB tehnologija d.o.o. koji su često izdvajali svoje vrijeme za podučavanje novih znanja. Hvala i svim prijateljima i kolegama s kojima sam provodio vrijeme tijekom studentskih dana!

Posebno hvala djevojci Ines koja je uz mene bila u svakom trenutku i na svakoj riječi ohrabrenja, ljubavi i bezuvjetnoj podršci.

Sažetak

U radu je analiziran princip rada štanci kao alatnih strojeva te je proveden postupak optimizacije kod biranog proizvoda. Kao pomoć u proizvodnji korišten je računalni program *TruTops*, te je prikazan njegov detaljan opis i mogućnosti.

Prvi dio daje uvid u štančanje kao tehnologije u proizvodnji sa svim objašnjenim potrebnim parametrima. Detaljno se opisuju izabrani materijal za proizvod te štanca na kojoj se odvija sam proces probijanja, TRUMATIC 5000R.

U drugom dijelu detaljno se prolazi kroz izbor alata u praksi te se daju važni parametri koji su potrebni kod optimiziranja proizvodnje. Nakon alata detaljno su prikazani koraci kod obrade jednog proizvoda te je objašnjen proces optimizacije tehnologije štančanja tijekom izrade proizvoda.

Ključne riječi: Probijanje, probijač, matrica, optimizacija

Summary

In this thesis the work of punching machines as machine tools and the optimization procedure for the selected product are analysed. *TruTops* software was used to help with production and a detailed description of the interface and capabilities are given.

First part provides an insight into punching as a technology in production system with all the necessary parameters explained. The selected material for the product and the punch on which the punching process itself takes place, TRUMATIC 5000R, are described in detail.

The second part goes through a detailed selection of tools in practice and gives important parameters that are needed to optimize production. After the tools, the steps in processing a product are presented in detail and the most optimally selected procedures during processing are explained.

Keywords: Punching, Punch, Die, Optimization

Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
F_0	N	Teorijska sila rezanja
τ_m	N/mm ²	Maksimalna smična čvrstoća
A	mm ²	Rezna površina
l	mm	Duljina reza
s	mm	Debljina materijala
d	mm	Promjer alata
χ	-	Rezni faktor
a	mm	Duljina stranice alata
z	mm	Rezna zračnost
Z	mm	Ukupna zračnost
Spp_{linear}	mm/udarac	Linearni korak alata
$Spp_{circular}$	mm/udarac	Kružni korak alata
R_t	mm	Visina ostatka materijala

Sadržaj

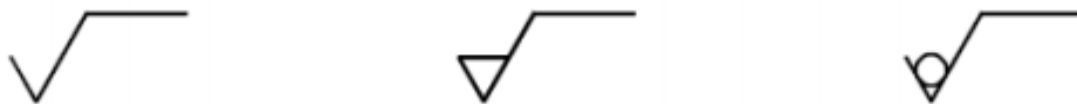
1.	Uvod.....	1
2.	Postupak štancanja	2
2.1.	Štancanje u industriji	3
2.2.	Podjela štanci.....	3
2.3.	Vrste štancanja	4
2.4.	Princip i faze štancanja.....	6
2.5.	Alati kod štancanja	7
3.	Materijal.....	9
3.1.	Materijal proizvoda	9
3.2.	Materijal matrice	9
3.3.	Materijal probijača	10
4.	Stroj.....	11
4.1.	Struktura stroja	11
4.1.1.	Linearno spremište alata	12
4.1.2.	Poklopac za ispadanje	13
4.2.	Dodatna oprema stroja.....	14
4.2.1.	Sheetmaster	14
4.3.	Sigurnost operatera.....	15
5.	Izbor alata.....	16
5.1.	Dijelovi alata za probijanje.....	16
5.2.	Probijač.....	16
5.2.1.	Vrste probijača	17
5.2.2.	Razina buke kod probijanja.....	18
5.3.	Matrica	19
5.4.	Svlakač	20
5.4.1.	„Presser foot“	20
5.5.	Održavanje alata	21
5.6.	Geometrija i vrste alata.....	22
6.	Proračuni	27
6.1.	Sila rezanja	27

6.1.1. Smična čvrstoća	28
6.1.2. Rezni faktor x	29
6.2. Rezna zračnost.....	30
6.3. Sjeckanje	31
6.3.1. Kvaliteta probijanja kod sjeckanja	33
7. Izrada proizvoda.....	35
7.1. Proizvod	35
7.2. Konstrukcijska rješenja	35
8. Optimizacija.....	37
8.1. TruTops	37
8.2. Tipovi datoteka.....	37
8.3. Korisničko sučelje računalnog programa	38
8.4. Prozor „Nest“	39
8.5. Prozor „Punch“.....	41
8.5.1. Optimizacija putanja alata.....	44
8.5.2. Optimizacija redoslijeda putanja alata	48
8.5.3. Optimizacija posljednje faze proizvodnje	54
9. Zaključak.....	56
10. Literatura.....	58

1. Uvod

Strojna obrada se dijeli na strojnu obradu bez i s odvajanjem čestica. Cilj je dolazak do gotovog proizvoda u zadanom vremenu, a da je sam proizvod odgovarajuće potrebne kvalitete. Osnovna misija svih alatnih strojeva je što efikasnija zamjena ljudskog rada s povećanjem ekonomičnosti, produktivnosti i najvažnije točnosti kod proizvodnje. U ovaj tip obrade spadaju: tokarenje, glodanje, bušenje, provlačenje, piljenje i brušenje.

Suprotno, obrada bez odvajanja čestica je način kod kojeg se polazni materijal mijenja u novi oblik s novim dimenzijama ili svojstvima bez izravne promjene mase i volumena. Obrade se dijele na plastično oblikovanje i obrada promjenom strukture. Ubrajaju se obrade poput kovanja, lijevanja, valjanja, ekstruzije i rezanja u koje direktno spada i štancanje.



Slika 1. Simboli za označavanje hrapavosti površine: svi postupci dozvoljeni (lijevo), obrada odvajanjem čestica (sredina), obrada bez odvajanja čestica (desno)

Rezanje spada u mehanički postupak kojim se odvaja dio obradka od cjeline djelomično ili u potpunosti. Odvajanje se provodi mehaničkim alatima u koje se ubrajaju škare, noževi, štanice i slični strojevi. Alat kojim se ručno ili na stroju obrađuje materijal naziva se rezni alat. Žigovi i matrice spadaju u alate za sječenje koji u direktnom dodiru odvajaju materijal bez odvajanja čestica pomoću oštrice koja se javlja u izvedbi klina.

2. Postupak štancanja

Pod štancanje podrazumijevaju se trajne deformacije ili postupci rezanja kao obrada bez odvajanja čestica. Strojevi koji obavljaju rad u ovoj tehnologiji nazivamo štancama, a one mogu preoblikovati, razdvajati ili spajati materijal, pa tako prema namjeni razlikujemo štanice za probijanje, savijanje, izrezivanje, vučenje i slično. Štanice su općeniti naziv za veliku grupu alatnih strojeva kod kojih se podrazumijeva korištenje specijalnih alata koji služe za samu obradu metala ili nemetala rezanjem ili oblikovanjem istih. Pri obradbi materijala s razdvajanjem iz plošnoga se materijala odvajaju proizvod ili otpadak.

Štancanje je više od probijanja provrta u trakama lima; štancanje može stvarati konture, formirati limove te izmijeniti površine. Probijanje dopušta cjelokupnu obradu dijelova, dok je tehnologija u cjelini brza, učinkovita, produktivna, a automatiziran proces nudi širok izbor mogućnosti.

Probijanje se smatra i reznim procesom, jednim prolazom dolazi se do dva lima, dok se do konture dolazi uzastopnim probijanjem alata po nekoj zatvorenoj konturi. Formiranje površina otvara nove dimenzije ove tehnologije, različiti posebni alati pretvaraju štancu u svestrani stroj s mogućnostima za utiskivanje, graviranje, tapkanje, savijanje i označavanje. [2]

Materijali koji se obrađuju štancanjem su najviše metali (čelik, aluminij), u ovome radu čelik oznake S280GD + Z275 te nemetali (koža, guma, tekstil, polimeri i slično). U polazni materijal tako spadaju metalni limovi u obliku platine, koluta, ploča ili trake. Platinom se smatra proizvod pravokutnog presjeka najmanje širine 150 mm, a najveće debljine 40 mm. Sposobnost rezanja čeličnih limova kod štancanja jest do 6 mm, dok je za veće debljine obavezno zagrijavanje materijala ili njegova posebna izvedba, a kod savijanja se kao maksimalna debljina uzima 100 mm.

Postupak samog procesa štancanja se odvija pomoću stroja, alata i sile pritiska, dok je zadaća stroja štancanje raznih oblika plašteva za npr. kutije i slične nepravilne oblike koji se ne mogu masovno oblikovati i proizvoditi drugim tehnologijama. Alat za štancanje djeluje najčešće na ravnu temeljnu ploču, a sam postupak može biti automatiziran ili još u rijetkim slučajevima ručan iako se takvi strojevi više ne koriste u današnjoj proizvodnji. [1]

2.1. Štancanje u industriji

Tehnologija štancanja koristi se kako u serijskoj tako i u masovnoj proizvodnji. Mogućnošću korištenja odgovarajućih materijala, pravilnim radom koji ulazi u granične parametre proizvodnje i pravilnom toplinskom obradom reznih dijelova alata, jedan alat može izraditi i cijele serije. Dodatno, nisu potrebna velika znanja radnika koji rade na tim strojevima jer samo posluživanje štanci je jednostavno. Uz ručno posluživanje koje se sastoji od stavljanja platine ili pomicanje trake lima postoji i automatsko posluživanje koje čini odmatalica, ravnalica ili pak dodavalica trake koluta lima.

Tehnološko vrijeme izrade jednog komada kraće je u odnosu na većinu drugih tehnologija, tako npr. u odnosu s obradom odvajanja čestica, to vrijeme iznosi 7 do 10 puta manje.

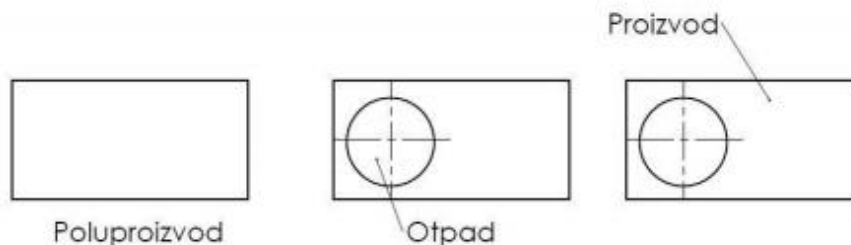
2.2. Podjela štanci

Podjele štanci su mnogobrojne i različite, a grubo se klasificiraju po različitim kriterijima. Od važnijih se izdvajaju: [1]

- Prema postupku rezanja
 - Za izrezivanje
 - Za odrezivanje
 - Za probijanje
 - Za dorezivanje
 - Za zarezivanje
- Prema broju rezova
 - Jednorezne
 - Višerezne
- Prema načinu vođenja žigova
 - Bez viđenja žiga
 - S vođenjem žiga
- Posebne štanice
 - Za obrezivanje
 - Za krzanje
 - Za naknadno i fino rezanje
- Kombinirane štanice
 - Uključuju postupke trajne deformacije

2.3. Vrste štancanja

Kod štancanja razlikuje se više vrsta obrade lima, od kojih su neke: izrezivanje, probijanje, odsijecanje, dorezivanje, zarezivanje. Za izradu pozicije u ovome radu potreban je isključivo postupak probijanja. [4]

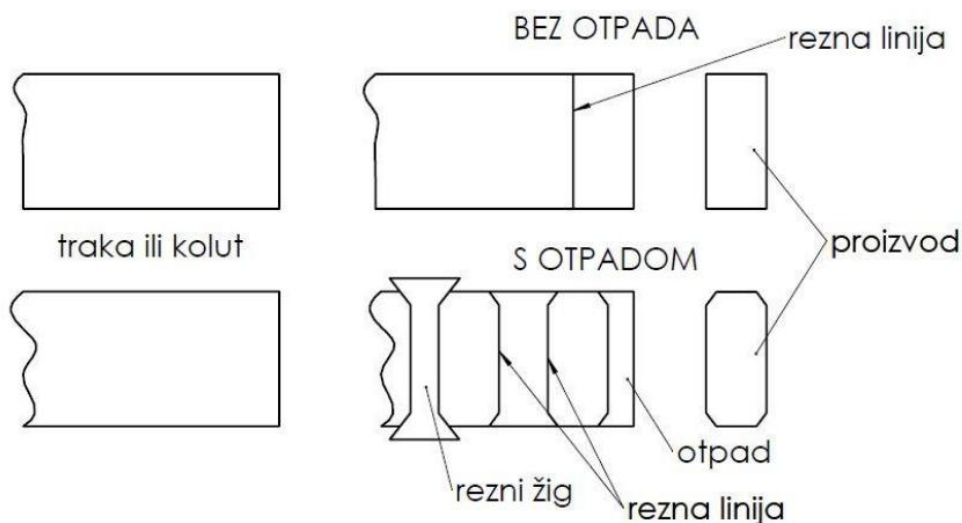


Slika 2. Probijanje [4]

Rezanje duž zatvorene konture za proizvode s točnim oblikom naziva se probijanjem. Izdvojeni dio materijala je otpad, a proizvodom se smatra ostatak ploče. Proces probijanja, prikazan na slici 1 temelji se na principu rezanja škarama. Probijanje se sastoji od četiri faze, analogno fazama kod štancanja.

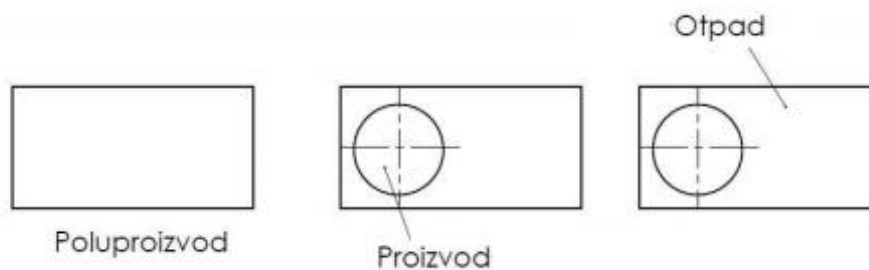
Sljedeći postupak je odrezivanje, rez je duž otvorene konture, koristi se za jednostavnije proizvode, a odvojeni dio trake jest proizvod već gotove potrebne širine. U materijalu dolazi do naprezanja zbog djelovanja vanjskih sila, a tim naprezanjima prelazi se dopuštena čvrstoća materijala te se javlja razdvajanje materijala.

Razlikuje se odrezivanje bez i s otpadom, a oba postupka se ostvaruju pomoću strojeva ili uz pomoć alata na samoj preši. [1]



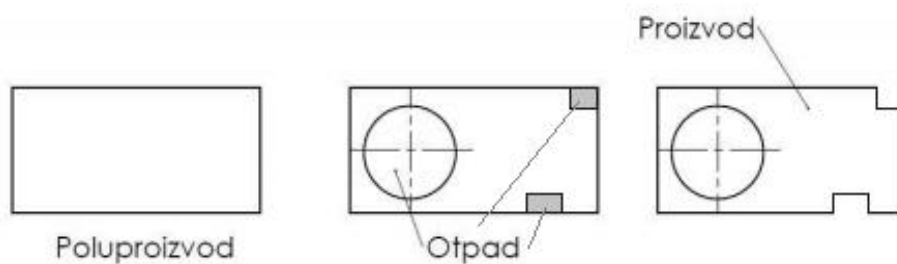
Slika 3. Odsijecanje; bez otpada (gore), s otpadom (dolje) [4]

Uz probijanje navode se i drugi postupci rezanja od kojih je jedna izrezivanje. U suštini suprotan pojam probijanju, a svodi se na rez duž zatvorene konture za proizvode koji zahtijevaju točni vanjski oblik. Otpadom se smatra ostatak trake, dok je proizvod izdvojen iz materijala. [4]



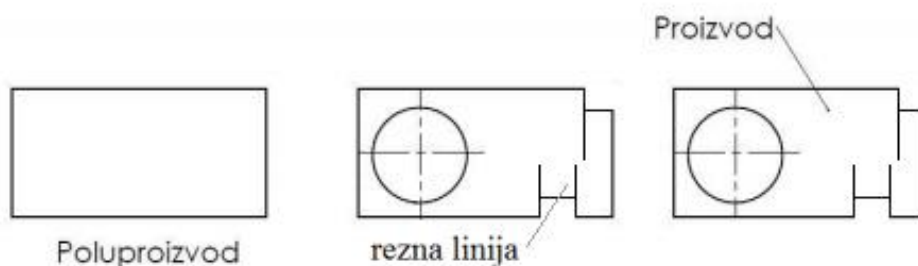
Slika 4. Izrezivanje [4]

Kod dorezivanja, odvajaju se dijelovi površine na konturi proizvoda pomoću otvorenog reza, a odvojen dio materijala je dio otpada. [4]



Slika 5. Dorezivanje [4]

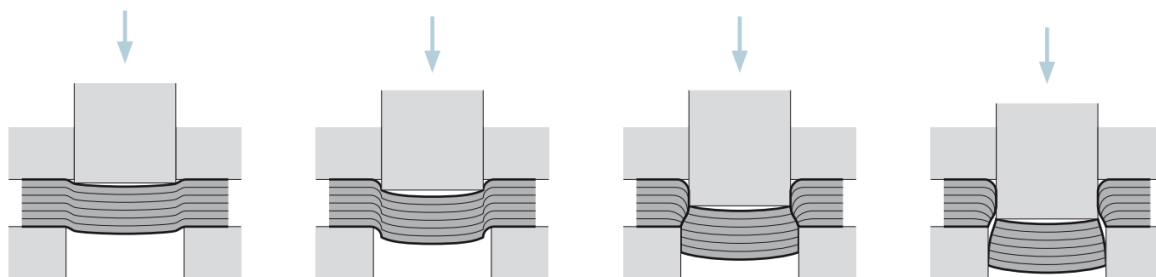
Posljednji postupak je zarezivanje kod kojeg se obrađuje rez na samoj konturi proizvoda, ali bez rezanja i izbacivanja dijela površine. Zarezivanje se uglavnom koristi za pomoć kod savijanja. [4]



Slika 6. Zarezivanje [4]

2.4. Princip i faze štancanja

Princip štancanja se svodi na pozicioniranje lima između žiga i matrice od kojih je žig pokretan alat koji svojim pomicanjem prema dolje prodire u matricu. Rubovi ovih dvaju dijela alata pomiču se paralelno jedan s drugim te tako režu lim. Iz tog razloga štancanje je prema normi DIN 8588;2013 [5] kategoriziran kao postupak rezanja jer norma definira rezanje kao dijeljenje materijala s dva rezna brida koji se kreću jedan pored drugog.

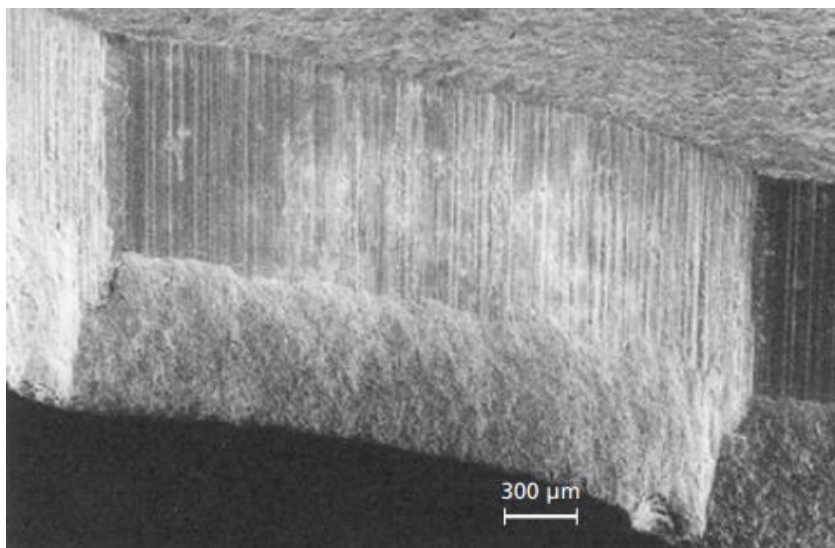


Slika 7. Faze prisutne kod štancanja [2]

Postupak štancanja odvija se u četiri faze (stupnjeva), a događa se uslijed međusobnog djelovanja reznih bridova žiga i matrice. Faze (stupnjevi) su:

- 1. faza: Uslijed prodiranja žiga u materijal dolazi prvo do elastične deformacije.
- 2. faza: Tijekom kontinuiranog prodiranja žiga i premašene granice elastičnosti dolazi do trajne deformacije materijala te nastaju zaobljena ulegnuća.
- 3. faza: Rastom razine napetosti proizvedene unutar materijala prekoračuje se smična čvrstoća materijala i dolazi do rezanja materijala na samim rubovima matrice i žiga; nastaju risevi.
- 4. faza: Dolazak do potpunog loma materijala uslijed smanjenja otpora preostalog dijela; nastaju risevi i na kraju lom materijala. [4]

Nakon loma otpadni komadić materijala izbacuje se kroz matricu u otpad ili pada na otpadnu traku, a žig se počinje izvlačiti van iz matrice. Zbog elastičnog pritiska pri izvlačenju žiga odvija se zaglađivanje rezne površine samog materijala, a u slučaju potezanja lima sa sobom ugrađen je svlakač koji odvaja lim od žiga. Nakon izvlačenja žiga dolazi do elastičnog povrata materijala, odnosno smanjuje se mjera otvora ili provrta, a mjera izrezanog dijela se povećava u odnosu na samu mjeru žiga.



Slika 8. Rez uvećan elektronskim mikroskopom [2]

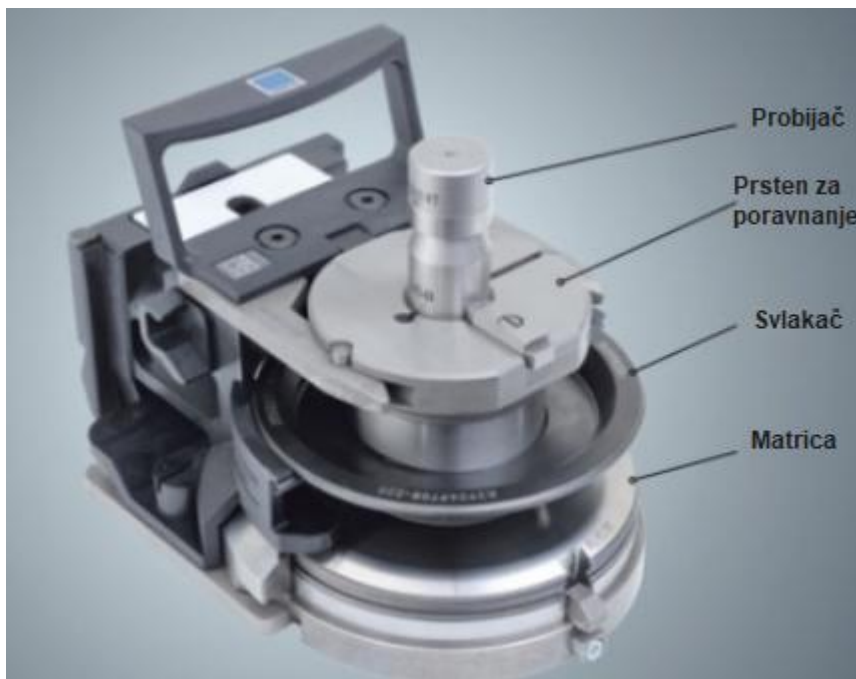
Rezultat procesa štancanja nije kontinuirani rez nego se gornji dio materijala reže opterećenjem sile i pritiskom žiga na materijal uzrokujući lom i odvajanje donjeg dijela materijala. Na omjer rezanja-lomljenja utječe više faktora: matrica, zračnost i debljina materijala. Sam proces probijanja kao i njegov rezultat mogu biti optimizirani na razne načine. Tako su moguće operacije probijanja s ciljem dobivanja vrlo glatke površine ili pak za rukovoditelje strojeva jako važna stavka – tiše štancanje.

2.5. Alati kod štancanja

Svestranost postupka probijanja se odvija uz veliku pomoć široke palete alata. Danas je sve veća težnja prema potpuno automatiziranim alatima. Također, kod izbora alata, uz vrstu alata posebno je važno uzeti u obzir i veličinu serija izradka. Kod malih serija izradak se izrađuje pomoću jednostavnijih konstrukcijskih rješenja koja se većinom sastoje od spajanja više jednostavnih alata u jednu obradu te se tako zadovoljavaju neki posebni oblici izradka, dok se kod velikih serija isplati izrađivanje kompliciranih alata jer je postignuta ušteda vremena mnogo puta veća, a odmah se i štedi na samim jednostavnim alatima kojima se produžuje trajnost. Odabir vrste alata tako ovisi o više različitih faktora od kojih su neki: veličina serije, potrebne točnosti, oblici i dimenzije provrta te vrsti materijala.

Alat za probijanje se sastoji od 2 glavna dijela: žiga i matrice. Tijekom operacije probijanja, žig koji je pokretni dio alata prodire kroz materijal u matricu te se još naziva i probijačem s obzirom na svoju ulogu u procesu. Matrica je dio odgovoran za oblik i dimenzije izradka, koji u većini izvedbi alata miruje, ali nailazi se i na neke posebne alate kod kojih se istovremeno pokreću i žig i matrica. Oba dijela alata su istog oblika i odgovaraju jedan drugome uz malu

razliku u dimenzijama koja se naziva zračnost, a sami žig i matrica mogu biti veoma kompleksni i sastojati se od više dijelova.



Slika 9. Alat korišten kod štancanja [2]

Bitnu ulogu na odabranu vrstu alata imaju i potrebni zahtjevi za točnost izrade, a na samu točnost alata utjecaj ima ploča za vođenje. Ploča obavlja tri različite funkcije:

- Vođenje žiga, odnosno centriranje gornjeg alata u odnosu na donji
- Vođenje trake lima
- Uklanjanje otpadaka sa žiga nakon završenog štancanja.

U praksi se najčešće zahtijeva da točnost izrade alata bude tri kvalitete bolja od točnosti izrade pozicije koji se probija kao na primjeru prema tablici 1. Ako radna pozicija prema nacrtu nije tolerirana, uzima se izradna tolerancija u razini kvalitete IT11, ako nije internim normama drugačije propisano.

Tablica 1. Odnos tolerancija kod probijanja [11]

Kvaliteta izrade proizvoda	IT9	IT10	IT11
Kvaliteta izrade matrice	IT6	IT7	IT8
Kvaliteta izrade žiga	IT5	IT6	IT7
Tolerancija matrice	H6	H7	H8
Tolerancija žiga	h5	h6	h7

3. Materijal

3.1. Materijal proizvoda

Za izradu proizvoda koristi se galvanizirani čelik S280GD + Z275 u obliku lima standardiziranih dimenzija 2000 x 1500 mm debljine 2 mm. Sastav čelika S280GD + Z275 je prema atestu materijala:

- Ugljik [C] – 0,064%
- Mangan [Mn] – 0,524%
- Silicij [Si] – 0,016%
- Sumpor [S] – 0,007%
- Fosfor [P] – 0,01%
- Aluminijski [Al] – 0,029%

Granica tečenja čelika S280GD + Z275 iznosi 304 N/mm^2 , dok je vlačna čvrstoća 406 N/mm^2 te rastezljivost čelika iznosi 18%.

Oznaka Z275 označuje da je čelik presvučen slojem cinka. Premaz cinka ima sastav koji se gotovo u cijelosti sastoji od cinka (>99%) i ne sadrži olovo što rezultira fino kristaliziranim cinkom koji ispunjava visoke zahtjeve vizualnog izgleda. Postupak se provodi tehnologijom galvanizacije, a zahvaljujući dobro fleksibilnosti premaza bez olova, zaštita od korozije je dobra i u savijenim mjestima što je izuzetno važno. Broj uz slovo Z označuje ukupnu masu premaza obje površine u koja se izražava u jedinici g/mm^2 , tako da u ovome slučaju premaz iznosi 275 g/mm^2 . Uobičajena vrijednost debljine sloja po površini za ovu oznaku cinčanja iznosi $20 \mu\text{m}$.

3.2. Materijal matrice

Matrice alata izrađene su uglavnom od visokolegiranog alatnog čelika za hladni rad X155CrMoV12-1. Čelik ove oznake sadrži:

- 1,55% ugljika [C]
- 12% kroma [Cr]
- 0,80% molibdena [Mo]
- 0,90% vanadija [V]

Ovaj čelik je ledeburitni čelik s 12% kroma, vrlo visoke otpornosti na abrazivno i adhezivno trošenje zbog velikog udjela tvrdih karbida u rešetci te dobre žilavosti. Također, karakteristike su vrlo dobra dimenzijska stabilnost i visoka tlačna čvrstoća. [10]

3.3. Materijal probijača

Materijali koji se koristi za izradu probijača su uglavnom brzorezni alatni čelici. Ovi su čelici legirani s jakim karbidotvorcima (Cr, W, V, Mo) koji s povišenim udjelom ugljika koji se kreće od 0,7 do 1,3% stvaraju slobodne karbide postojane i pri višim temperaturama. Zbog takvog sastava i mikrostrukture, ovi čelici imaju karakteristike izvrsne otpornosti na trošenje i otpornosti na popuštanje pri radnim temperaturama od 500 do 600°C. Svojstva im omogućuju primjenu za rezne alata koji rade pri velikim brzinama kao alati za probijanje lima. Koristi se brzorezni alatni čelik HS6-5-2 sastava:

- 0,9% ugljika [C]
- 4% kroma [Cr]
- 6,5% volframa [W]
- 5% molibdena [Mo]
- 1,9% vanadija [V]

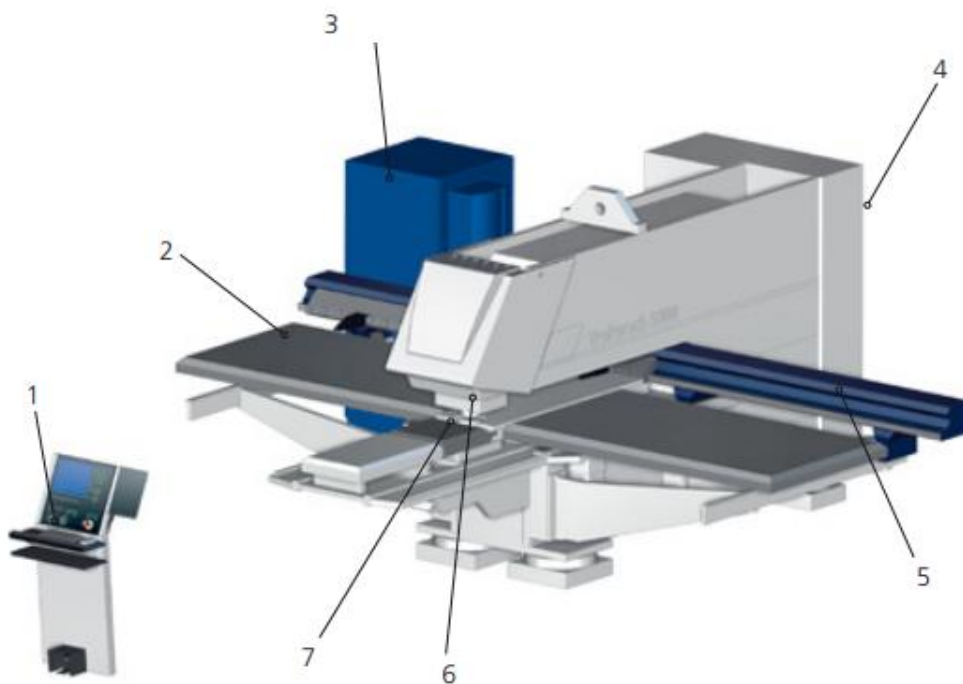
Molibden čeliku određuje temeljna svojstva, a karakteristike su dobra žilavost i dobra obradljivost odvajanjem čestica, a sklon je razugličenju tijekom toplinske obrade. [10]

4. Stroj

Pozicije se izrađuju na stroju TRUMPF, izvedbe TRUMATIC 5000R. Konstrukcija stroja je izvedena u C-okviru koji omogućuje apsorpiranje sila kod probijanja. Glava za probijanje je nepomično postavljena na okvir stroja. Dizajn okvira u obliku slova C znači da je stroj otvoren prema naprijed te tako lako dostupan operateru jer se radno područje nalazi ispred njega. Lim se kreće slobodno u radnom području, a postavljaju se točno ispod alata za probijanje gdje se strojno obrađuju; gotov izradak napušta stroj na različite načine.

Masa stroja iznosi oko 22 tone, a dimenzije iznose 6760 mm širine i 6100 mm dubine, a s dodatnom opremom širina raste na 12500 mm; o dodatnoj opremi govoriti će se u poglavlju 4.2. Radni prostor iznosi 2535 x 1280 mm, a mogućnost obrade koju stol pruža su dimenzije ploča 3000 x 1500 mm s maksimalnom debljinom do 8 mm. Nazivna sila probijanja iznosi 220 kN, odnosno 22 tone; maksimalna posmična brzina je 100 m/min, broj udaraca mjeri 1200 1/min dok se točnost probijanja nalazi unutar granica od $\pm 0,1$ mm. Programiranje se vrši preko računalnog programa TruTops, a odgovorni postprocesor jest Siemens Sinumerik 840 D.

4.1. Struktura stroja



Slika 10. Glavni dijelovi stroja [3]

Na slici 10 prikazani su i označeni glavni dijeli stroja koji su prema brojevima:

- 1) Kontrolna ploča
- 2) Radni stol stroja
- 3) Strujni ormar
- 4) Hidraulička jedinica
- 5) Poprečna šina s linearnim spremištem alata
- 6) Glava stroja
- 7) Poklopac za uklanjanje pozicija manjih dimenzija

4.1.1. Linearno spremište alata

Alat se lako i sigurno umeće u spremište alata dodavanjem središnje stezaljke za alat koja djeluje pritiskom na gumb. Za postavljanje se svi alati automatski oslobađaju i zatim se ponovno centralno poravnavaju i vraćaju nakon završetka obrade. Kod promjene alata senzori nadziru probijač, svlačač i matricu, a promjena alata traje manje od 3 sekunde dok u slučaju *MultiTool*-a brzina promjene pada na samo 0,7 sekundi. Poprečna šina na koju se postavlja sam linearni spremište alata sadrži mjesta za ukupno 19 alata i 4 hvataljke koje stabiliziraju ploču lima. Spremište alata je lako dostupan za postavljanje, a operator vrši izmjenu alata potrebnih za određeni program probijanja povoljnim zamjenjivanjem konzola s alatom ili vađenja alata iz jedne te ispuštanjem drugog alata u njegovu konzolu.



Slika 11. Linearno spremište alata

4.1.2. Poklopac za ispadanje

Postoje različiti načini odvajanja i izbacivanja gotovih i otpadnih dijelova iz stroja bez ručne intervencije. Moguće je i odvojiti gotove pozicije različitih oblika i ispadanje te razvrstavanje u različite kontejnere koji su numerirani od 1 do 4. Razvrstavanje i selektivno uklanjanje dobrih i otpadnih pozicija provodi se korištenjem poklopca za ispadanje. Put uklanjanja pozicije ovisi o dimenziji gotove pozicije i položaju poklopca čiji su gabariti 500 x 500 mm. Ukoliko su dimenzije pozicije izrazito male poput npr. nekih pločica ili distanci, postoji i manji otvor koji se nalazi odmah ispred glave alata i spaja se na istu traku za odvođenje pozicija do kontejnera. Suprotno tome, poklopac se otvara te ispušta gotove pozicije na traku za odvođenje. Uobičajeno se koriste kontejneri 1 i 2 za dobra, a kontejneri 3 i 4 za otpadne dijelove lima.

Kod većih pozicija ili pozicija koje se ne smiju oštetiti ili ogrebat i drugi postoji ručno uklanjanje koje djeluje na principu zadnjeg probijanja reznog alata kojim se završava kontura i zaustavlja štanca dok se pozicija ne izvadi te operator ponovno pokreće štancu. Uz prethodno spomenute vrste odvajanja pozicija važno je spomenuti i tehniku stavljanja *microjoint*-ova. *Microjoint* je mala veza uglavnom debljine od 0,4 do 0,8 mm koja se ubacuje između pozicije i skeleta otpadne ploče koja onemogućuje vađenje ili ispadanje jer je pozicija i dalje pričvršćena na skelet, a uklanjanju se istresivanjem ili udarcem gumenim čekićem blizu spoja. Za razliku od automatizacije kod ispadanja ili kod korištenja dodatnih strojeva (*SheetMaster*), ova metoda uključuje naknadnu ručnu intervenciju operatera.



Slika 12. Poklopac za ispadanje

4.2. Dodatna oprema stroja

Automatizirane komponente pretvaraju štancu u potpuno automatski obradni centar jer su razne dodatne komponente stroja dizajnirane za modularnu upotrebu koja rezultira u mnogim različitim instalacijama štanci. U dodatne strojeve ubrajaju se:

- Stroj za utovar materijala s palete na radnu ploču, odvoza gotovih pozicija i restova na palete zvan „*SheetMaster*“
- Dvije poprečno klizne platforme koje se sastoje od dvaju kolica (gornjih i donjih)
- Stroj za automatsko uklanjanje gotovog skeleta sa ploče na vlastitu paletu imena „*GripMaster*“
- Četiri kontejnera manjih dimenzija u koje ispadaju gotove pozicije manjih dimenzija, odnosno „*SortMaster*“ koji je prikazan na slici 13

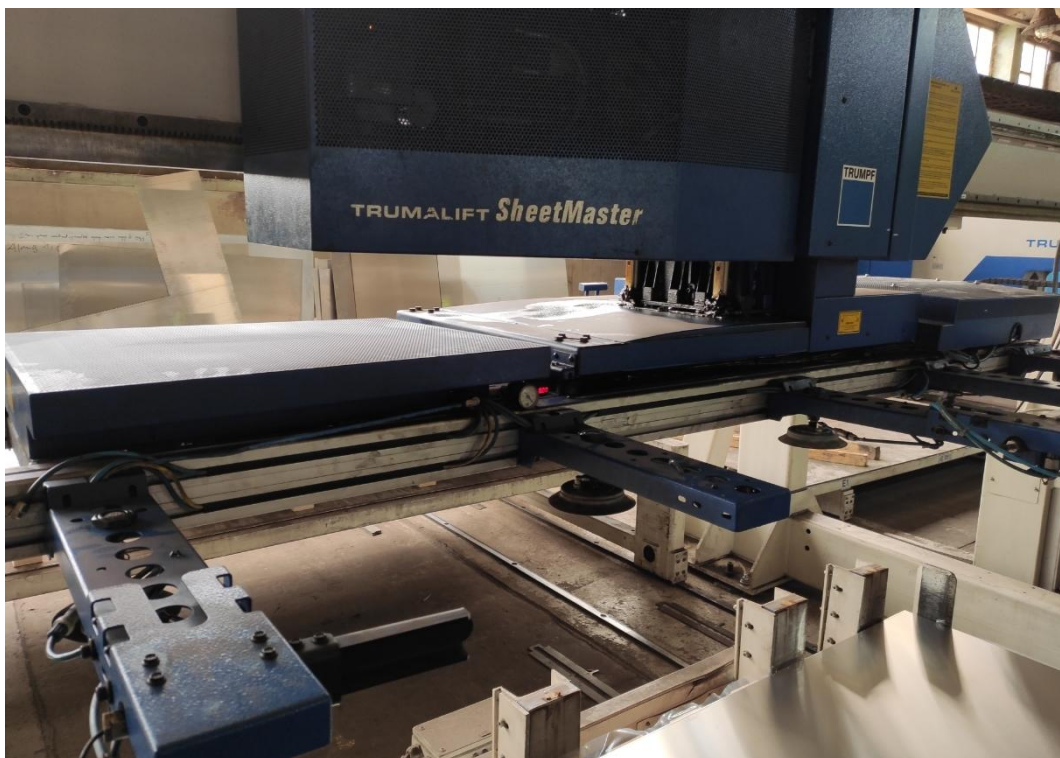


Slika 13. „*Sortmaster*“

4.2.1. *Sheetmaster*

Za obavljanje radnje utovara materijala, operator je dužan postaviti paletu sa željenim materijalom na lijevu kliznu platformu koja služi za neobrađene limove te se aktiviranjem izravnog nošenja materijala na radnu ploču *Sheetmaster* pozicionira iznad palete. Lijeva klizna platforma sadrži dva kolica koja izmjenjuju pozicije po potrebi operatera i tako omogućuju opskrbu stroja s dva različita materijala ili pak istog materijala s dvije različite dimenzije ploča.

Hvatanje materijala se odvija pomoću usisnih papučica koje su različitih veličina, numerirane i predefinirano raspoređene, a sam raspored papučica je uglavnom fleksibilan te im se u svakom trenutku mogu zamijeniti pozicije. U drugom slučaju, *Sheetmaster* služi za uklanjanje i slaganje gotovih pozicija s radne ploče na desnu kliznu platformu od kojih gornja kolica služe za gotove dijelove, dok su donja kolica preraspoređene za rest-ove. Rest je nepotreban dio cijele dimenzije ploče koji je ostao neiskorišten u fazi proizvodnje, odnosno izrezak većih dimenzija koji se može ponovno upotrijebiti u svrhe probijanja nekih drugih pozicija u budućnosti.



Slika 14. „Sheetmaster“

4.3. Sigurnost operatera

Štance su strojevi većih dimenzija pa je potrebno osigurati dobar, ravan prostor bez smetnji i uplitanja ostalih strojeva, radnih procesa i drugih radnika. S lijeve strane štanca je ograđena zaštitnom ogradom radi sigurnosnih razloga i nemogućnosti prilaženja pokretnim dijelovima stroja. S ostale tri strane, štanca je omeđena s četiri žuta stupića s laserskom linijom koja se aktivira prilikom pokretanja procesa probijanja. Ukoliko dođe do prekida linije do kojeg uglavnom dolazi prelaskom nekog drugog zaposlenika u područje štanca, stroj se automatski zaustavlja i sprječava daljnji rad.

5. Izbor alata

Svestranost postupka probijanja se odvija uz veliku pomoć široke palete alata. Danas je sve veća težnja prema potpuno automatiziranim alatima. Također, kod izbora alata, uz vrstu alata posebno je važno uzeti u obzir i veličinu serija izradka.

5.1. Dijelovi alata za probijanje

Korišten cjelokupni alat se sastoji od konzole, probijača i matrice u kombinaciji s prstenom za poravnanje i svlakačem (*stripper*). Gornji dio konzole drži probijač, prsten za poravnanje i svlakač koji su dizajnirani za ulaz u glavu stroja dok se matrica nalazi u donjem dio konzole i ulazi u donji adapter za alat. Gornji i donji dio konzole alata su centralno poravnati jedno prema drugome.



Slika 15. Dijelovi alata: probijač (gore lijevo), svlakač (gore desno), matrica (dolje lijevo), prsten za poravnanje (dolje desno) [2]

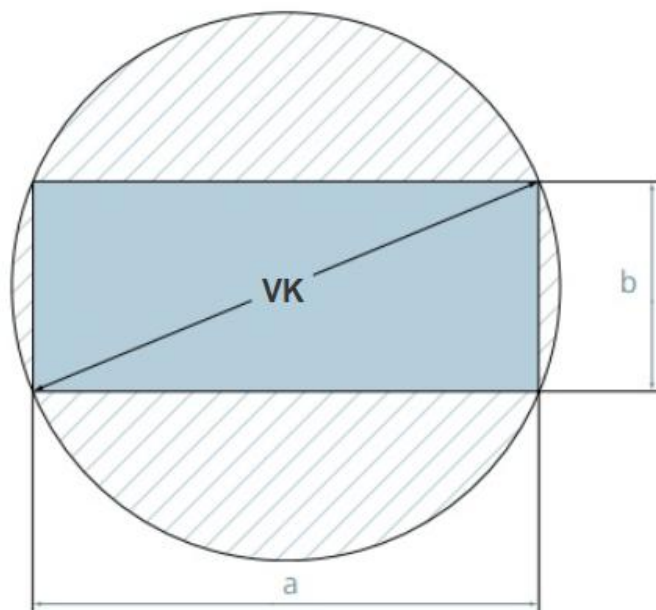
Prsten za poravnanje je zapravo stezni prsten koji osigurava oblik udarca u centralnom (nultom) položaju. Dodatno prenosi silu udarca na probijanje i određuje sam kutni položaj udarca.

5.2. Probijač

Probijači se standardno proizvode od HSS (brzorezni čelik) i nude visoku nosivost. Izrađuju se prema raznim parametrima od kojih su oblik, veličina, premaz i duljina najvažniji. Također, postoje i probijači s kosom te piramidalnom udarnom površinom.

5.2.1. Vrste probijača

Kod probijanja uzima se u obzir raznolikost važnih faktora i dimenzija. Ne uključuju samo dimenzije rezne geometrije, nego i duljinu probijanja te dopušteno smanjenje duljine alata uzrokovano brušenjem. Veličina alata se tako svodi na vanjsku kružnu konturu bez obzira na svoju reznú geometriju i oblik udarca. Pravilo u praksi nalaže da se kod probijanja uzima alat s vanjskom kružnicom koja iznosi najmanje debljinu samog materijala koji se probija.

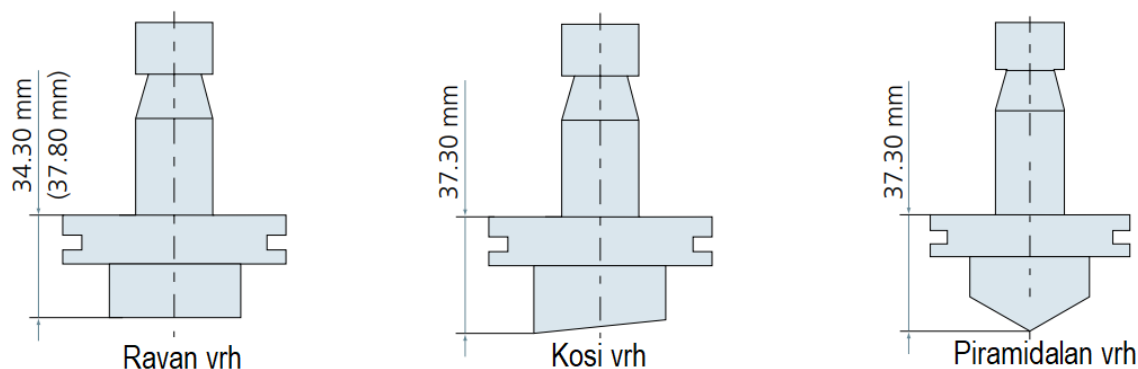


Slika 16. Vanjska kružnica alata pravokutne rezne geometrije

Vrijednost veličine vanjske kružnice dobiva se preko izraza: [3]

$$VK = \sqrt{(a^2 + b^2)} \quad (5.1)$$

Razlikuju se tri vrste probijača prema obliku vrha: ravni, kosi i piramidalni, a prikazani su na slici 17. Uz oblik vrha, primarna razlika je u duljini reznog dijela koji se mjeri od gornjeg ruba prstena za poravnanje pa do krajnje točke alata. Probijač s ravnom reznom površinom dolazi u dvije izvedbe, dužoj i kraćoj, a one iznose 34,3 mm i 37,8 mm dok su oba probijača i s kosom i piramidalnom reznom površinom duljine 37,3 mm. Prednost dužih probijača je u većoj mogućnosti kod procesa brušenja i većom brzinom kod probijanja tehnikom „Presser foot“.

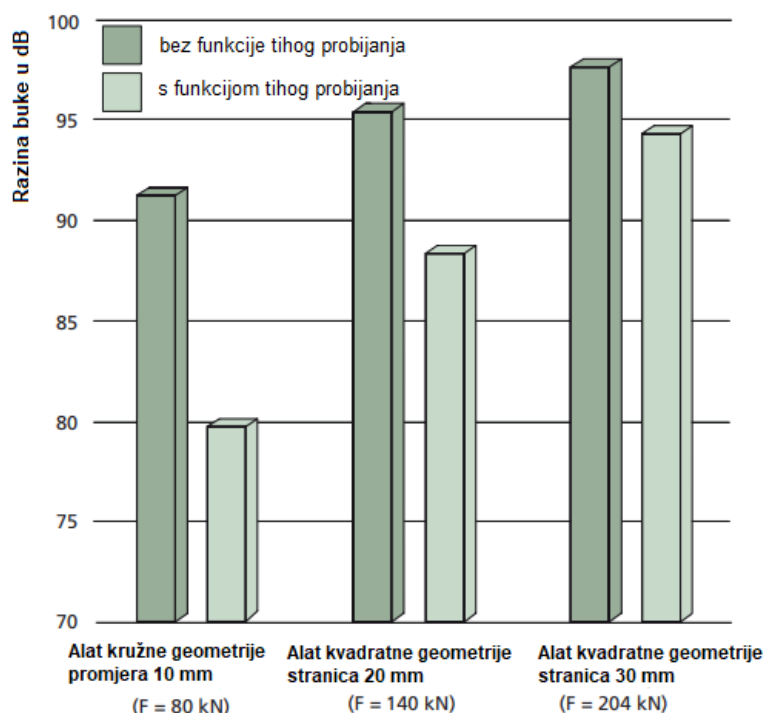


Slika 17. Oblici i duljine probijača [3]

5.2.2. Razina buke kod probijanja

Sve štanice imaju jednu osobinu zajedničku, bučne su. Standardni udarci pri punoj brzini probijaju materijal prisilno i uz puno buke, ali postoji alternativa, odnosno više njih. Dostupna su različita rješenja kako smanjiti razinu buke u halama i poštediti sluh operatora. Uz ukošene alate tako postoji i funkcija „*Quiet Punching*“, odnosno funkcija tihog probijanja.

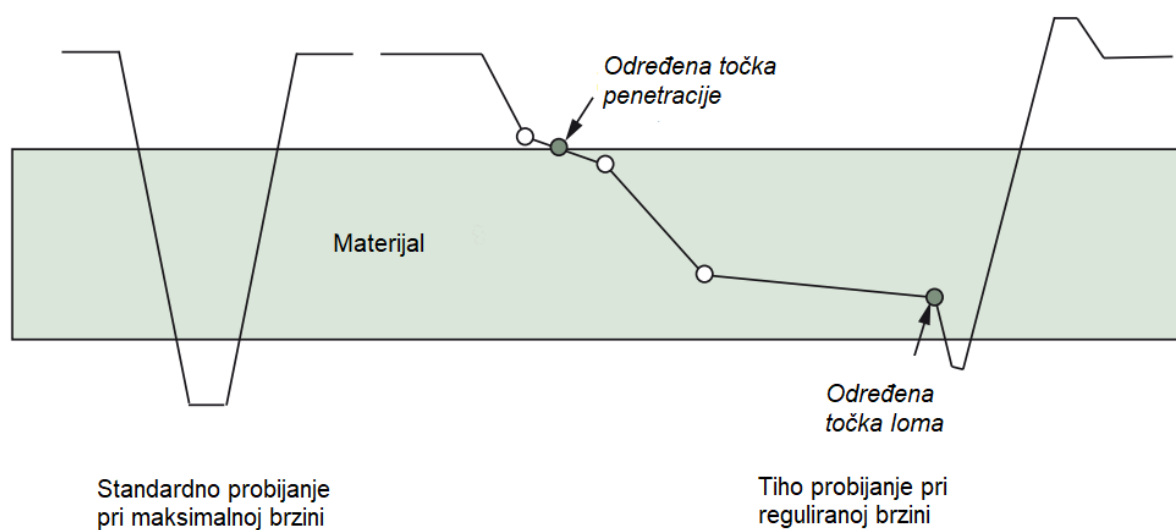
U dijagramu je prikazano korištenje funkcije tihog probijanja i njezinog značajnog smanjena razine buke kod štanice uzevši u obzir da je smanjenje veće kod alata manjih promjera zbog manje potrebne ukupne sile probijanja.



Slika 18. Razina buke kod pojedinih alata [3]

Još jedan opisni graf funkcije tihog probijanja prikazan je na slici 19. Glava za probijanje se kreće maksimalnom brzinom iz startne radne pozicije do pozicije neposredno površini lima koja se usvaja i memorira jednim testnim udarcem. Onda probijač penetrira površinu materijala pri usporenoj brzini glave koji je popraćen stvarnim udarcem glave, također pri manjoj brzini.

Ovaj proces se može kontrolirati već unaprijed programiranim stadijima funkcije tihog probijanja čije su oznake brojevima od 1 do 4, od kojih razina 1 predstavlja maksimalno, a broj 4 minimalno usporavanje brzine. Nakon postizanja točke loma štanca se vraća u početnu brzinu probijanja. Glava se tako kreće i dalje do najnižeg položaja, a zatim se podiže maksimalnom brzinom. Rezultat je puno tiši hod, a funkcija se programira za svaki alat individualno dok kombiniranjem s ukošenim alatima razina buke se prigušuje još više.

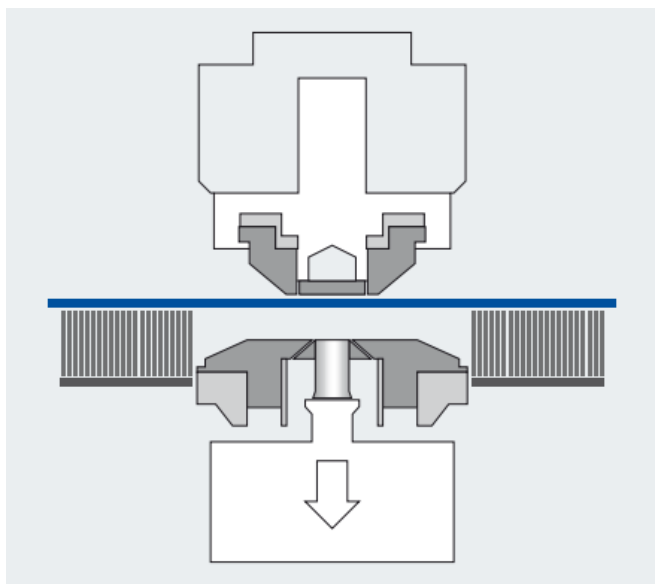


Slika 19. Graf s-t [2]

5.3. Matrica

U alatu za probijanje matrica je dio suprotan probijaču, a zajedno djeluju kao alati za rezanje lima. Matrica djeluje protivno sili udarca te tako omogućava probijanje, dok nastali otpad pada kroz matricu i ispada na traku za otpad.

Kod specijalnog formiranja površina nije moguće koristiti fiksnu matricu jer dolazi do kolizije novonastalog oblikovanja i same matrice, te se problem kolizije rješava korištenjem silazne matrice. Silazna matrica se spušta nakon svakog udarca alata i tako stvara prostor specijalnom oblikovanju, povećavajući pouzdanost procesa probijanja potpuno isključujući mogućnost kolizije matrice i materijala. Također, omogućuje obradu bez ogrebotina izradka zbog svojeg spuštanja prije svakog sljedećeg pokreta pozicioniranja udarca te tako sprječava kontakt između matrice i lima.



Slika 20. Silazna matrica [2]

Još opsežnije aplikacije mogu se izvesti korištenjem aktivne matrice, čija zasebna os pokreće konzolu s držačem matrice i samu matricu te tako funkcionira kao druga udarna glava. Aktivna matrica omogućava korištenje alata za specijalno oblikovanje lima poput rešetki, zdjelica i istiskivanja koja se mogu izdići sve do 12 milimetara visine od površine lima. Nakon oblikovanja, matrica se povuče natrag ispod lima, dok tijekom oblikovanja lim nije podignut. Također, aktivna matrica omogućava integrirano ravnjanje lima te su i vrlo perforirani limovi ravni nakon završetka obrade probijanja.

5.4. Svlačač

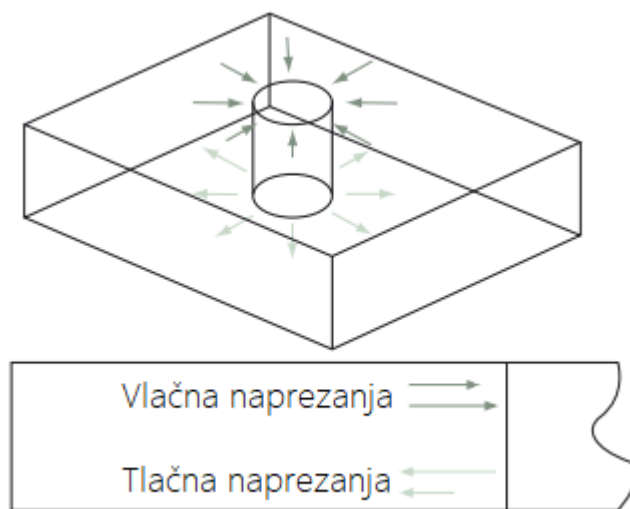
Svlačač kod procesa štancanja obavlja tri različite funkcije: osnovna funkcija jest odvajanje materijala i alata kod povlačenja udarca, dok su druge dvije funkcije situacijske te se koriste kod funkcija „Presser foot“ i repozicije ploče gdje služe kao držači lima.

5.4.1. „Presser foot“

Pozicije proizvedene od lima trebaju biti što su ravnije moguće. Međutim, svaki materijal sadrži naprezanja koja mogu uzrokovati deformaciju u materijalu. Velika preciznost gotovih pozicija je zadovoljena kod izrazito ravnog lima te se korištenjem takvog početnog materijala uspijevaju smanjiti skupi daljnji prepravci. Preporučljivo je korištenje limove od materijala koji su već prethodno oslobođeni naprezanja.

Deformacije se pojavljuju tijekom proizvodnje jer svaki udarac probijača i matrice uzrokuje naprezanja; s gornje strane ploče javljaju se tlačna naprezanja, a s donje vlačna naprezanja.

Takva raspodjela naprezanja uzrokuje savijanje ploče prema gore po pravilu – što je veći broj udaraca, deformacija je veća. Međutim, postoje različite metode da se probijanje učini sa što manje postignutih naprezanja.



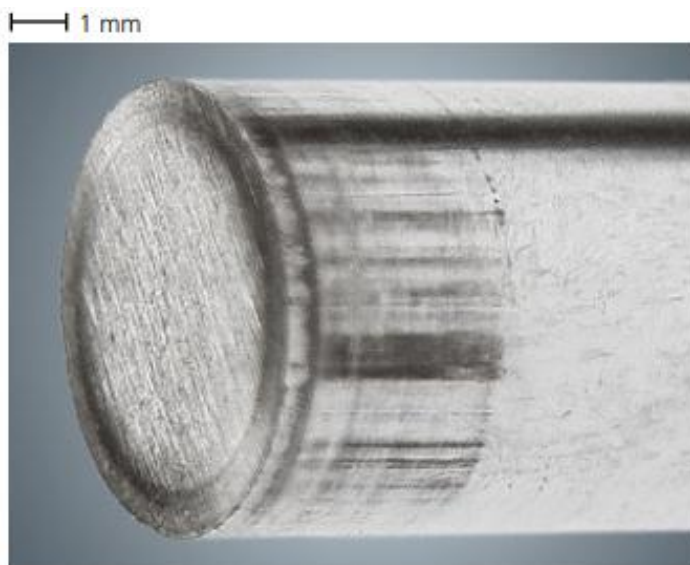
Slika 21. Naprezanja kod probijanja [2]

Neke situacije probijanja zahtijevaju posebne tehnike obrade, a jedna od takvih jest „Presser foot“. „Presser foot“ je potreban kod probijanja debelog mekanijeg materijala, uskih uzoraka provrta odnosno perforacija, provrta manjeg promjera od debljine materijala te dijelova koji imaju tendenciju savijanja. Aktivna funkcija smanjuje deformaciju lima tako da prilikom izlaženja probijača lim se drži čvrsto uz pomoć svlakača koji je priljubljen i pritišće ploču te se tako lim ne povlači zajedno s alatom i ne zapinje na mjestu probijanja u trenutku vraćanja probijača na svoju radnu visinu. Funkcija pomaže u proizvodnji izradaka veće kvalitete istovremeno produžujući vijek trajanja alata sprečavajući potencijalni lom, ali također usporava sam proces probijanja zbog dodatnog koraka u izradi. Korištenje funkcije „Presser foot“ nije uvijek potrebno, posebice kod probijanja tanjih materijala. Tako kod alata pravokutnog presjeka koji se koristi najviše za sjeckanje kontura, svlakač sprječava da se materijal lovi za alat jer je postavljen iznad materijala sve dok alat udara skroz preko svlakača na povratku prema gore. Isključivanje funkcije u ovoj situaciji i u drugima kad je to moguće, izvrstan je način ubrzavanja vremena obrade uz zadržavanje izradka visoke kvalitete i dosljednosti.

5.5. Održavanje alata

Kod proizvodnje visokokvalitetnih pozicija i za održavanje najviših performansi opreme za probijanje potrebno je pravilno održavanje alata za probijanje koji se postižu brušenjem probijača i matrice. Kada su probijač i matrica tupi, štanca zahtijeva dodatnu silu kod probijanja

provrtu što dodatno stavlja nepotrebno trošenje na ovnu stroja. Također, dobri pokazatelji su i ulazni provrt na gornjoj površini materijala koji se nalazi na rubu probijenog provrta ili veličina srha na donjoj strani materijala postaje drastično izraženiji kod nebrušenog alata.



Slika 22. Istrošenost alata nakon 120 000 udaraca u nehrđajući čelik [2]

Rub probijača pokazuje habanje i zaokruživanje na rubu te ga je potrebno naoštiti jednostavnim skidanjem 0,1 do 0,25 mm materijala. U ekstremnim slučajevima kod jako istrošenih alata, potrebno je dodatno skidanje po 0,05 mm do zadovoljavajućeg reznog brida. Ako se probijač ošteti te rezni brid ima pukotinu, probijač se brusi do točke u kojoj pukotina počinje. [8]

5.6. Geometrija i vrste alata

Kod probijanja postoje različite vrste oblika geometrije alata. Po geometriji, alati se dijele na sljedeće:

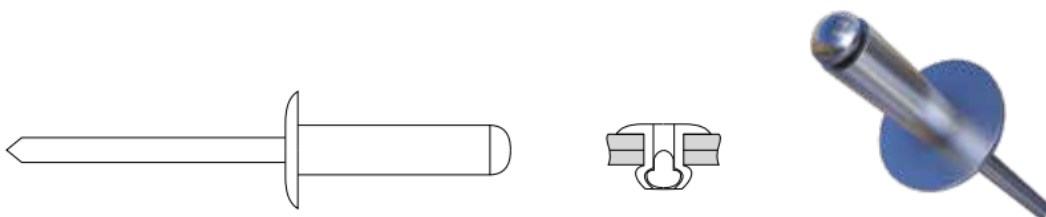
- Osnovne alate
- Alate kategorije oblika A
- Alate kategorije oblika B
- Alate specijalnih geometrija
- „MultiTool“ alat

U osnovne geometrije alata ubrajamo alate kružnog, kvadratnog, šesterokutnog te pravokutnog presjeka. Alatima ovih presjeka obrađuje se 80% otvora ili provrta kod probijanja. Osnovni alati se mogu koristiti i kod probijanja složenijih oblika ako imaju značajke ovih geometrija.



Slika 23. Geometrije osnovnih alata [2]

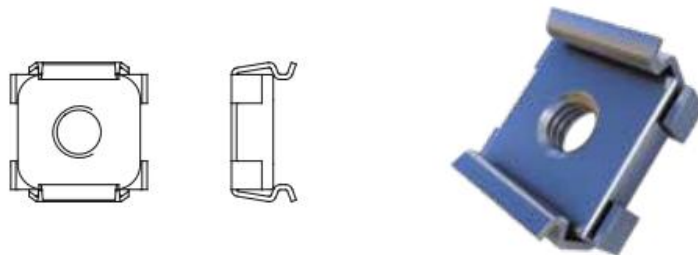
Dimenzije ovih alata su najraznovrsnije upravo zbog razloga što se koriste u svakoj prilici, tako dimenzije alata kružne geometrije promjera 3 i 4 mm služi uz probijanje provrta i za probijanje vrhova spojenih kontura kao pomoć pri spajanju konturi ili kao pomoć pri daljnjoj obradi izradka, npr. savijanja. Dimenzija promjera 6,8 mm služi isključivo kod probijanja provrta koje se postavljaju i spajaju s drugim komponentama zakovicama sa ravnom zaobljenom glavom. Kod probijanja unutarnjeg radijusa veće dimenzije od najvećeg promjera alata empirijski se koristi alata promjera 20 mm.



Slika 24. Zakovica s ravnom zaobljenom glavom [9]

Alat kvadratnog presjeka se koriste u tri slučaja: probijanje većeg dijela lima van cijelog kostura ploče zbog mogućeg ispadanja tog dijela tijekom obrade te oštećivanja glave alata ili cjelokupnog stroja, sjeckanja konture vanjskog radijusa većih dimenzija i probijanje otvora za postavljanje kavezne matice. U prvome slučaju prema potrebi koriste se alati dimenzija stranica 5, 8, 10, 20 i 40 mm, a u slučaju izrade radijusa do 25 mm koriste se kvadratni alati stranice 5 mm dok se za radijuse veće od 25 mm koriste alati stranice 20 mm. Kod kaveznih matica koriste se isključivo dimenzija M6 koja se probija alatom stranice 9,5 mm.

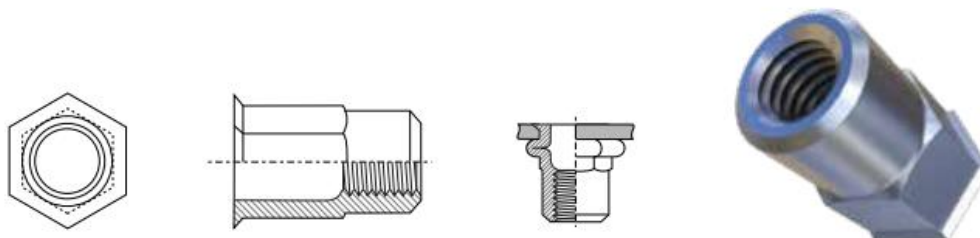
Alati pravokutnog presjeka uglavnom služe za linearno sjeckanje kontura od kojih su najčešće dimenzije: 20 x 3 mm, 76 x 3 mm i 15 x 4 mm za sve materijale, dok se alat dimenzije 76 x 4 mm koristi isključivo za sjeckanje dužih kontura kod debljih materijala.



Slika 25. Kavezna matica [9]

Nadalje, jedina funkcija kod korištenja alata šesterokutnog presjeka jest probijanje otvora za daljnju montažu zakivnih matica. Matice se sortiraju prema veličini metričkog navoja i uz svaku oznaku navoja postoji odgovarajući šesterokutni otvor kojoj odgovara poprečna dimenzija svoje dvije paralelne stranice, a označuju se sa slovima SW ispred prethodno spomenute dimenzije. Dimenzije samog otvora se određuju na način očitavanja podataka iz tablica, pronalaska dimenzije vanjskog promjera D te dodavanja 0,2 mm na spomenutu dužinu koja je onda dovoljna da matica prolazi kroz otvor, ali da se zaustavlja kod izduženog vrha.

$$SW = D + 0,2 \text{ mm} \quad (5.1)$$



Slika 26. Zakivna matica [9]

Tako se razlikuju probijanja otvora dimenzija:

- M4 – SW6,1 [mm]
- M5 – SW7,1 [mm]
- M6 – SW9,1 [mm]
- M8 – SW11,1 [mm]
- M10 – SW13,1 [mm]
- M12 – SW16,1 [mm]

Kategorije alata oblika A i B razlikuju se samo kod primarne dimenzije u svojoj geometriji koja im određuje orijentaciju postavljanja u kasnijoj optimizaciji putanje; kategorija A se orijentira prema stranici, odnosno duljini l , dok se alat kategorije B orijentira preko radijusa R . Najčešće korišteni alati ovih kategorija su kod kategorije A, pravokutnik s kružnim završetkom („oblong“) i kvadrat s radijusom, a kod kategorije B su to četverostrani radijus i obični radijus s dodanim bridovima odabrane širine.



Slika 27. Alati kategorija A (lijevo, sredina) i B (desno)

Specijalni alati uglavnom nastaju spajanjem više geometrija prethodno spomenutih kategorija alata te se izrađuju prema vlastitoj potrebi, odnosno potrebi korisnika. Prednosti specijalnih alata su sljedeće:

- Ušteda vremena i puta
- Smanjenje trošenja i broja potrebnih alata kod probijanja
- Manje iskorištenih alatnih mjesta u spremištu alata
- Nema nepotrebne izmjene alata



Slika 28. Specijalni alat: zakačka

Primjer specijalnog alata je zakačka širine 30 cm koja je sastavljena od 4 različite geometrije i potrebno je više od 20 udaraca alatom. Slanjem geometrije proizvođaču alata dostavljen je novi, po narudžbi izrađen alat sa specijalnom geometrijom koji zamjenjuje prethodno spomenuta probijanja samo jednim jedinim udarcem.

„Multitool“ alat svoje ime opravdava time da je sastavljen od većeg broja manjih alata; tako postoje izvedbe s 4, 5, 6 i 10 mogućih umetnutih alata odjednom. Prednosti su brojne: sam broj alata se povećava u jednom adapteru čime se oslobađa mjesto drugim alatima, kraća su vremena postavljanja i promjene alata, umeci alata se mogu uklanjati jedan po jedan i znatno se povećava produktivnost malih udaraca. U „Multitool“ alat stavljaju se samo alati strogo propisanih dimenzija te se time ograničava na manji spektar alata.



Slika 29. Izgled alata „Multitool“ [3]

Princip rada se zasniva na finom zupčaniku sa specijalnim premazom koji se rotira prema numeriranim brojevima na matrici i tako hvata različite alate; potrebno je samo upariti isti probijač i matricu s istim brojevima.

Vrsta geometrije		Dimenzije u mm	Vrsta geometrije		Dimenzije u mm
	Kružna	 (d) = 1.00 - 16.00		Kružna	 (d) = 1.00 - 16.90
	Kvadratna	 (a) = 1.00 - 11.30		Kvadratna	 (a) = 1.00 - 12.20
	Pravokutna	 (e) = 1.80 - 16.00		Pravokutna	 (e) = 2.50 - 16.90
	Pravokutna s kružnim završetkom	 (l) = 2.00 - 16.00		Pravokutna s kružnim završetkom	 (l) = 2.00 - 16.90

Slika 30. Dimenzije alata za „Multitool“ [3]

6. Proračuni

6.1. Sila rezanja

Proračun sile rezanja kod probijanja nužna je za utvrđivanje minimalne snage stroja, a ona ovisi najprije o dva faktora: debljini i smičnoj čvrstoći materijala, a uz njih se ubraja i opcionalni izbor vrste reza na vrhu alata. Što je veća debljina i čvrstoća materijala, to je potrebna veća sila rezanja stroja da se materijal probije. Teorijska sila rezanja iznosi: [1]

$$F_0 = \tau_m \cdot A \quad (6.1)$$

$$A = l \cdot s \quad (6.2)$$

gdje su:

F_0 – teorijska sila rezanja [N]

τ_m – maksimalna smična čvrstoća [N/mm^2]

A – rezna površina [mm^2]

l – duljina reza [mm]

s – debljina materijala [mm]

Teorijsku silu rezanja potrebno je uvećati za vrijednost od 20% zbog mogućih zatupljenja reznih bridova, tolerancije debljine limova ili pak trenja između probijača i matrice: [1]

$$F_{\text{probijanja}} = 1,2 \cdot F_0 \quad (6.3)$$

Formule se koriste i za određivanje maksimalne moguće duljine reza koja se može postići strojem, a razlikuju se u geometriji udarca. Duljina reza l za udarce iznosi: [3]

$$l = d_{\max} \cdot \pi \cdot x \quad (6.4)$$

$$l = 4 \cdot a_{\max} \cdot x \quad (6.5)$$

gdje su:

$d_{\max}$ – maksimalni promjer alata

x – rezni faktor; $x = 1$ za udarce običnim alatom, $x > 1$ za udarce alatom s kosinama

Uvrštavanjem izraza (6.4) i (6.5) u izraze (6.2) i (6.1) dobiva se:

$$F_0 = \tau_m \cdot d_{\max} \cdot \pi \cdot x \cdot s \quad (6.6)$$

Maksimalni promjer alata kružnog presjeka $d_{\max}$ iznosi: [3]

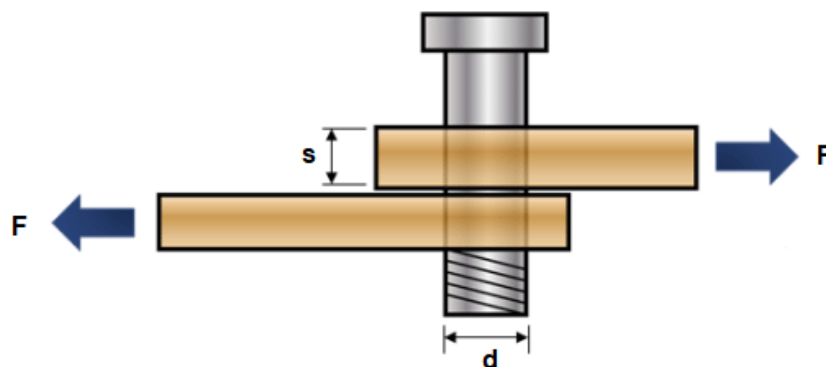
$$d_{\max} = \frac{F_0}{\tau_m \cdot \pi \cdot x \cdot s} \quad (6.7)$$

Dok je za maksimalnu duljinu stranice $a_{\max}$ alata kvadratne geometrije izraz:

$$a_{\max} = \frac{F_0}{\tau_m \cdot 4 \cdot x \cdot s} \quad (6.8)$$

6.1.1. Smična čvrstoća

Opterećenje čvrstog tijela silama u ravnini samog presjeka čvrstog tijela, a koje nastoje postići usporedno klizanje jednog dijela presjeka prema drugom nazivamo smicanjem. Smično opterećenje koristi se u nekim tehnologijama obrade, poput rezanja škarama te probijanja štancanjem. Promatranjem naprezanja u limu uslijed djelovanja dvaju okomitih alata čije su osi pomaknute dolazi do smicanja, čije su posljedice reaktivna posmična ili tangencijala naprezanja τ koja se nalaze u ravnini presjeka tijela.



Slika 31. Smicanje

Smično opterećenje je blisko sa savijanjem, a izračunavanje posmičnog naprezanja zbog svoje poprečne sile je opisano u vezi s poprečnim savijanjem štapa. Čisto smicanje je teško za ostvariti i u laboratorijskim uvjetima, pa se pokus izvodi uvijanjem tankih cijevi. Točno određivanje raspodjele poprečnog naprezanja u presjeku jest vrlo složeno zbog nejednolike raspodijeljenog naprezanja po presjeku smicanja. Smična čvrstoća je osnovno mehaničko svojstvo materijala na osnovu kojeg se materijali vrednuju prema njihovoj mehaničkoj otpornosti na smicanje te se u praksi proračunava izrazom:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (6.9)$$

gdje su:

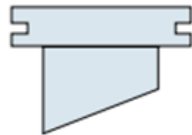
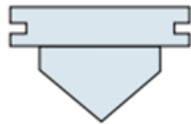
τ – smična čvrstoća [N/mm²]

F – primijenjena sila [N]

A – poprečni presjek materijala; usporedan sa silom [mm²]

6.1.2. Rezni faktor x

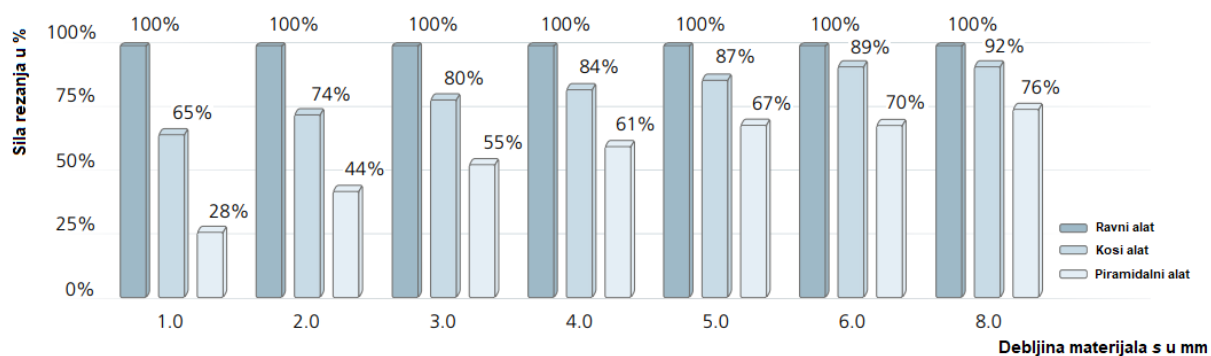
Faktor rezanja x značajno doprinosi iznosu ukupne sile rezanja, a njegov iznos ovisi o izboru probijača, točnije obliku njegovog vrha. Probijači ukošenih reznih površina su 3 mm duži od ravnih, a ta dodana duljina dolazi od same kosine čiji maksimalni kut kosine iznosi 5° .

Debljina u mm	Rezni faktor X kod ravnih alata	Rezni faktor X kod kosih alata	Rezni faktor X kod piramidalnih alata
			
1.0	1.00	3.50	1.53
1.5	1.00	2.66	1.44
2.0	1.00	2.25	1.35
2.5	1.00	2.00	1.30
3.0	1.00	1.83	1.25
3.5	1.00	1.71	1.11
4.0	1.00	1.62	1.19
5.0	1.00	1.50	1.15
6.0	1.00	1.41	1.12
8.0	1.00	1.31	1.08
10.0	1.00	1.25	1.00

Slika 32. Rezni faktor x prema obliku vrha probijača [3]

Korištenje ukošenih alata ima znatne prednosti:[3]

- Smanjenje nepravilnosti, odnosno izobličenja lima jer je napetost u materijalu niža za 20%
- Razina zvuka se smanjuje do 14 dB što rezultira smanjenjem razine buke za više od 50% u nekim materijalima
- Potrebna sila rezanja smanjena je za do 72%, također ovisno o debljini materijala



Slika 33. Potrebna sila rezanja u odnosu na debljinu materijala i obliku vrha probijača [3]

6.2. Rezna zračnost

Udaljenost reznih bridova matrice i probijača naziva se rezna zračnost, a mjeri se u zadanoj ravnini koja mora biti okomita na samu rezu ravninu. Veličina zračnosti utječe na silu rezanja, trošenje reznih bridova matrice i probijača te samu kvalitetu probijanja. Zračnost iznosi:[1]

$$z = \frac{D-d}{2} \quad (5.2)$$

$$Z = D - d \quad (5.3)$$

gdje su:

z – rezna zračnost u [mm]

Z – ukupna zračnost u [mm]

D – promjer matrice u [mm]

d – promjer probijača u [mm]

Također, veličina zračnosti ovisi primarno o čvrstoći i debljini materijala, a zatim o kvaliteti rezne plohe i izvedbi stroja. Iznimno je važno imati točnu veličinu ukupne zračnosti kod probijanja jer u slučaju obrade veće debljine materijala korištenjem matrice koja ima preveliku ili nedovoljnu ukupnu zračnost, rezni rub probijača bit će pod visokim opterećenjem. Obično iznosi otprilike 20% debljine lima, a ako se probijanje vrši na mekšim materijalima poput aluminija, preporučuje se zračnost od 10%. Na temelju ove vrijednosti, određuje se i prikladna matrica koja ima iste dimenzije kao i geometrija probijača uz dodanu, prije spomenutu empirijsku vrijednost od 20% debljine lima: [2]

$$\phi D = \phi d + 0,2 \cdot s \quad (5.4)$$

gdje je nova varijabla s , odnosno debljina materijala u milimetrima.

Tablica 2. Vrijednosti ukupne zračnosti prema vrsti i debljini materijala [3]

Vrsta materijala	Debljina materijala u milimetrima							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Aluminij (AlMg3)								
Min.	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
Opt. (Rezna zračnost 10%)	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Max. (Rezna zračnost 20%)	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60
Čelik (DC01)								
Min.	0.10	0.20	0.30	0.40	0.60	0.70	0.90	1.00
Opt. (Rezna zračnost 20%)	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60
Max.	0.30	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80
Nehrđajući čelik								
Min.	0.10	0.20	0.30	0.40	0.60	0.70	0.90	1.00
Opt. (Rezna zračnost 20%)	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60
Max.	0.30	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80

Za određivanje ravnoteže između stvaranja srha i trošenje alata, kao referenca uzimaju se vrijednosti iz tablice ukupnih zračnosti. Minimalna vrijednost se uzima u slučaju potrebne

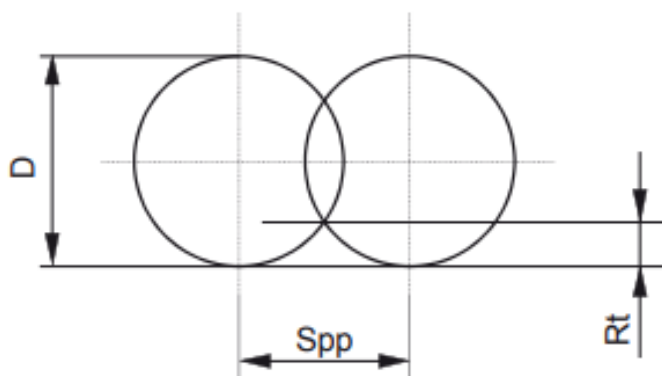
posebno niske razine stvaranja srha uzevši u obzir da se povećavaju potrebna sila rezanja i trošenje alata. U suprotnom slučaju, uzimanje maksimalne vrijednosti zračnosti omogućava pokrivanje više debljina materijala kod probijanja, ali se stvaranje srha proporcionalno povećava s povećanjem debljine. Odabir optimalne vrijednosti rezultira idealnom ravnotežom između stvaranja srha i trošenja alata. Za naknadnu obradu odabire se pjeskarenje koje služi za skidanje srha kod proizvoda. Tablične vrijednosti su orijentacijske, a one se provjeravaju isprobavanjem i poboljšavaju po potrebi.

6.3. Sjeckanje

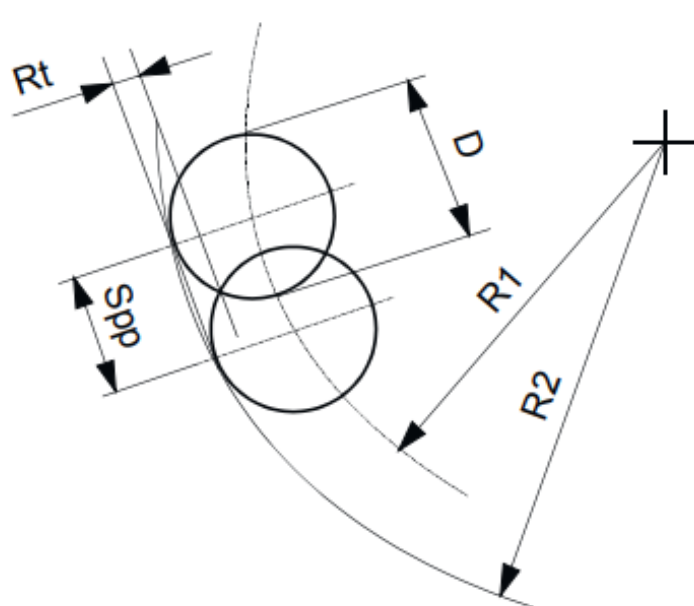
U slučaju probijanja provrta ili otvora u svrhu stvaranja konture koristi se postupak sjeckanja materijala. Postupak sadrži probijanje otvora ili provrta jednog za drugim tako da dolazi do preklopa što omogućuje stvaranje kontura svih oblika. Početni udarci pojedinih probijanja su i dalje vidljivi i osjetni te se stvara osnovni rezni brid. Ovisno o nepotrebnoj visini ostatka materijala i korištenom alatu, korak alata određuje koliko se alat pomiče svakom operacijom probijanja. Pravila kod sjeckanja u praksi su sljedeća:

- Za ravnu konturu koriste se alati kvadratnog ili pravokutnog presjeka
- Vanjski radijus sjeckan je uglavnom alatom kvadratnog ili kružnog presjeka
- Unutarnji radijus sjecka se alatom kružnog presjeka

Sjeckanje alatom kružnog presjeka koristi se u praksi isključivo za konture unutarnjeg radijusa kružnim prolazom alata dok se za linearno sjeckanje ne koristi, ali navodi se izraz koji nam koristi u izračunu kružnog koraka alata: [2]



Slika 34. Linearni korak alata kružnog presjeka [2]



Slika 35. Kružni korak alata kružnog presjeka [2]

$$Spp_{linear} = \sqrt{4 \cdot Rt \cdot (D - Rt)} \quad (6.10)$$

$$Spp_{circular} = Spp_{linear} \cdot \frac{R1}{R2} \quad (6.11)$$

gdje su:

Spp_{linear} – linearni korak alata [mm/udarac]

$Spp_{circular}$ – kružni korak alata [mm/udarac]

Rt – visina ostatka materijala [mm]

D – promjer udarca [mm]

$R1$ – radijus putanje središnje točke alata [mm]

$R2$ – radijus izradka [mm]

Sjeckanje alatom kvadratnog ili pravokutnog presjeka izvodi se linearno za ravne konture, a kružno za obradu kontura vanjskih radijusa dok je izraz za kružnu obradu jednak i za unutarnji i vanjski radijus te je jednak za bilo koji korišten alat (kvadratni ili kružni presjek). Izraz za obradu ravnih kontura dijeli se na raspon vrijednosti: [2]



Slika 36. Linearni korak alata pravokutnog presjeka [2]

$$Spp_{\min} = \frac{L}{2} \quad (6.12)$$

$$Spp_{\max} = L - 2 \text{ mm} \quad (6.13)$$

gdje su:

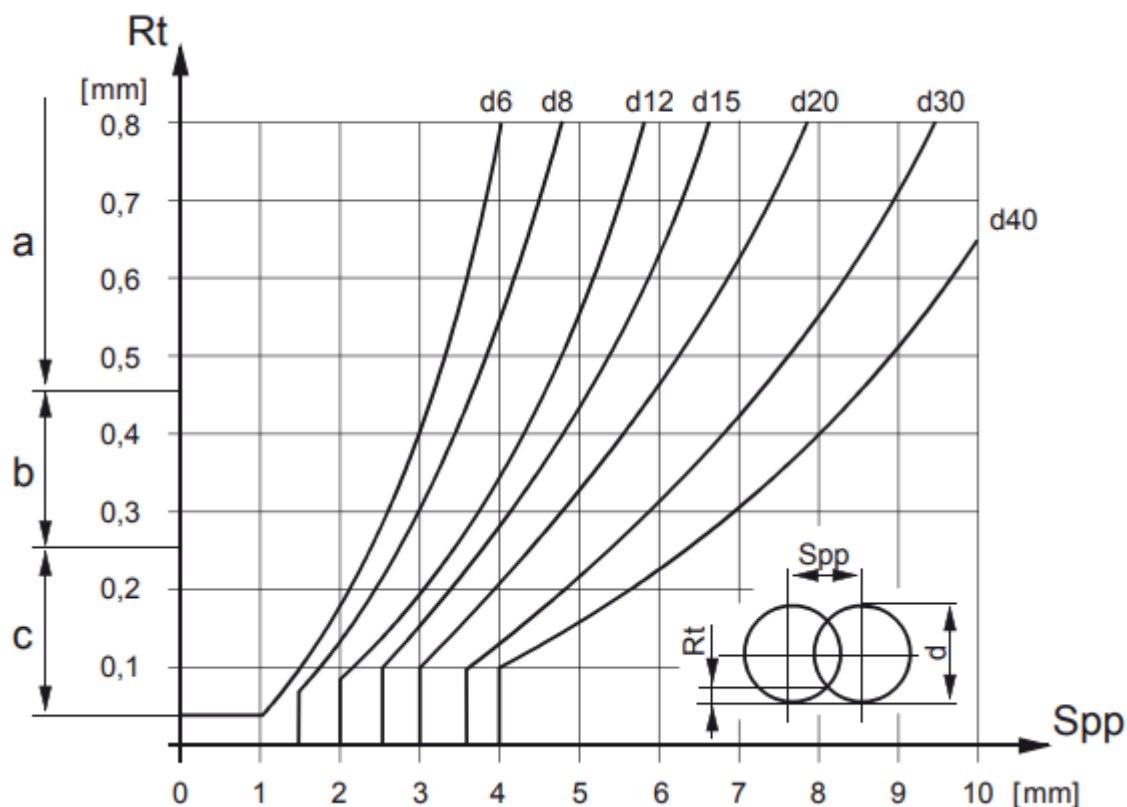
$Spp_{\min}$ – minimalni korak alata [mm/udarac]

$Spp_{\max}$ – maksimalni korak alata [mm/udarac]

L – duljina udarca [mm]

6.3.1. Kvaliteta probijanja kod sjeckanja

Kod probijanja konture metodom sjeckanja alatom kružnog presjeka, sjeckani rub karakterizira nepravilnost koja se očitava u odabranom koraku alata, a prema tome i visini ostatka materijala na putanji. Manji korak alata poboljšati će kvalitetu konture, odnosno smanjiti nepravilnosti. Optimalan korak sjeckanja s alatima kružnog presjeka prikazan je na sljedećem dijagramu ovisnosti koraka alata, radijusu udarca alata te visini ostatka materijala. Isti graf vrijedi i za alat kockastog presjeka u kružnoj putanji.



Slika 37. Graf optimalnog koraka alata [3]

U grafu su prikazana područja kvalitete ruba konture sa slovima a, b i c te označuju grubo, srednje i fino probijenu konturu proizvoda. Za minimalni korak s materijalom debljine koristi se sljedeće nepisano pravilo:[2]

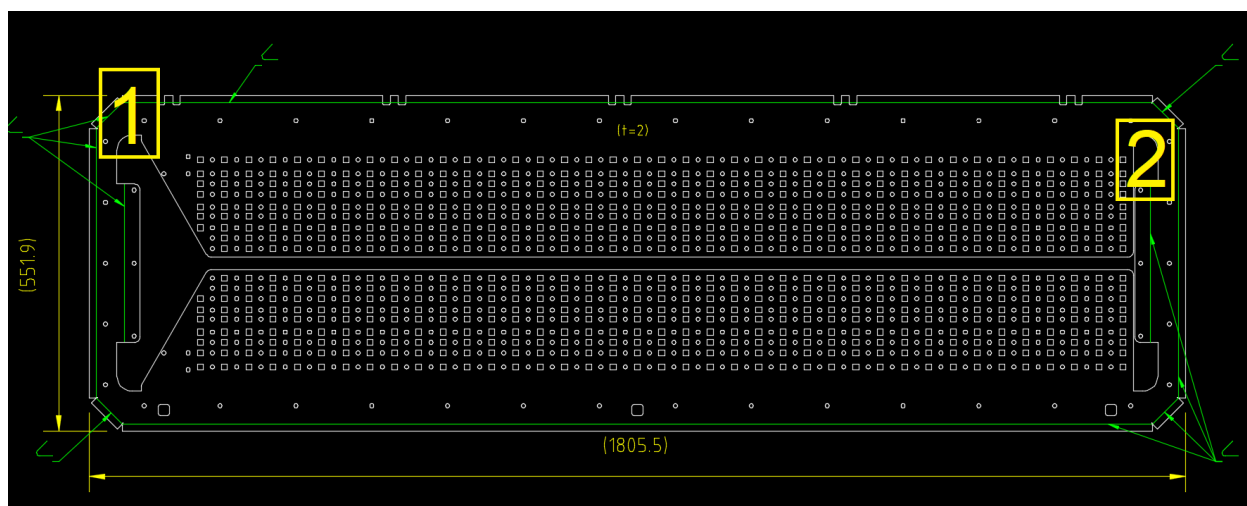
$$Spp_{\min} = 0,5 \cdot s \quad (6.14)$$

Kod nekih izvedbi ključan faktor je točnost, kao kod probijanja precizno dimenzioniranih provrta koje zahtijevaju maksimalnu točnost jer se koriste za umetanje i montažu zakovica ili ostalih spojnih ili montažnih komponenata. Precizno probijanje zahtijeva poseban pristup te se takvi provrti najprije probijaju alatom manjih dimenzija od potrebne sa zračnosti iznosa od 20% debljine materijala, a kasnije se koristi specijalan alat koji za izradu finalnog promjera ima manju zračnost, od 0,1 do 0,2 mm ili 10% debljine materijala.

7. Izrada proizvoda

7.1. Proizvod

Slika 38 prikazuje poziciju koja će se obraditi procesom probijanja prema daljnjim postupcima. Pozicija je dio većeg sklopa, a u suštini prikazuje metalnu bazu i okvir na koji se postavljaju ostale pozicije u sklopu, a sam sklop su vrata korištena za strujne ormare u vlakovima. Za postupak probijanja najvažniji je razvijen lim proizvoda jer prikazuje željeni ciljni proizvod. Kod razvijanja pozicije uzima se u obzir razvlačenje materijala koje ovisi o debljini materijala, veličini matrice i veličini žiga kod daljnjeg procesa savijanja. U konačnici dolazi se do dimenzije razvijenog lima duljine 1805,5 mm i širine 551,9 mm. Za izradu proizvoda koristi se ploča debljine 2 mm materijala S280GD+Z275 dimenzija 2000 x 1500 mm prethodno spomenutih u poglavlju 3.



Slika 38. Razvijeni lim s prikazanim linijama savijanja (zeleno)

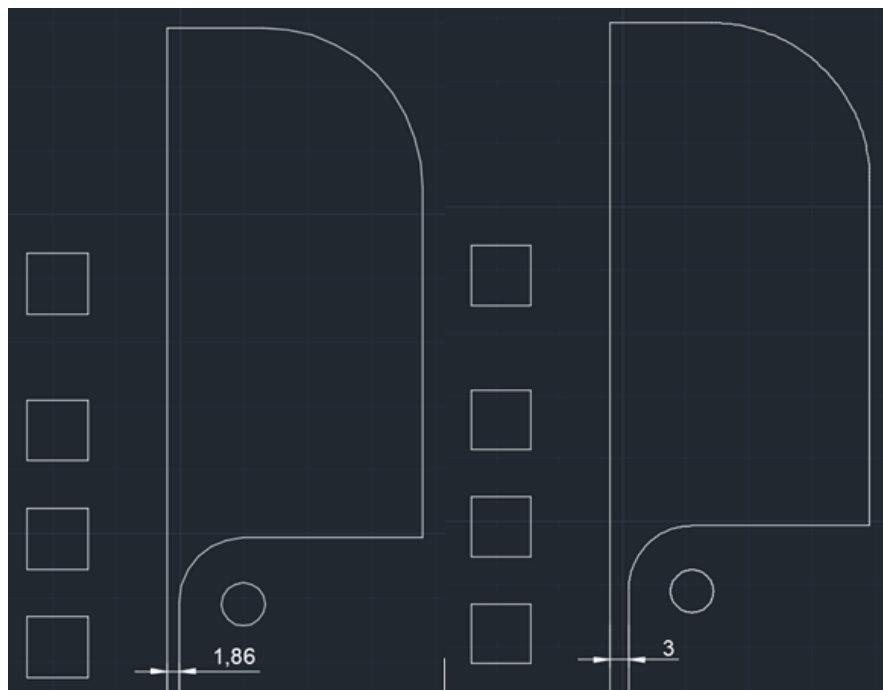
7.2. Konstrukcijska rješenja

Kod dobivenog razvijenog lima nailazi se na dva problema, označenih brojevima 1 i 2 na slici 38. Brojem 1 označen problem javlja se zbog sljedeće tehnologije obrade, savijanja. Spojne uture za savijanje nije moguće izraditi probijanjem zbog nedostatka geometrije alata te se oni neznatno prepravljaju u oblike koje je moguće izraditi osnovnim alatima, pritom pazeći na željene dimenzije proizvoda. Dodavanjem kruga promjera 3 mm u vrh prethodne geometrije utora omogućuje se probijanje provrta i ulazak alata koji se koristi za probijanje utora, u ovome slučaju alat pravokutnog presjeka dimenzije 11 x 1,5 mm prikazanog u sljedećem poglavlju optimiziranja.



Slika 39. Konstrukcijsko rješenje 1: prije (lijevo), poslije (desno)

Na slici 40 istaknut je dio pozicije koji prikazuje otpad unutar komada kojeg se potrebno riješiti na najlakši mogući način. Trake koja spaja središnji dio otpada jest zazor koji se obrađuje zbog naknadne tehnologije savijanja „krila“ proizvoda, a širina joj iznosi 1,86 mm. Konture dužih dimenzija režu se reznim alatima s najdužom jednom stranicom svoje geometrije. U ovome slučaju to su alati pravokutnog presjeka dimenzija 76 x 3 mm te je potrebno spomenutu traku proširiti za dodatnih 1,14 mm udesno pritom uzimajući u obzir da svi otvori i provrti okolo ostanu na istim udaljenostima i da takvo rješenje ne šteti izgledu krajnje pozicije, a uvelike pomaže kod probijanja.



Slika 40. Konstrukcijsko rješenje 2: prije (lijevo), poslije (desno)

8. Optimizacija

8.1. TruTops

TruTops je računalni program koji koriste strojevi marke TRUMPF koji savijaju, probijaju ili laserski režu lim. Računalni program rješava i dizajn i programiranje te omogućuje pokrivanje više koraka u procesu i dosljedan rad. Obuhvaća svaki korak obrade pozicija, od komponenata do gotovog NC programa za savijanje, probijanje ili lasersko rezanje. TruTops je integrirani računalni program s povezanom inteligencijom koja omogućuje idealnu interakciju između stroja i računalnog programa.

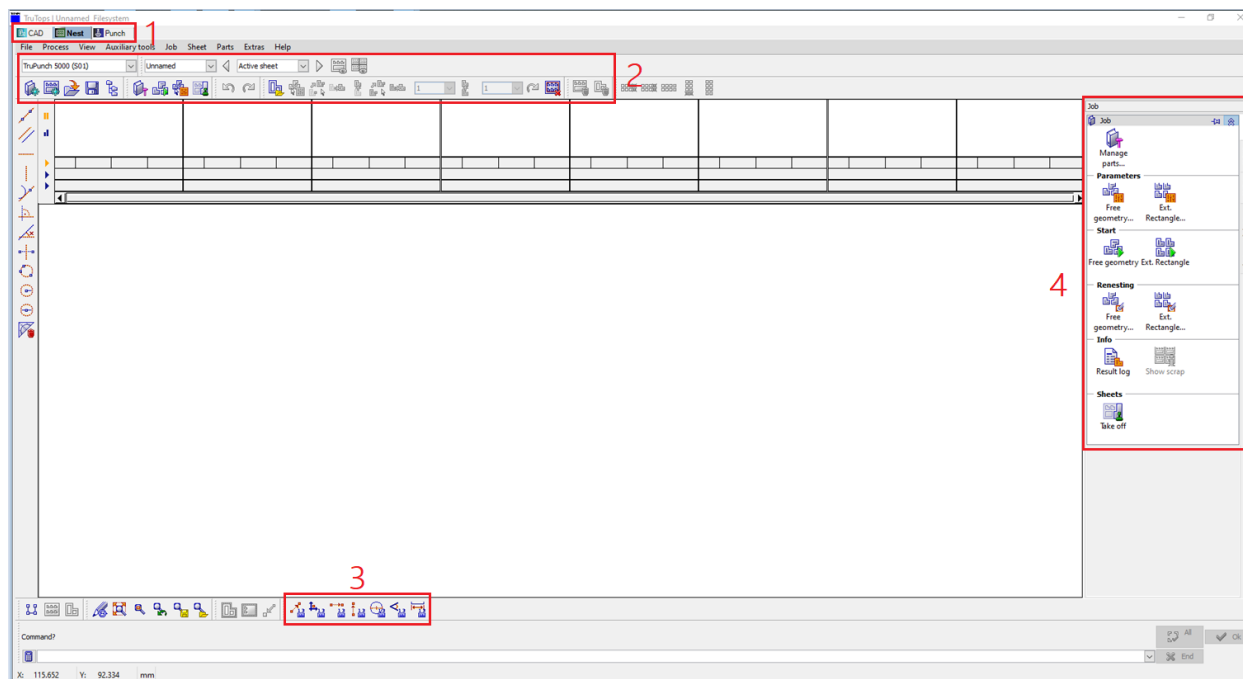
8.2. Tipovi datoteka

GEO ekstenzija (TruTops Geometry File) je 3D CAD datoteka spremljena u GEO obliku; sadrži dizajn lima i koristi ga računalni program TruTops. Datoteka uključuje podatke o konturi, podatke o materijalu i debljini materijala, odnosno neprocesuiranu geometriju. Suprotno GEO datoteci je datoteka GMT koja uz sve sadržaje GEO datoteke uključuje i procesuiranu geometriju pozicije s već gotovim putanjama alata spremnih za pozicioniranje na mrežu ploče. U istom odnosu nalaze i datoteke s ekstenzijama TAF i TMT, gdje TAF označuje gotovu neprocesuiranu mrežu ploče s jednom ili više pozicija, dok TMT dodaje putanje alata na tu geometriju te je preostala samo optimizacija putanji u kasnijem koraku.

Također važne datoteke jesu JOB i LST. JOB se koristi od točke stavljanja pozicija na ploču do samog kraja optimizacije, svi procesi i sve putanje spremaju se pod ovu datoteku te se kod otvaranja i želje promjene određenih ili putanja ili rasporeda samih pozicija uvijek odabire JOB datoteka. LST datoteka sadrži NC kod programa koji se izvodi u SIEMENS Sinumerik 840D, a potrebno ga je proslijediti operateru koji odabire i učitava željeni program kojim započinje proces probijanja.

8.3. Korisničko sučelje računalnog programa

Pokretanjem računalnog programa TruTops otvara se prozor na slici 41 koji prikazuje korisniku različite točke interesa numerirane brojevima od 1 do 4.



Slika 41. Sučelje računalnog programa TruTops

Pod brojem 1 dana su na odabir tri različita prozora u kojima se obavlja cijeli dio posla koji uključuje programiranja, optimizacije i generiranja NC koda. Tri prozora redom nose nazive: CAD, Nest i Punch. Kartica CAD ima većinu mogućnosti kao i srodni programi istog naziva, ali one su nedovoljno razvijene do potrebne razine jednog takvog računalnog programa te se ova kartica koristi isključivo u svrhu pretvaranja DXF datoteke u GEO datoteku jer je tako jedino moguće učitavanje razvijenog lima pozicije u daljnjim procesima optimiziranja.

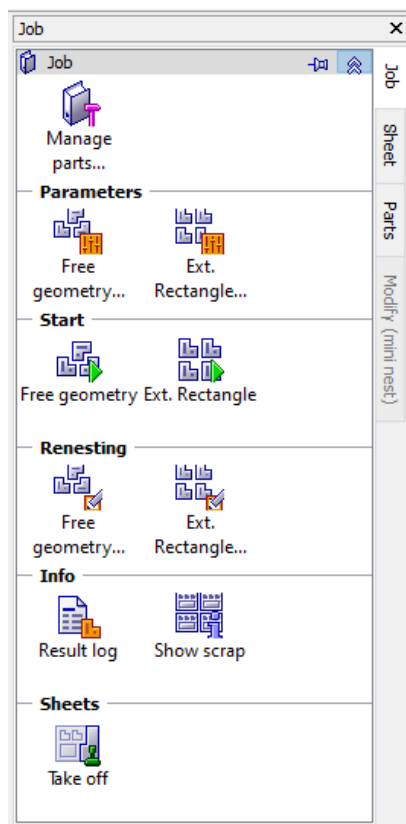
Kod alatne trake broj 2 u gornje redu se po redu nalaze: izbornik stroja, izbornik programa, aktivna ploča u programu te dva različita tipa pregleda prozora Nest. Donji red sadrži: nova JOB datoteka, dodavanje nove ploče, otvaranje postojeće ploče ili mreže ploča te spremanje JOB datoteke.

Alatna traka broj 3 pruža mogućnosti brzog dimenzioniranja i mjerenja potrebnih ili zanimljivih točaka interesa. Nude se mogućnosti slobodnog mjerenja, mjerenja od ishodišta, horizontalnog mjerenja, vertikalnog mjerenja, mjerenja polumjera i promjera i mjerenje kuta između dvije linije.

Najvažniji izbornik se i kod prozora Nest i prozora Punch uvijek nalazi na broju 4 čije se sučelje sastoji od biranja vertikalnog imenovanih kartica s desne strane izbornika i otvaranja njihovih podizbornika u većem prozoru s lijeve strane.

8.4. Prozor „Nest“

Slika 41 već prikazuje izgled prozora Nest te će se samo objasniti funkcije prikazanih naredbi u traci broj 4. Koriste se uglavnom tri naredbe tijekom procesa stvaranje mreže ploče.



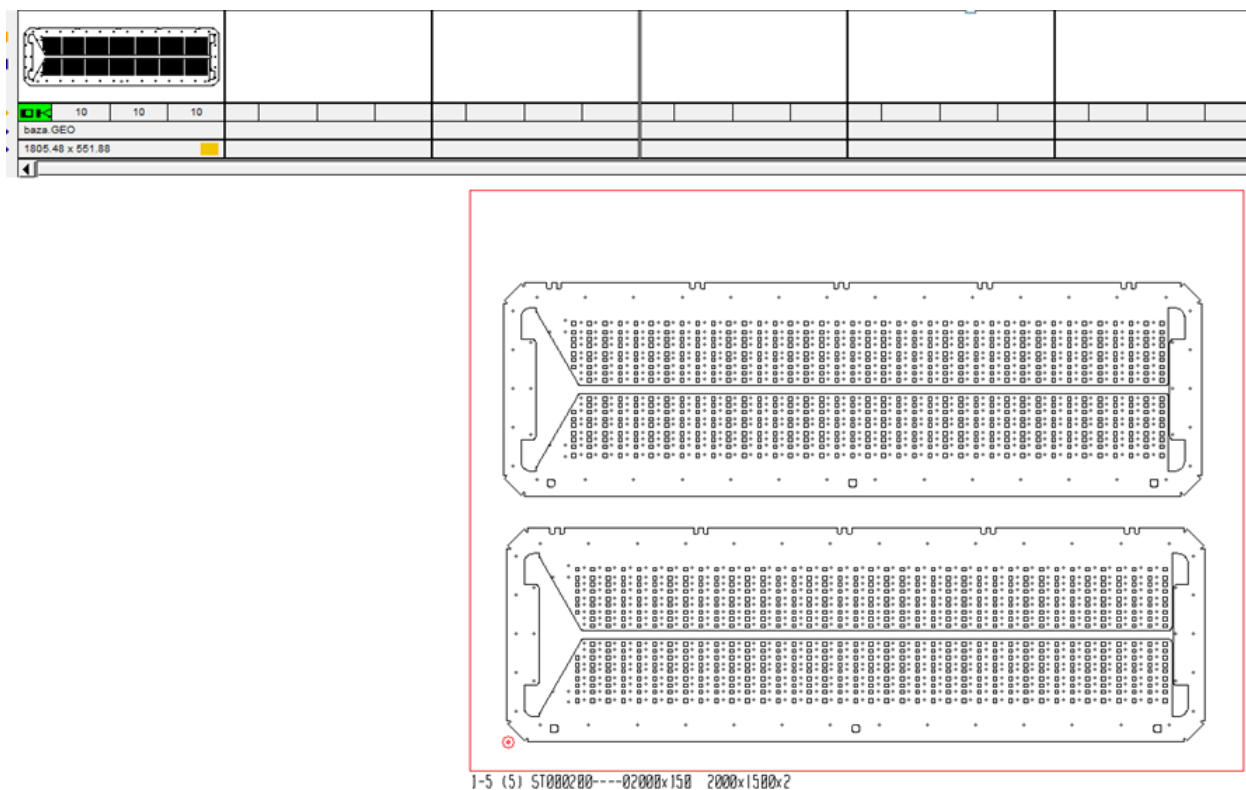
Slika 42. Uvećani izbornik broj 4

Naredba *Ext. Rectangle...* pod kategorijom *Parameters* služi za postavljanje parametara ploče koja se obrađuje. Parametri poput debljine materijala, dimenzije ploče, broj raspoloživih ploča u skladištu, margine ploče, razmaka između dvije pozicije u mreži i izbora stroja koji obavlja proces probijanja i njegov pripadajući postprocesor.

Debljina se postavlja na 2 mm, dok su dimenzije ploče koja se koristi za pozicije u radu 2000 x 1500 mm. Kod margina je važno postavljanje donje ruba na 75 mm jer se ispod te linije nalaze hvataljke čiji radni prostor obuhvaća 73 mm visine, a u slučaju postavljanja putanje alata u radni prostor hvataljke, obavezna je automatska repozicija ploče koja se odvija pritiskom glave stroja na ploču i pomicanjem linearne šine stroja u zadanu poziciju te ponovni hvat ploče.

Manage parts otvara prozor u koji se dodaju GEO datoteke ili već procesuirane GMT datoteke. Dodaje se potreban broj pozicija te se odabire mogućnost rotiranja pozicije u mreži što omogućava optimalno slaganje u slučaju manjih pozicija. Odabirom potrebnih opcija i pritisak tipke *Ok* pojavljuje se u gornjoj alatnoj traci slika pozicije s određenim zadanim potrebnim brojem.

Ext. Rectangle pod kategorijom *Start* automatski generira i postavlja pozicije na ploče zadanih dimenzija. Naredba je posebno korisna za pregledavanja odnosa kod većeg broja pozicija, iako su uglavnom takva automatska sortiranja nepovoljna i stvaraju previše otpada.

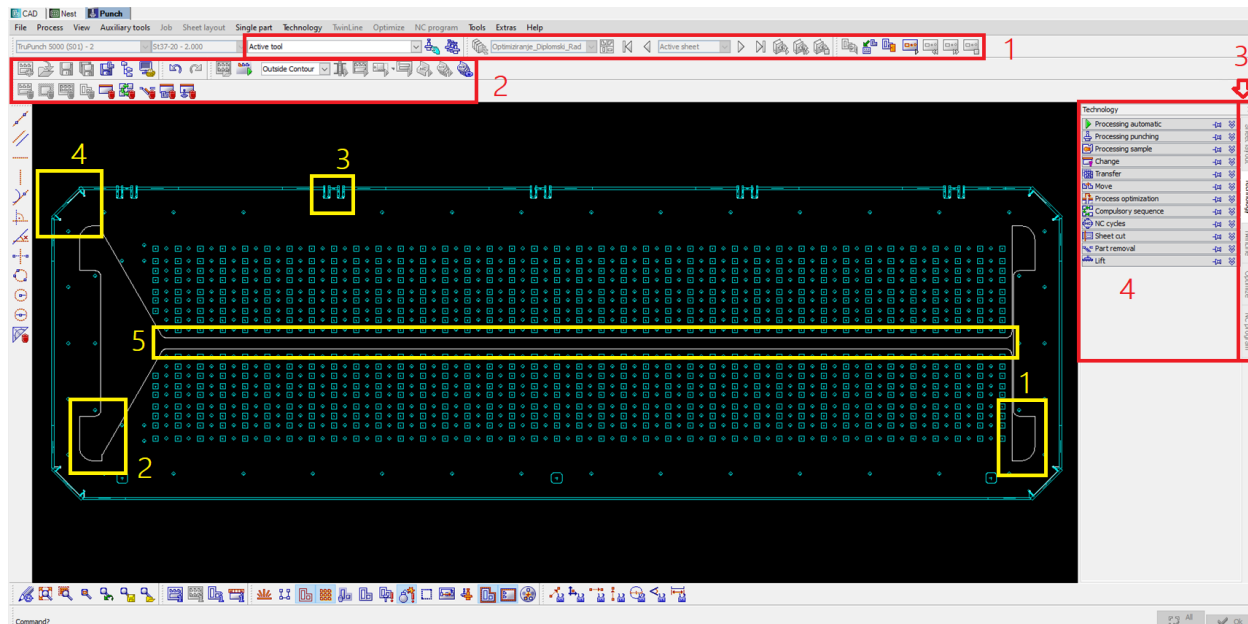


Slika 43. Konačni izgled mreže lima s potrebnim pozicijama

Na slici 43 prikazan je konačan izgled mreže lima kod kojeg će se kasnije provoditi proces optimizacije putanje alata u prozoru „Punch“. U gornjoj traci je prikazan željen broj gotovih pozicija dok su ispod mreže navedene dimenzije lima i potreban broj početnog materijala za prije određeni broj pozicija. Otvorena JOB datoteka se sprema i otvara u sljedećem prozoru „Punch“.

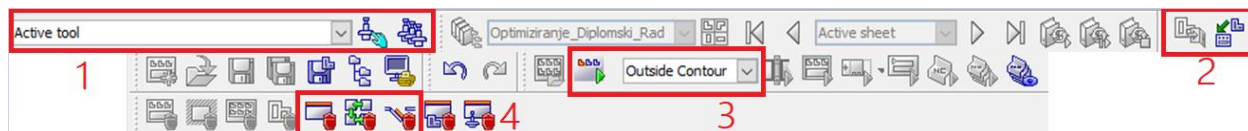
8.5. Prozor „Punch“

Otvaranjem JOB datoteke u ovom prozoru dobiva se sučelje prikazano na slici 44 koje je također crveni numerirano točkama interesa od 1 do 4, dok žuta boja prikazuje probleme kod postavljanja putanji alata koji se rješavaju u sljedećem poglavlju.



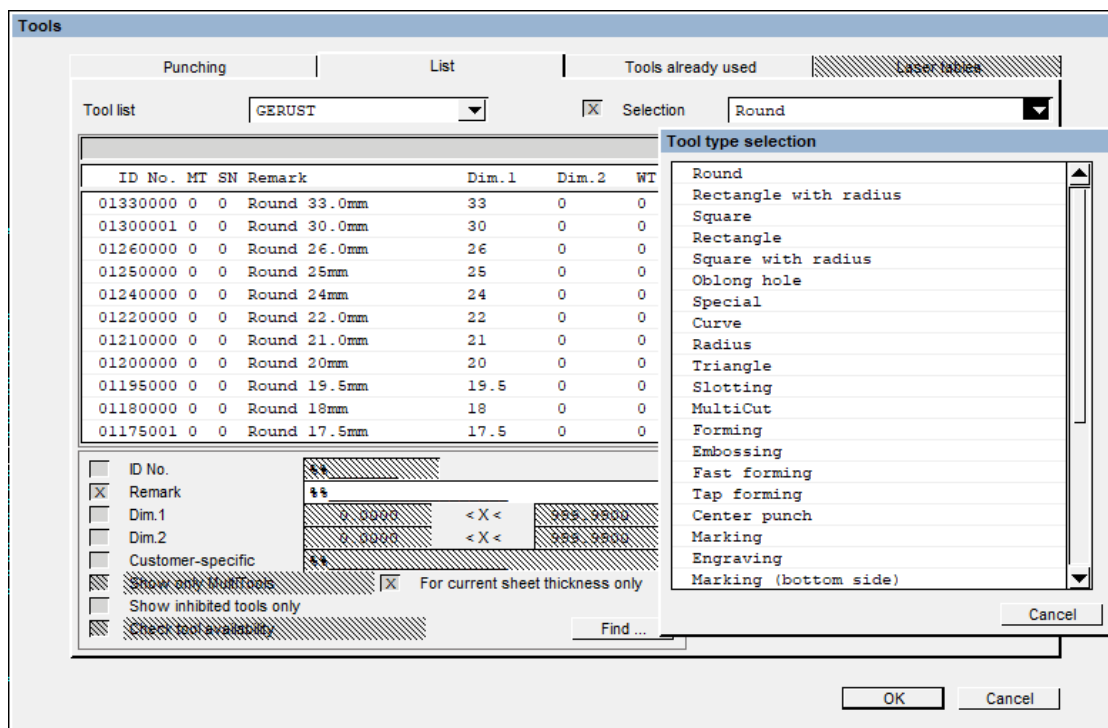
Slika 44. Sučelje prozora „Punch“

Na slici 45 uvećane su alatne trake pod brojevima 1 i 2 koje ostaju iste tijekom cijelog procesa optimizacije.



Slika 45. Uvećane alatne trake 1 i 2

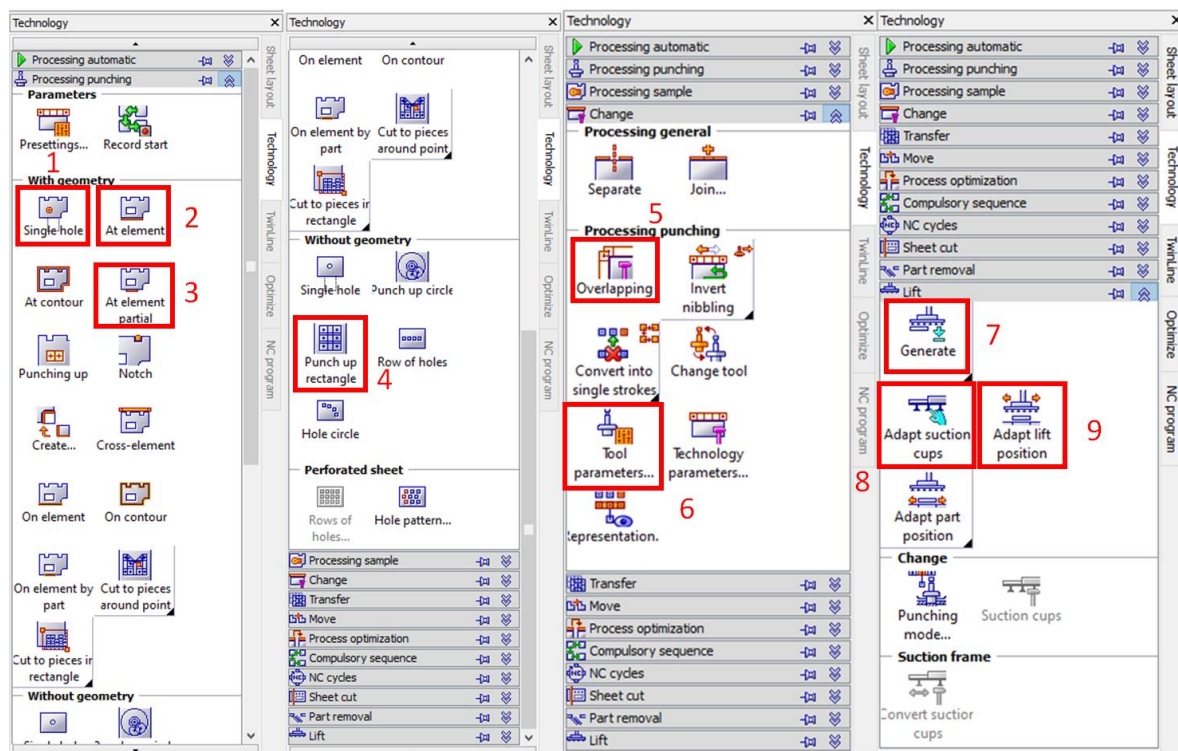
Pod brojem 1 na slici 45 smještene su najvažnije naredbe: traka koja prikazuje trenutno izabrani alat, umetanje novog alata te izbor alata iz postojeće liste alata. Pritiskom na listu alata otvara se prozor na slici 46. Uz listu svih alata poredanih po različitoj geometriji i vrsti alata, moguć je i pregled već korištenih alata kod trenutnog probijanja te je potrebno obratiti pažnju da broj alata nikad ne prelazi broj 18 zbog ograničenog broja alata u prije navedenom linearnom spremištu alata. Odabirom alata i pritiskom gumba OK odabrani se alat prikazuje u traci alata i spreman je za ubacivanje putanji ili probijanja provrta.



Slika 46. Lista alata

Naredbama u prozoru 2 (1: *Single part mode*; 2: *Exit single part mode*) mijenja se perspektiva prikaza pozicija u samom programu. U ovom slučaju postoji samo jedna pozicija koja se obrađuje te se prozor automatski postavlja u prozor izolacije pozicije. Naredbe u prozoru 3 sastoje se od naredbe *Process complete part or sheet automatically* i padajućeg izbornika koji bira željene linije koje se pritiskom prve naredbe automatski popunjavaju putanjama alata, a ovdje je potrebno izabrati *Outside Contour*. Računalni program automatski prepoznaje većinu otvora i provrta, ako za odgovarajuće dimenzije postoje odgovarajući alati u listi alata. Slika 44 tako već prikazuje izgled pozicije u prozoru izolacije i sa automatski prepoznatim putanjama i probijanjima koje uvelike pomažu u kasnijoj optimizaciji. Posljednje naredbe u prozoru 4 brišu redom: putanju, niz putanji te odabranu tehniku odstranjivanja pozicije.

Alatna traka 3 prikazuje vertikalni izbornik s pet dodatnih izbornika, od kojih su samo tri važna za optimiziranje: *Technology* (Slika 47), *Optimize* (Slika 53; lijevo, sredina), *NC program* (Slika 53; desno). Izbornik *Technology* otvara dvanaest novih padajućih izbornika; tri najvažnija izbornika koja se koriste su: *Processing punching* (Slika 47; lijevo, sredina lijevo), *Change* (Slika 47; sredina desno), *Lift* (Slika 47; desno).



Slika 47. Izbornik „Technology“

Korištenje naredbi u prva dva prozora omogućava se odabirom željenog alata koji odgovara provrtu, otvoru ili konturi pozicije. Geometrija odabranog alata se postavlja na sljedeći način:

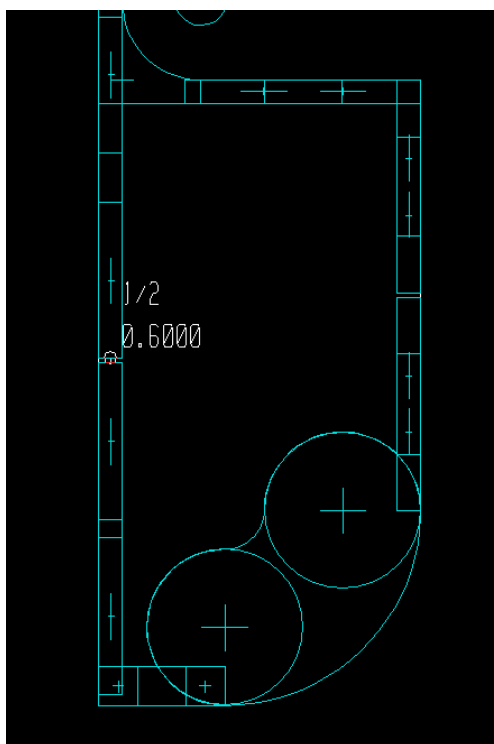
- 1) *Single hole* postavlja geometriju alata u jednu točku na poziciji, uglavnom se koristi kod otvora ili provrta koji nisu automatski generirani prethodnom naredbom.
- 2) *At element* postavlja putanju alata duže cijele njezine duljine, a koristi se kod sjeckanja konture pozicije te se uglavnom izvodi s alatima kvadratne ili pravokutne geometrije osim kod slučaja obrade unutarnjeg radijusa kad se koristi kružni alat.
- 3) *At element partial* također postavlja putanju alata kao i prethodna naredba, ali po duljini prema želji korisnika; potrebne su tri odredišne točke: prva označuje konturu pozicije, dok su druga i treća rubne točke putanje.
- 4) *Punch up rectangle* zahtjeva također tri odredišne točke za izvedbu: prva točka označuje početak prvog udarca alata, druga točka predstavlja kraj putanje, a trećom točkom se određuje kut same putanje; računalni program generira optimalnu putanju alata unutar zadanog pravokutnika koji je određen prvom i zadnjom točkom te ih popunjava prolazima izabranog alata, uglavnom kvadratne geometrije. (Slika 50)

Naredbom *Overlapping* pod brojem 5 produžuje se ili skraćuje željena putanja alata koja će biti korisna u daljnjim rješenjima, dok se naredbom broj 6 *Tool parameters...* uključuje već spomenuta opcija *Presser foot* na željene alate koja je u ovome slučaju potrebna kod dijela perforacije provrta i otvora u sredini pozicije.

8.5.1. Optimizacija putanja alata

Na slici 44 žuto su označeni i numerirani mogući problemi kod optimiziranja putanja alata, brojevima od 1 do 5. Računalni program automatski ne pronalazi optimalna rješenje te je kod nekih koraka potrebno veće empirijsko znanje korisnika.

Kod problema numeriranog brojem 1 i prema slici 48 nailazi se na unutarnji radijus veličine 25 mm i vanjski radijus veličine 10 mm te problem kod odstranjivanja otpadnog komada van kostura lima nakon obrade svih alata. Standardni alat za sjeckanje manjih komadića lima obavlja se stavljanjem alata pravokutne geometrije dimenzija 20 x 3 mm, dok se manja linija na dnu komadića rješava prolazom alatom kvadratne geometrije dimenzije 5 x 5 mm. Za vanjski radijus 10 mm potrebno je jedno probijanje već prethodno spomenutog i generiranog alata kategorije B, koji odgovara dimenzijama radijusa 10 mm i brida 3 mm koji odgovara ostalim alatima za sjeckanje. Unutarnji radijus 25 mm rješava se sjeckanjem po kružnoj putanji alatom kružne geometrije promjera 10 mm.



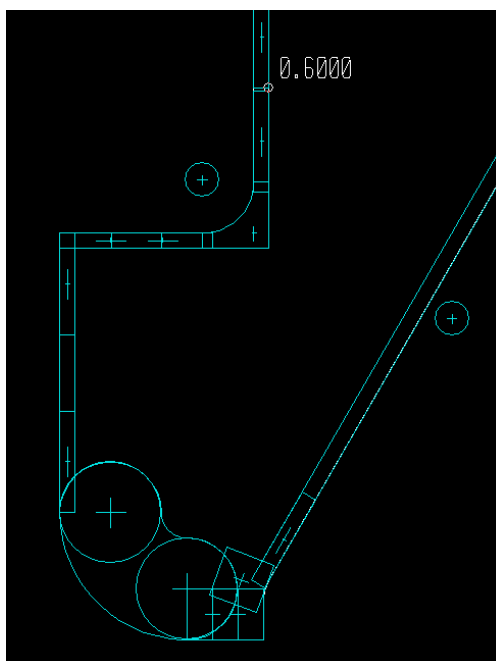
Slika 48. Rješenje 1

Potreban je finiji rub obrade, što znači manji ostatak materijala R_t i što manji korak alata S_{pp} . Prema grafu na slici 37 uzima se korak alata S_{pp} od 3 mm koji daje ostatak R_t od 0,2 mm što spada u kategoriju C, odnosno fino sjeckana kontura.



Slika 49. Probijanje rješenja 1

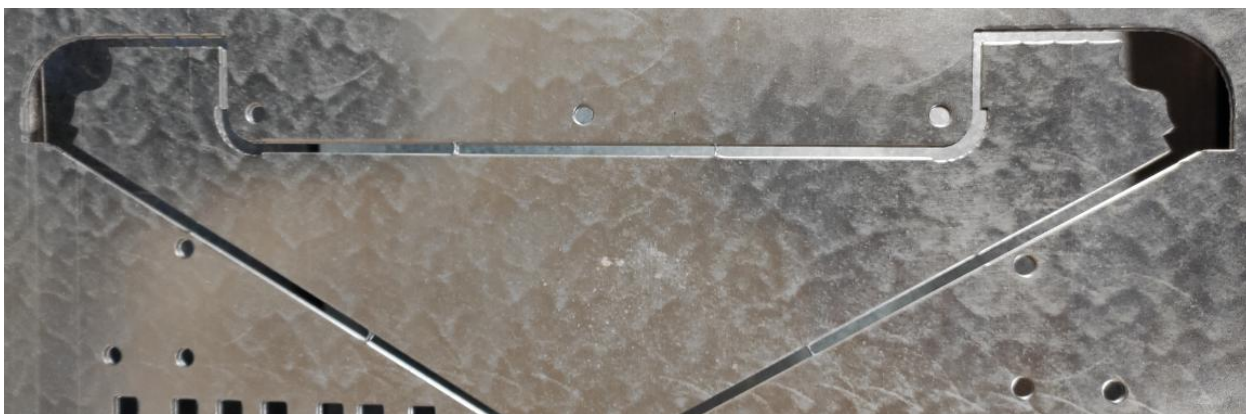
Za odstranjivanje komadića lima javljaju se dvije opcije. Prva opcija je ispadanje kroz poklopac stroja, dok je druga uvođenje sitnih spojeva između otpada i materijala koji će se koristiti za cijeli središnji otpad proizvoda. Odabrana je druga opcija i zato se koristi naredba *Generate microjoint* koji se nalazi u izborniku *Technology* i padajućem izborniku *Process optimization*, a debljina spoja za ovakav materijal debljine 2 mm iznosi 0,6 mm kao što je i prikazano na slici 48.



Slika 50. Rješenje 2

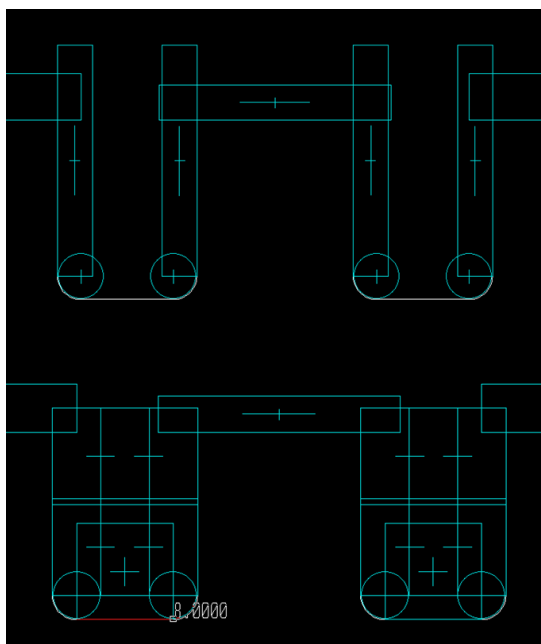
Problem numeriran brojem 2 sadrži iste zahtjeve kao i u prethodnom primjeru uz dodatak vanjskog radijusa koji nije pod kutom od 90°, ali za rješavanje je dovoljno jedno probijanje

ukošenim alatom kvadratne geometrije stranica 10 mm. Odstranjivanje se također rješava uvođenjem sitnih spojeva duž cijele dužine otpada.



Slika 51. Probijanje rješenja 2

Za problem žuto numeriranim brojem 3 potrebno je izraditi deset identičnih utora duž gornjeg brida proizvoda. Na slici 52 prikazan je utor koji je računalno automatski generiran. Bitno je uočiti dužinu donjeg brida utora koja iznosi 8 mm i ona određuje kojim alatom će se probijati cijela površina utora.



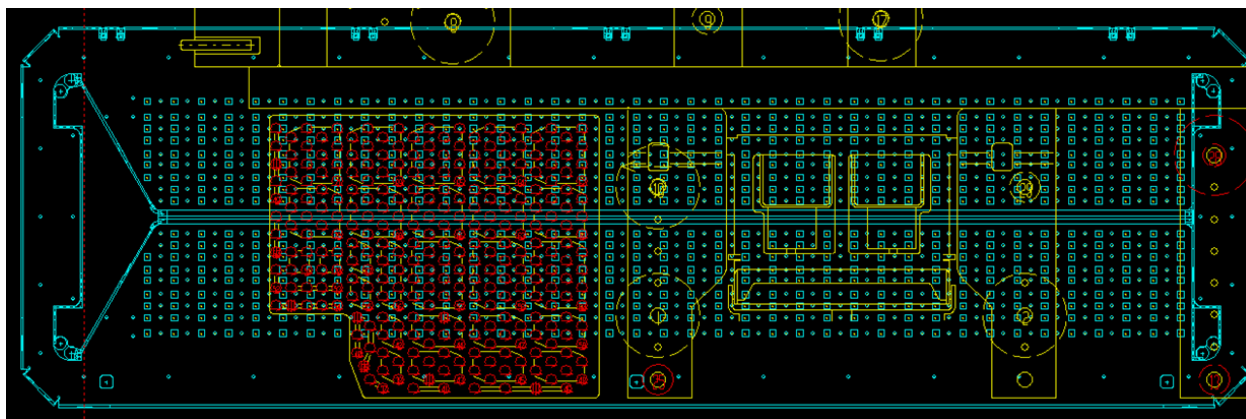
*Slika 52. Rješenje 3; automatski generirane putanje (gore),
optimizirano probijanje utora (dolje)*

Razlog uklanjanja cijele površine utora je moguća smetnja dodatnog komada materijala kod vađenja pozicije *Sheetmaster*-om zbog kolizije proizvoda i kostura lima koje bi rezultiralo u savijanju cijelog lima i sigurnog oštećenja dijela stroja. Brišu se automatski generirane bočne stranice utora te se naredbom *Single hole* postavlja jedno probijanje po donjem bridu, a

naredbom *Punch up rectangle* se prostor materijala ispunjava s dva reda prijelaza alatom. Alat korišten kod oba probijanja jest kvadratne geometrije stranice 8 mm.

Kod utora za savijanje pod brojem 4 problem se riješio samim konstrukcijskim rješenjem u poglavlju 7.2. Potrebno je dodati 2 probijanja po utoru, alatom pravokutne geometrije dimenzija 11 x 1,5 mm. Alat nije pogodan za sjeckanje kontura kao ostali pravokutni alati zbog povećane mogućnosti kod loma alata, ali za jedno zasebno probijanje se pokazuje kao dovoljno čvrst alat.

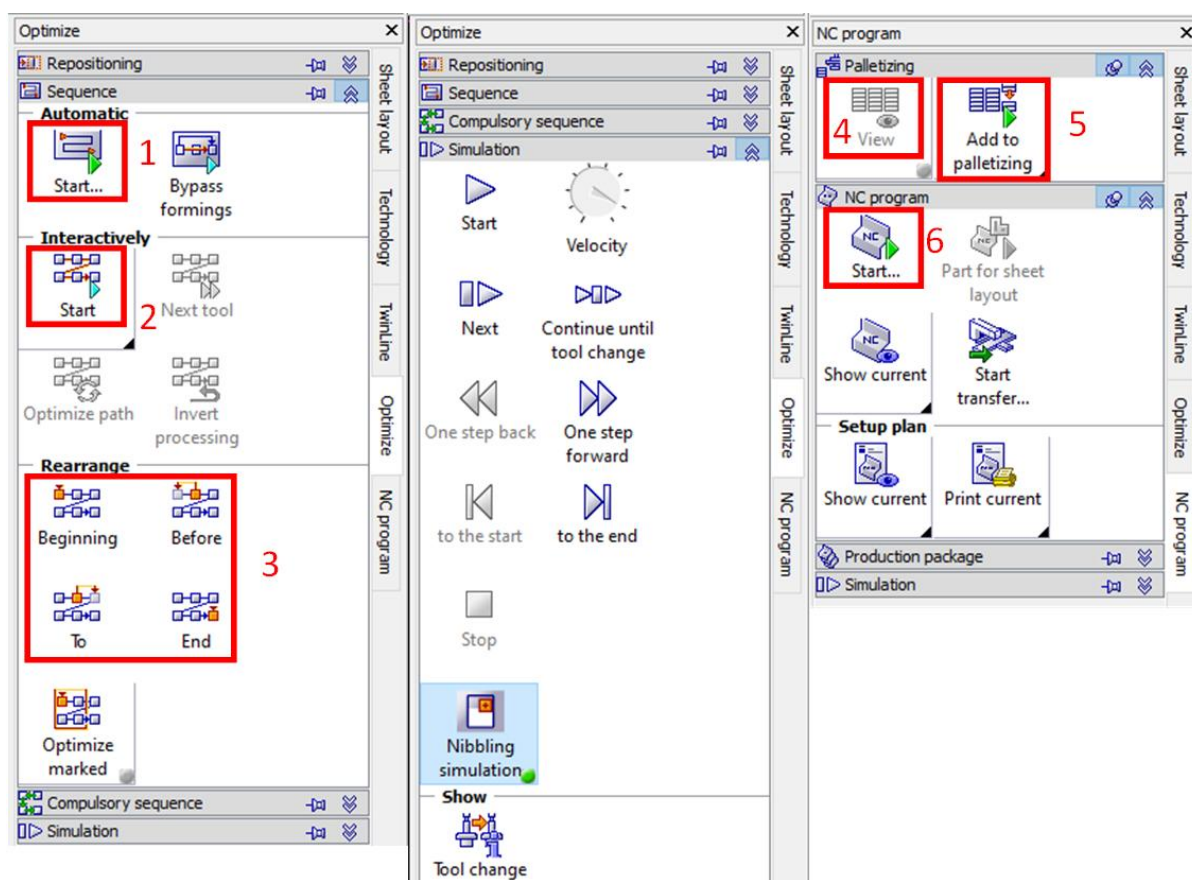
Posljednje rješenje numerirano brojem 5 se rješava s dva prolaza alatom kvadratne geometrije stranica 12,2 mm. Koristi se naredba na slici 47 pod brojem 2 *At element* koja postavlja putanje na gornji i donji brid središnjeg otvora koji se potpuno uklanja probijanjem. Putanje alata proširimo do brida s kojim počinje pozicija te tako izbjegnemo neželjen mali otpad.



Slika 53. Potpune putanje alata i naredba Lift

Posljednji izbornik na slici 47 imena *Lift* koristi se kao jedna od tehnika odstranjivanja pozicije iz kostura lima. Naredba pod brojem 7 *Generate* stvara zadnji rez na putanji alata kod čijeg dolaska stroj zaustavi rad te se *Sheetmaster* pomiče iznad materijala u poziciju koju određuje naredba *Adapt lift position* (slika 47, broj 8), a pozicionira se tako da što se više usisnih papučica postavi na gotov proizvod i tako omogući nošenje na paletu. Isključivanje i uključivanje određenih usisnih papučica moguće je preko naredbe *Adapt suction cups* (slika 47, broj 9), a važno je ponovno spomenuti modularnost stroja i moguće razmještanje usisnih papučica na druga predviđena mjesta u cilju što boljeg hvata. Zadnji rez se uglavnom postavlja u donji lijevi rub pozicije zbog predefiniranog položaja *Sheetmaster*-a u odnosu na stroj.

8.5.2. Optimizacija redoslijeda putanja alata

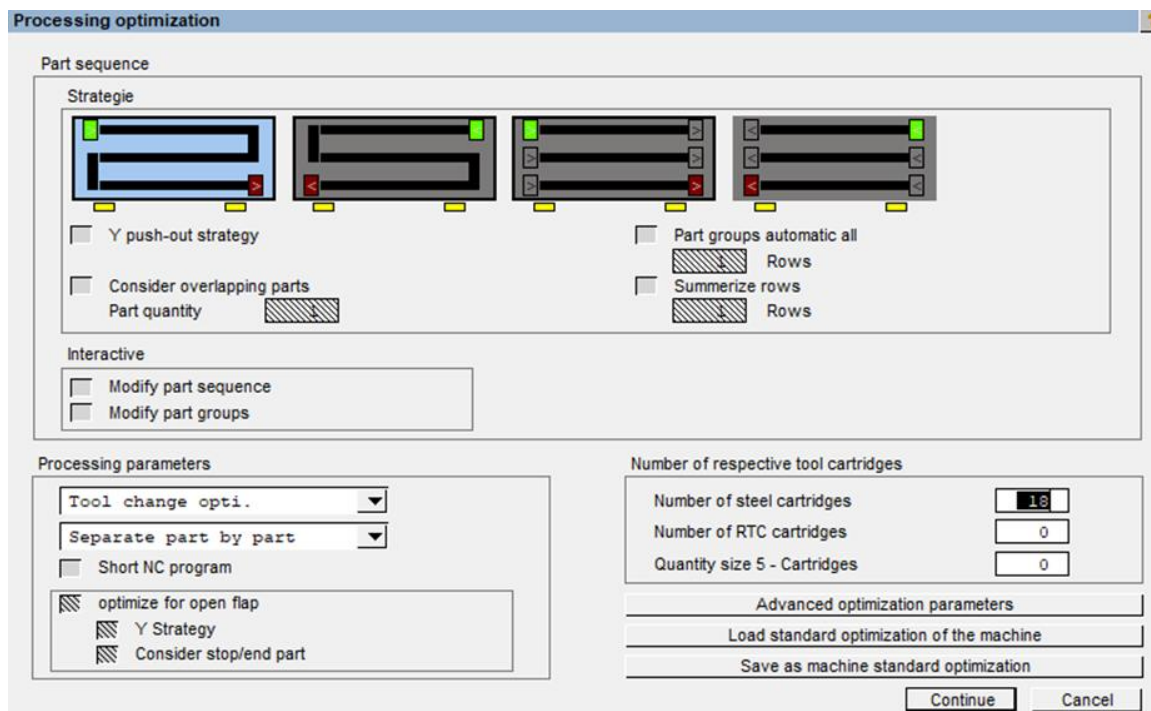


Slika 54. Izbornici „Optimize“ (lijevo, sredina) i „NC program“ (desno)

Druga dva važna izbornika prikazana su na slici 54. U izborniku *Optimize* nalaze se dva padajuća izbornika koja se koriste nakon postavljanja svih željenih putanja u prethodnom koraku: *Sequence* (Slika 54; lijevo), *Simulation* (Slika 54; sredina).

Lijevim izbornikom *Sequence* započinje sam proces optimizacije. Postoje dvije opcije za početak optimizacije: automatski generirane putanje alata naredbom *Automatic Start* (1) ili ručna interakcija *Start Interactively* (2) kojom se označuju željene putanje te se tako postavlja redoslijed. Kod oba slučaja, nakon pritiska naredbe potrebno je odrediti redoslijed alata koji će računalni program poštivati u svojem stvaranju putanje, a određuje se raspored prema slici 56. Uz popis alata navedeni su tip alata i bitnije broj udaraca jednog alata. Sotfver odrađuje jedan alat za drugim u cijelosti te tako nije moguće dobiti dvije izmjene istog alata, pa su potrebne naredbe u oblaku broj 3 na slici 54 koje omogućuju ručno postavljanje točno određene putanje ili više njih. Mogućnosti su stavljanje putanje ili probijanja na sam početak ili kraj obrade ili pak stavljanje prije ili nakon prethodno selektirane putanje.

Samim pokretanjem optimizacije ploče putanje su generirane po vremenu dodavanja istih u prozoru *Punch*. Korištenje naredbe *Start Automatic* je gotovo uvijek preporučano jer je rezultat pregledniji prikaz putanja alata i lakšeg snalaženja u moru putanja kod nekih alata. Otvara se prozor na slici 55; računalni program daje na izbor dvije bitno različite strategije od kojih obje imaju dvije orijentacije te se dolazi do ukupnog broja od četiri strategije.



Slika 55. Strategije automatski generirane putanje

Prve dvije strategije koriste se kod postojanja perforacija u poziciji jer se nakon prelaska jednog reda probijanja alat ne vraća u početak retka nego se samo okomito spušta u sljedeći redak, time smanjujući tehnološko vrijeme izrade zbog kraćeg pomaka stola stroja. Druge dvije strategije su korisne kod velikog broja malih pozicija koji su postavljeni na ispadanje preko poklopca za ispadanje zbog mogućnosti grupiranja npr. lim se popuni s dvadeset redaka i trideset stupaca malih pločica, pa računalni program grupira prva tri retka i njihova obrada se odvija redak po redak te tek kada ispadne zadnji komad, stroj počinje obradu sljedeća tri retka. Time se znatno očuva ravnina lima tokom cijele obrade što je jako bitno kod točnosti malih pozicija.

Kod već spomenutog redoslijeda alata na slici 56 koriste se sljedeća pravila prema važnosti:

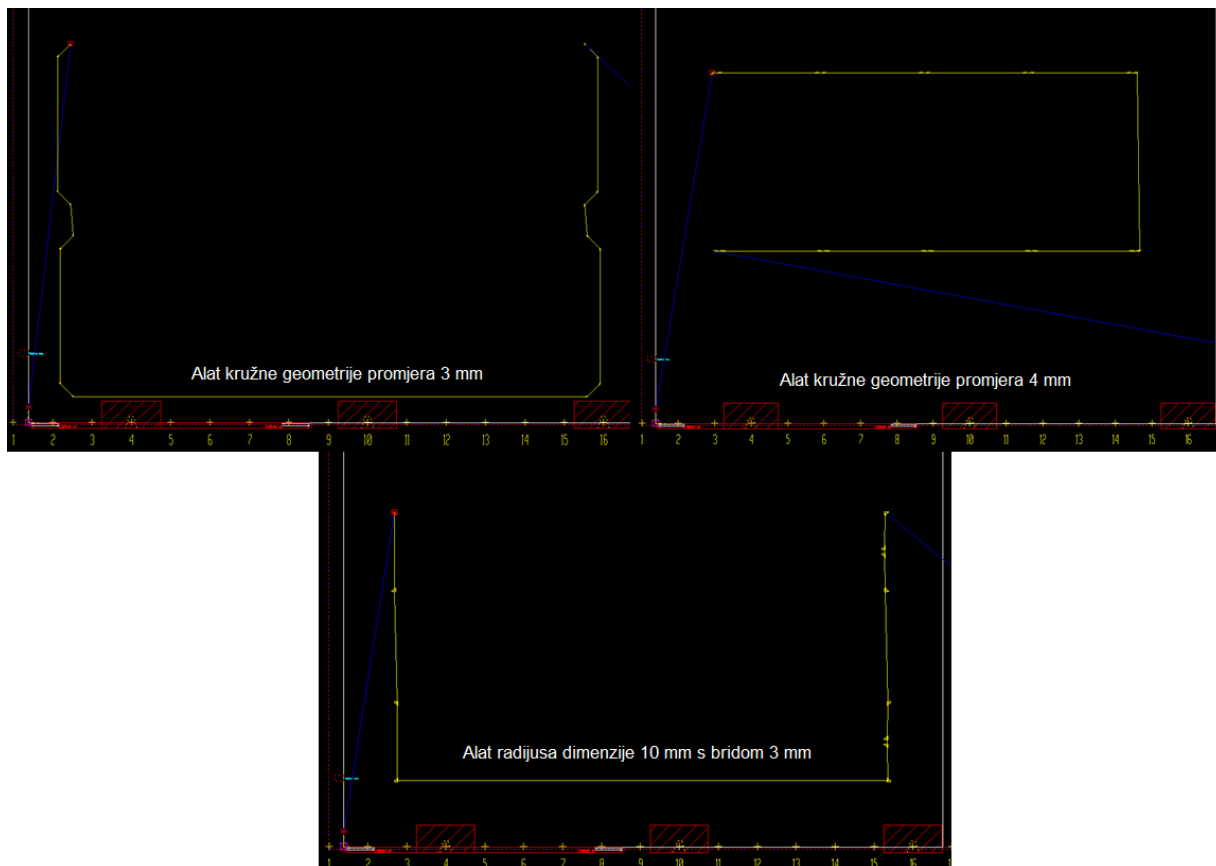
- 1) Obrada alata manjih dimenzija zbog njihove povećane vjerojatnosti dolaska do loma, odnosno zbog prioriteta udaranja cijelom svojom reznom površinom u materijal, a ne sjeckanja dijela materijala polovicom površine koje bi dovelo do oštećenja alata; prvi se postavljaju alati kružnih geometrija promjera 3 i 4 mm, alat pravokutnog presjeka dimenzija 11 x 1,5 mm te alat radijusa dimenzije 10 i brida 3 mm
- 2) Na kraj obrade se uglavnom stavlja alat koji je stavljen kao okidač za odstranjivanje pozicije van iz kostura lima, u ovom slučaju alat pravokutne geometrije dimenzija 76 x 3 mm čiji je zadnji rez prema slici 52 u donjem lijevom kutu pozicije
- 3) Alati koji obavljaju samo probijanja otvora ili provrta stavljaju se nakon prvih alata; alat kružnog presjeka promjera 6,8 mm koji obavlja 1468 probijanja po jednom limu i alat kvadratne geometrije stranica 9,5 mm koji probija materijal 1396 puta te 6 probijanja alatom kategorije A, kvadratne geometrije stranica 19,1 mm sa zaokruženim vrhovima polumjera 11,25 mm
- 4) Alati sa zadaćom sjeckanja materijala za razne utore, unutarnje ili vanjske radijuse te same konture proizvoda; alati kvadratnih geometrija stranica 5, 8, 10 i 12,2 mm, alat kružne geometrije promjera 10 mm te finalno alat pravokutne geometrije 20 x 3 mm

[illegible]

Slika 56. Redoslijed alata kod obrade

Sljedeći korak je naredba *Start Interactively* (slika 54; oblak 2) koja izbacuje isti prozor s prethodno određenim rasporedom alata te nakon potvrđivanja računalni program prolazi po zadanom rasporedu od alata do alata te izolira i prikazuje u grafičkom prikazu putanju za taj alat.

Početni udarac određen je crvenom bojom u grafičkom sučelju računalnog programa. Kod malog broja probijanja, rješenja za putanje su jednostavna te nemaju neku značajnu ulogu u tehnološkom vremenu izrade. U optimizaciji programa u radu detaljnije se obrađuju putanje alata kružne geometrije promjera 6,8 mm i kvadratne geometrije stranica 9,5 mm te posljednja dva alata pravokutnih geometrija dimenzija 20 x 3 mm i 76 x 3 mm.



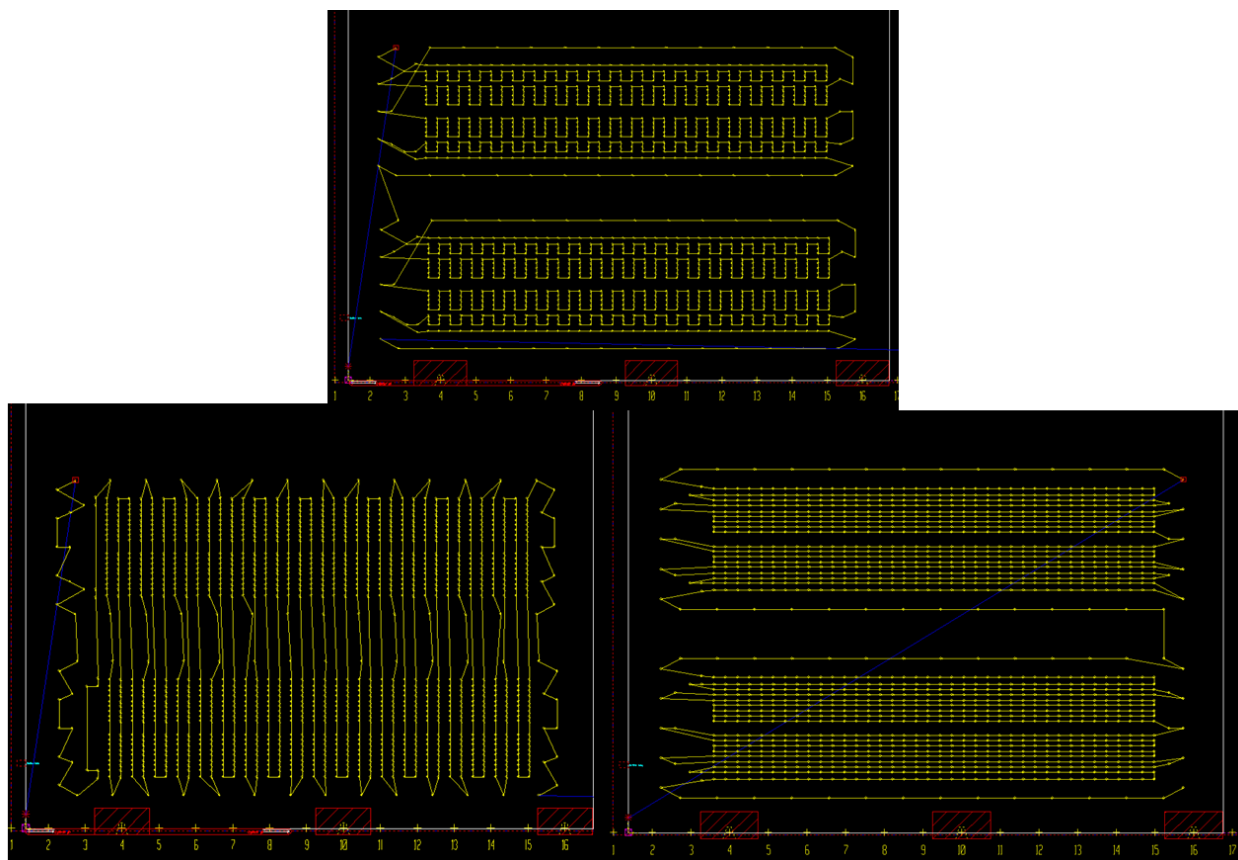
Slika 57. Putanje prvih alata s malim brojem probijanja

Perforacije na slikama 58 i 59 se optimiziraju na dva različita načina:

- stupac po stupac perforacije
- redak po redak perforacije

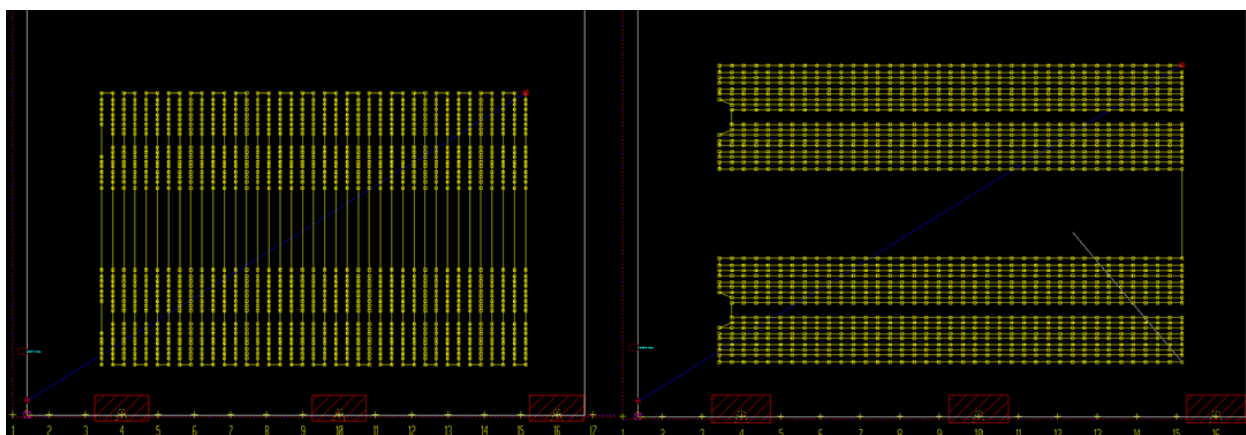
Na slici 58 gore, prikazana je računalno generirana putanja prema strategiji broj 1 kako je zadana na slici 55, ali još se ne smatra optimalnom. Pravilo kod biranja optimizacije redak po redak (slika 58; dolje lijevo) ili stupac po stupac (slika 58; dolje desno) jest u zbroju redaka i stupaca perforacije i njihovo množenje s srednjom vrijednosti duljine jednog prolaza po redu ili stupcu. Kod putanje kružnog alata promjera 6,8 mm vidljiv je kraći prolaz po stupcu perforacije te unatoč većem broju stupaca koji iznose 43 u odnosu na broj redaka kojih je 40, biramo opciju

stupac po stupac koji je optimalan kod ovog probijanja. Za perforacije potrebno je uključiti tehnologiju *Presser foot*.

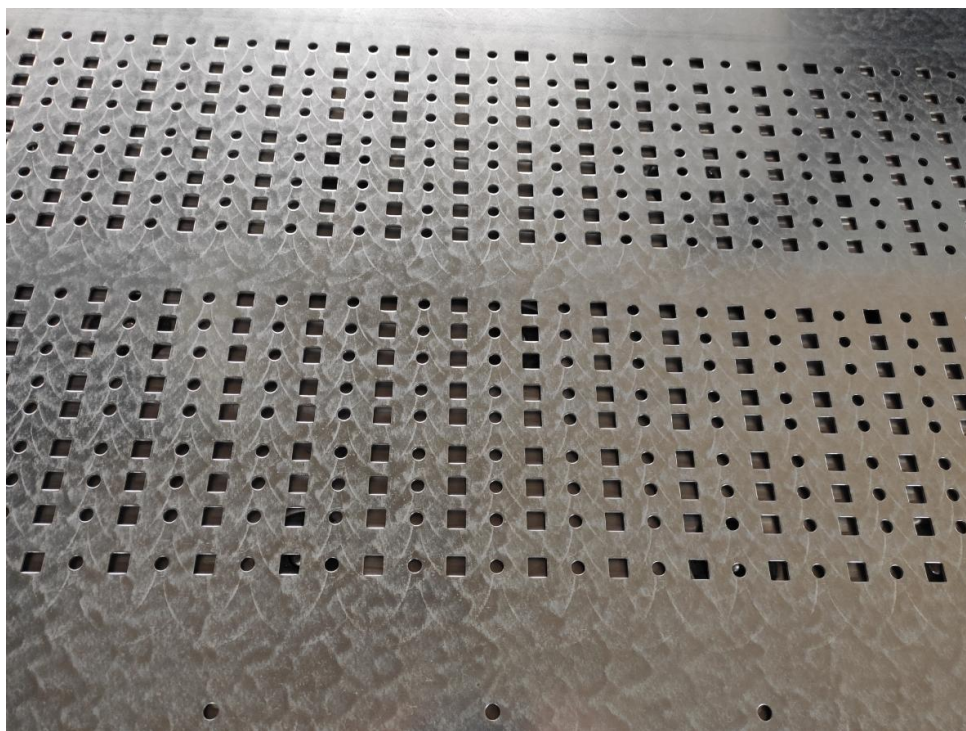


Slika 58. Perforacija probijana alatom kružne geometrije promjera 6,8 mm

Identična situacija javlja se i kod prolaza alatom kvadratne geometrije stranice 9,5 mm. Bira se optimizacija stupac po stupac.

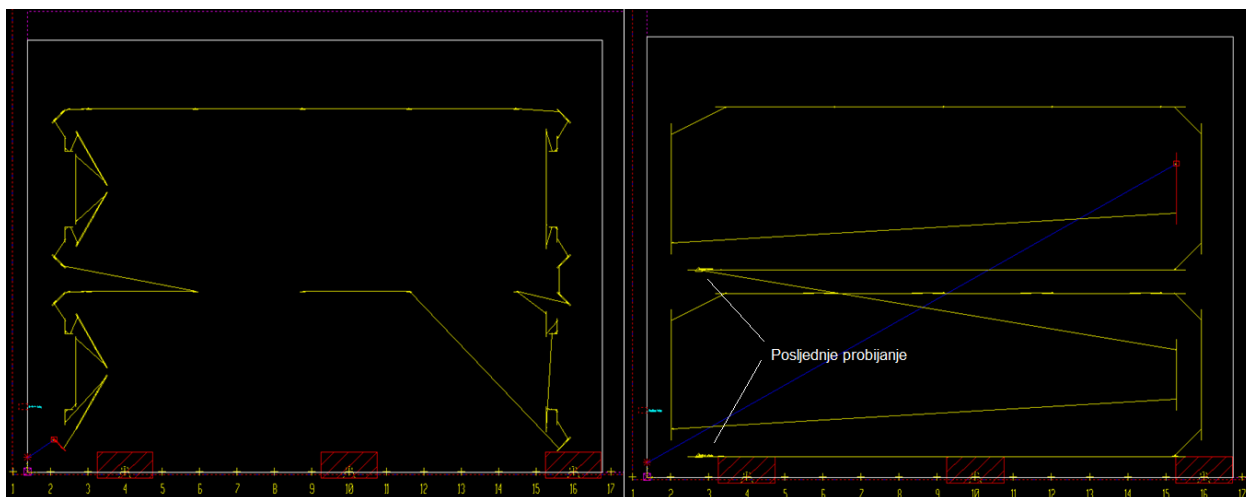


Slika 59. Perforacija probijana alatom kvadratne geometrije stranica 9,5 mm



Slika 60. Probijanje perforacije s vidljivim otiscima svlačka

Posljednje putanje alatima pravokutnih dimenzija optimizirane su sukladno sa zadanim ciljem kojeg ovi alati posjeduju. Alat dimenzija 20 x 3 mm ima zadaću kao i ostali alati, a to je u najkraćem roku obaviti svoju putanju te se dolazi do putanje na slici 61, lijevo. Kod posljednjeg alata dimenzija 76 x 3 mm (slika 61, desno) posebna pažnja se pridonosi potrebnom zadnjem rezu svake od pozicija jer upravo ono signalizira nošenje pozicije van lima na paletu. U ovom slučaju posljednje probijanje je u donjem lijevom rubu pozicije, pa se prolazi iznutra prema van s najkraćim mogućim slobodnim hodom alata.



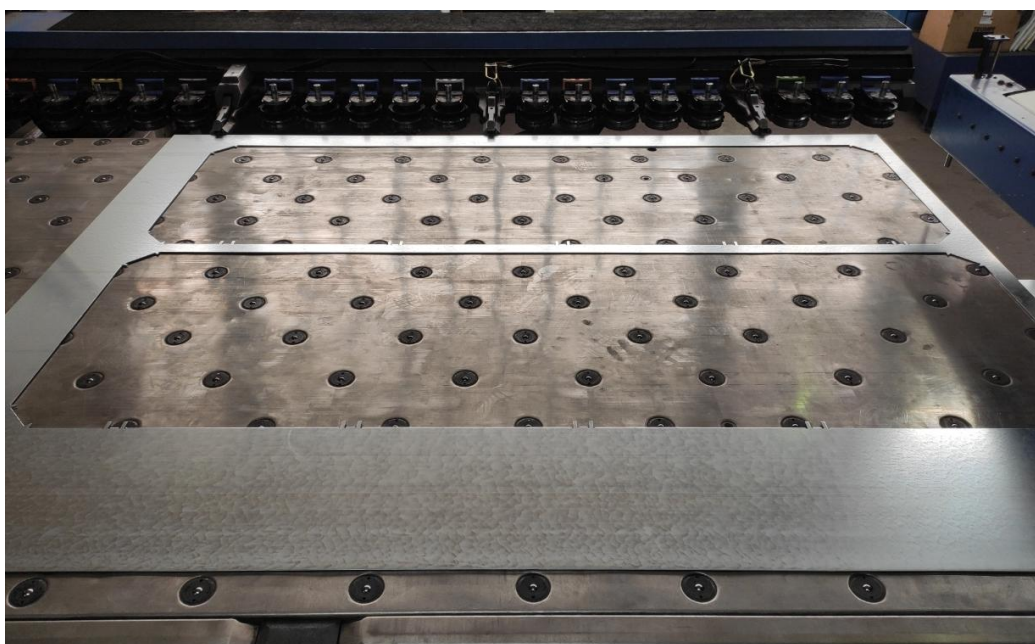
Slika 61. Putanje alata pravokutnih dimenzija

8.5.3. Optimizacija posljednje faze proizvodnje

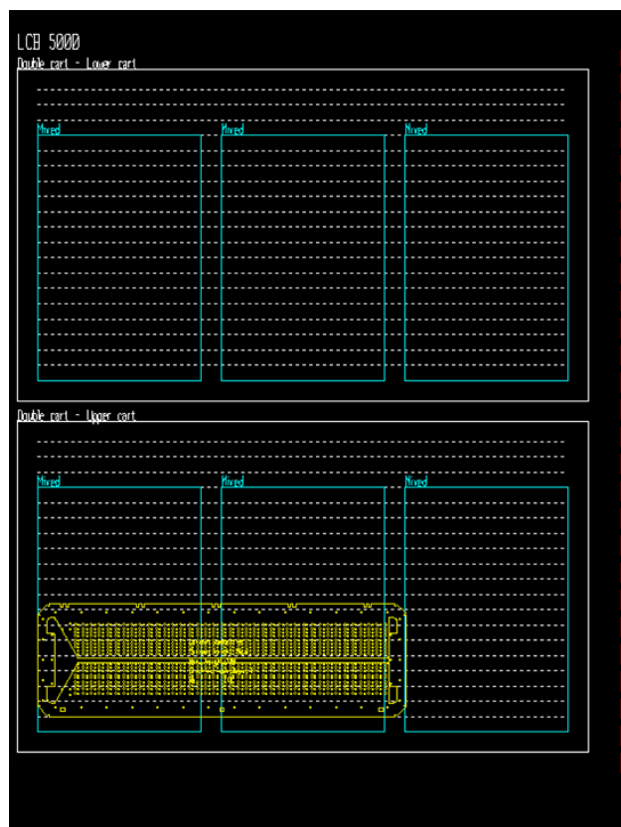
Putanjom zadnjeg alata dolazi se do kraja u ovom dijelu optimiziranja; potrebno je još pokrenuti simulaciju, odrediti paletiziranje pozicije i generirati NC kod.

Simulation (slika 53; sredina) daje pregled trenutno postavljenih operacija probijanja uz par opcija u koje spadaju: početak simulacije bez stajanja, početka operacije uz stajanje kod javljanja greške, simuliranje jednog alata do njegove izmjene, kretanje jedan korak naprijed ili unazad te biranje brzine izvođenja same simulacije. Simulacija se najviše koristi kao pomoć i provjera pri optimiziranju.

Kod uključivanja *Sheetmaster*-a u proizvodnju pozicija potrebno je odrediti mjesto te pozicije na paleti do koje stroj dolazi i lagano spušta poziciju na zadanu paletu. Lijeva klizna platforma je rezervirana za početni materijal, dok se desna klizna platforma koristi upravo za skladištenje pozicija. Također, poželjno je stavljanje gotovih proizvoda na gornja kolica, a rest-ove koji se ponovno koristi u proizvodnji na donja kolica.

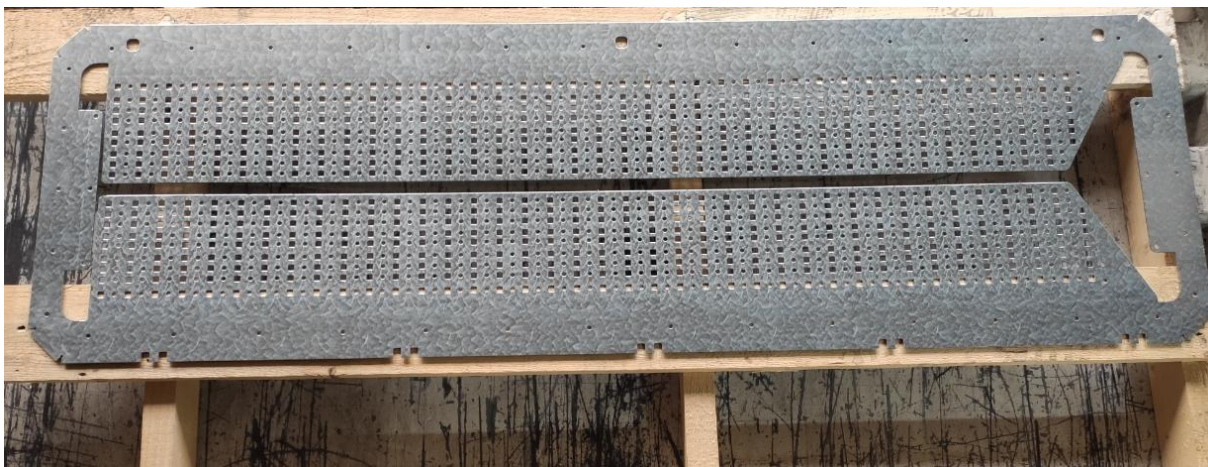


Slika 62. Kostur lima



Slika 63. Određivanje skladištenja gotove pozicije

Koriste se naredbe na slici 54, desno numerirane brojevima 4 (View) i 5 (Add to palletizing) te se interaktivno slažu gotove pozicije i rest-ovi na zadana kolica i palete prema slici 63.



Slika 64. Proizvod na paleti

Posljednji korak je korištenje naredbe *NC program Start* kojom se bira naziv i broj programa prema želji korisnika i automatski generira NC kod koji se sprema kao LST datoteka, a ujedno se ispisuju i svi potrebni podaci vezani uz sam program kao što su; dimenzije lima, debljina lima, postotak otpada, broj koliko se program put izvodi, vrijeme obrade probijanja, prikaz palete i pozicija koje se obrađuju te popis svih potrebnih alata da operater pripremi stroj za obradu kao HTML datoteka.

9. Zaključak

Tržište se mijenja svakodnevno te zbog težnje za što većom izdržljivošću reznog brida alata, boljom kvalitetom izrade i povećanja same kvalitete proizvoda dolazi se do razvoja naprava i alata koji procese u proizvodnji obavljaju jednostavnije i efikasnije. Uostalom, proizvodnja se danas fokusira isključivo na zahtjeve kupca, a s tim je i prioritet ostvariti sve zahtjeve tržišta.

U radu je prikazano oblikovanje tehnologije i izrada numeričkog programa (NC koda) koji je potreban za samo pokretanje stroja. Tijekom tog procesa optimizirani su brojni parametri: izbor alata, razmještaj paletiziranja, tehnologija ispadanja gotovog proizvoda, putanje alata i raspored putanji alata. Svi parametri imaju svoju ulogu u poboljšanju proizvodnje te je sve parametre potrebno tretirati s jednakom važnošću. Alat se odabire prema potrebnoj geometriji i veličini odnosno duljini konture, otvora ili provrta. Veće radijuse i otvore od prethodno zadanih dimenzija alata probijaju se metodom sjeckanja materijala s većim brojem prolaza alata manje dimenzije. Kod odvajanja ili izbacivanja pozicija van kostura lima postoje tri različite opcije: ispadanje i razvrstavanje komada u kontejnere ispod glave stroja, strojno nošenje gotove pozicije na paletu te ubacivanje mikro spojeva odnosno *microjoint*-ova koji onemogućuju spomenuto vađenje ili ispadanje pozicije jer se ona spaja sa kosturom lima, ali je potrebna naknadna ručna intervencija operatera za vađenje pozicije te naknadna obrada brušenja tih mikro spojeva. Za optimizaciju putanje pojedinih alata potrebno je slijediti pravila prethodno spomenuta u radu i dolazi se do zadovoljavajuće razine probijanja.

Kod štancanja se često nailazi na velike serije proizvoda za koje je potrebno puno početnog materijala, a onda se čak i mali napredak u jednom dijelu proizvodnje enormno osjeti. Otpad je veliki problem kod svih tehnologija, a kod štancanja se taj postotak nastoji smanjiti do 20% te se onda štancanje može smatrati optimiziranim. Uvijek je dobro imati u pripremi neke male pozicije kojima se popunjava spomenuti početni materijal.

Također, od velike su važnosti i konstrukcijska rješenja jer se jednom sitnom promjenom koja ne uzrokuje mijenjanje u završnom proizvodu dolazi do lakšeg probijanja u proizvodnji.



Sveučilište Sjever

IZJAVA O AUTORSTVU I SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, **DINO HAJŠOK** pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor završnog rada pod naslovom **OPTIMIZACIJA TEHNOLOGIJE PROBIJANJA** te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:
Dino Hajsok

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, **DINO HAJŠOK** neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom završnog rada pod naslovom **OPTIMIZACIJA TEHNOLOGIJE PROBIJANJA** čiji sam autor.

Student:
Dino Hajsok

10. Literatura

- [1] Tehnika štancanja, www.ss-industrijska-strojarska-zg.skole.hr, 2012.
- [2] https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Master/Products/Services/01_brochures/TRUMPF-punching-at-a-glance-brochure-EN.pdf, dostupno ožujak 2020.
- [3] https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Master/Products/Services/01_brochures/TRUMPF-punching-tools-catalog-EN.pdf, dostupno ožujak 2020.
- [4] Obrada metala deformiranjem, doc.dr.sc. Sanja Šolić, kolegij: Tehnologija II, Ak. god. 2018/2019, prezentacija
- [5] Norma DIN 8588;2013, Manufacturing processes severing - Classification, subdivision, terms and definitions, dostupno travanj 2020.
- [6] <https://www.unipunch.com/support/charts/material-specifications/>, dostupno travanj 2020.
- [7] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=56775>, dostupno travanj 2020.
- [8] <https://www.fabricatingandmetalworking.com/2015/10/three-tricks-to-keep-punching-performance-at-its-best/>, dostupno travanj 2020.
- [9] <https://www.trfastenings.com/products/Catalogue/Fasteners-for-Sheet-Metal>, dostupno travanj 2020.
- [10] Svojstva i primjena materijala, Tomislav Filetin, Franjo Kovačiček, Janez Indof, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002
- [11] Alati i naprave, Branko Grizelj, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2004

Popis slika

Slika 1. Simboli za označavanje hrapavosti površine kod: svi postupci dozvoljeni (lijevo) obrada odvajanjem čestica (sredina), obrada bez odvajanja čestica (desno)	1
Slika 2. Probijanje [4]	4
Slika 3. Odsijecanje; bez otpada (gore), s otpadom (dolje) [4]	4
Slika 4. Izrezivanje [4]	5
Slika 5. Dorezivanje [4]	5
Slika 6. Zarezivanje [4]	5
Slika 7. Faze prisutne kod štancanja [2]	6
Slika 8. Rez uvećan elektronskim mikroskopom [2]	7
Slika 9. Alat korišten kod štancanja [2]	8
Slika 10. Glavni dijelovi stroja [3]	11
Slika 11. Linearno spremište alata	12
Slika 12. Poklopac za ispadanje	13
Slika 13. „Sortmaster“	14
Slika 14. „Sheetmaster“	15
Slika 15. Dijelovi alata: probijač (gore lijevo), svlakač (gore desno), matrica (dolje lijevo), prsten za poravnanje (dolje desno) [2]	16
Slika 16. Vanjska kružnica alata pravokutne rezne geometrije	17
Slika 17. Oblici i duljine probijača [3]	18
Slika 18. Razina buke kod pojedinih alata [3]	18
Slika 19. Graf s-t [2]	19
Slika 20. Silazna matrica [2]	20
Slika 21. Naprezanja kod probijanja [2]	21
Slika 22. Istrošenost alata nakon 120 000 udaraca u nehrđajući čelik [2]	22
Slika 23. Geometrije osnovnih alata [2]	23
Slika 24. Zakovica s ravnom zaobljenom glavom [9]	23
Slika 25. Kavezna matrica [9]	24
Slika 26. Zakivna matrica [9]	24
Slika 27. Alati kategorija A (lijevo, sredina) i B (desno)	25
Slika 28. Specijalni alat: zakačka	25
Slika 29. Izgled alata „Multitool“ [3]	26
Slika 30. Dimenzije alata za „Multitool“ [3]	26
Slika 31. Smicanje	28

Slika 32. Rezni faktor x prema obliku vrha probijača [3]	29
Slika 33. Potrebna sila rezanja u odnosu na debljinu materijala i obliku vrha probijača [3]	29
Slika 34. Linearni korak alata kružnog presjeka [2]	31
Slika 35. Kružni korak alata kružnog presjeka [2]	32
Slika 36. Linearni korak alata pravokutnog presjeka [2]	32
Slika 37. Graf optimalnog koraka alata [3]	33
Slika 38. Razvijeni lim s prikazanim linijama savijanja (zeleno)	35
Slika 39. Konstrukcijsko rješenje 1: prije (lijevo), poslije (desno)	36
Slika 40. Konstrukcijsko rješenje 2: prije (lijevo), poslije (desno)	36
Slika 41. Sučelje računalnog programa TruTops	38
Slika 42. Uvećani izbornik broj 4	39
Slika 43. Konačni izgled mreže lima s potrebnim pozicijama	40
Slika 44. Sučelje prozora „Punch“	41
Slika 45. Uvećane alatne trake 1 i 2	41
Slika 46. Lista alata	42
Slika 47. Izbornik „Technology“	43
Slika 48. Rješenje 1	44
Slika 49. Probijanje rješenja 1	45
Slika 50. Rješenje 2	45
Slika 51. Probijanje rješenja 2	46
Slika 52. Rješenje 3; automatski generirane putanje (gore), optimizirano probijanje utora (dolje)	46
Slika 53. Potpune putanje alata i naredba Lift	47
Slika 54. Izbornici „Optimize“ (lijevo, sredina) i „NC program“ (desno)	48
Slika 55. Strategije automatski generirane putanje	49
Slika 56. Redoslijed alata kod obrade	50
Slika 57. Putanje prvih alata s malim brojem probijanja	51
Slika 58. Perforacija probijana alatom kružne geometrije promjera 6,8 mm	52
Slika 59. Perforacija probijana alatom kvadratne geometrije stanica 9,5 mm	52
Slika 60. Probijanje perforacije s vidljivim otiscima svlačka	53
Slika 61. Putanje alata pravokutnih dimenzija	53
Slika 62. Kostur lima	54
Slika 63. Određivanje skladištenja gotove pozicije	55
Slika 64. Proizvod na paleti	55

Popis tablica

Tablica 1. Odnos tolerancija kod probijanja [11]	8
Tablica 2. Vrijednosti ukupne zračnosti prema vrsti i debljini materijala [3]	30

Prilozi

Prilog 1 – CD-R disk