

VIŠJA STROKOVNA ŠOLA ACADEMIA
MARIBOR

Izboljšava ravnosti izdelkov z vpeljavo procesa ohlajanja po umetnem staranju

Kandidat: Klemen Sternad

Vrsta študija: študent izrednega študija

Študijski program: Strojništvo

Mentor predavatelj: dr. Darko Friščić, univ. dipl. gosp. inž.

Mentor v podjetju: Urban Polegek, dipl. inž.

Lektorica: mag. Ana Ferk, prof. slov. jez. in knj.

Maribor, 2022

IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Podpisani Klemen Sternad sem avtor diplomskega dela z naslovom Izboljšava ravnosti izdelkov z vpeljavo procesa ohlajanja po umetnem staranju, ki sem ga napisal pod mentorstvom dr. Darka Friščića.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo delo izključno rezultat mojega dela;
- sem poskrbel, da so dela in mnenja drugih avtorjev, ki jih uporabljam v predloženi nalogi, navedena oz. citirana skladno s pravili Višje strokovne šole Academia Maribor;
- se zavedam, da je plagiatorstvo – predstavljanje tujih del oz. misli kot moje lastno kaznivo po Zakonu o avtorski in sorodnih pravicah (Uradni list RS, št. 16/07 – uradno prečiščeno besedilo, 68/08, 110/13, 56/15 in 63/16 – ZKUASP); prekršek pa podleže tudi ukrepom Višje strokovne šole Academia Maribor skladno z njenimi pravili;
- skladno z 32.a členom ZASP dovoljujem Višji strokovni šoli Academia Maribor objavo diplomskega dela na spletnem portalu šole.

Maribor, junij 2022

Podpis študenta:

Vsebina

1	UVOD	6
1.1	OPIS PODROČJA IN OPREDELITEV PROBLEMA	6
1.1	NAMEN, CILJI IN OSNOVNE TRDITVE	7
1.2	PREDPOSTAVKE IN OMEJITVE	8
1.3	UPORABLJENE RAZISKOVALNE METODE	8
2	DEFINICIJA MATERIALA	10
2.1	NA KRATKO O POSTOPKU IZDELAVE	10
2.2	LASTNOSTI ZLITINE EN AW-6082 [AlSi1MgMn]	11
2.3	UPORABA ZLITINE EN AW-6082 [AlSi1MgMn]	11
2.4	STANJA ALUMINIJEVIH ZLITIN	11
2.4.1	<i>Osnovna stanja aluminijevih zlitin</i>	<i>13</i>
3	NOTRANJE NAPETOSTI	14
3.1	VZROKI ZA NASTANEK NOTRANJIH NAPETOSTI	14
3.2	NOTRANJE NAPETOSTI ZARADI TEMPERATURNIH NIHANJ	14
3.3	NOTRANJE NAPETOSTI ZARADI FAZNIH TRANSFORMACIJ	15
3.4	NOTRANJE NAPETOSTI ZARADI MEHANSKE OBDELAVE	17
3.5	UČINKI NOTRANJIH NAPETOSTI	18
3.6	NADZOR NOTRANJIH NAPETOSTI	18
3.7	MERJENJE NOTRANJIH NAPETOSTI	19
4	POSTOPEK IZDELAVE OBRAVNAVANEGA MATERIALA	20
4.1	KORAKI V PROCESU EKSTRUZIJE ALUMINIJA	21
4.2	DELI STISKALNICE	23
4.3	DEJAVNIKI, KI VPLIVAJO NA IZTISKANJE	25
4.4	VLEČENJE	27
4.5	RAVNANJE	29
5	OPIS STROJA	31
5.1	OPIS PROGRAMSKEGA VMESNIKA	34
5.2	SESTAVA NAŠEGA PROGRAMA	36
6	PREIZKUS	38
6.1	NASTAVITVE PEČI	38
6.2	POSTAVITEV MATERIALA	39
6.3	PRIPRAVA MATERIALA	41
6.3.1	<i>Meritev pred staranjem</i>	<i>42</i>

6.3.2	<i>Meritev po klasičnem programu</i>	43
6.4	MERITEV TEMPERATURE MATERIALA MED POSTOPKOM	45
6.4.1	<i>Termoelementi</i>	46
6.4.2	<i>Pirometrija AMS2750F</i>	47
6.4.3	<i>Meritev temperature materiala</i>	47
6.4.4	<i>Meritev ravnosti po novem programu z ohlajanjem</i>	51
7	REZULTATI	53
8	UGOTOVITVE	55
8.1	PRED TOPLOTNO OBDELAVO	55
8.2	PO NORMALNEM POSTOPKU	56
8.3	PO POSTOPKU Z OHLAJANJEM	56
8.4	PREDLOGI ZA NADALJNJE RAZISKOVANJE	57
9	KROVNA TEMA – VODENJE STROKOVNEGA PROJEKTA IZ STROJNIŠTVA	58
9.1	ZAMENJAVE TRANSPORTNE PALETE ZARADI UPORABE NEPRAVILNEGA TIPA PALETE.....	58
9.2	ZALAGANJE VHODA NA DEPONJO PAKIRNE LINIJE	58
9.3	NEDOKONČAN MATERIAL NA DEPONJI KONČNEGA MATERIALA	59
9.4	DODAJANJE PREDNOSTNIH NALOGOV NA LINIJO Z MOSTNIM DVIGALOM	59
9.5	NEENAKOMERNA OBREMENITEV VILIČARISTA	59
9.6	MAJHEN IZKORISTEK DRUGE LINIJE	59
9.7	PRETOK INFORMACIJ	60
9.8	STANDARDIZACIJA.....	60
9.9	POENOTENJE IN ZDRUŽEVANJE	60
9.10	NORMIRANJE IN UČINKOVITOST	61
9.11	UVEDBA 5S	61
9.12	DELOVNA NAVODILA	63
9.13	KAKOVOST	63
9.14	ORGANIZACIJA DELA	64
9.15	AVTOMATIZACIJA PROCESA	64
9.16	SPREMEMBA TLOORISA PAKIRNE LINIJE	64
10	SKLEP	66
11	BIBLIOGRAFIJA	68

Kazalo slik

SLIKA 1: NAJPOGOSTEJŠE NAPAKE	7
SLIKA 2: PRIKAZ TEGANJA	10
SLIKA 3: PRIKAZ NOTRANJIH NAPETOSTI.....	15
SLIKA 4: RAZTEZANJE	16
SLIKA 5: NOTRANJE NAPETOSTI OBRATNO	16
SLIKA 6: NAPETOSTI ZARADI MEHANSKE OBDELAVE	17
SLIKA 7: PRINCIP STISKANJA	20
SLIKA 8: EKSTRUZIJA	22
SLIKA 9: DELI STISKALNICE	23
SLIKA 10: SESTAVA ORODJA	25
SLIKA 11: PRINCIP VLEČENJA PALIC	28
SLIKA 12: VALJČNO RAVNANJE.....	29
SLIKA 13: RAVNANJE OKROGLIH PALIC.....	29
SLIKA 14: KOT RAVNALNIH VALJEV	30
SLIKA 15: PEČ EBNER	31
SLIKA 16: SKLOPI GRELCEV	32
SLIKA 17: POSTAVITEV VGRAJENIH TERMEOLEMENTOV	33
SLIKA 18: STANJE PROGRAMA.....	35
SLIKA 19: SESTAVLJANJE SEGMENTOV PROGRAMA.....	36
SLIKA 20: VSTAVLJANJE KOMBINACIJE STANJA IN ZLITINE	37
SLIKA 21: GRAF OHLAJANJA PRETEKLIH	38
SLIKA 22: VMESNIK ZA ZALAGANJE MATERIALA	39
SLIKA 23: ZALAGANJE MATERIALA V PEČ	40
SLIKA 24: PRIKAZ MERILNIH MEST.....	41
SLIKA 25: UKRIVLJENOST PRED STARANJEM 1	42
SLIKA 26: UKRIVLJENOST PRED STARANJEM 2	43
SLIKA 27: UKRIVLJENOST PO NORMALNEM STARANJU 1	44
SLIKA 28: UKRIVLJENOST PO NORMALNEM STARANJU 2	45
SLIKA 29: VSTAVLJENI TERMEOLEMENTI	46
SLIKA 30: TERMEOLEMENT TIP »J«	46
SLIKA 31: PRIKAZ TEMPERATUR MED POSTOPKOM.....	48
SLIKA 32: PRIKAZ SEGMENTOV TEMPERATUR V PEČI	48
SLIKA 33: GRAF SEGREVANJA IN OHLAJANJA	50
SLIKA 34: UKRIVLJENOST PO POČASNEM OHLAJANJU 1	51
SLIKA 35: UKRIVLJENOST PO POČASNEM OHLAJANJU 2.....	52

KAZALO TABEL

TABELA 1: DELITEV ALUMINIJEVIH ZLITIN 12

TABELA 2: REZULTATI 55

ZAHVALE

Najprej bi se želel zahvaliti mentorju na šoli dr. Darku Friščiću, univ. dipl. gosp. inž., za njegovo podporo in hitro odzivnost od začetka priprave diplomskega dela do zadnjih usklajevanj podrobnosti naloge.

V podjetju Impol bi se rad zahvalil mentorju Urbanu Polegeku, dipl. inž. str., za mentorstvo in pomoč pri uporabi literature, pridobljene v podjetju. Prav tako bi se rad zahvalil mag. met. in mat. Ervinu Rošerju, ki mi je pomagal izbrati problem in izvesti vse potrebne meritve za izvedbo primerjav in preizkusov.

Posebna zahvala velja kolegu Janiju Špesu, s katerim sva skupaj opravljala študijske obveznosti – od prvega do zadnjega izpita.

POVZETEK

Današnja proizvodnja zahteva veliko inovativnosti in prilagodljivosti, še več pa enostavnih rešitev, ki pripomorejo h kvalitetni, k hitrejši in cenejši izdelavi. Veliko izdelkov zahteva dolgo in kompleksno izdelavo zaradi lastnosti, ki so pričakovane na koncu obdelave, kar seveda oteži proces izdelave in zahteva obdelavo na več operacijah oz. strojih. S tem podaljšujemo čas izdelave in povečujemo količino izmeta zaradi same obdelave. Seveda je z več operacijami povečana tudi možnost napak ali poškodb, ki lahko dodatno povzročajo izmet in zahtevajo drago kontrolo.

V ta namen bomo v delu raziskovali vpliv podaljšanega ohlajanja na koncu postopka umetnega staranja izdelka iz aluminijeve zlitine EN AW-6082. Izdelek je palica premera 14,1 mm in dolžine 3000 mm, ki med postopkom umetnega staranja izgubi predpisano ravnost in se ukrivi. Zaradi tega pojava je potrebna dodatna operacija ponovnega ravnanja po toplotni obdelavi, ki podaljšuje proces izdelave. Problem nastane tudi pri končnem razrezu materiala, saj razrez zaradi popačenja začetka in konca palice pri valjčnem ravnanju ni mogoč na isti liniji. Tako je po ponovnem ravnanju potreben še razrez na končno dolžino, zato smo primorani material obdelovati na dveh dodatnih operacijah. Ponovno ravnanje se izvaja na stroju, ki ni del tegalne linije, kar povzroča še dodatne logistične težave. Pri dodatnem transportu in manipulaciji z materialom nastaja tudi večna možnost nastanka poškodb na materialu.

V diplomskem delu bomo predstavili preizkus počasnejšega ohlajanja materiala po končanem postopku in vplive ohlajanja na ravnost materiala. Iz različnih virov bomo preučili možne pojave v materialu, ki lahko povzročijo krivljenje materiala med samim postopkom toplotne obdelave. Namen raziskave je ohraniti čim boljšo ravnost med postopkom umetnega staranja in s tem zmanjšati potrebo po ponovnem ravnanju izdelkov, ki so že toplotno obdelani. S tem bi skrajšali proizvodni proces, saj bi zmanjšali ali pa celo izničili potrebo po ponovnem ravnanju materiala po končani toplotni obdelavi.

Na materialu bomo opravili meritev ravnosti, kar nam bo omogočalo primerjavo med obema postopkoma. S to primerjavo bomo lahko ugotavljali vpliv ohlajanja na material in smiselnost vpeljave ohlajanja v sam proces.

Ključne besede: notranje napetosti, umetno staranje, EN AW-6082, ekstruzija aluminijevih zlitin, kontinuirni vlek aluminijevih zlitin.

ABSTRACT

Today's production requires a lot of innovation and flexibility, and above all, simple solutions that help make production faster and cheaper. Many products require long and complex production due to the properties expected at the end of processing, which of course complicates the manufacturing process and requires processing in several operations or machines. This prolongs the production time and increases the amount of ejection due to the processing itself. Of course, more operations also increase the possibility of errors that require costly control.

To this end, we will investigate the impact of prolonged cooling at the end of the artificial aging process, an aluminum alloy product EN AW-6082. The product is a rod with a diameter of 14.1 mm and a length of 3000 mm, which loses the prescribed flatness and bends during the artificial aging process. Due to this phenomenon, an additional operation after heat treatment is required, which prolongs the manufacturing process. The problem also arises with the final cutting of the material, as cutting is not possible on the same line due to distortion of the beginning and end of the rod during roller straightening. Thus, after straightening, a cut to the final length is required. Thus, we are forced to process the material in two additional operations. Re-handling is performed on a machine that is not part of the towing line, which causes additional logistical problems.

In this paper, we will test the slower cooling of the material after the procedure and the effects of cooling on the flatness of the material. From various sources, we will examine possible phenomena in the material that can cause the material to warp. The purpose of the research is to maintain the best possible flatness through the process of artificial aging and thus reduce the need to re-straighten products. This would shorten the production process, as it would reduce or even eliminate the need to re-straighten the material after the heat treatment is completed.

We will measure the flatness of the material, which will allow us to compare the two procedures. With this comparison, we will be able to determine the impact of cooling on the material and the feasibility of introducing cooling into the process itself.

Keywords: Residual stress, artificial ageing , EN AW-6082, aluminium tempers, aluminium extrusion, aluminium drawing.

1 UVOD

1.1 Opis področja in opredelitev problema

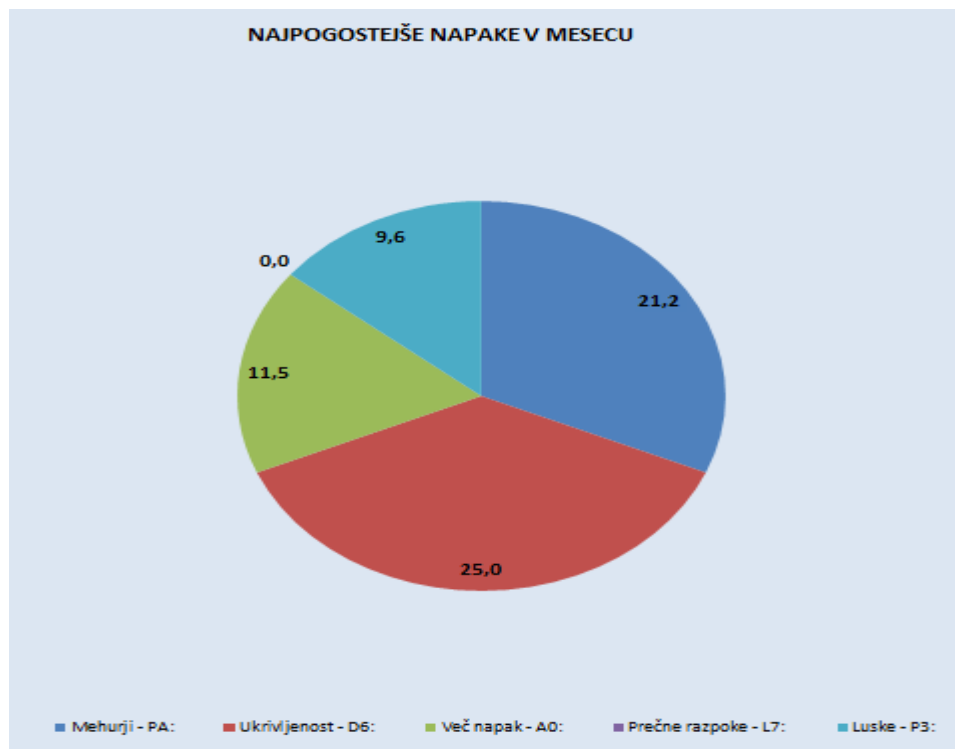
V proizvodnem procesu PCP Cevarna podjetja Impol se ciklično opravlja postopek toplotnih obdelav aluminijastih izdelkov. Zaradi širokega asortimaja izdelkov, ki se izdelujejo v podjetju, je treba postopke obdelave velikokrat usklajevati in prilagajati tako, da lahko zadovoljimo potrebe čim širšega nabora izdelkov. Pri tem je treba zelo paziti, da ne izključimo potreb drugih materialov, kar bi pomenilo izključevanje in s tem bolj razdrobljen proces v že tako raznolikih postopkih. Zato je zelo pomembno iskanje univerzalnih rešitev, ki so lahko aplicirane na čim večji spekter izdelave.

Problem, ki ga obravnavamo, nastaja pri postopku umetnega staranja. Staranje palic manjših premerov, ki so bile hladno obdelane, povzroča ukrivljenost, ki presega zahteve kupcev. V našem primeru je ta ukrivljenost definirana z 1 mm/m.

Originalna izdelava je bila veliko hitrejša, saj hladna obdelava poteka na proizvodni liniji, ki zajema kontinuirni vlek, valjčno ravnanje, obrez materiala in na koncu po potrebi posnemanje robov. Zaradi nastanka tega problema je potrebna dodatna operacija v postopku izdelave, kjer je treba izdelke po toplotni obdelavi ponovno ravnati. Le-to s seboj prinese svoje težave, saj postopek valjčnega ravnanja pusti grob konec palice, ki ga je potrebno po ravnanju posneti. Tukaj problem povzroči še eno dodatno operacijo pri izdelavi. Poleg tega se je treba zavedati, da toplotno obdelan material nima več enakih lastnosti kot surov, kar vpliva na zmožnost ravnanja izdelkov. Celoten proces tako povzroči izjemno dolge proizvodne čase in večje število operacij, kar pomeni tudi daljše dobavne roke.

Izbira problematike v proizvodnji je bila enostavna, saj je mogoče preveriti statistiko napak za določeno obdobje. Te napake se knjižijo v sistem kot motnje v proizvodnji. S pomočjo teh podatkov je možno pravočasno ukrepati in preprečiti določene težave, ki bi lahko nastajale pri nadaljevanju obdelave.

S podanega grafa je razvidno, da je med večjimi težavami končna ravnost izdelkov.



Slika 1: Najpogostejše napake

Vir: (Lasten vir)

1.1 Namen, cilji in osnovne trditve

V diplomskem delu bomo raziskovali potencialne rešitve pri toplotni obdelavi aluminijastih palic. Rešitev mora biti čim bolj univerzalna, saj obdelava zajema skupine zlitin različnih stanj, ki imajo tudi različne lastnosti.

Prav tako mora biti rešitev cenovno ugodna in izvedljiva z minimalnimi posegi, saj tudi ti zahtevajo svoj čas in prinašajo stroške. Zaradi tega je smiselno raziskati tudi samo toplotno obdelavo, saj je to operacija, na kateri problem nastaja.

Namen diplomskega dela je zmanjšanje vpliva toplotne obdelave na ravnost palic z uvedbo ohlajanja na koncu procesa umetnega staranja. S tem se bo zmanjšala potreba po ponovnem ravnanju končnih izdelkov. Posledično se bo dvignila tudi produktivnost proizvodnega procesa.

Cilj diplomskega dela je na podlagi eksperimenta in meritev določiti ustreznost ohlajanja na koncu toplotne obdelave. S tem bi radi poiskali ugodno rešitev za aktualni problem v podjetju, kar bi zmanjšalo potrebo po ponavljanju postopka ravnanja končnih izdelkov. Z izvedbo meritev in analizo podatkov bomo lahko raziskali vpliv ohlajanja na ravnost materiala po umetnem staranju.

Na podlagi teh raziskav bomo preverili pravilnost naslednjih trditev.

- H1: Zaradi hitrega padca temperature pri končanem postopku umetnega staranja material ne dosega zahtevane ravnosti.
- H2: Dodajanje ohlajanja na koncu postopka bo doprineslo k ohranjanju ravnosti izdelkov.
- H3: Z dodajanjem ohlajanja na koncu postopka umetnega staranja zmanjšamo potrebo po ponovnem ravnanju izdelkov.
- H4: Raziskovanje na starejšem stroju ponuja priložnosti za izboljšave na področju varnosti.

1.2 Predpostavke in omejitve

Zaradi varovanja poslovnih skrivnosti podjetja Impol določenih parametrov pri sami izdelavi ne bomo razkrivali. V ta namen je možno, da bo kakšna fotografija ali parameter obdelave zakrit ali pa zaokrožen tako, da bo kljub temu razumljiv, ampak ne dovolj natančen.

1.3 Uporabljene raziskovalne metode

Diplomsko delo bo večinoma zasnovana iz teorije, pri kateri smo izhajali iz podane literature, in dejanskega preizkusa spremembe zaključka postopka toplotne obdelave. Kot vodila bomo

uporabljali tudi ohlajevalne krivulje, ki so nastajale ob zaključenih procesih pri normalnem načinu ohlajanja. Temu bo sledila obdelava meritev, na podlagi katere bomo lahko ocenili uspešnost eksperimenta.

Predviden pristop:

- raziskava literature,
- zbiranje podatkov iz navedenih virov,
- deskripcija problema in potencialne rešitve na osnovi pridobljenih podatkov,
- komparacija stanja pred predlagano rešitvijo in po njej,
- meritve stabilnosti temperature in meritve ravnosti pred in po predlagani rešitvi.

2 DEFINICIJA MATERIALA

2.1 Na kratko o postopku izdelave

Obravnavali bomo aluminijaste palice manjših premerov, saj na njihovo končno ravnost vpliva toplotna obdelava.

Palice se izdelujejo po naslednjem postopku:

- Ekstrudiranje (stiskanje) na direktni stiskalnici, kjer skozi matrico stiskamo aluminijaste droge, pri čemer dobimo željeno obliko palice.
- Natezno ravnanje sledi na isti proizvodni liniji. S tem postopkom zagotovimo potrebno ravnost palic za nadaljnjo obdelavo.
- Razrez na željeno dolžino, ki bo primerna za obdelavo na naslednji operaciji. Po razrezu material dostavimo na vlečno linijo.
- Vlečna linija je sestavljena iz tegalnika, kjer palice vlečemo skozi orodje določenega premera, da dobimo željeno dimenzijo izdelka. Po vlečenju palice dosežejo valjčno-ravna del linije, ki palice izravna. Temu sledi še končni razrez palic in opcijsko posnemanje robov na željeni kot in globino.



Slika 2: Prikaz teganja

Vir: (The Fabricator, 2022)

Sledi umetno staranje, kjer material segrevamo na določeno temperaturo za željen čas. Material posledično pridobi boljše mehanske lastnosti kot v surovem stanju.

2.2 Lastnosti zlitine EN AW-6082 [AlSi1MgMn]

Zlitina 6082 ponuja podobne, vendar ne enakovredne fizikalne lastnosti zlitini 6061 in nekoliko višje mehanske lastnosti v stanju T6, kar pomeni, da je material kaljen in umetno staran. Ima dobre končne lastnosti in se dobro odziva na najpogostejše anodne premaze (to so prozorni, prozorni in barvni, trdi premazi).

Za zlitino 6082 je mogoče uporabiti različne komercialne metode spajanja (npr. varjenje, spajkanje itd.), vendar lahko toplotna obdelava zmanjša trdnost v območju zvara. Zagotavlja dobro obdelovalnost pri materialu, ki je samo umetno staran (stanje T5), in kaljenih stanjih T6, vendar se za izboljšanje tvorbe odrezkov priporočajo lomilci odrezkov ali posebne obdelovalne tehnike.

Stanje 0, ki je žarjeno stanje materiala, ali T4, ki je samo kaljeno stanje materiala brez umetnega staranja, je priporočljivo pri upogibanju ali oblikovanju zlitine 6082. Prav tako je težko izdelati tankostenske ekstrudirane oblike v zlitini 6082, zato stanje T6 morda ne bo najboljše zaradi omejitev kaljenja zlitine.

2.3 Uporaba zlitine EN AW-6082 [AlSi1MgMn]

Zaradi dobre varljivosti, spajkanja, odpornosti proti koroziji, oblikovanja in obdelave je zlitina 6082 uporabna za palice in obdelovalne materiale, brezšivne aluminijaste cevi, strukturne profile in profile po meri. Tako lastnosti kot tudi njena majhna teža in odlične mehanske lastnosti so prispevale k uporabi zlitine 6082-T6 v avtomobilskih, letalskih in železniških aplikacijah za visoke hitrosti. Zaradi odličnih lastnosti se uporablja na skoraj vseh industrijskih, komercialnih in potrošniških trgih.

2.4 Stanja aluminijevih zlitin

Oznake stanj se nanašajo na variacije fizikalnih lastnosti, ki jih je mogoče doseči znotraj zlitine.

Zlitine, ki jih ekstrudiramo, so lahko toplotno obdelane in toplotno neobdelane. Obe vrsti se pogosto uporabljata. Oznake zlitin so štirimestna števila, ki označujejo določeno skupino materiala z določenimi podobnostmi. Primer je zlitina, ki jo obravnavamo, iz serije 6xxx, bolj natančno določeno pa 6082.

Tabela 1: Delitev aluminijevih zlitin

Serijska	Poglavitni legirni element
1xxx	99 % aluminija
2xxx	Baker
3xxx	Mangan
4xxx	Silicij
5xxx	Magnezij
6xxx	Magnezij in silicij
7xxx	Cink
8xxx	Ostali elementi

Vir: (Impol, 2022)

Zlitine v družinah serij 1xxx, 3xxx in 5xxx niso toplotno obdelane. Zlitine serij 2xxx, 6xxx in 7xxx so toplotno obdelane. Zlitine serije 4xxx vsebujejo tako toplotno obdelane kot toplotno neobdelane vrste.

Zlitin iz skupine, ki ni toplotno obdelana, ni mogoče bistveno utrditi s toplotno obdelavo, njihove lastnosti pa so odvisne od stopnje hladnega dela. Toplotno obdelane zlitine pa lahko utrdimo z nadaljnjo toplotno obdelavo. To pomeni, da razlike v kemičnih in metalurških strukturah skupin zlitin vplivajo tudi na to, kako zlitine reagirajo med postopkom varjenja kot tudi na druge postopke izdelave. Z drugimi besedami – ta široka paleta aluminijevih zlitin in njihovih lastnosti ustvarja kompleksno paleto materialov. Razumevanje osnovnih razlik nam lahko pomaga biti uspešnejši pri izbiri prave (Metal Supermarkets, 2022).

2.4.1 Osnovna stanja aluminijevih zlitin

Na prvi pogled označb stanj materiala ni lahko razumeti. Pomembno pa je prepoznati in razumeti, kaj pomenijo te črke in številke. Aluminijasti izdelki s specifičnimi lastnostmi in oblikami so označeni z oznakami zlitin in stanj. Oznake zlitine so štirimestne številke. Te identificirajo kemijsko sestavo zlitine.

Oznake stanj so alfanumerične. Dodane so oznakam zlitine, in sicer za štirimestno oznako zlitine. Primer je 6061-T6, kar pomeni serija 6xxx, varianta 6061, ki je kaljena in umetno starana.

Oznake temperameta povedo tako proizvajalcu kot uporabniku, kako je bila zlitina mehansko in/ali toplotno obdelana, da se dosežejo želene lastnosti. Prvi znak v oznaki temperameta (velika črka F, O, H, W ali T) označuje splošni razred obdelave.

F – izdelano. Večina izdelkov F-temper je polizdelkov. Uporabljali se bodo pri oblikovanju, končni obdelavi ali termičnih procesih za doseganje drugih končnih oblik ali temperamentov.

O – žarjeno. Za doseganje najnižje trdnosti zlitine se uporabljajo obdelave z žarjenjem. Glavni razlog zanje je povečati obdelovalnost ali povečati žilavost in duktilnost.

H – utrjeno. Oznaka za zlitine, ki niso toplotno obdelane in katerih trdnost se je povečala z deformacijskim utrjevanjem, običajno pri sobni temperaturi.

W – toplotno obdelano. Ta oznaka velja samo za zlitine, ki se po toplotni obdelavi raztopine starajo naravno in spontano. To je redko končno stanje.

T – termično obdelano. To velja za katero koli obliko izdelka iz katere koli toplotno obdelane zlitine, ki je bila toplotno obdelana v raztopini, ki ji sledi kaljenje in staranje (Metal Supermarkets, 2022).

3 NOTRANJE NAPETOSTI

Preostale napetosti ali notranje napetosti so zaklenjene znotraj kovinskega predmeta, čeprav je predmet brez zunanjih sil. Te napetosti so posledica dejstva, da sosednja področja kovine omejujejo širjenje, krčenje ali sproščanje elastičnih deformacij. Preostale napetosti so lahko natezne ali tlačne. Dejansko preostale natezne in tlačne napetosti soobstajajo znotraj komponente.

3.1 Vzroki za nastanek notranjih napetosti

Preostale napetosti nastanejo, ko je komponenta obremenjena preko svoje meje elastičnosti in pride do plastične deformacije. Plastična deformacija se pojavi, ko napetost preseže mejo tečenja kovine (obravnavano pri nateznem preizkušanju).

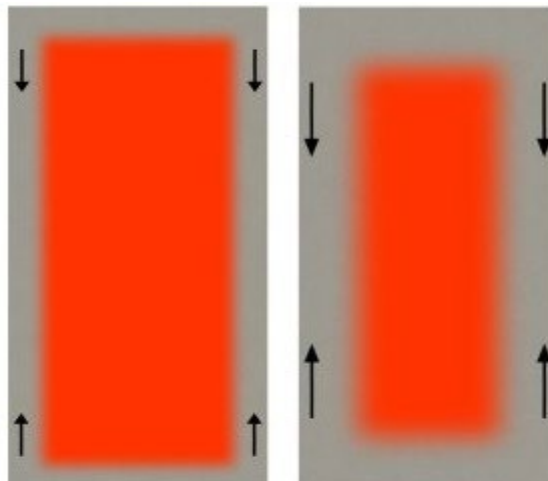
Notranje napetosti lahko nastanejo iz naslednjih vzrokov.

- Neenakomerna plastična deformacija lahko nastane med mehansko obdelavo, npr. med valjanjem ali hladnim preoblikovanjem, kot sta upogibanje ali vlečenje materiala, med strojno obdelavo in mehanskimi površinskimi obdelavami (npr. brušenje z valji).
- Vzrok so lahko tudi fazne transformacije pri hlajenju iz povišanih temperatur, kot se dogaja pri postopku kaljenja materiala.
- Neenakomerna plastična deformacija med segrevanjem ali hlajenjem.
- Heterogenost kemičnega ali kristalografskega reda (nitriranje ali utrjevanje).
- Različne površinske obdelave (emajliranje, galvanizacija PVD in CVD-premaz).

3.2 Notranje napetosti zaradi temperaturnih nihanj

V delih, ohlajenih iz povišanih temperatur, so preostale napetosti posledica temperaturnih nihanj v kovini, ki nastajajo med hlajenjem. Med toplotno obdelavo in varjenjem pride do hlajenja iz povišanih temperatur, kjer je ta efekt najizrazitejši.

Temperaturne spremembe med hlajenjem iz povišane temperature v kovini povzročijo lokalizirane spremembe količine toplotnega krčenja. Toplotno krčenje povzroči neenakomerno napetost zaradi različnih stopenj hlajenja na površini in v notranjosti kovine. Med hlajenjem se zunanji del komponente najprej ohladi; ta del kovine se skrči in stisne bolj vročo notranjo kovino. Ko se notranji del komponente ohlaja, se kovina poskuša skrčiti, vendar jo ovira že ohlajeni zunanji del. Posledično ima notranji del preostalo natezno napetost, zunanji del komponente pa preostalo tlačno napetost.



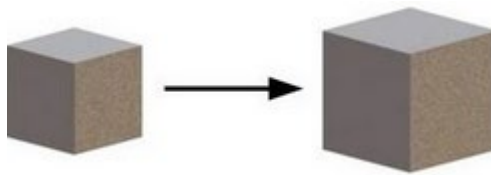
Slika 3: Prikaz notranjih napetosti

Vir: (Imetllc , 2022)

3.3 Notranje napetosti zaradi faznih transformacij

Fazna transformacija je sprememba v metalurških fazah, prisotnih v zlitini. Na primer pretvorba iz avstenita v martenzit v jeklu med kaljenjem je fazna transformacija.

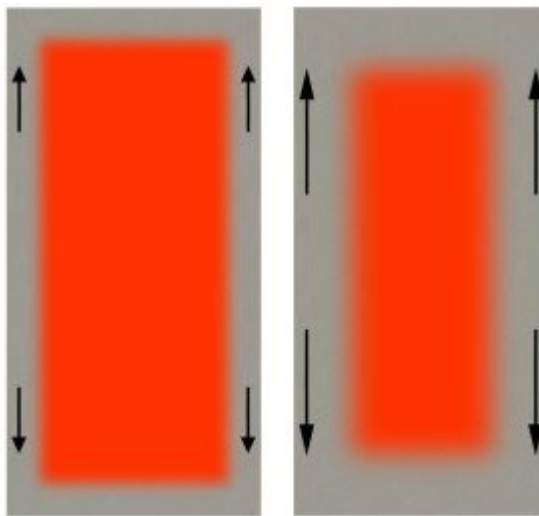
Notranje napetosti, ki nastanejo med fazno transformacijo, so posledica volumske razlike med novonastalo in začetno metalurško fazo. Volumenska razlika povzroči razširitev ali krčenje kovine (Spaić, Fizikalna metalurgija, 2022).



Slika 4: Raztezanje

Vir: (Industrial Metallurgists, 2022)

Pri faznih transformacijah, ki se pojavijo med hlajenjem iz povišane temperature, na primer pri jeklu, se zunanji deli kovine najprej ohladijo in najprej podvržejo fazni transformaciji. Če je prostornina nove faze drugačna od prostornine začetne faze, se bo transformirana prostornina kovine spremenila, ko bo nastala nova faza. Ko se notranjost kovine ohladi, bo poskušala povečati ali zmanjšati prostornino, vendar pa bo sprememba prostornine kovinske notranjosti omejena s hladnejšim zunanjim slojem kovine, ki se je že preoblikovala.



Slika 5: Notranje napetosti – obratno

Vir: (Industrial Metallurgists, 2022)

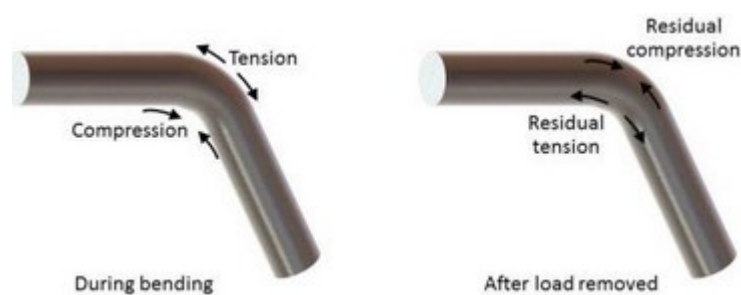
Ko je prostornina nove faze večja od prostornine začetne faze, bo osrednji del komponente pod pritiskom, površina pa pod napetostjo. Ko je prostornina nove faze manjša od prostornine začetne faze, bo sredinski del komponente pod napetostjo, del kovine na površini in blizu nje pa pod pritiskom.

Na primer med kaljenjem jekla se avstenit spremeni v martenzit, pri čemer ima martenzit prostornino, ki je približno 4 % večja od avstenita. Med gašenjem se jeklo na površini najprej spremeni v martenzit, saj se površina najhitreje ohladi. Ko se kovina v notranjosti še naprej ohlaja, se tudi notranjost spremeni v martenzit. Vendar pa je njegovo volumsko širjenje omejeno zaradi utrjene, hladnejše površinske plasti. To zadrževanje povzroči, da je notranjost stisnjena, zunanja površina pa pod napetostjo.

V nekaterih pogojih lahko spremembe prostornine povzročijo notranje napetosti, ki so dovolj velike, da povzročijo plastično deformacijo, kar vodi do upogibanja ali popačenja komponent. Pri močnem gašenju so lahko to kalilne napetosti (Spaić, Metalografija zlitin, 2000).

3.4 Notranje napetosti zaradi mehanske obdelave

Notranje napetosti nastanejo tudi, ko je plastična deformacija neenakomerna skozi prerez predmeta, ki se deformira, kot na primer med upogibanjem, vlečenjem, valjanjem in iztiskanjem. Ko je kovina podvržena plastični deformaciji, je del deformacije elastičen. Po odstranitvi obremenitve, ki je povzročila deformacijo, kovina poskuša obnoviti elastični del deformacije. Vendar pa je elastično okrevanje nepopolno, ker mu nasprotuje sosednji plastično deformiran material.



Slika 6: Napetosti zaradi mehanske obdelave

Vir: (Industrial Metallurgists, 2022)

Če razmišljamo o kovinskem predmetu, ki je bil upognjen, bodo njegova območja, ki mejijo na ovinek, le elastično deformirana; to območje pa se bo poskušalo obnoviti, kar je pojav, znan kot vzmet. Po odstranitvi zunanje sile upognjene regije preprečujejo, da bi se sosednja popolnoma elastična področja obnovila v nedeformirano stanje. Ta področja ostanejo v stanju preostale napetosti, plastično deformirana področja pa v stanju preostalega stiskanja.

Na splošno bo predznak preostale napetosti, ki nastane zaradi neenakomerne deformacije, nasproten predznaku plastične deformacije, ki je povzročila preostalo napetost.

3.5 Učinki notranjih napetosti

Notranje napetosti so lahko koristne ali škodljive, odvisno od tega, ali je napetost natezna ali tlačna. Preostale natezne napetosti so lahko dovolj velike, da povzročijo popačenje ali razpoke komponent. Tudi razpoke zaradi utrujenosti in korozije ob napetosti zahtevajo prisotnost nateznih napetosti. Ker se preostale napetosti algebraično seštevajo z uporabljenimi napetostmi, lahko preostale površinske natezne napetosti v kombinaciji z uporabljeno natezno napetostjo zmanjšajo zanesljivost komponent. Pravzaprav preostala natezna napetost včasih zadostuje, da povzroči razpoke zaradi napetostne korozije.

Preostale površinske tlačne napetosti so na splošno koristne, ker zmanjšujejo učinke uporabljenih nateznih napetosti. V večini primerov površinske tlačne napetosti prispevajo k izboljšanju utrujenosti in odpornosti proti razpokanju zaradi napetosti in korozije.

3.6 Nadzor notranjih napetosti

Nadzorovanje vrste in velikosti notranjih napetosti je pomembno za aplikacije, pri katerih bodo komponente izpostavljene utrujenosti ali razpokanju zaradi napetostne korozije ali če so preostale napetosti dovolj velike, da povzročijo deformacijo ali razpoke komponent. To je mogoče doseči z mehansko obdelavo, s toplotno obdelavo za lajšanje napetosti, z nadzorom procesov toplotne obdelave in izbiro zlitin.

Mehanske obdelave, kot so brizganje, rahlo hladno valjanje, raztezanje in majhne količine stiskanja, se uporabljajo za namerno induciranje preostale tlačne napetosti na površini komponente.

Ker se meja tečenja kovine z naraščanjem temperature zmanjšuje, je mogoče kovine razbremeniti s segrevanjem na temperaturo, pri kateri je meja tečenja kovine enaka ali manjša od velikosti preostale napetosti. Pri tej temperaturi se lahko kovina mikroskopsko plastično deformira, s čimer se sprosti vsaj del preostale napetosti. Po razbremenitvi napetosti je največja preostala napetost, ki lahko ostane, enaka meji tečenja materiala pri temperaturi razbremenitve.

Z vidika obdelave komponent je mogoče preostale napetosti zmanjšati na minimum z uporabo zmanjšanih stopenj hlajenja za zmanjšanje temperaturnih nihanj in omogočiti, da se fazne transformacije pojavljajo enakomerneje po celotnem prečnem prerezu komponente. Prav tako lahko za uporabo počasnejših stopenj hlajenja izberemo zlitine, medtem ko se še vedno pojavijo zelene fazne transformacije. Na primer, da so komponente iz ogljikovega jekla skozi kaljena, nizkolegirana ogljikova jekla, omogočajo uporabo počasnejših stopenj hlajenja v primerjavi z navadnimi ogljikovimi jekli.

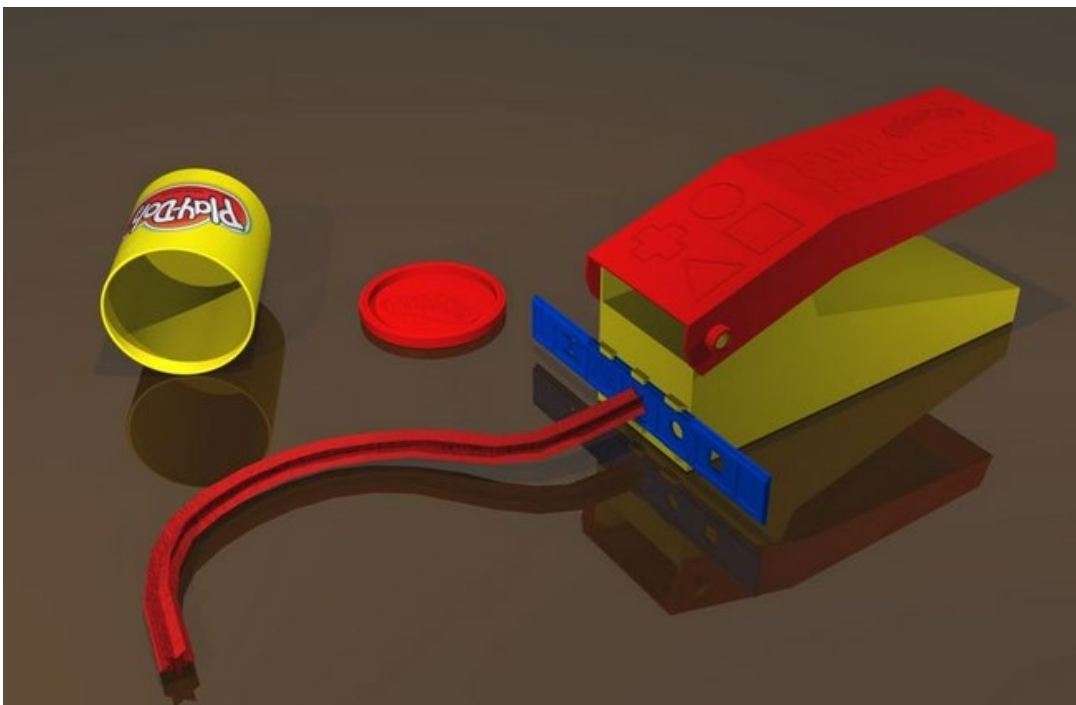
3.7 Merjenje notranjih napetosti

Rentgenska difrakcija se uporablja za nedestruktivno merjenje preostale napetosti. S to tehniko se izmerijo deformacije v atomski kristalni mreži kovine, nato pa se na podlagi meritev deformacije izračunajo preostale napetosti.

4 POSTOPEK IZDELAVE OBRAVNAVANEGA MATERIALA

Ekstruzija ali iztiskanje je opredeljena kot proces oblikovanja materiala, kot je aluminij, pri katerem s pritiskanjem na material dosežemo, da le-ta teče skozi oblikovano odprtino v matrici. Ekstrudirani material ima obliko, ki je enaka podolgovatemu kosu z enakim profilom kot odprtina matrice.

Za pomoč pri razumevanju postopka ekstrudiranja aluminija pomislite na Play-Doh® Fun Factory in kako deluje. Zamislite si Fun Factory kot stiskalnico za ekstruzijo, ročaj kot bat, oblikovno palico kot matrico in Play-Doh® kot aluminijasti blok. Prvi korak je izbira zelene oblike in barve. Zamislite si obliko kot matrico in barvo kot potrebo po temperamentu in zlitini. Nato se Play-Doh® vstavi v držalno komoro in pritisnemo na ročaj, ki Play-Doh® sili skozi obliko. V stiskalnici za ekstruzijo bat s strani pritiska na aluminijasti drog, kjer je lažni blok pritrjen na konec stebra bata. Ko se Play-Doh® začne pojavljati, je bil dejansko »iztisnjen«. Ista načela veljajo za ekstrudiranje iz aluminijastih drogov, vendar so tam vključene bistveno podrobnejše in bolj izpopolnjene tehnologije.



Slika 7: Princip stiskanja

Vir: (Playdoh, 2022)

Velikost stiskalnice določa, kako veliko je mogoče izdelati ekstruzijo. Velikost iztiskanja se meri z njegovo najdaljšo dimenzijo prečnega prereza, tj. njegovo prileganje znotraj obrobne kroga. Opisani krog je najmanjši krog, ki bo v celoti zaprl prerez ekstrudirane oblike.

Najpomembnejši dejavnik, ki si ga je v procesu ekstrudiranja treba zapomniti, je temperatura. Temperatura je pri tem procesu najbolj kritična, ker daje aluminiju želene lastnosti, kot sta trdota in končna obdelava.

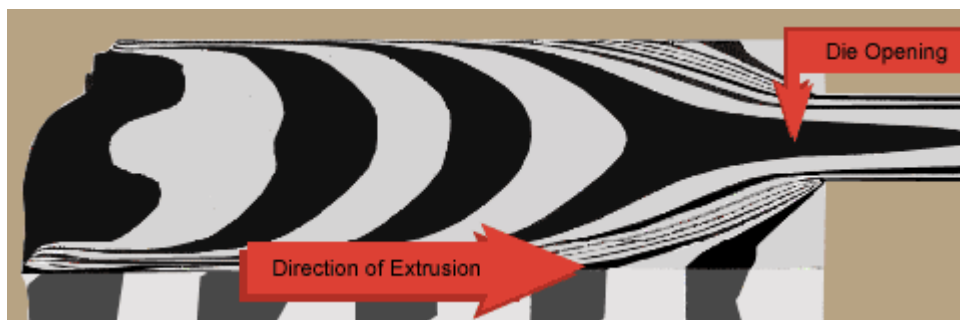
4.1 Koraki v procesu ekstruzije aluminija

Aluminijaste droge je treba segreti na 350 do 520 °C (odvisno od materiala). Ko aluminijasti drog doseže želeno temperaturo, se prenese v nakladalnik, kjer se batu doda tanek film ločevalnega sredstva, ki preprečuje, da bi se oba dela zlepila.

Bat nato pritiska na lažni blok, ki potisne aluminijasti drog, dokler le-ta ni v notranjosti recipienta stiskalnice. Pod pritiskom se drog stisne ob matrico in postane krajši in širši, dokler ni v polnem stiku s stenami recipienta. Medtem ko se aluminij potiska skozi matrico, tekoči dušik teče okoli nekaterih delov matrice, da jo ohladi. To podaljša življenjsko dobo matrice in ustvari inertno atmosfero, ki preprečuje nastajanje oksidov na iztisnjenem materialu. V nekaterih primerih se namesto tekočega dušika uporablja plinasti dušik. Plin dušik ne ohladi matrice, ampak ustvari inertno atmosfero.

Pritisk, ki se doda na aluminijasti drog, začne mehko kovino stiskati skozi odprtino matrice. Ko ekstruzija izstopi iz stiskalnice, se temperatura meri z instrumentom True Temperature Technology (3T), ki je nameščen na plošči stiskalnice. 3T beleži izstopno temperaturo aluminijaste ekstruzije. Glavni namen poznavanja temperature je ohraniti največjo hitrost stiskanja. Ciljna izstopna temperatura za ekstruzijo je odvisna od zlitine. Na primer ciljna izstopna temperatura za zlitine 6063, 6463, 6063A in 6101 je 500 °C (najmanj). Ciljna izstopna temperatura za zlitine 6005A in 6061 je 510 °C (najmanj).

Ekstruzije se potisnejo iz matrice do izhodne mize in izvleka, ki vodi kovino po iztočni mizi med iztiskanjem. Med vlečenjem se iztiskanje hladi z nizom ventilatorjev po celotni dolžini iztočne in hladilne mize.



Slika 8: Ekstruzija

Vir: (Bonnell Aluminum, 2022)

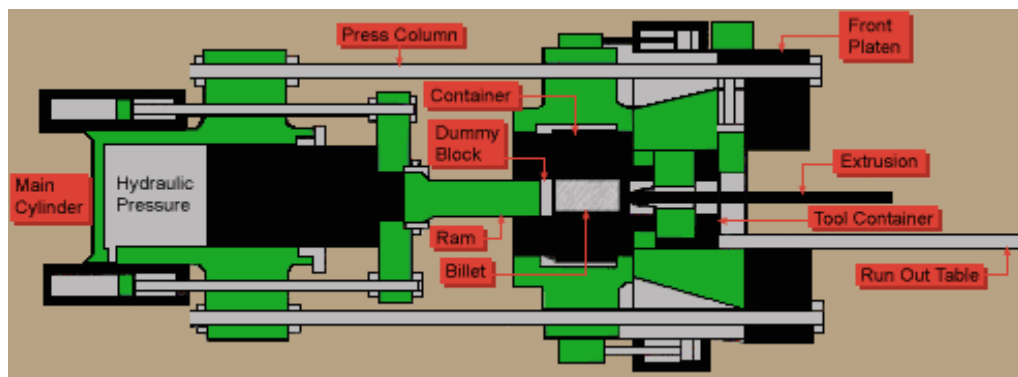
Celotnega aluminijastega droga ni mogoče uporabiti. Preostanek vsebuje okside s površine aluminijastega droga. Zadnji del se odreže in zavrže, medtem ko se drug drog naloži in privari na predhodno naložen drog in postopek ekstruzije se nadaljuje.

Ko ekstruzija doseže želeno dolžino, se iztiskanje razreže s profilno žago ali škarjami. Kovina se prenaša (prek sistemov s pasom ali pomičnimi tramovi) z iztočne mize na hladilno mizo. Ko se aluminij ohladi in premakne vzdolž hladilne mize, se nato premakne na nosila. Sledi natezno ravnanje, ki izvede delovno utrjevanje – tj. molekularna ponovna poravnava, ki daje aluminiju večjo trdoto in izboljšano trdnost.

Naslednji korak je žaganje. Po raztegovanju ekstruzij se le-te prenesejo na mizo z žago in razrežejo na določene dolžine. Ko so deli razrezani, jih naložimo na transportno napravo in založimo v peči za staranje. Toplotna obdelava ali umetno staranje utrdi kovino s pospeševanjem procesa staranja v okolju z nadzorovano temperaturo za določen čas. Tukaj se izvajajo še procesi hladne obdelave, ki so odvisni od zahtev naročenega materiala.

4.2 Deli stiskalnice

Da bi razumeli, kako deluje ekstruzijska stiskalnica, je treba identificirati dele stiskalnice in razložiti njihovo uporabo. Ekstruzijska stiskalnica je sestavljena iz sprednje in zadnje plošče, ki ju skupaj držijo štiri vezi.



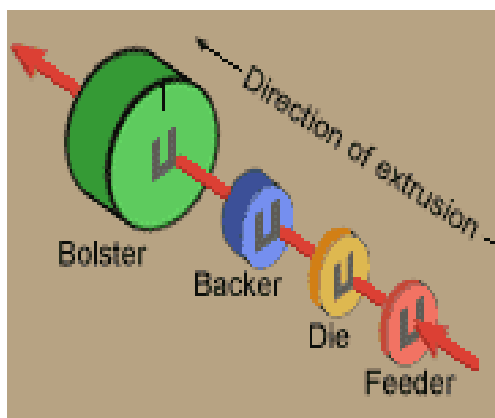
Slika 9: Deli stiskalnice

Vir: (Bonnell Aluminum, 2022)

Deli stiskalnice, ki pripomorejo k ekstruziji, so naslednji.

- Glavni cilinder – komora in cilinder ekstruzijske stiskalnice, v katero se črpa hidravlična tekočina za ustvarjanje želenega tlaka in gibanja.
- Hidravlični tlak – tlak, ki se uporablja za premikanje ram naprej pri zahtevanih funtih na kvadratni palec.
- Bat – jeklena palica, pritrjena na glavni cilinder z lažnim blokom na koncu, ki vstopi v posodo in izvaja pritisk na gredico.
- Stiskalniška plošča (»Dummy Block«) – tesno prilegajoč se jekleni blok, pritrjen na bat na stiskalnici, ki zatesni drog v recipientu in preprečuje, da bi kovina puščala nazaj.
- Drog – aluminijasta polena, razrezana na določene dolžine, ki se podajajo v stiskalnico kot ekstruzijski material.
- Recipient – komora v stiskalnici za ekstruzijo, ki drži drog, ko se potiska skozi matrico na enem koncu, medtem ko je pod pritiskom stiskalniške plošče in bata, ki vstopa na drugem koncu.

- Nabor orodij (sestava matrice):
 - polna sestava: obroč za matrice, matrica in podpora (podporniki se ne uporabljajo v sistemih Carthage ali Newnan);
 - votla sestava: obroč matrice, trn matrice, pokrovček matrice in podpora, nosilec matrice – vsebnik sklada orodja, zaklepanje matrice – zaklene matrico v držalo matrice.
- Peč za droge, ki je komponenta stiskalnice, se uporablja za segrevanje drog na temperaturo ekstruzije.
- Strižni del (škarje) odreže neekstrudirani del droga, ki ostane v posodi po zaključku ekstruzijskega cikla. Na ostanku se nahajajo oksidi, potem ko je bat potisnil drog skozi posodo.
- Peč za orodje, v kateri se matrice segrevajo na 350 do 500 °C 4–6 ur pred uporabo.
- Nosilec drži drog, medtem ko ga potisnemo v stiskalnico s pritiskom bata.
- Iztočna miza je miza ob takojšnjem izhodu opreme na izhod stiskalnice, ki pomaga pri vodenju in podpori iztiskanca.
- Ojačevalnik se uporablja za pomoč pri vodenju aluminijastih ekstruzij iz matrice. Ima enako število lukenj kot sama matrica in se lahko uporablja na vseh stiskalnicah. Sistem Newnan se oddaljuje od njihove uporabe, ker so dragi in težki za rokovanje (Bonnell Aluminum, 2022).
- Pritisni obroč plošče je obroč iz kaljenega orodnega jekla, vstavljen v ploščo za podporo matrice. Pritisk, ki ga glavni cilinder nanese na obroč, povzroči napetost in obrabo, kar povzroči potrebo po periodični zamenjavi.



Slika 10: Sestava orodja

Vir: (Bonnell Aluminum, 2022)

4.3 Dejavniki, ki vplivajo na iztiskanje

Oblika je odločilni dejavnik pri zahtevnosti in ceni dela, ki ga je mogoče ekstrudirati. Pri ekstruziji je mogoče ekstrudirati najrazličnejše oblike, vendar je treba upoštevati omejevalne dejavnike. Ti vključujejo velikost, obliko, zlitino, razmerje iztiskanja, toleranco, končno obdelavo, faktor in razmerje ostankov. Če del presega meje teh dejavnikov, ga ni mogoče uspešno ekstrudirati.

Velikost, oblika, zlitina, razmerje iztiskanja, toleranca, končna obdelava in razmerje ostankov so v procesu ekstrudiranja medsebojno povezani tako, kot so hitrost ekstrudiranja, temperatura droga, ekstruzijski tlak in zlitina, ki se ekstrudira.

Na splošno se hitrost iztiskanja neposredno spreminja s temperaturo in tlakom kovine, ki se razvijeta v recipientu. Temperatura in tlak sta omejena z uporabljeno zlitino in obliko, ki se ekstrudira. Na primer nižje temperature ekstrudiranja bodo običajno ustvarile oblike z boljšo kakovostjo površin in natančnejšimi dimenzijami. Nižje temperature zahtevajo tudi višje tlake. Včasih se zaradi omejitev tlaka doseže točka, ko je obliko nemogoče iztisniti skozi dano stiskalnico.

Prednostna temperatura droga je tista, ki zagotavlja sprejemljive površine in tolerančne pogoje ter hkrati omogoča najkrajši možni čas cikla. Idealno je ekstrudiranje drogov pri najnižji temperaturi, ki jo postopek dopušča. Izjema so t. i. zlitine za stiskanje, ki jih je večina v seriji 6000. Pri teh zlitinah je treba na izhodu iz matrice doseči temperaturo toplotne obdelave raztopine v območju 450 do 520 °C, da se razvijejo optimalne mehanske lastnosti.

Pri previsokih temperaturah materiala in hitrostih ekstrudiranja postane pretok kovine bolj tekoč. Kovina, ki išče pot najmanjšega upora, se nagiba k zapolnjevanju večjih praznin na površini matrice in se upira vstopu v zožena območja. V teh pogojih dimenzije oblike ponavadi padejo pod dovoljene tolerance, zlasti tanke štrline ali rebra.

Druga posledica prevelikih temperatur in hitrosti ekstrudiranja je trganje kovine na tankih robovih ali ostrih vogalih. To je posledica zmanjšanja natezne trdnosti kovine pri pretirano visokih temperaturah. Pri takih hitrostih in temperaturah je verjetno, da bo stik med kovino in nosilnimi površinami matrice nepopoln in neenakomeren.

Višje mehanske lastnosti zlitine praviloma pomenijo nižjo stopnjo ekstruzije. Večje trenje med drogom in steno obloge povzroči daljši čas, potreben za začetek ekstrudiranja gredice. Razmerje ekstrudiranja oblike je jasen pokazatelj količine mehanskega dela, ki se bo pojavil, ko se oblika iztisne.

Razmerje ekstruzije = površina droga/območje oblike.

Ko je razmerje iztiskanja odseka nizko, bodo imeli deli oblike, ki vključujejo največjo maso kovine, malo mehanskega dela. To še posebej velja za približno prvih deset metrov ekstrudirane kovine. Njegova metalurška struktura se bo približala stanju, kot je lita (grobo zrnato). Ta struktura je mehansko šibka in za oblike z razmerjem iztiskanja, manjšim od 10:1, ni mogoče zagotoviti mehanskih lastnosti.

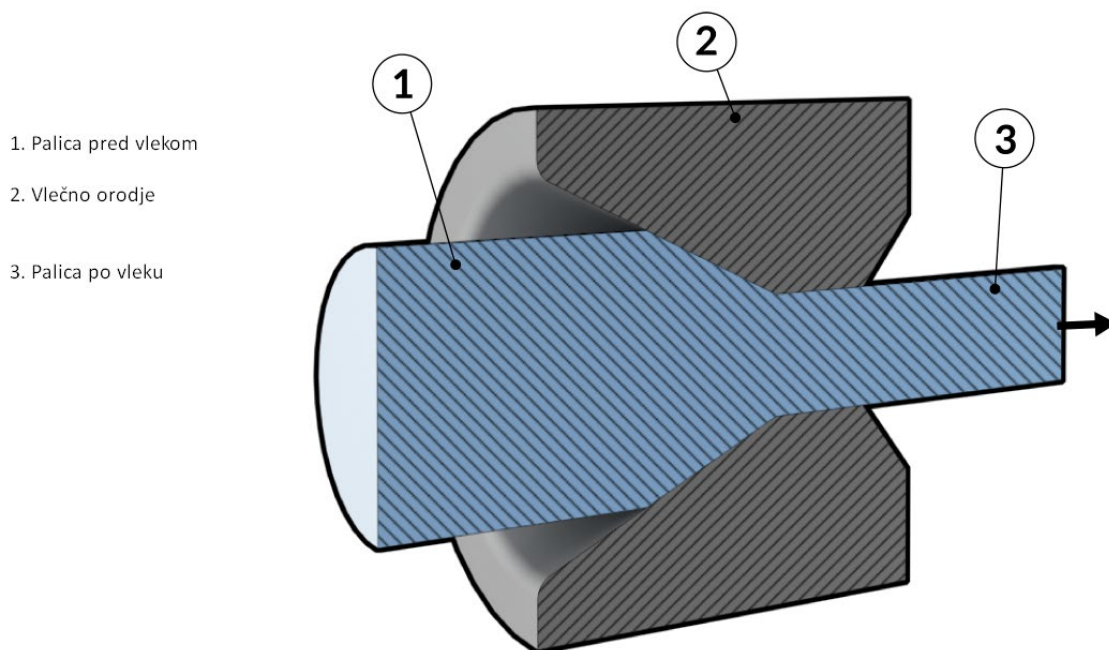
Kot je bilo pričakovati, je situacija nasprotna, ko je razmerje iztiskanja visoko. Za potiskanje kovine skozi manjše odprtine v matrici je potreben večji pritisk, kar bo povzročilo ekstremno mehansko delo. Običajno so sprejemljiva ekstruzijska razmerja za trde zlitine omejena na 35:1, za mehke pa 100:1. Normalno razmerje ekstrudiranja za trde zlitine je od 10:1 do 35:1, za mehke zlitine pa od 10:1 do 100:1. Te omejitve se ne smejo šteti za absolutne, saj lahko dejanska oblika iztiskanja vpliva na rezultate. Višje kot je razmerje iztiskanja, težje je del ekstrudirati, kar je posledica povečane odpornosti proti pretoku kovine. Trde zlitine zahtevajo največji pritisk za ekstruzijo in so še težje za iztiskanje zaradi slabih površinskih lastnosti, ki zahtevajo najnižjo možno temperaturo droga.

4.4 Vlečenje

Zaradi vedno večje konkurence je postalo zelo pomembno še naprej izboljševati učinkovitost procesa v smislu kakovosti izdelkov in optimizirane uporabe virov. Zahteve v avtomobilskem sektorju, energetiki in rudarskem sektorju so pripeljale do številnih sprememb v postopku vlečenja.

Hladno vlečenje je široko uporabljena tehnika predelave kovin. Proces ima svoje prednosti, kot so ožje dimenzijske tolerance, boljša površina in končna obdelava ter izboljšane mehanske lastnosti v primerjavi s postopki vročega oblikovanja.

Postopek vlečenja poteka tako, da stroj potegne palico skozi matrico, kjer zmanjša njen prerez. Izvaja se lahko ob prisotnosti vzvratne napetosti, ki pomaga zmanjšati tlak matrice in zagotavlja dimenzijsko stabilnost. Teoretično največje možno zmanjšanje v enem prehodu je 63 %, praktična meja pa je 45 %. Zato se za doseganje večje redukcije uporablja večstopenjsko vlečenje palic. Vlečenje palic običajno poteka pri sobni temperaturi.



Slika 11: Princip vlečenja palic

Vir: (Manufacturing Guide, 2022)

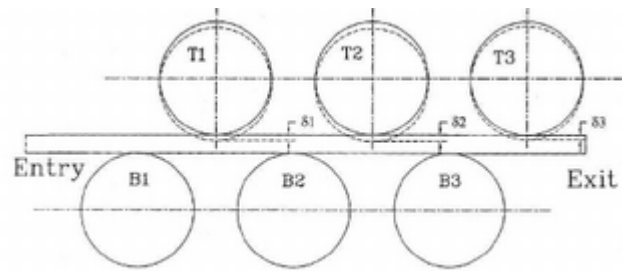
Oblikovanje matrice je pri vlečenju palic zelo pomembno. Večina raziskovalcev je optimizirala obliko matrice s ciljem zmanjšanja energije. Vendar pa ima oblika matrice velik vpliv na kakovost izdelka. Nekatere oblike matrice lahko povečajo zahtevano moč, zmanjšajo napake in izboljšajo mehanske lastnosti, kot sta natezna trdnost in trdota vlečene palice.

V postopku vlečenja palic obstaja več vrst napak. Nekatere napake, kot so kraste (nepravilno oblikovani sploščeni izrastki), nastanejo zaradi pomanjkljive surovine. Nekatere napake nastanejo zaradi napačne zasnove matrice in postopka. Na primer kombinacija velikega kota matrice in majhnega zmanjšanja povzroči zožitev plastične cone v bližini središčne črte in poveča možnost centralnega razpokanja.

Trenje je nezaželeno pri vlečenju palic in običajno se Coulombov koeficient trenja giblje od 0,01 do 0,1 ob ustreznem mazanju. Pri suhem vlečenju palic se mazivo nanese na palico, preden vstopi v matrico. Pri mokrem vlečenju sta matrica in palica potopljeni v maziva. Prav tako je pomembno nadzorovati preostale napetosti v palicah s pravilno zasnovo matrice in postopka (Manufacturing Guide, 2022).

4.5 Ravnanje

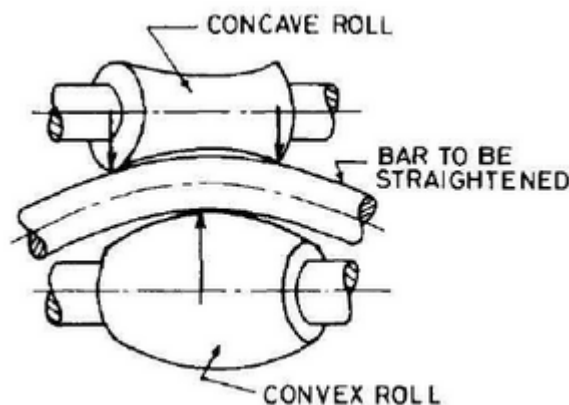
Cilj postopka ravnanja s prečnimi valji je ravnati palice s krožnim prerezom. Kovinske izdelke, kot so palice, tirnice in pločevine, je mogoče izravnati z izmeničnim upogibanjem z znižanjem amplitude. V idealnem primeru zadnji korak upogibanja povzroči takšno ukrivljenost, da izdelek po vzmetnem povratku doseže ravnost.



Slika 12: Valjčno ravnanje

Vir: (Research Gate, 2022)

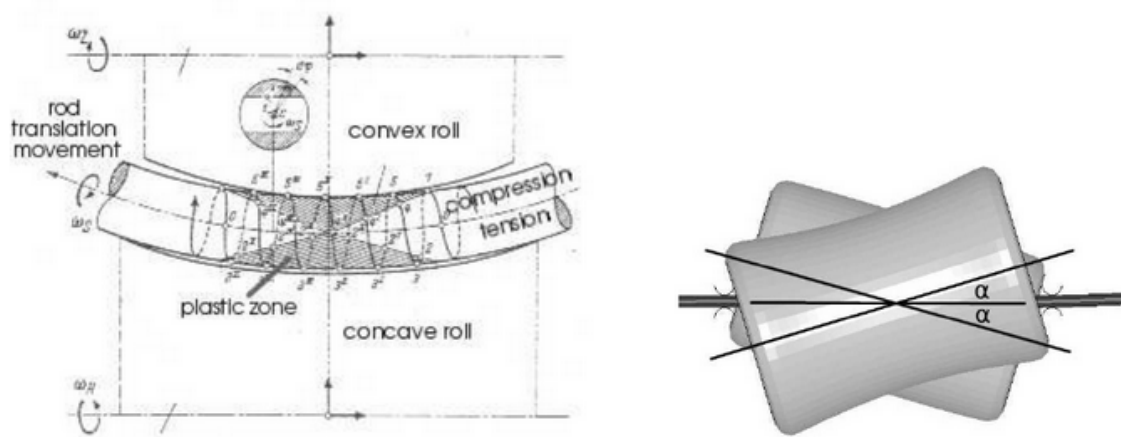
Pri palicah je problem nekoliko drugačen. Medtem ko se tirnice zaradi različnih sil upogibajo v eni ravnini vztrajnosti svojega preseka, se lahko okrogle palice prosto upognejo v treh dimenzijah. Ena rešitev, ki omogoča izravnati takšne izdelke, je upogniti material v dveh ravninah z nastavitvijo dveh naprav pod pravim kotom, kot je prikazano na sliki (Research Gate, 2022).



Slika 13: Ravnanje okroglih palic

Vir: (Research Gate, 2022)

Značilnost palic je njihova zmožnost vrtenja okoli svoje osi, tudi pod napetostjo. Na podlagi tega dejstva je druga možnost upogibanje izdelka z hkratnim vrtenjem. Ta druga možnost je prikazana na sliki.



Slika 14: Kot ravnalnih valjev

Vir: (Research Gate, 2022)

Palica potuje skozi dva valja: konkavnega in konveksnega. Dokler je razdalja med valji večja od premera palice, je palica podvržena čistemu upogibanju. Glede na točko na površini palice njena pot poteka vzdolž vijačnice z upognjeno osjo. Rezultat tega je deformacijsko stanje, ki ga lahko predstavimo kot eno od treh točk upogiba, ki napredujejo vzdolž vijačnice. Upogibanje palice je mogoče prilagajati s spreminjanjem kota med valji in palico. Manjši je kot, bolj se upogiba. Optimalni kot je tak, da je dosežena najvišja ravnost palice, hkrati pa ima še vedno ekonomsko realno hitrost prevajanja. Dandanes se večinoma izbira kot na empirični podlagi.

5 OPIS STROJA

V tem delu bomo opisali peč, na kateri bomo izvajali preizkus. Zelo pomemben je seveda tudi programski vmesnik, ki nam omogoča hitro sestavljanje segmentov programa umetnega staranja in ostalih funkcij peči, kot je ventilacija, odsesavanje, manipulacija vrat itd.

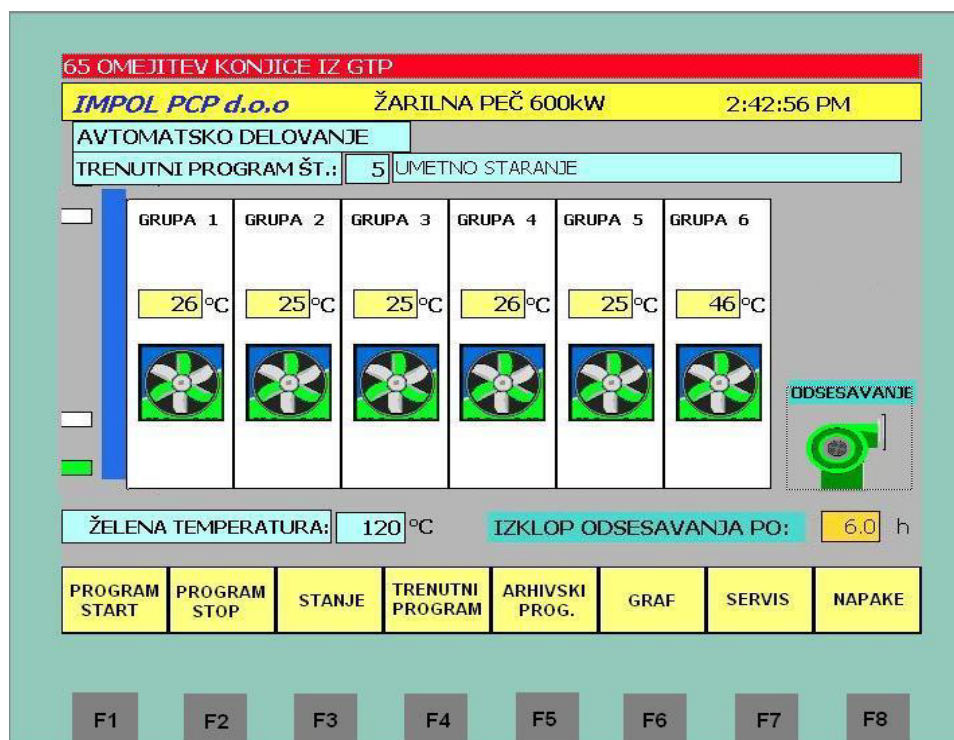


Slika 15: Peč Ebner

Vir: (Lastni vir, 2022)

Elektro uporovna peč je namenjena žarjenju in umirjanju (umetnemu staranju) palic cevi in profilov iz aluminija in aluminijevih zlitin pri temperaturah do 450 °C. Sestavljajo jo jeklena komora z elektro uporovnimi grelci, ventilatorji za kroženje notranjega zraka, nakladalni voz in sistem za odsesavanje oljnih par. Upravlja jo pečar ali drugi za to usposobljeni delavec.

Peč je razdeljena na šest grup za ogrevanje. V vsaki grupi je ventilator z dvohitrobnim motorjem in električnimi grelci, ki lahko grejejo v dveh stopnjah. Vsaka stopnja ogrevanja ima moč 45 kW. Tako je skupna moč ogrevanja peči 540 kW.



Slika 16: Sklopi grelcev

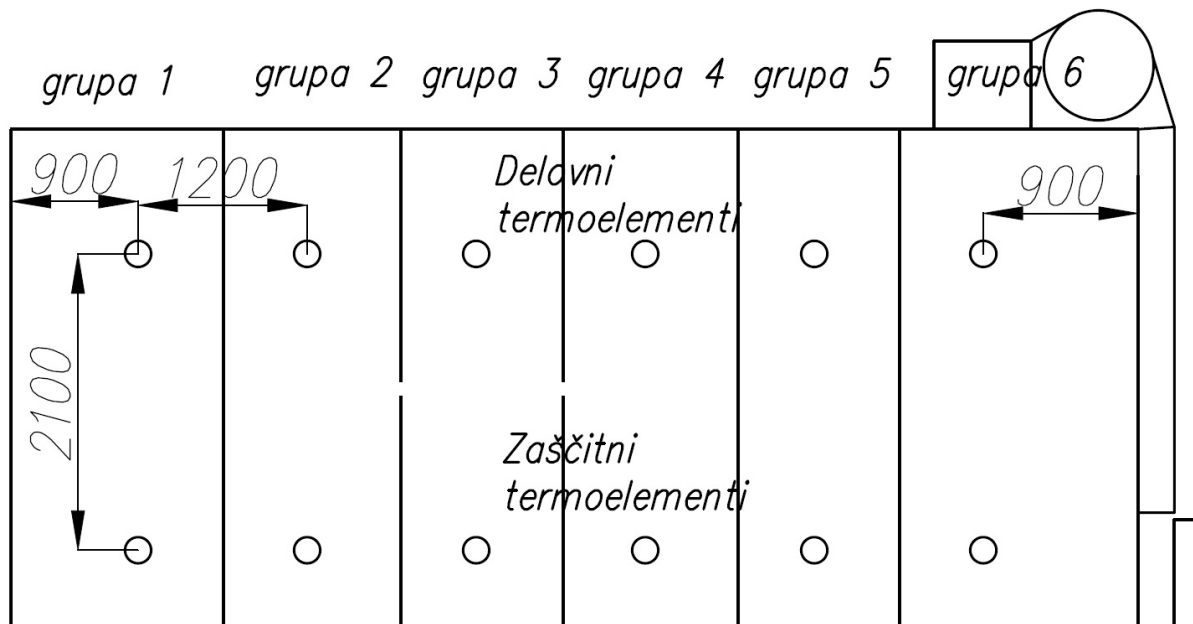
Vir: (Lastni vir, 2022)

Na peči je montiran tudi ventilator za odsesavanje plinov iz peči, ki nastajajo zaradi segrevanja oljnega filma, ki ostaja na določenih palicah. Odsesavanje se zažene na začetku procesa in se po štirih urah avtomatsko izklopi, saj bi v nasprotnem primeru negativno vplivalo na sam proces, če bi delovalo, ko je peč segreta na temperaturo.

Krmilje je ločeno na močnostni del, ki krmili grelce in ventilatorje, ter regulacijski del, ki skrbi za vodenje programov žarenja oziroma staranja.

Regulacija temperature v peči je izvedena s pomočjo vgrajenih termoelementov, ki so nameščeni na zgornji strani peči, in sicer za vsako skupino grelcev posebej. Poleg delovnih

termoelementov so nameščeni tudi zaščitni, ki varujejo peč pred pregrevanjem. Ti so nameščeni na spodnji strani peči v istih segmentih kot delovni. Postavitev termoelementov v peči je prikazana na spodnji sliki.



Slika 17: Postavitev vgrajenih termoelementov

Vir: (Impol, 2022)

Peč ima prav tako vgrajen priključek za dodatne termoelemente, ki jih lahko poljubno namestimo v notranjost peči za natančnejše spremljanje postopka in lastno postavitev termoelementov po komori peči.

Za spremljanje stanja grelcev na peči je izdelan program, ki testira posamezne grupe grelcev. V grupi, kjer se izvaja test, se najprej vklopi ventilator, nato pa še grelci na stopnji mala moč. Ko na analizatorju omrežja (impulz za vsako 0.1 kWh) registriramo določeno število impulzov, se iz pretečenega časa izračuna moč grelcev. Nato se postopek ponovi še za stopnjo velika moč. Tako je zaključena kontrola v eni grupi in se postopek nadaljuje z naslednjo grupo.

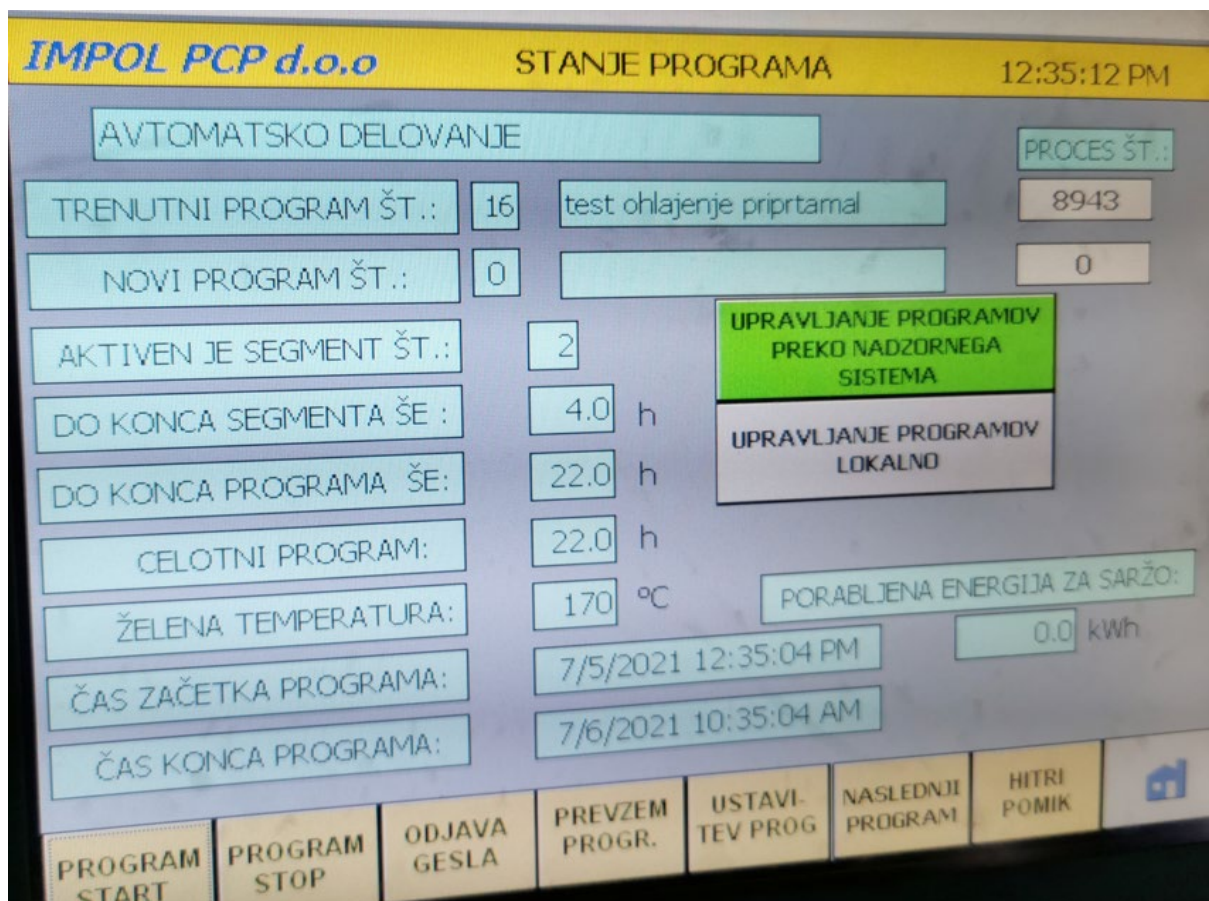
Ko je kontrola zaključena še v zadnji grupi, se izvrši še kontrola, ki preverja, ali izmerjene moči presegajo mejno vrednost, navedeno na dnu tabele. Če to ni tako, nam izpiše napako. Napaka

se prikazuje na sliki za kontrolo moči, na osnovni sliki in na sliki stanja peči. Napake ni možno resetirati ali izbrisati, ampak je potrebna ponovna uspešno izvedena kontrola grelcev. Kontrola grelcev se avtomatsko vklopi enkrat tedensko. Lahko pa jo sprožimo tudi ročno. Pogoj je, da peč ni v avtomatskem režimu delovanja.

Zalaganje materiala po prostoru v peči je deljeno na pozicije in nivoje. Pozicije nam prikazujejo tloris peči, nivoji pa višino naloženih transportnih palet. Tako lahko sledimo, kje točno v peči je bil določen material. Da si lažje predstavljamo, kje v peči je katera pozicija, so na vratih peči nalepljene oznake s pozicijami. Zalaganje je v treh nivojih, saj nam ta višina odgovarja glede na velikost transportnih palet in glede na višino komore peči.

5.1 Opis programskega vmesnika

Na panelu peči je prikazana osnovna slika. Z nje lahko v zgornji vrstici razberemo trenutno stanje procesa. Pod tem je vidna številka programa, ki nam daje povezavo z založitvijo, kar omogoča sledljivost pri samem procesu. Na osnovni sliki vidimo še shemo peči, ki prikazuje temperaturo v peči, ki jo nastavi program. Delovanje komponent peči je na panelu grafično prikazano. Dejanski program za umetno staranje je izbran s strani sistema, ki glede na kombinacijo stanja materiala in zlitine materiala določi postopek z ustrezno temperaturo, časom, ventilacijo, odsesavanjem itd.



Slika 18: Stanje programa

Vir: (Lastni vir, 2022)

S tem je preprečena tudi možnost napačnega zalaganja peči, saj programski vmesnik po izboru prvega sklopa materiala ne dopušča dodajanja materiala, ki ni v istem naboru kombinacij zlitin in stanj. S tem preprečimo možnost umetnega staranja materiala pri napačni temperaturi.

Program je seveda modularen do takšne mere, da omogoča dodajanje novih kombinacij zlitin in stanj, spreminjanje temperatur, trajanje procesa ter upravljanje ostalih delov peči, kot so odpiranje vrat, hlajenje po procesu in odsesavanje hlapov. Te funkcije lahko sprožimo ob določenem času v procesu.

5.2 Sestava našega programa

Glede na priročnost programskega vmesnika elektro peči Ebner smo lahko enostavno sestavili nov program, ki nam bo omogočal ohlajanje na koncu postopka. Program smo pripravili s pomočjo tehnologov, ki imajo za tako uporabo ustrezna dovoljenja.

Naš nov program bo sestavljen iz dveh segmentov, sestavljenih iz časa in temperature ter zaključnega dela, kjer se bo material ohlajal v peči s priprtimi vrati, pri čemer bosta vklopljena ventilacija in odsesavanje.

Peč: 0312 Ime programa: test ohlajanje priptamal Program upoštevaj samo v primeru izpada delovanja peči na udarni temperaturi ☐

Št. programa: 16

Segment	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Čas [h]:	0.00	4.00	0.00	16.00	0.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Temperatura [°C]:	170	170	150	150	0	0	0	0	0	0
Hitrost ventilatorjev:	Mala	Mala	Mala	Mala	Mala	Mala	Mala	Mala	Mala	Mala
Čas odsesavanja [h]:	0.00									

Kombinacije parov zlitina/stanje:

Zlitina	Stanje
AC30	T10

Uredi kombinacije programa zlitina/stanje

Grafični prikaz programa:

Elektro peč - 0312, Št. programa: 16

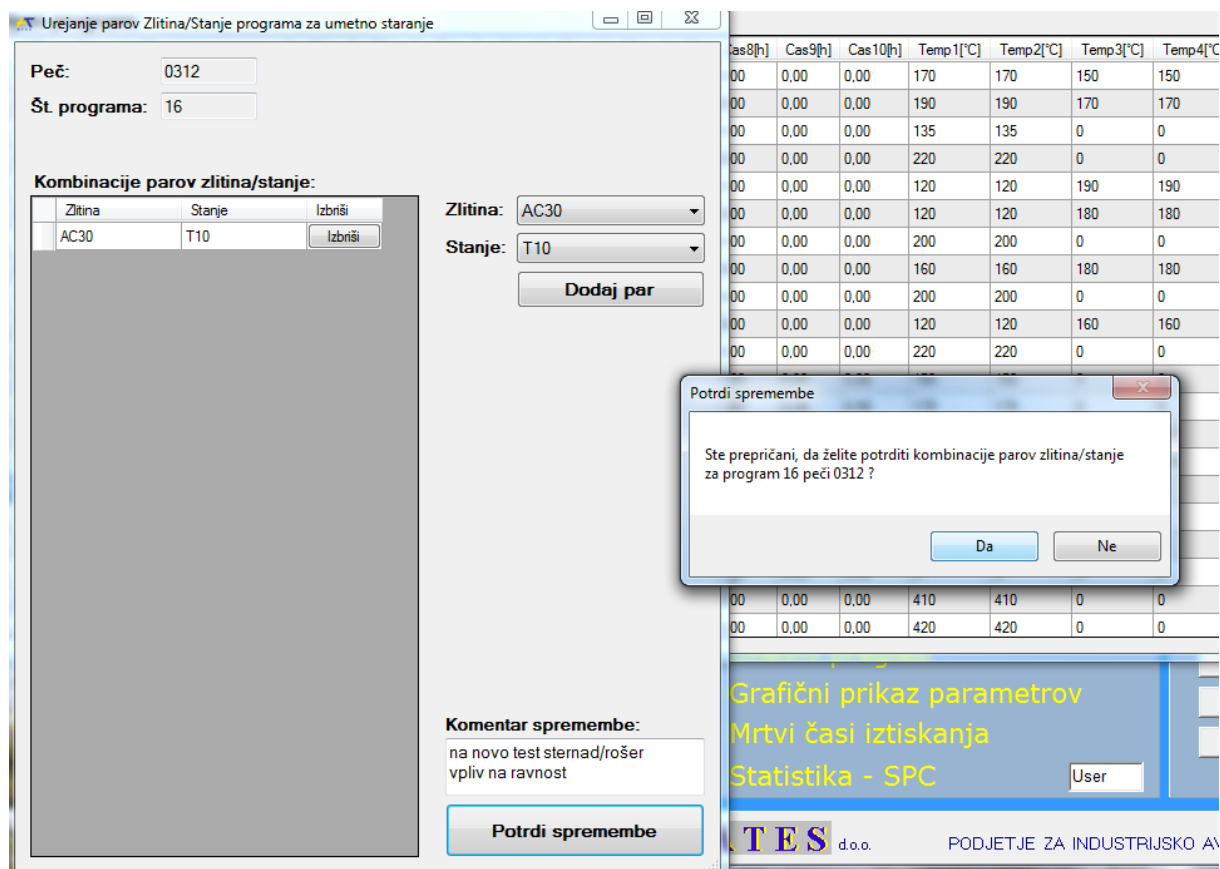
Komentar spremembe:

Izbriši program Arhiv sprememb Dodaj/uredi program

Slika 19: Sestavljanje segmentov programa

Vir: (Lastni vir, 2022)

Zraven temperature, časa in delovanja ostalih komponent peči smo morali izbrati tudi primerne kombinacije zlitin in stanj materialov za ta program. Tako bomo lahko material pravilno dodali v peč in natančno sledili procesu.



Slika 20: Vstavljanje kombinacije stanja in zlitine

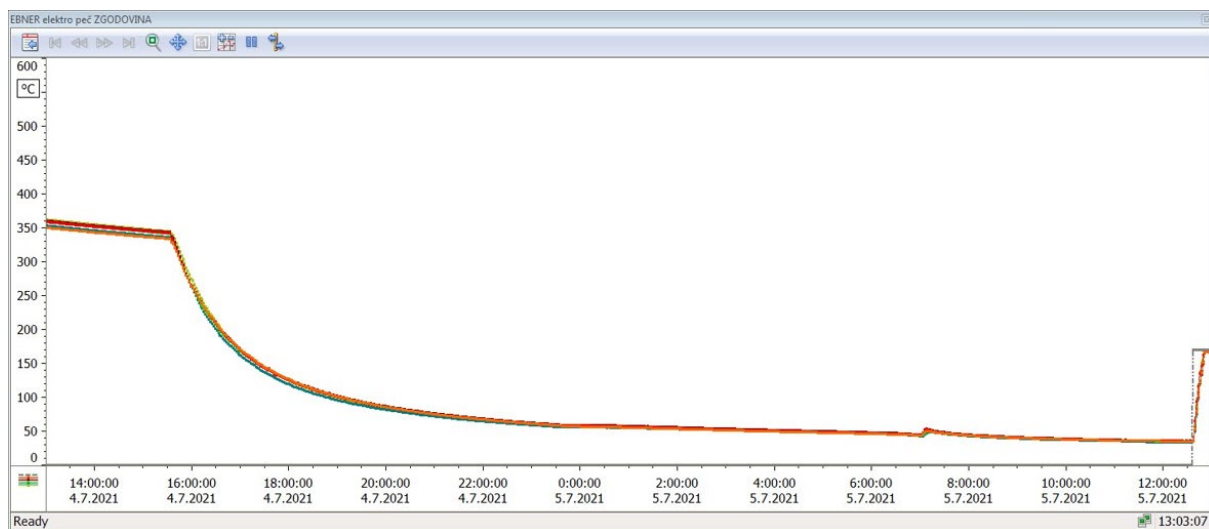
Vir: (Lastni vir, 2022)

6 PREIZKUS

Za sam preizkus ohlajanja na koncu postopka je treba upoštevati več faktorjev. Programa ne smemo spremeniti do mere, kjer bi material začel spreminjati mehanske lastnosti. Tukaj upoštevamo tudi spremembe za zlitine, s katerimi je naša obravnavana zlitina 6082 kompatibilna. Točnega sklopa zlitin zaradi poslovne tajnosti ne moremo razkriti.

6.1 Nastavitve peči

Samo ohlajanje je predvideno glede na ohlajevalne krivulje peči, ko so bila vrata odprta za 30 cm in je bila ventilacija vklopljena. Takšen sistem počasnega ohlajanja se uporablja za žarenje aluminijevih zlitin v tej peči, vendar na višjih temperaturah.



Slika 21: Graf ohlajanja preteklih postopkov

Vir: (Lastni vir, 2022)

Iz več primerov ohlajanja pri drugih postopkih sklepamo, da bi ohlajanje iz naše izbrane temperature do potrebne ohladitve materiala potekalo približno dve uri. Za takšno hlajenje bi morali biti vklopljeni tudi ventilatorji za ventilacijo v peči in odsesavanje hlapov. Ventilacija bo pripomogla k hitrejšemu padcu temperature in boljšemu mešanju dodanega hladnega zraka v peč. Smer kroženja zraka v peči poteka pravokotno glede na vrata peči.

6.2 Postavitev materiala

Za testni program je potrebno izbrati dovolj veliko količino materiala. Seveda bo količina vplivala tudi na čas ogrevanja na začetno temperaturo izbranega postopka. Za čim bolj primerljive rezultate o realni uporabi peči bomo naložili material na enak način kot za redne delovne naloge.

Pregled založenosti in nastavljenega programa

Pregled založenosti: Št. staranja: 2110168, Št. peči: 0312, Št. programa: 16

Operator: Klemen Sternad

V R A T A

TRE: 4586
Del. nalog: 37942
Stanje: T10
Količina: 1460,00
Zlitina: AC30
Dimenzija: fi 14,10
Dolžina: 3000,00
Oblika: 31 - OKROGLA I

TRE: 4554
Del. nalog: 37942
Stanje: T10
Količina: 1448,00
Zlitina: AC30
Dimenzija: fi 14,10
Dolžina: 3000,00
Oblika: 31 - OKROGLA I

TRE:
Del. nalog:
Stanje:
Količina:
Zlitina:
Dimenzija:
Dolžina:
Oblika:

TRE: 3010
Del. nalog: 36561
Stanje: T10
Količina: 550,00
Zlitina: AC62
Dimenzija: 56
Dolžina: 3800,00
Oblika:

TRE: 4571
Del. nalog: 37942
Stanje: T10
Količina: 1500,00
Zlitina: AC30
Dimenzija: fi 14,10
Dolžina: 3000,00
Oblika: 31 - OKROGLA I

TRE: 4600
Del. nalog: 37942
Stanje: T10
Količina: 1571,00
Zlitina: AC30
Dimenzija: fi 14,10
Dolžina: 3000,00
Oblika: 31 - OKROGLA I

Nivo 6
Nivo 5
Nivo 4
Nivo 3
Nivo 2
Nivo 1

PROGRAM ŠT.: 16 Ime programa: test ohlajenje priptamal

Segment:	1	2	3	4	5
Čas [h]:	0,00	4,00	0,00	16,00	0,00
Temperatura [°C]:	170	170	150	150	0
Hitrost ventilator.:	Mala	Mala	Mala	Mala	Mala

Segment:	6	7	8	9	10
Čas [h]:	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Temperatura [°C]:	0	0	0	0	0
Hitrost ventilator.:	Mala	Mala	Mala	Mala	Mala

Čas odsesavanja [h]: 0,00

Grafični prikaz:

Število založenih TRE: 15 Skupna teža: 16869 kg

Natisni

Slika 22: Vmesnik za zalaganje materiala

Vir: (Lastni vir, 2022)

Postavitev materiala v peči je podobna kot pri rednem zalaganju materiala za staranje.

Izbrane transportne palete, naložene z materialom, smo naložili na ploščad peči po določenih pozicijah, ki so prikazane v programu za zalaganje peči. V peč je možno naložiti šest palet na dno peči in tri v višino peči.



Slika 23: Zalaganje materiala v peč

Vir: (Lastni vir, 2022)

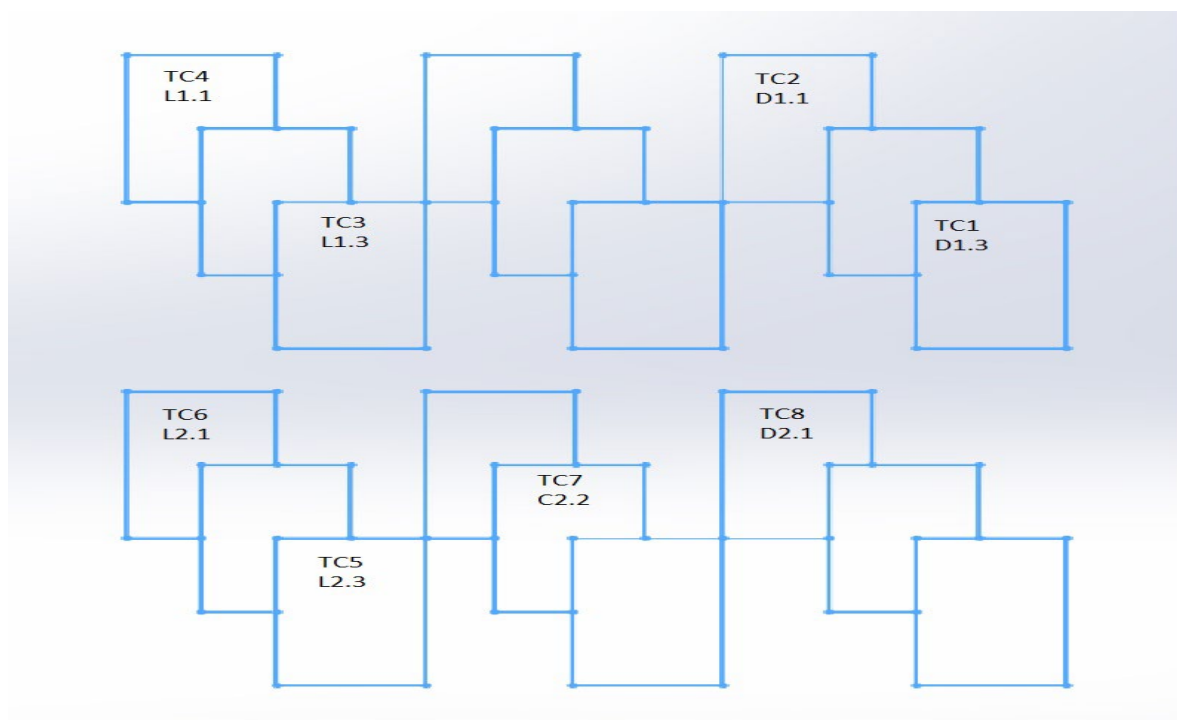
Paleta, ki nosijo naš material za test, so razporejene na pozicije, ki nam omogočajo sledenje temperaturnim spremembam na različnih mestih v peči.

Tako smo izbrali osem merilnih mest, kjer pričakujemo večje razlike. Osem mest je možno meriti s pomočjo vgrajenega vmesnika za priključitev termoelementov. Same meritve lahko spremljamo v programu za umetno staranje, kjer lahko izbiramo željene merilne točke. Izbiramo lahko med posameznimi delovnimi termoelementi in eksternimi termoelementi, katerim pozicijo določimo mi.

V našem primeru smo termoelemente postavili na zunanje robove komore peči in v center peči. Na teh mestih pričakujemo temperaturne razlike, ki bodo izrazitejše ob začetku ohlajanja materiala. Merilna mesta so za lažjo predstavbo prikazana na sliki.

Oznaka TC predstavlja oštevilčen termoelement tipa J. Število pod oznako pa prikazuje njegovo pozicijo v peči.

Na primer: D1.1 prikazuje desno pozicijo 1, nivo 1.



Slika 24: Prikaz merilnih mest

Vir: (Lastni vir, 2022)

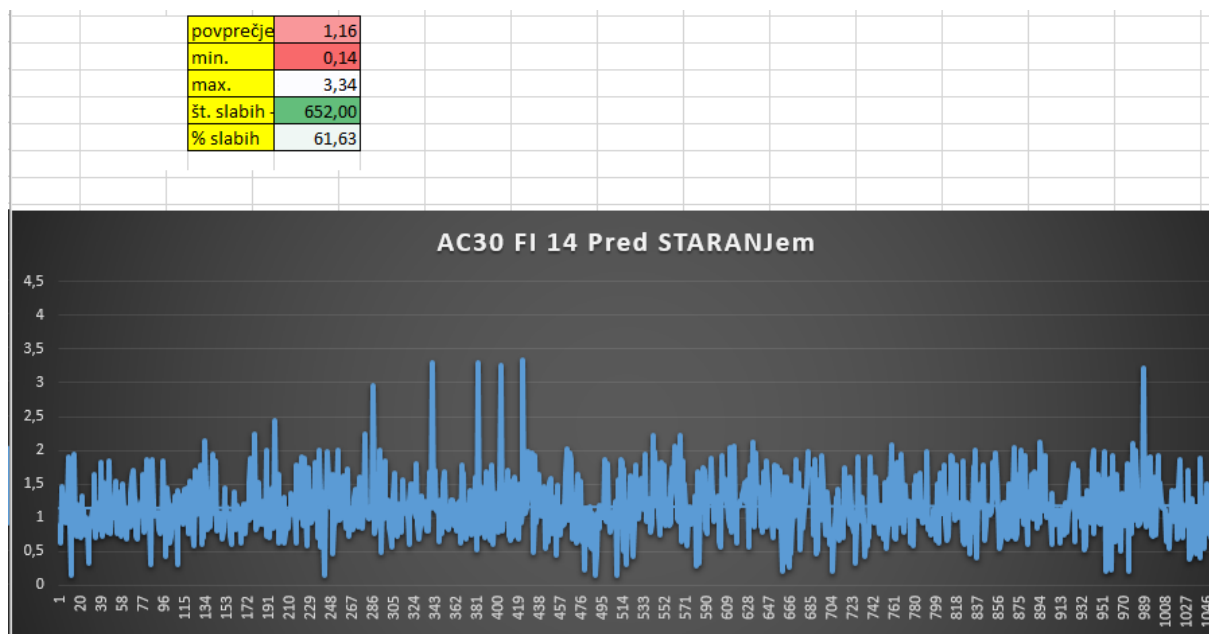
6.3 Priprava materiala

Material za preizkus smo pripravili tako, da smo izvedli postopek meritve ravnosti pred staranjem. S tem smo pridobili podatke o ravnosti pred toplotno obdelavo.

Potrebovali pa smo tudi podatke o ravnosti po izvedbi klasične toplotne obdelave, torej brez ohlajanja. Ti podatki bodo iz materiala istega delovnega naloga, ki se bo staral v drugi založitvi peči.

6.3.1 Meritev pred staranjem

Meritev ravnosti na laserskem merilniku smo izvedli pred toplotno obdelavo in pridobili naslednje podatke.

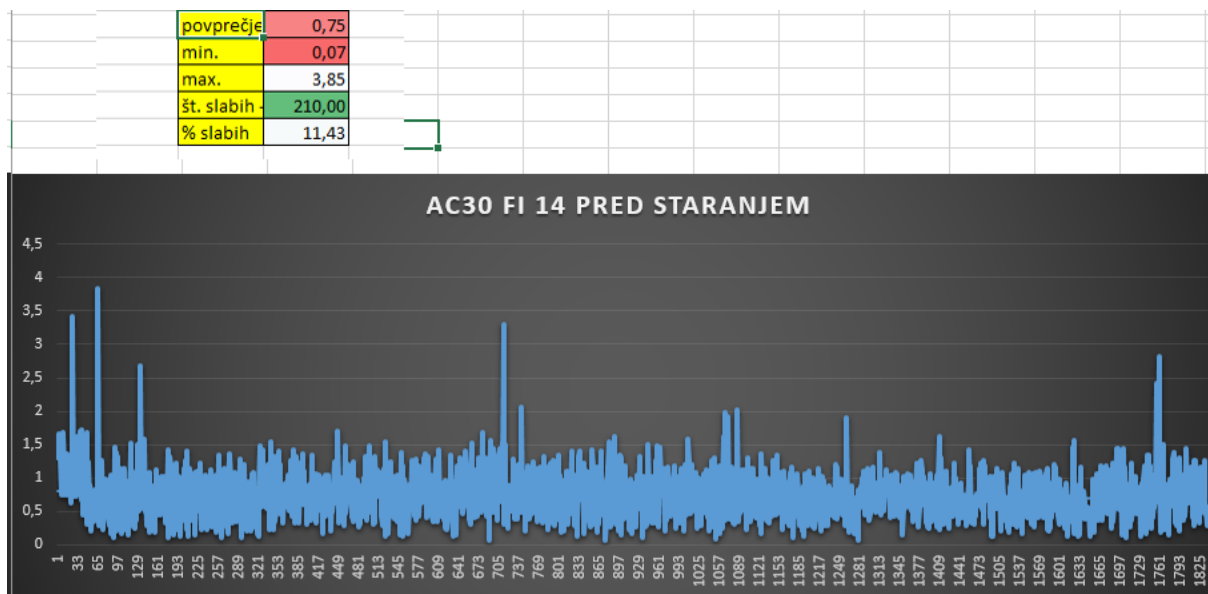


Slika 25: Ukrivljenost pred staranjem 1

Vir: (Lastni vir, 2022)

Z grafa je razvidna ukrivljenost materiala pred toplotno obdelavo. Y-os nam prikazuje, koliko je izmerjena palica zvita v milimetrih na meter dolžine palice, X-os pa prikazuje zaporedno število izmerjene palice.

Povprečna ukrivljenost palice z izbrane transportne palete je 1,16 mm/m, kar seveda ne ustreza zahtevani strožji ravnosti 1 mm/m. Prikazani so tudi izraziti maksimumi, ki nakazujejo na novo nehomogenost neznanega izvora. Zelo visoko število palic je preseglo dovoljeno mejo ukrivljenosti – kar 61,63 %.



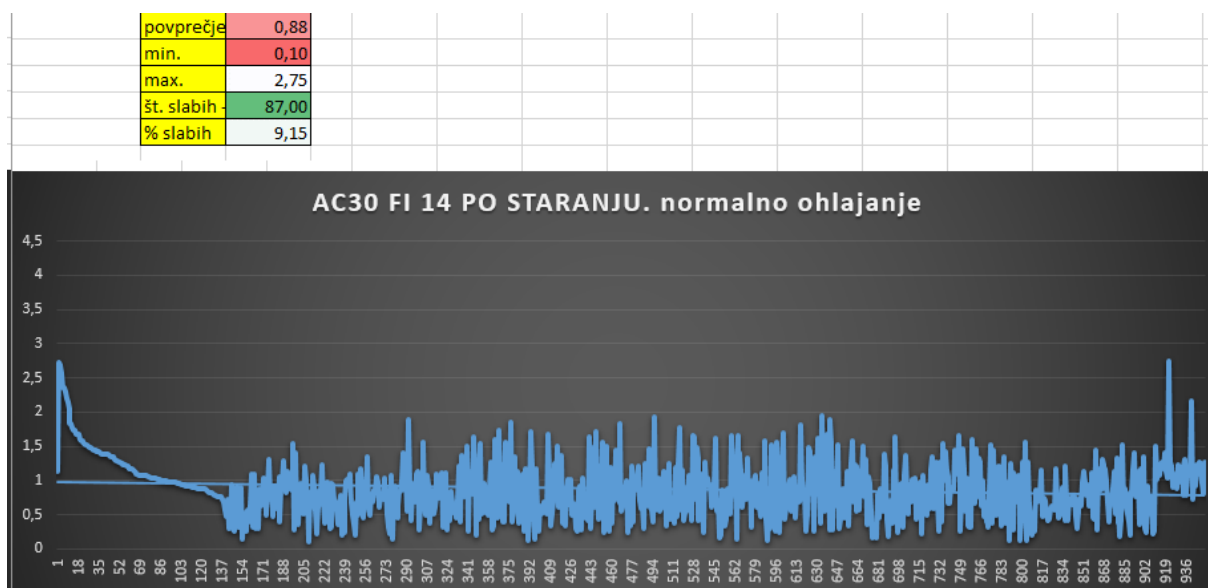
Slika 26: Ukrivljenost pred staranjem 2

Vir: (Lastni vir, 2022)

Na naslednji paleti so bile palice bolj ravne, saj je dovoljeno ukrivljenost presegalo samo 11,43 % izmerjenih palic.

6.3.2 Meritev po klasičnem programu

Po umetnem staranju brez ohlajanja na koncu postopka smo izvajali meritve ravnosti na laserskem merilniku in pridobili naslednje vrednosti.

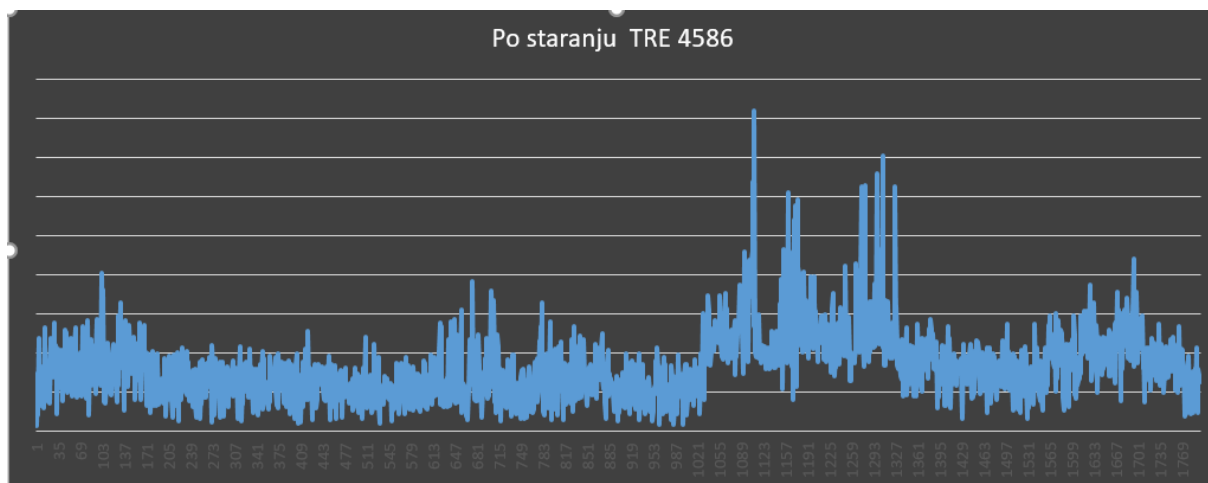


Slika 27: Ukrivljenost po normalnem staranju 1

Vir: (Lastni vir, 2022)

Pridobljeni rezultati so zelo zanimivi, saj je povprečna ukrivljenost palice manjša od toplotno neobdelanih, tudi število izrazitih maksimumov ukrivljenosti in same intenzivnosti ukrivljenosti je manjše.

Predpostavljamo lahko, da ima oblika transportne palete, ki daje palicam oporo, velik pomen pri sami končni ravnosti. Opora materiala ne bi smela povzročati razlik pri testu ravnosti, saj imata oba vzorca materiala enake pogoje.



Slika 28: Ukrivljenost po normalnem staranju 2

Vir: (Lastni vir, 2022)

Naslednja paleta je pokazala podobne rezultate – 27 % palic, ki presegajo mejo 1 mm/m. Vidna je tudi večja prisotnost zvitihi palic v drugi polovici meritev.

6.4 Meritev temperature materiala med postopkom

Za natančnejše razumevanje samega poteka procesa smo se odločili uporabiti dodatne termoelemente, s katerimi smo merili temperaturo samega materiala. Vgrajeni termoelementi tipa J nam ne dajejo vrednosti, ki nam bi ustrezale, saj merijo temperaturo zraka v peči. Naš preizkus pa zahteva meritev temperature samega materiala.



Slika 29: Vstavljeni termoelementi

Vir: (Lastni vir, 2022)

6.4.1 Termoelementi

Vstavljeni termoelementi so bili razporejeni po skrajnih mestih v peči, kar pomeni, da smo lahko opazili razlike temperature v sami komori peči. Termoelementi, ki smo jih uporabljali, so tipa J, to so kalibrirani mineralno izolirani termoelementi.



Slika 30: Termoelement tipa J

Vir: (Lastni vir, 2022)

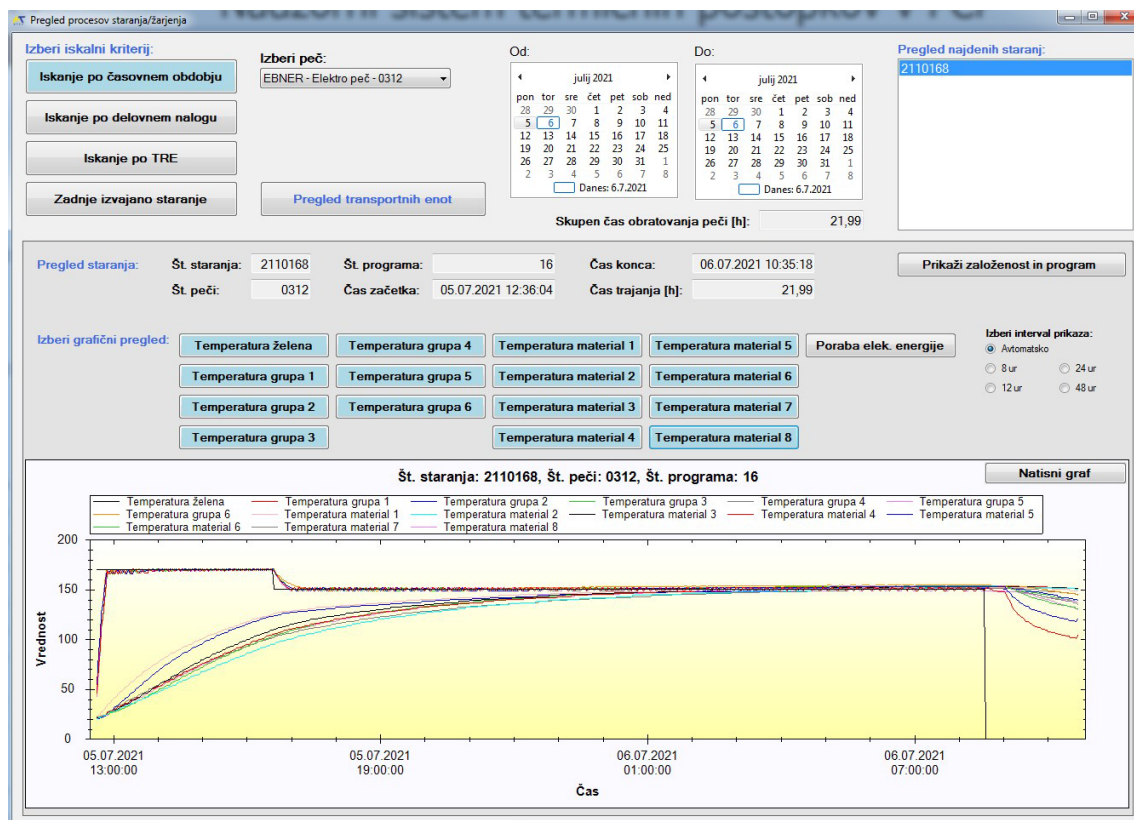
Ti termoelementi z mineralno izolacijo so skladni s standardom AMS2750F in so zasnovani tako, da izpolnjujejo visoko kakovost in natančnost, ki se zahtevata za aplikacije toplotne obdelave v letalski industriji. Njihova poltrda konstrukcija omogoča, da se upognejo in oblikujejo tako, da ustrezajo določenim aplikacijam, ne da bi pri tem zmanjšali učinkovitost.

6.4.2 Pirometrija AMS2750F

Ta specifikacija zajema pirometrične zahteve za opremo, ki se uporablja za toplotno obdelavo kovinskih materialov. Natančneje zajema temperaturne senzorje, instrumente, opremo za termično obdelavo, korekcijske faktorje in odmike instrumentov, teste točnosti sistema in raziskave enakomernosti temperature. Le-ti podatki so potrebni za zagotovitev, da so deli ali surovine toplotno obdelane v skladu z veljavnimi specifikacijami.

6.4.3 Meritev temperature materiala

Za potrebe samega testa smo temperaturo materiala merili vzporedno s temperaturo zraka v komori peči. Program, ki je izbran za proces, je sestavljen iz dveh stopenj, pri katerih je temperatura na začetku udarna. Razlog za to je večja količina materiala na transportnih paletah, kar pomeni počasnejše segrevanje materiala na sredini transportne palete. Delamo z razliko 20 °C, kar pripomore k primernejšemu segrevanju materiala.

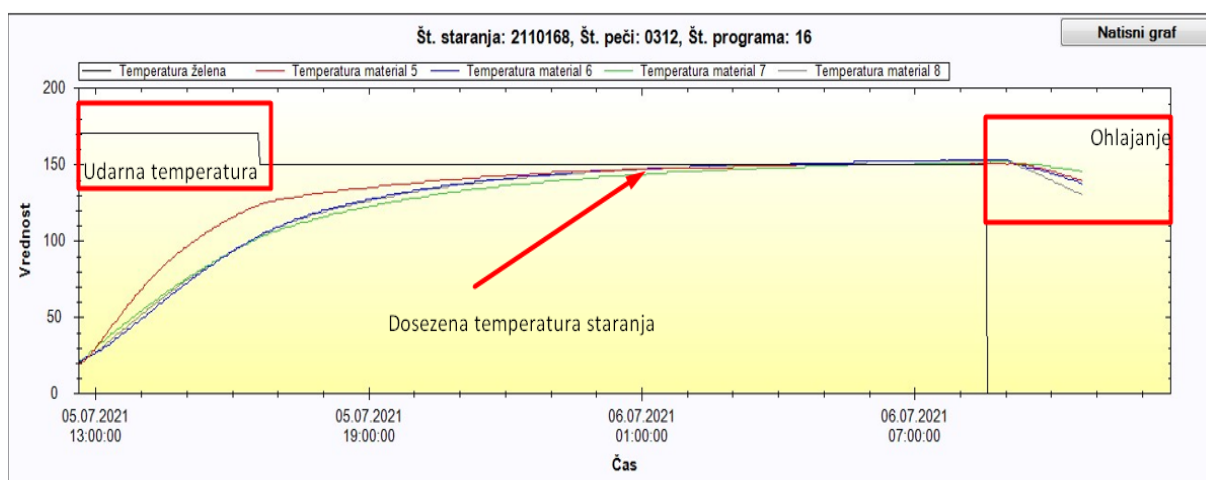


Slika 31: Prikaz temperatur med postopkom

Vir: (Lastni vir, 2022)

6.4.3.1 Segrevanje

Na sliki lahko primerjamo dejansko temperaturo materiala s temperaturo zraka v peči.



Slika 32: Prikaz segmentov temperatur v peči

Vir: (Lastni vir, 2022)

Črna črta, ki ima ostrejšje oblike, prikazuje željeno temperaturo. Tik ob tej črti vidimo strnjene krivulje, ki prikazujejo temperaturo zraka v komori. Zadnje so še krivulje, ki postopoma naraščajo na grafu. Te prikazujejo temperaturo materiala v odvisnosti od časa.

Razvidno je, da material željeno temperaturo doseže komaj po dvanajstih urah segrevanja v peči, kar pomeni, da je samo segrevanje po osnovnem postopku dejansko počasnejše za material, ki je na sredini transportne palete. Zunanje palice so pri tem bolj izpostavljene višji začetni temperaturi, kar lahko povzroča nehomogenosti in s tem nezaželeno krivljenje materiala.

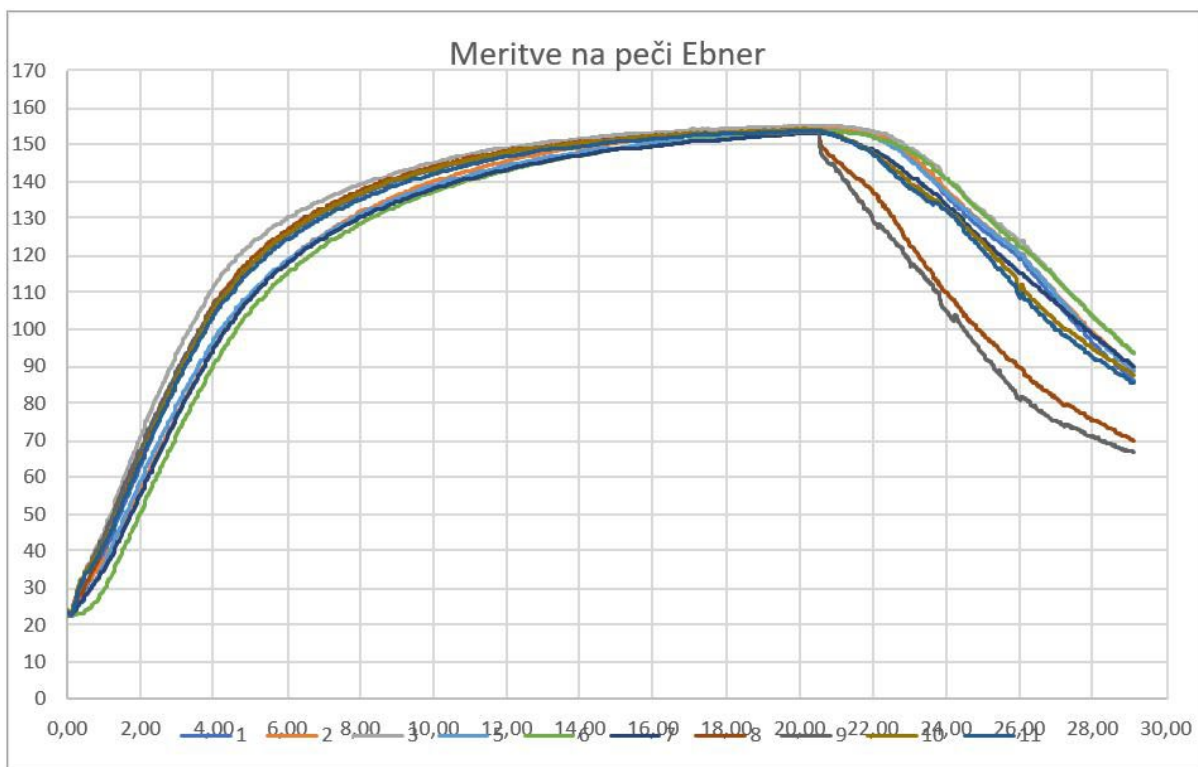
6.4.3.2 Zadrževanje na temperaturi

Po šestih urah v peči material doseže primerljivo temperaturo s temperaturo komore, kjer se začne izenačenje temperatur. Po dvanajstih urah segrevanja je material na željeni temperaturi, ki jo na splošno predpisuje postopek umetnega staranja. Tukaj zadržujemo temperaturo na 150 °C za naslednjih osem ur, kar največ virov predlaga kot priporočeno temperaturo in čas za umetno staranje obravnavane aluminijeve zlitine.

6.4.3.3 Ohlajanje

Sledil je konec procesa, kar pomeni uporabo dodatnih parametrov, ki smo jih vstavili v program preko uporabniškega vmesnika kot testni program.

Po poteku željenega časa na temperaturi 150 °C se je sprožilo odpiranje vrat peči, ki so se pomaknila na višino tridesetih centimetrov, kot smo predpisali za hitrejše ohlajanje. Sočasno se je vklopilo tudi odsesavanje oljnih hlapov in ventilacija za kroženje zraka v komori peči, kar je povzročilo omejeno ohlajanje materiala, ki je razvidno z naslednjega grafa.



Slika 33: Graf segrevanja in ohlajanja

Vir: (Lastni vir, 2022)

Komora peči se odpira samo z ene strani, kar je vidno z grafa ohlajanja, ki prikazuje dve točki, ki sta se hitreje ohlajali. Ti točki sta na zadnji strani komore peči, kjer so se vrata odprla za trideset centimetrov. Temperaturna razlika med sprednjim najbolj oddaljenim delom komore peči in delom komore ob vratih pa dosega razliko deset do petnajst stopinj Celzija.

Kljub hitremu padcu temperature zraka v komori peči je temperatura materiala v naslednjih dveh urah padla samo za deset stopinj Celzija.

Po opazovanju postopka ohlajanja smo se odločili podaljšati ohlajanje v peči, saj temperatura materiala ni dovolj padla, da bi lahko povzročila drugačne rezultate kot klasični program umetnega staranja, ki nima določenega ohlajanja v komori peči, ampak ohlajanje na zraku. Po treh urah smo opazili zadovoljiv padec temperature na materialu. Tako smo pustili enake pogoje za ohlajanje materiala, dokler temperatura ni padla na osemdeset stopinj Celzija.

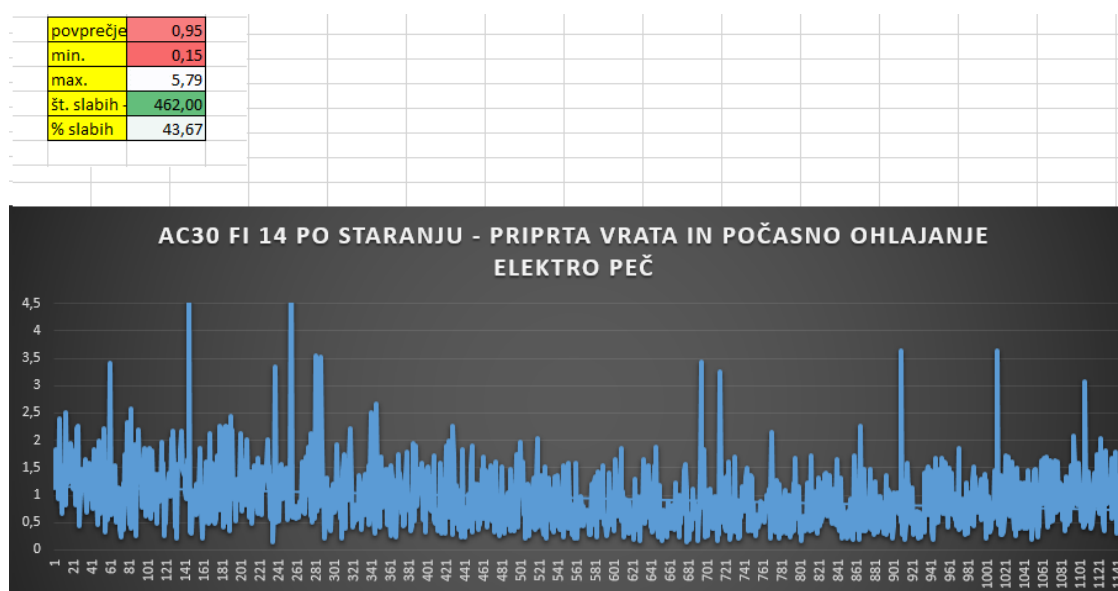
Na tej temperaturi se tudi z ohlajanjem na zraku pobirajo vzorci materiala za mehanske lastnosti, kar pomeni zaključek procesa, da lahko pridobimo realne rezultate vzorcev.

Nadaljnja obdelava materiala pri takšni temperaturi še ni mogoča, zato smo na meritve ravnosti počakali do naslednjega dne.

6.4.4 Meritev ravnosti po novem programu z ohlajanjem

Sledila je zadnja meritev ravnosti palic, pri kateri smo spremenili program umetnega staranja. Program je bil spremenjen na naslednjih korakih.

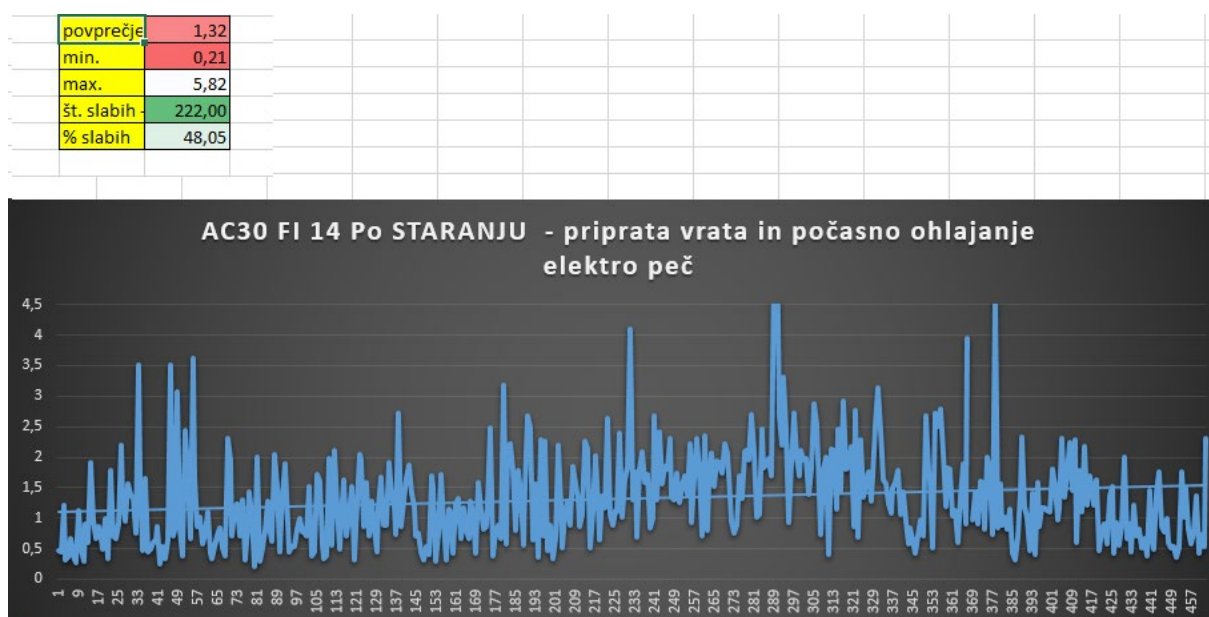
- Po končanem umetnem staranju materiala v peči se vrata peči avtomatsko odprejo do višine 300 mm.
- Sočasno z odpiranjem vrat se vključi odsesavanje oljnih par.
- S tem se vključi tudi ventilacija v peči, ki omogoča kroženje zraka po peči.
- S temi spremembami bomo poskusili upočasniti ohlajanje materiala in s tem zmanjšati krivljenje palic v peči.



Slika 34: Ukrivljenost po počasnem ohlajanju 1

Vir: (Lastni vir, 2022)

Pri pregledu rezultatov opazamo izrazite maksimalne vrednosti. Povprečna vrednost sicer ustreza zahtevam, vendar večina palic vseeno presega dovoljeno ukrivljenost. Znova opazamo podobne vrednosti kot pri palicah, ki so bile obdelane po klasičnem postopku, kar nakazuje podoben problem, ki ni povezan z ohlajanjem. Palice so znova relativno ravne, ampak imajo izrazite ampak redkejšje maksimume. To se vidi kot večja maksimalna ukrivljenost palic kot pri meritvi brez toplotne obdelave. Obe toplotni obdelavi povzročita večje maksimalno odstopanje ravnosti.



Slika 35: Ukrivljenost po počasnem ohlajanju 2

Vir: (Lastni vir, 2022)

Med paletama materiala opazamo veliko manjšo razliko po toplotni obdelavi kot pred samo obdelavo. Vsekakor pa je še vedno skoraj polovica palic izven dovoljenih mej ukrivljenosti.

7 REZULTATI

Po pregledu meritev ravnosti ugotavljamo, da ima samo ohlajanje materiala v peči minimalen pomen pri ravnosti izdelkov. Material je zelo kompaktno naložen na paletah, kar preprečuje hitro segrevanje in ohlajanje količine materiala, ki je na paleti. Po samem preizkusu ohlajanja v peči smo ugotovili, da palice ohranijo visoko temperaturo veliko dlje, kot smo pričakovali. To predpisujemo veliki količini palic, naloženih na paleti.

Tudi pri segrevanju lahko opazimo, da se material ne segreva zelo hitro, saj željeno temperaturo materiala dosežemo komaj po enajstih urah segrevanja v peči. Tudi tukaj je vidno, da ima veliko vlogo tesno naložen material. Ta pojav je viden samo pri palicah, ki so dovolj majhnega premera in dovolj ravne, da se zelo dobro stikajo med sabo.

Pred staranjem smo izmerili palice in dobili naslednje podatke o ravnosti.

Prva paleta:

- povprečna ukrivljenost 1,16 mm/m,
- min. 0,14 mm/m,
- max. 3,34 mm/m,
- 61 % slabih palic.

Druga paleta:

- povprečna ukrivljenost 0,75 mm/m,
- min. 0,07 mm/m,
- max. 3,85 mm/m,
- 11,43 % slabih palic.

Po staranju, ki ima normalno ohlajanje, so sledili naslednji rezultati.

Prva paleta:

- povprečna ukrivljenost 0,88 mm/m,
- min. 0,1 mm/m,
- max 2,75 mm/m,
- 9,15 % slabih palic.

Druga paleta:

- povprečna ukrivljenost 0,81 mm/m,
- min. 0,07 mm/m,
- max. 4,1 mm/m,
- 27,23 % slabih palic.

Po staranju, ki ima počasno ohlajanje, smo pridobili te podatke.

Prva paleta:

- povprečna ukrivljenost 0,95 mm/m,
- min. 0,15 mm/m,
- max. 5,79 mm/m,
- 43,67 % slabih palic.

Druga paleta:

- povprečna ukrivljenost 1,32 mm/m,
- min. 0,21 mm/m,
- max. 5,82 mm/m,
- 48,05 % slabih palic.

8 UGOTOVITVE

Pridobljeni rezultati so zelo mešane narave. Zaradi tega bo interpretacija rezultatov zapletenejša, ampak tudi zelo zanimiva, kar pa ne obljublja končne rešitve našega problema ukrivljenosti.

Tabela 2: Rezultati

Stolpec1	1. pred	2.pred	1.normalno	2.normalno	1. novo	2. novo
Povprečna zvitost	1,16	0,75	0,88	0,81	0,95	1,32
min. zvitost	0,14	0,07	0,1	0,07	0,15	0,21
max. zvitost	3,34	3,85	2,75	4,1	5,79	5,82
Delež zvitih	61%	11,43%	9,15%	27,23%	43,67%	48,05%

Vir: (Lastni vir, 2022)

V tabeli so za lažji pregled prikazani ključni podatki meritev ravnosti pred obdelavo, po normalni obdelavi in po novi obdelavi.

8.1 Pred toplotno obdelavo

Že pri meritvah ravnosti pred toplotno obdelavo je jasno, da je material podvržen določenim notranjim napetostim, zaradi katerih so palice ukrivljene. Te napetosti so pričakovane, saj nastanejo zaradi hladne obdelave materiala na vlečenju in pri valjčnem ravnanju.

Izrazita je tudi velika razlika med paletami, saj je na prvi paleti pred umetnim staranjem 61 % izmeta, na drugi pa samo 11 %. Zanimiv je tudi podatek, ki prikazuje enak maksimum ukrivljenosti in enak minimum ukrivljenosti.

Ti podatki že sami po sebi nakazujejo, da bo direktna primerjava težka, saj kljub enakemu postopku obdelave nimamo konstantne količine izmeta ukrivljenih palic. Tukaj se skrivajo določene nehomogenosti v izdelavi, ki lahko izvirajo iz predhodnih operacij obdelave ali pa iz samega materiala.

8.2 Po normalnem postopku

Po toplotni obdelavi, ki se zaključi brez počasnega ohlajanja, smo dobili naslednje meritve ravnosti. Zanimiva je razlika med neobdelanimi in obdelanimi, saj so imele iste palice, ki so imele pred obdelavo 61 % ukrivljenih kosov, sedaj samo 9,15 % izmeta.

Druga paleta istega materiala je imela v tem primeru višji izmet kot pred obdelavo, saj smo imeli pred obdelavo 11 % izmeta, po obdelavi pa 27 %. Pri utrjevanju materiala zaradi toplotne obdelave smo dosegli podobnejše rezultate na obeh paletah kot pred samo obdelavo, kar lahko nakazuje zmanjšanje razlik med palicami.

8.3 Po postopku z ohlajanjem

Sledil je postopek, pri katerem smo uporabili počasno ohlajanje na koncu klasičnega programa. Tudi pri postopku z ohlajanjem je razvidna manjša razlika med paletami, saj je na prvi paleti 44 % izmeta in na drugi paleti 48 % izmeta. Zanimiva je tudi višja maksimalna ukrivljenost, ki je pri obeh paletah 5,8 mm/m.

Problem, ki bi lahko nastajal za večje ukrivljanje spodnjih palic na paleti in stranskih palic na paleti, je daljši čas na povišani temperaturi, kar pomeni tudi daljši čas za usedanje, kjer ni zadostne podpore.

8.4 Predlogi za nadaljnje raziskovanje

Glede na končne rezultate lahko podamo nekaj predlogov za nadaljnje raziskave, saj nam v našem primeru ni uspelo izdelati bolj ravnih palic kot po klasičnem postopku.

K temu je prispevalo več dejavnikov, ki bi jih bilo treba pred nadaljevanjem raziskovanja problema izločiti. Predlagali bi meritev ravnosti materiala, ki bi imel med umetnim staranjem med vsako vrsto naloženega materiala vstavljen distančnik, kar omogoča kroženje zraka okrog posameznih palic in s tem bolj enakomerno segrevanje.

Predlagali bi tudi poizkus ravnanja palic, ki so starane na paleti z dodatno stransko oporo in polnim dnom. S tem bi preprečili vešenje palic ob straneh palete in na samem dnu palete.

9 KROVNA TEMA – VODENJE STROKOVNEGA PROJEKTA IZ STROJNIŠTVA

V letošnjem letu smo imeli priložnost sodelovati pri projektu prenove pakirne linije. V naslednjih točkah bi radi predstavili predlagane spremembe na liniji za izboljšanje poteka dela in povišanje toka materiala.

9.1 Zamenjave transportne palete zaradi uporabe nepravilnega tipa palete

Pri večkratnem pomanjkanju transportnih palet se dogaja, da na tegalnih linijah prihaja do uporabe palet, s katerih materiala ni možno naložiti na naslednji stroj. Zaradi takšnih primerov se na pakirni liniji material s teh palet presipava v klasične. To seveda povzroča zaustavitev celotne pakirne linije, saj mora transportni delavec te polne palete nalagati na transportni voziček na sredini linije in dostaviti ustrezno prazno paletu, kar pomeni prekinitev toka materiala za celotno pakirno linijo.

Potencialna rešitev: Pregled stanja praznih palet na začetku izmene.

9.2 Zalaganje vhoda na deponijo pakirne linije

Vhod na deponijo materiala za pakirno linijo je večino časa zaseden do mere, da umikanje materiala ni možno niti z mostnim dvigalom, saj se material nalaga pod preklado, kamor mostno dvigalo nima dostopa. Da je dostava prednostnih nalogov na deponijo pakirne linije možna, je potrebno večkratno prelaganje materiala.

Potencialna rešitev: Označena cona na vhodu na deponijo pakirne linije, ki je namenjena izhodnemu materialu.

9.3 Nedokončan material na deponiji končnega materiala

Na deponiji pakirne linije se večkrat znajde tudi material, ki še ni končan. To se zgodi zaradi dodajanja določene operacije (ravnanje, obrezovanje itd.), ki ni redna za te naloge.

Potencialna rešitev: Označena cona na vhodu na deponijo pakirne linije, ki je namenjena izhodnemu materialu.

9.4 Dodajanje prednostnih nalogov na linijo z mostnim dvigalom

Prednostni nalogi ali »nujni« nalogi se pogosto dodajajo na linijo mimo nakladalnih ramp, kar omogoča takojšnjo obdelavo. Zaradi takšnega sprejema materiala se izgublja čas transportnega delavca, ki zalaga pakirno linijo, saj večkrat čaka na voziček.

9.5 Neenakomerna obremenitev viličarista

Pri nalaganju traktorja s končanim materialom linije večkrat čakajo na odvažanje spakiranega materiala.

Potencialni rešitvi:

- Označevanje naslednjih paketov, ki jih je potrebno odpeljati.
- Samostojno nalaganje traktorja za razbremenitev viličarista, ki ima prioriteto na linijah.

9.6 Majhen izkoristek druge linije

Na drugi liniji se obdelujejo nalogi večjih dimenzij, zaradi česar je paket končan zelo hitro. Tukaj se večkrat čaka na transport veza, saj je možno pakiranje samo enega veza naenkrat.

Potencialna rešitev: »Buffer linije«. Proga, na kateri sta lahko dve oblikovni paleti in je možno eno umakniti ter začeti z uporabo druge. Tako je možno ublažiti obremenjenost viličarista, ko ima druge opravke (nalaganje, tehtanje, menjava palet, dostava zabojev in embalaže).

9.7 Pretok informacij

Navodila za pakiranje materiala so dodeljena iz kabine. Tukaj je komunikacija skoraj izključno enosmerna. Velikokrat pa mora zaposleni v kabino, da se dogovori o zahtevah pakiranja materiala. V veliko pomoč bi bila boljša dostopnost informacij o zahtevah pakiranja.

Potencialna rešitev: Prikaz ključnih informacij direktno na linijo (širina in višina paketa, vrsta lesa za pakiranje, barvanje čelnih strani, uporaba folije za etikete, pakiranje v PVC-folijo itd.). Prikaz bi lahko izvedli preko monitorja ali dostopnega računalnika med 2. in 3. linijo.

9.8 Standardizacija

Poenotenje materialov in razno združevanje je na pakirni liniji skoraj neizvedljivo. Material, ki se pakira na tej liniji, je različnih dimenzij, ligur, oblik in dolžin z različnimi zahtevami glede načina pakiranja. Treba je vedeti tudi, da so ti delovni nalogi v večini težki 500 kg, kar pomeni pakiranje samo enega veza na nalog.

Informacijsko bi lahko stanje izboljšali z uvedbo možnosti sortiranja zahtev pakiranja v naboru nalogov za pakiranje. Tako bi lahko grupirali podobne zahteve in s tem pakiranje izvajali bolj serijsko.

9.9 Poenotenje in združevanje

Podobnosti bi lahko iskali v zahtevah pakiranja. To pomeni definiranje vseh vrst paketov in tudi elektronsko označevanje na nalogu, kar bi lahko pomagalo združevati naloge z istimi zahtevami.

Naprej določene načrte pakiranja bi lahko vezali na kakovostne zahteve v informacijskem sistemu. Za tem bi bilo potrebno urediti tudi izpis kakovostnih zahtev zraven izpisa seznama nalogov, ki so pripravljeni za pakiranje.

9.10 Normiranje in učinkovitost

Kot smo že omenili, obstaja veliko različnih izdelkov in različnih načinov pakiranja. To pomeni, da težko določimo, koliko dela je opravljenega, če gledamo samo končno težo materiala. Zaradi tega se zdi smiselno določiti težavnost pakiranja glede na potreben čas za izdelavo paketa. To bi nam omogočilo določitev manjšega števila zahtevnostnih faktorjev, iz katerih je lažje oceniti količino opravljenega dela.

Izmišljen primer:

Pakiranje paketov premerov 40 mm do 70 mm ima zahtevnost 5 paketov na uro.

Pakiranje paketov premerov 12,7 mm do 20 mm ima zahtevnost 2 paketa na uro itd.

Realne primere bi bilo treba izmeriti in preučiti, da bi lahko ustvarili logične skupine. Tako bi lahko ocenili opravljeno delo, ki poteka na liniji, in s tem tudi pravično nagrajevali zaposlene za njihov trud. Seveda to ne sme biti edini kriterij za delovno uspešnost.

9.11 Uvedba 5S

Za izvedbo bi bil najprej potreben posvet z zaposlenimi, saj oni najbolj vedo, kaj se najmanj in kaj največ uporablja na določenem mestu. Glede na krajši ogled poteka dela na pakirni liniji bi predlagali naslednje spremembe glede urejanja delovnega okolja.

Sortiranje in reorganizacija skladišča embalaže:

- mesto za karton,
- mesto za les (razrezan, toplotno obdelan, navaden),

- mesto za PVC-folijo,
- mesto za lesene zaboje za pakiranje manjših dimenzij,
- nujno jasno označevanje definiranih mest za določen material (velike barvne table ali napisi kot za zaboje za povratni material).

Sortiranje in organizacija delovnih mest na linijah.

Linija 1:

- zagotovitev zadostne količine pripravljenega lesa za spodnje dele paketa za celotno izmeno;
- zagotovitev zadostnega prostora za kartonaste trakove, ki se uporabljajo v toku dela;
- priročni mesti za kladivo in lepilni trak;
- priročno mesto za barvne spreje.

Linija 2:

- premik žage in sprotne količine lesa med 2. in 3. linijo za lažjo dostopnost;
- ureditev transportnega vozička za zadostne količine embalaže za celotno izmeno;
- zagotovitev zadostnega prostora za kartonaste trakove, ki se uporabljajo v toku dela;
- priročni mesti za kladivo in lepilni trak;
- priročno mesto za barvne spreje;
- priročno in varno mesto za shranjevanje zateznega stroja.

Linija 3:

Opcijsko enaka ureditev kot na 2. liniji, vendar ni tako nujna, saj se obravnavajo samo »posebni« nalogi, ki imajo izredno dolg čas pakiranja.

9.12 Delovna navodila

V okviru TPM bi bilo treba urediti kontrolni seznam za napake, ki bi lahko povzročile zastoje. Na ta seznam bi bilo dobro vključiti vzdrževanje, saj lahko z malo predčasne pozornosti rešimo daljše zastoje. Pregledi bi naj zajemali tudi vzdrževanje reda in čistoče na delovnem mestu.

Dnevni pregled:

- količine embalaže za pakiranje (les, karton, lepilni trak, barvni sprej),
- urejenosti delovnega mesta in
- orodja.

Pregled opreme bi opredelili z vzdrževalci glede na zastoje zaradi okvar opreme, ki bi jih sproti beležili. Npr. okvara transportnega vozička, okvara pomika oblikovne palete, pregled transportnih prog, pregled povezav itd.

9.13 Kakovost

Na pakirni liniji je za dimenzijsko pravilnost izdelkov zadolžen kontrolor. Seveda pa vsake najmanjše napake kontrolor ne bo videl, saj kontrolira vse linije. Obstaja velika verjetnost, da poškodbo ali napako na izdelku opazi zaposleni, ki izdelke pakira. Zato se zdi zelo pomembno obveščanje zaposlenih o možnih napakah in reklamacijah, ki nastajajo zaradi teh napak. Te napake bi bilo dobro prikazati na vidnem mestu. Zraven prikaza napak pa predstaviti še kakšne aktualne reklamacije, saj le-te prikazujejo večji problem in s tem večjo pomembnost pri pregledu izdelka.

Iz lastne izkušnje smo si najbolj zapomnili mehurje na končani roki za BMW, ki smo jih videli v Tehnofinalu. Takšni oprijemljivi primeri dajejo izdelkom večji pomen, kot ga prikažejo sami polizdelki, zaradi česar ljudje tem primerom posvečamo več pozornosti.

9.14 Organizacija dela

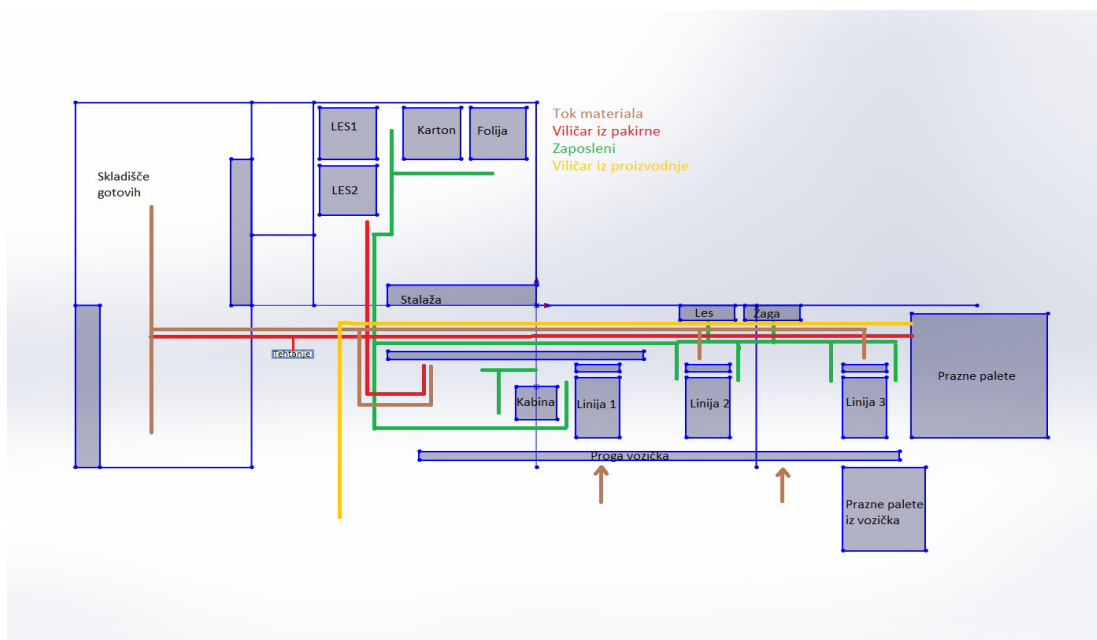
Za povečanje učinkovitosti na pakirni liniji bi bila potrebna analiza mrtvih časov. Pri vsakem čakanju na liniji bi zabeležili razlog. Tako bi pridobili najpogostejše zastoje in vzroke zanje, ki bi jih odpravljali glede na pogostost. Poleg tega bi bilo treba analizirati obremenjenost delovnih mest glede na tip pakiranja, da bi lahko dobili boljšo porazdelitev dela in s tem bolj tekoč proces.

9.15 Avtomatizacija procesa

Avtomatizacija je primerna za ponovljive procese. Teh je na pakirni liniji bolj malo, najbolj izrazit pa je proces zlaganja praznih okvirjev. Ta proces bi lahko bil avtomatiziran, kar bi se podalo tudi novi postavitvi odlaganja praznih palet.

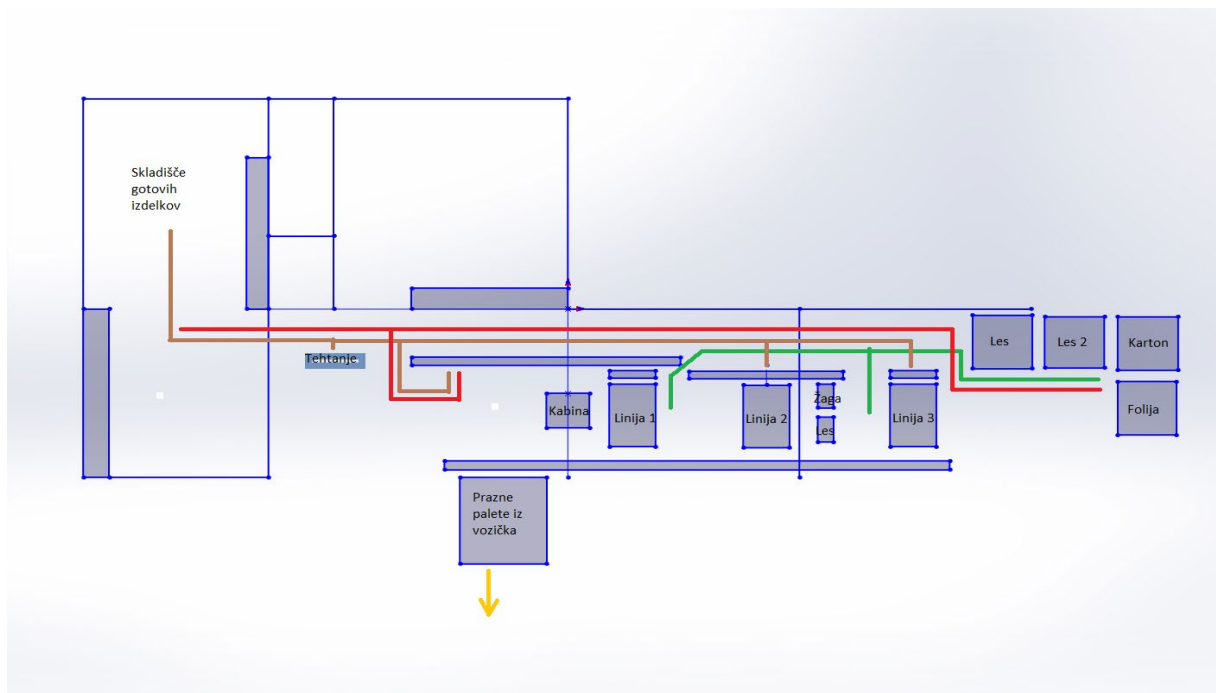
9.16 Sprememba tlorisa pakirne linije

Z manjšimi spremembami glede postavitve, ki so opisane v poteku naloge, bi lahko skrajšali poti, ki so potrebne za delovanje linije. Prilagamo skico predloga izvedbe teh sprememb.



Slika 36: Stara postavitev linije

(Lasten vir)



Slika 37: Nova postavitev linije

(Lasten vir)

10 SKLEP

Cilj diplomskega dela je bil raziskati vpliv ohlajanja na material po postopku umetnega staranja. S tem smo hoteli zmanjšati potrebo po ravnanju materiala. Tako bi skrajšali sam proces izdelave palic in zmanjšali možnosti za poškodbe, saj posledično zmanjšamo tudi število operacij, ki so potrebne za izdelavo. Pri tej raziskavi smo ugotovili, da bodo potrebne določene spremembe pri samem nalaganju materiala, da bi lahko natančno izločili določene faktorje pri problematiki. Problematična je sama količina materiala, ki je tesno naložena na palete. To s seboj prinese dodatne faktorje, ki vplivajo na ravnost končnega izdelka. Opazili smo veliko podobnosti med določenimi načini obdelave. Kljub temu smo pridobili ogromno podatkov o samem postopku, ki jih lahko uporabimo pri nadaljnjih raziskavah.

Ob tem smo ovrednotili naše trditve z začetka diplomskega dela, za katere smo ugotovili naslednje:

H1 – Padeč temperature na koncu postopka je zaradi velike količine tesno naloženega materiala relativno počasen, ni pa enakomeren čez celoten presek skupka materiala. To pomeni, da se material enako kot pri klasičnem postopku ohlaja neenakomerno glede na presek celotnega skupka materiala na paleti. Z dodanim počasnim ohlajanjem v peči nismo dosegli boljše ravnosti izdelkov, saj se nam pojavljajo še druge nehomogenosti v izdelavi, ki doprinesejo k mešanim rezultatom in nekonstantnim izidom. S tem bi trditev ovrgli in predlagali iskanje drugih rešitev.

H2 – Izdelki svoje ravnosti kljub počasnejšemu ohlajanju na koncu postopka niso ohranili s toplotno obdelavo. Ravnost izdelkov je bila glede na klasičen postopek po končnih meritvah celo slabša. Glede na mešane podatke težko določimo glavni vzrok za večjo količino ukrivljenih palic. Glavna razlika je bila seveda daljša izpostavljenost povišani temperaturi, kar je lahko povzročalo zvitost materiala. Na podlagi teh rezultatov lahko to hipotezo ovržemo.

H3 – Z dodajanjem ohlajanja na koncu postopka umetnega staranja smo hoteli zmanjšati potrebo po ponovnem ravnanju izdelkov. Po postopku z dodanim ohlajanjem je bila skoraj

polovica palic nad dovoljeno mejo ukrivljenosti (1 mm/m). Ravnanje po končanem postopku je tako še vedno potrebno, zato tudi tretjo hipotezo ovržemo.

H4 – Zaradi raziskovanja na starejšem stroju se nam ponujajo priložnosti za izboljšave s področja varnosti. To trditev lahko potrdimo, saj se je pri preučitvi stroja našlo nekaj predlogov za izboljšavo varnosti. Treba se je zavedati, da je stroj starejši in je bil postopoma izboljšan in posodobljen. Spremembe so opazne pri uravnavanju samega procesa in omogočanju sledljivosti na samem stroju. Tukaj so določene komponente ostale prvotne, ki bi jih bilo možno enostavno zamenjati in s tem doprinesti k boljši varnosti.

Na koncu bi radi predlagali še enostavno varnostno izboljšavo na temo varnosti, ki je tudi krovna tema diplomskega dela in bi doprinesla k bolj varnemu upravljanju stroja med premikanjem samega vložka materiala v in iz peči. Material, ki je naložen na transportne palete, nalagamo na potisno ploščad peči s pomočjo mostnega dvigala. Nalagamo lahko tri palete v širino, tri v višino in dve v globino peči, skupno osemnajst palet. Potisno ploščad premikamo s konzolo, ki ima na koncu kavelj za ujemanje z ročico na ploščadi, konzolo pa poganja motor preko dolge verige pod ploščadjo. Zalaganje sprožimo s tipko na krmilju za zalaganje. Tipka deluje kot stikalo, zaradi tega je možno med transportom mesto zalaganja tudi zapustiti, s tem pa nismo prisiljeni biti pozorni na zalaganje peči in pomikanje velike količine naloženega materiala.

Vlečna ploščad za zalaganje peči se upravlja iz krmilne omarice, ki je še v originalnem stanju, kar pomeni, da s pritiskom na gumb sprožimo vlečenje materiala na ploščad iz peči ali potiskanje v peč. Pri tem držanje gumba ni potrebno. Zaradi tega je reakcijski čas za zaustavitev v nujnem primeru veliko daljši kot v primeru, kjer je tipko treba držati (s sprostitvijo tipke pa zalaganje ustavimo).

- BIBLIOGRAFIJA *Bonnell Aluminum*. (07. 05 2022). Pridobljeno iz <https://www.bonnellaluminum.com/tech-info-resources/aluminum-extrusion-process/> Impol. (07. 05 2022).
- Industrial Metallurgists*. (7. 5 2022). Pridobljeno iz <https://www.imetllc.com/residual-stress/> Lasten vir. (7. 5. 2022).
- Manufacturing Guide*. (07. 05 2022). Pridobljeno iz <https://www.manufacturingguide.com/en/rod-drawing>
- Metal Supermarkets*. (07. 05 2022). Pridobljeno iz <https://www.metalsupermarkets.com/temper-designations-for-aluminum/>
- Playdoh*. (07. 05 2022). Pridobljeno iz <https://free3d.com/3d-model/play-doh-fun-factory-9697.html>
- Research Gate*. (07. 05 2022). Pridobljeno iz [researchgate.net](https://www.researchgate.net)
- Spaić, S. (2000). *Metalografija zlitin*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani.
- Spaić, S. (2022). *Fizikalna metalurgija*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani.
- The Fabricator*. (07. 05 2022). Pridobljeno iz <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/tubepipeproduction/cold-drawing-principles>