



B&B
VIŠJA STROKOVNA ŠOLA

Diplomsko delo višješolskega strokovnega študija
Program: Strojništvo
Modul: Orodjarstvo

**OPTIMIZACIJA TEHNOLOŠKEGA
PROCESA ZUNANJEGA LAKIRANJA
AVTOMOBILSKIH PANELOV Z
ROBOTIZACIJO LINIJE**

Mentorica: dr. Lidija Rihar
Somentor: Tomaž Rifelj, inž. mehatronike
Lektor: Zala Podkrižnik, dipl. slov. in dipl. germ.

Kandidat: Danijel Mešič

Trbovlje, marec 2026

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici dr. Lidiji Rihar za mentorstvo in strokovno pomoč pri izdelavi diplomskega dela.

Hvala g. Tomažu Riflju iz podjetja HELLA Štarnus Slovenija d. o. o. za somentorstvo, pomoč in nasvete pri izdelavi diplomskega dela.

Posebna zahvala gre tudi ženi in otrokoma. Hvala za podporo in vse spodbude v času študija.

IZJAVA

Študent Danijel Mešič izjavljam, da sem avtor tega diplomskega dela, ki sem ga napisal pod mentorstvom dr. Lidije Rihar in somentorja Tomaža Riflja.

Skladno s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorski in sorodnih pravicah dovoljujem objavo tega diplomskega dela na spletni strani šole in v institucionalnem oz. nacionalnem repozitoriju (COBISS).

Dne: 25. 3. 2026

Podpis: _____

POVZETEK

Diplomska naloga obravnava optimizacijo procesa zunanjega lakiranja avtomobilskih panelov s poudarkom na uvedbi robotizirane proizvodnje in predelavi lakirne linije za izdelavo in lakiranje panelov. Glavni cilji diplomskega dela so predstavitev in izboljšanje lakirne linije ter nanosa laka, zmanjšanje napak, povečanje produktivnosti ter racionalizacija porabe materiala. V nalogi je predstavljeno trenutno stanje procesa lakiranja, identificirane so glavne pomanjkljivosti in izgube, predlagana je rešitev z uvedbo industrijskih robotov. Opisana je tudi predelava lakirne linije glede na potrebe lakiranja večjih kosov.

KLJUČNE BESEDE

- Optimizacija
- Predelava
- Lakirna linija
- Postopek lakiranja
- Paneli

SUMMARY

The thesis addresses the optimization of the external painting process of automotive panels, with a focus on the introduction of robotic production and the modification of the painting line for the manufacturing and painting of panels. The main objective of the thesis is to present and improve the painting line, paint application, reduce defects, increase productivity, and rationalize material consumption. The thesis presents the current state of the painting process, identifies the main shortcomings and losses, and proposes a solution through the implementation of industrial robots. It also describes the modification of the painting line according to the requirements for painting larger components.

KEYWORDS

- Optimization
- Modification
- Painting line
- Coating process
- Panels

KAZALO

1	UVOD	1
1.1	Predstavitev problema.....	1
1.2	Namen naloge	1
1.3	Predstavitev podjetja Hella Saturnus Slovenija, d. o. o.....	2
1.4	Predpostavke in omejitve	3
1.5	Metode dela	4
2	TEORETIČEN DEL	5
2.1	Brizganje	5
2.1.1	Brizgalni stroj Engel Duo 1700 2K.....	5
2.1.2	Orodje	6
2.1.3	Material	8
2.2	Lakirna linija	9
2.2.1	Lak UVHC 5000	11
2.2.2	Prelagalni robot IRB 1600	12
2.2.3	Lakirni robot IRB 580	13
2.2.4	Lakirna pištola AGMDPRO.....	16
2.2.5	Nalagalni robot IRB 2600	17
2.3	Sušilne peči	18
2.3.1	Sušilna IR peč.....	19
2.3.2	UV zamrežilna peč.....	20
2.3.3	Temperirna IR peč	21
2.4	Klimatski sistemi	22
3	PREDELAVA LAKIRNE LINIJE	24
3.1	Avtomatsko prelaganje in transport do lakirnice	24
3.2	Kontrolna točka in čiščenje	25
3.3	Vstavljanje panela v lakirno šablono	26
3.4	Lakirni program panela	26
3.5	Prelaganje na sušilni transport	28
3.6	Grelec Heraeus	29
3.6.1	Uvod v IR tehnologijo sušenja	29
3.6.2	Vloga v procesu lakiranja in sušenja	30
3.7	Predelava UV peči	31
3.8	Pohitritev sušilne verige	32
3.9	Stanje pred in po optimizaciji procesa zunanjega lakiranja avtomobilskih panelov	33
4	ZAKLJUČEK	36
5	LITERATURA IN VIRI	38

KAZALO SLIK

Slika 1: Logotip HELLA Saturnus Slovenija, d. o. o.	3
Slika 2: Brizgalni stroj Engel DUO 1700	6
Slika 3: Tridelno brizgalno orodje	7
Slika 4: Makrolon® Clear & Makrolon® Bayblend.....	8
Slika 5: Postavitev lakirnice	11
Slika 6: Prelagalni robot IRB1600.....	13
Slika 7: Lakirni robot IRB 580	14
Slika 8: Lakirna pištola AGMDPRO	17
Slika 9: Nalagalni robot IRB 2600.....	18
Slika 10: Stara meritev UV peči pred predelavo	21
Slika 11: Klimatski sistem	23
Slika 12: Servo transport	25
Slika 13: Tajfun in IPA krpica.....	26
Slika 14: Del lakirnega programa panela	27
Slika 15: Grelec Heraeus.....	29
Slika 16: Nova postavitev UV reflektorjev in žarnic.....	31
Slika 17: Nova konstrukcija v UV peči	32

KAZALO TABEL

Tabela 1: Primerjalna analiza lakirnega postopka pred in po optimizaciji.....	34
---	----

KRATICE IN AKRONIMI

- ABS: trda in žilava tehnična plastika, ki se pogosto uporablja za avtomobilske dele, ohišja naprav in industrijske izdelke (A – akrilonitril, B – butadien, S – stiren).
- AGV: Automated Guided Vehicles
- HEPA: Visoko učinkovit filter za zrak, ki zadrži vsaj 99,97 % delcev velikosti 0,3 mikrona.
- HVLP: High Volume Low Pressure (velik volumen kompromiranega zraka pri nizkem tlaku).
- iTAC: MES sistem (Manufacturing Execution System), ki se uporablja za spremljanje, nadzor in optimizacijo proizvodnih procesov v realnem času, zlasti v avtomobilski industriji.
- KAS: kunststoff adbeckscheibe (plastična pokrovna leča)
- PID: Regulacijski algoritem (proporcionalna, integracijska in diferencialna regulacija), ki omogoča natančno upravljanje procesov z neprekinjenim prilagajanjem izhodne vrednosti glede na napako.
- UV: ultravijolično sevanje

1 UVOD

1.1 Predstavitev problema

Oddelek KAS1 predstavlja enega ključnih proizvodnih segmentov v podjetju HELLA Saturnus Slovenija, d. o. o., kjer poteka proces izdelave komponent, namenjenih avtomobilski svetlobni tehniki. Med pomembnejšimi tehnološkimi fazami znotraj tega oddelka je tudi postopek zunanjšega lakiranja plastičnih avtomobilskih leč in panelov, ki bistveno vpliva na končno kakovost izdelka in skladnost z estetskimi ter funkcionalnimi zahtevami kupcev.

Obstoječi proces zunanjšega lakiranja na oddelku KAS1 temelji na visoki stopnji avtomatizacije, ki vključuje robotsko prelaganje, manipuliranje kosov in nanašanje laka, kontrolirano sušenje kosov ter vizualni pregled polizdelkov. Kljub temu v praksi prihaja do različnih izzivov, povezanih s stabilnostjo procesa, zmanjšano ponovljivostjo rezultatov in občasnimi zastoji v delovanju opreme.

Eden izmed ključnih dejavnikov, ki vplivajo na razvoj in prilagoditev proizvodnih procesov, so zahteve kupcev ter sodobni trendi na avtomobilskem trgu, kjer prevladuje vse večje povpraševanje po večjih, kompleksnejših in oblikovno zahtevnejših avtomobilskih lečah ter panelih. Te oblikovne spremembe neposredno vplivajo na kompleksnost proizvodnega procesa, njegovo učinkovitost ter stroške izdelave.

Zaradi vse višjih zahtev avtomobilske industrije po izjemni natančnosti, visoki kakovosti in ponovljivosti proizvodnih procesov postaja nujna celovita nadgradnja obstoječe lakirne linije (Schwab, 2017).

Pri tem je ključnega pomena usmeritev v nadaljnjo optimizacijo s poudarkom na uvajanju robotizacije, digitalnem spremljanju ključnih procesnih parametrov ter razširitvi in prilagoditvi samega tehnološkega procesa, s ciljem izboljšanja učinkovitosti in stabilnosti proizvodnje.

1.2 Namen naloge

Namen diplomske naloge je podrobna predstavitev tehnološkega procesa zunanjšega lakiranja avtomobilskih panelov na oddelku KAS1 ter iskanje možnosti za njegovo optimizacijo. Poseben poudarek je na prenovi in tehnični posodobitvi lakirne linije, ki omogoča obdelavo kompleksnejših in zahtevnejših avtomobilskih komponent s pomočjo naprednih oblik robotizacije.

V okviru naloge bodo prikazane izbrane tehnične predelave, izvedene z namenom

doseganja višjih in kakovostnih standardov, skladne z zahtevami sodobne avtomobilske industrije. Predstavljen bo razvoj rešitve v smeri večje učinkovitosti, ponovljivosti in stabilnosti procesa lakiranja za proizvodnjo panelov.

1.3 Predstavitev podjetja Hella Saturnus Slovenija, d. o. o.

Podjetje HELLA Saturnus Slovenija, d. o. o., (v nadaljevanju HSS) se ponaša z več kot 100-letno zgodovino delovanja. Predstavlja pomemben člen v mednarodni skupini HELLA, ki sodi med vodilne dobavitelje avtomobilske industrije na globalni ravni. Z letom 2022 je večinski lastniški delež prevzelo podjetje Faurecia, s čimer je nastala skupina FORVIA, ena največjih svetovnih avtomobilskih dobaviteljic.

HSS uspešno sodeluje s številnimi vodilnimi proizvajalci avtomobilov, med drugim s koncerni, kot so BMW, Mercedes-Benz Group, Volkswagen Group in številni drugi. Ključne dejavnosti podjetja obsegajo razvoj, proizvodnjo in trženje naprednih svetlobnih in elektronskih komponent. Med njihove glavne proizvode sodijo žarometi, meglenke, dnevne luči, notranja osvetlitev in različne enofunkcijske ter večfunkcijske svetilke, vključno z elementi ambientalne osvetlitve. Asortiment obsega logotipe, ki so obenem tudi pokrovi radarjev ter panele (prednje maske).

V podjetju je zaposlenih približno 2000 oseb, med katerimi je velik delež visoko usposobljenih strokovnjakov s področij strojništva, fizike ter elektronike. Proizvodni procesi v podjetju so organizirani v dve glavni skupini, in sicer proizvodnjo komponent ter končno montažo izdelkov.

V okviru diplomske naloge je obravnavan tehnološki proces lakiranja v sklopu oddelka KAS1, ki sodi v proizvodnjo komponent. Oddelek vključuje tako proces brizganja plastičnih leč in panelov kot tudi zunanjšega in notranjšega lakiranja. Lakirna linija deluje avtomatično, pri čemer je človeški nadzor potreben zlasti v zaključni fazi procesa, kjer se izvaja vizualna kontrola polizdelkov – leč in panelov – z namenom odkrivanja morebitnih napak oziroma odstopanj od kakovostnih zahtev, ki so predpisane za posamezen projekt (Heinmann, 2021).

Na spodnji sliki je prikazan logotip Helle.



*Slika 1: Logotip HELLA Saturnus Slovenija, d. o. o.
(Vir: SIC Ljubljana, 2024)*

1.4 Predpostavke in omejitve

Pri obravnavi tehnološkega procesa zunanlega lakiranja avtomobilskih panelov je bilo potrebno zaradi kompleksnosti proizvodnje in številnih vplivnih dejavnikov določiti ustrezne predpostavke ter upoštevati omejitve, ki vplivajo na obseg in usmerjenost analize v okviru diplomskega dela.

Predvideva se, da lakirna linija na oddelku KAS1 deluje v standardnih, stabilnih pogojih, brez večjih motenj ali izrednih okoliščin, ki bi lahko pomembno vplivale na zanesljive rezultate. Prav tako se predpostavlja, da so robotski sistemi in ostala avtomatizirana oprema tehnično brezhibni ter delujejo skladno s specifikacijami proizvajalca in internimi standardi podjetja.

Uporabljeni materiali, kot so laki, granulati, premazi in čistilna sredstva, so ustrezno certificirani ter skladni z zahtevami avtomobilske industrije. Opažanja in meritve, ki so bili zbrani v času izdelave naloge, veljajo za reprezentativen prikaz običajnega delovanja lakirne linije, pri čemer se predpostavlja tudi, da je vizualni nadzor izdelkov izveden dosledno in strokovno s strani usposobljenega osebja.

Kljub natančni zasnovi raziskave je bila naloga podvržena določenim omejitvam. Analiza je osredotočena izključno na lakirni proces v okviru oddelka KAS1, zato ugotovitve niso neposredno prenosljive na druge oddelke ali proizvodne linije v podjetju. Zaradi varovanja poslovno občutljivih informacij je bil dostop do določenih tehničnih in finančnih podatkov omejen, kar je vplivalo na širino analize. Poleg tega je raziskava temeljila na podatkih, zbranih v omejenem časovnem obdobju, zato niso zajeti dolgoročni vplivi, kot so sezonska nihanja, zamenjava izdelčnih serij ali spremembe v strukturi proizvodnje. Diplomska naloga se prav tako ne pogloblja v ekonomsko analizo investicijskih vidikov robotizacije niti ne obravnava širših organizacijskih posledic na ravni kadrov ali strateškega razvoja podjetja.

1.5 Metode dela

Raziskava v okviru diplomske naloge se je pričela z zbiranjem in pregledovanjem razpoložljive literature (Dolenc, 2020). Zaradi omejene količine strokovnih virov, zlasti v slovenskem jeziku, je bilo primarno gradivo pridobljeno iz internetnih virov podjetja Hella Saturnus Slovenija, d. o. o., dopolnjeno je bilo z izbranimi viri iz knjižničnih sistemov COBISS in DKUM. Veliko je tudi internega gradiva. Zbrano gradivo je bilo sistematično analizirano, pri čemer je bila uporabljena metoda analize dokumentov. Poudarek je bil na identifikaciji vsebin, ki so neposredno uporabne za razumevanje in obratovanje obstoječega stanja v procesu brizganja in zunanega lakiranja panelov.

V eksperimentalnem oziroma praktičnem delu raziskave je bil uporabljen kombiniran pristop, najprej je bilo potrebno celovito razumeti delovanje lakirnega procesa, kar je zahtevalo analitično obravnavanje posameznih faz znotraj tehnološkega postopka. S pomočjo analitične metode je bil proces razdeljen na ključne korake, ki so bili nato podrobno proučeni z vidika njihove vloge in vpliva na končni rezultat.

2 TEORETIČEN DEL

Avtomatizacija proizvodnih procesov predstavlja pomemben dejavnik povečanja učinkovitosti in kakovosti v sodobni industriji (Dolenc, 2020).

2.1 Brizganje

Brizganje plastike je ena najpogosteje uporabljenih metod za oblikovanje termoplastičnih materialov v industriji. Postopek vključuje segrevanje plastične mase do tališča, njeno vbrizgavanje pod visokim tlakom v kovinsko orodje ter ohlajanje in strjevanje v končni izdelek. Tehnologija omogoča visoko ponovljivost, natančnost in produktivnost, zaradi česar je nepogrešljiva pri masovni proizvodnji komponent v avtomobilski industriji.

2.1.1 Brizgalni stroj Engel Duo 1700 2K

V proizvodnem procesu na oddelku KAS1 se za izdelavo avtomobilskih leč in panelov uporablja sodoben brizgalni stroj Engel Duo 1700 2K. Gre za dvoploščati hidravlični stroj, ki je zasnovan za zahteve industrijske aplikacije z večjimi dimenzijami orodij in višjimi zapiralnimi silami. Ena izmed ključnih prednosti stroja je njegova kompaktna konstrukcija, ki omogoča optimalno izbiro prostora v proizvodnem okolju, hkrati pa zagotavlja izjemno robustnost, stabilnost in ponovljivost procesov.

Stroj Engel Duo 1700 2K dosega nazivno zapiralno silo 17.000 kN, kar omogoča obdelavo velikih orodij in hkrati zagotavlja zadostno tesnjenje tudi pri visokih brizgalnih pritiskih. Volumen brizganja je odvisen od konfiguracije vbrizgalne enote, pri čemer se v običajnih primerih giblje med 300 in 1000 cm³. Premer polža, ki je pomemben za natančno doziranje in homogenizacijo materiala, znaša od 70 do 90 mm. Brizgalna enota je zasnovana tako, da omogoča visoko stopnjo prilagodljivosti različnim vrstam materialov, vključno s tehnično zahtevnimi termoplasti, kot je polikarbonat (Makrolon), ki se uporablja pri izdelavi panelov.

Pomembna tehnološka značilnost stroja je uporaba energijsko varčne servohidravlične pogonske tehnologije, ki zagotavlja optimalno energetsko učinkovitost ob hkratnem ohranjanju visoke natančnosti gibanja. Poleg tega je stroj opremljen z nadzornim sistemom CC300, ki omogoča intuitivno upravljanje s pomočjo sodobnega uporabniškega vmesnika. Sistem omogoča natančno spremljanje vseh procesnih parametrov, hitro prilagajanje nastavitvev in učinkovito diagnostiko morebitnih napak, kar pomembno prispeva k stabilnosti proizvodnega procesa.

Zaradi visoke zmogljivosti in zanesljivosti je stroj Engel Duo 1700 2K posebej primeren za proizvodnjo optičnih komponent, kjer so dovoljena le minimalna odstopanja v dimenzijski nenatančnosti in kakovosti površine. V kombinaciji z

natančno zasnovanim orodjem in optimalnimi procesnimi parametri stroj omogoča doseganje visokih standardov, ki jih narekuje avtomobilska industrija.

Na spodnji sliki je prikazan brizgalni stroj Engel DUO 1700.



Slika 2: Brizgalni stroj Engel DUO 1700
(Vir: Maschinenhandel Borowski GmbH, b. I.)

2.1.2 Orodje

Orodje za brizganje predstavlja enega ključnih elementov v procesu brizganja termoplastov, saj določa obliko, dimenzije, površinsko kakovost ter funkcionalne lastnosti končnega izdelka. V primeru izdelave avtomobilskih leč in panelov gre za visoko precizno in kompleksno večdelno orodje, ki je zasnovano posebej za optične komponente, kjer so tolerance minimalne, površinska kvaliteta pa mora ustrezati najvišjim standardom avtomobilske industrije.

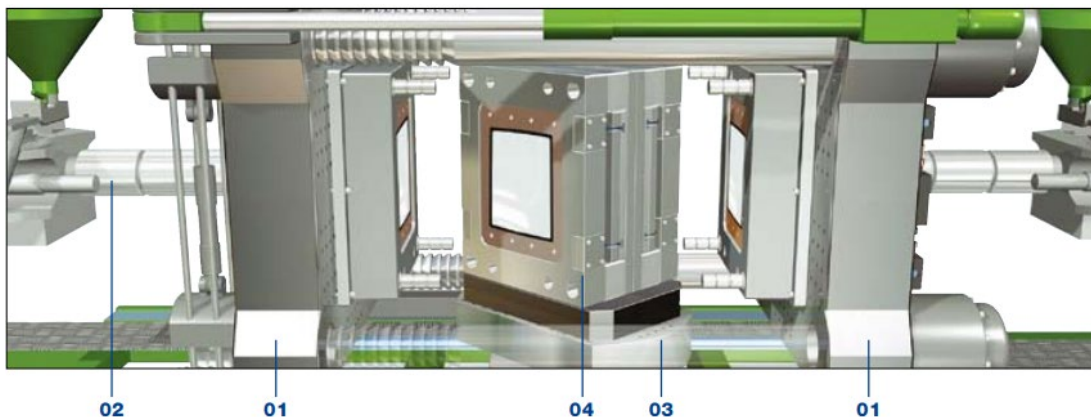
V uporabi je orodje z dvojnimi delovanjem, namenjeno brizganju dvokomponentnih delov, kjer se najprej oblikuje prozorna leča iz optično čistega polikarbonata, nato pa se v istem orodju izvede še drugi vbrizg črne komponente, ki služi kot nosilec ali senca. Takšna zasnova omogoča optimalno spajanje obeh materialov in odpravlja potrebno po dodatnih montažnih postopkih.

Orodje vsebuje sistem za natančno termoregulacijo, ki zagotavlja enakomerno temperaturno porazdelitev po celotni površini votline. To je bistvenega pomena pri brizganju optičnih delov, saj temperaturna nihanja lahko povzročijo notranje napetosti, deformacije ali optične nepravilnosti. Poleg tega je vključena vroča šoba (angl. hot runner), ki omogoča optimalen tok materiala, zmanjšuje toplotne izgube ter preprečuje nastanek napak, kot so kratki brizgi ali zamrznjeni robovi.

Za uporabo orodja je ključna tudi uporaba sensorike, ki nadzira tlak, temperaturo in hitrost polnjenja, s čimer se zagotavlja konstantna kakovost izdelkov. Orodje je izdelano iz visokokakovostnih jekel, odporno proti obrabi in visoki temperaturi, kar omogoča dolgotrajno in stabilno proizvodnjo brez pogostih servisnih posegov.

Natančna izdelava orodja ter redna vzdrževanja sta ključnega pomena za zagotavljanje nizkega izmeta in visoke ponovljivosti, še posebej v obratovalnem okolju, kot je oddelek KAS1, kjer se proizvaja večje število delov dnevno. Skupaj z naprednim strojem Engel Duo 1700 2K tvori orodje tehnološko celoto, ki omogoča zanesljiv, avtomatiziran in kakovostno stabilen proizvodni proces.

Na spodnji sliki je prikazano tridelno brizgalno orodje.



Slika 3: Tridelno brizgalno orodje
(Vir: Lakara, 2025)

- 01 – vpenjalna enota orodja
- 02 – brizgalna enota orodja
- 03 – horizontalna vrtljiva miza (180°)
- 04 – vrtljivi del orodja

2.1.3 Material

V proizvodnem procesu brizganja leč in panelov na oddelku KAS1 se uporabljata dva temeljna materiala, Makrolon® Clear in Makrolon® Bayblend. Oba materiala izhajata iz portfelja visoko zmogljivih polikarbonatnih mas, proizvajalcev pod blagovno znamko Covestro, in sta prilagojena zahtevnim pogojem, ki jih narekuje avtomobilska industrija.

Makrolon® Clear je optično izredno čist polikarbonat, ki se uporablja za izdelavo prozornih komponent, kot so leče avtomobilskih svetil. Gre za material z izjemno visoko prepustnostjo svetlobe (več kot 88 %), nizko stopnjo lomljivosti in odlično dimenzijsko stabilnostjo. Zahvaljujoč svojim mehanskim lastnostim je Makrolon® odporen proti udarcem in toploti, kar je ključno pri uporabi v vozilih, kjer prihaja do toplotnih obremenitev, mehanskih vibracij in izpostavljenosti UV žarkom. Material se oblikuje tudi po zelo nizki stopnji notranji napetosti, kar pripomore k zmanjševanju napak na brizganju, kot so napetostne razpoke ali optične popačenosti. Površina izdelka je gladka, sijoča in pripravljena za nadaljnjo obdelavo, kot je lakiranje, brez potrebe po dodatnem mehanskem obdelovanju.

Na spodnji sliki je prikazan material Makrolon® Clear in Makrolon® Bayblend.



*Slika 4: Makrolon® Clear & Makrolon® Bayblend
(Lastni vir)*

Drugi ključni material, ki se uporablja kot dopolnilo oziroma nosilni element, je Makrolon® Bayblend. V osnovi gre za zlitino polikarbonata (PC) in akrilonitril-butadien-stirena (ABS), ki povezuje lastnosti obeh materialov: žilavost, toplotno odpornost in dimenzijsko stabilnost polikarbonata ter obdelovalnost in nizko skrčenje ABS. Bayblend se uporablja za črne komponente, ki služijo kot nosilni ali estetski element pokravnih leč in panelov. Material je posebej zasnovan za avtomobilsko industrijo in zagotavlja visoko stopnjo UV stabilnosti ter dobro odpornost proti staranju, kar preprečuje porumenelost in mehansko degradacijo skozi čas.

Pri dvokomponentnem brizganju je ključna tudi medsebojna kompatibilnost materialov. Makrolon® Clear in Bayblend imata podobne temperaturne razpone obdelave ter visoko adhezijsko združljivost, kar omogoča trdno in trajno vez med obema komponentama brez mehanskega spajanja. To omogoča proizvodnjo kompleksnih komponent v enem tehnološkem koraku, kar pomembno prispeva k optimizaciji proizvodnega procesa.

Zaradi svojih tehničnih in optičnih lastnosti tako Makrolon® Clear kot tudi Makrolon® Bayblend predstavljata optimalno izbiro za uporabo pri svetlobni tehniki v avtomobilski industriji, kjer se zahteva visoka kakovost, trajnost in estetska dovršenost končnih izdelkov.

2.2 Lakirna linija

Zunanji lakirni proces leč in panelov na oddelku KAS1 poteka na sodobni, avtomatizirani lakirni liniji, zasnovani za visoko ponovljivost in stabilno kakovost obdelave optično občutljivih komponent. Linija vključuje več medsebojno povezanih funkcionalnih sklopov, ki skupaj tvorijo celovito tehnološko rešitev, prilagojeno zahtevam avtomobilske industrije.

V prvi fazi lakiranja komponento zajame industrijski robot ABB, opremljen s specializiranim prijemalom in lečo ali panel odloži v lakirno šablono, namenjeno za določen projekt. Roboti delujejo po vnaprej definiranih programih, ki so prilagojeni geometriji izdelka in zahtevam – npr. hitrosti premika robota, raznim programskim ukazom, nanosu sloja laka, spremljanju in računanju koraka verige.

Lakiranje poteka v zaprtih lakirnih kabinah s kontrolirano atmosfero, kjer se nadzorujejo temperatura, vlaga in hitrost zraka, kar je ključno za preprečevanje kontaminacije in zagotavljanje enakomernega nanosa. Kabine so opremljene s filtracijskim sistemom z večstopenjskim prečiščevanjem zraka, ki vključuje tako predfiltracijo kot HEPA filtre. To omogoča lakiranje v t. i. čistem okolju, ki ustreza standardom optične kakovosti.

Po nanosu laka se komponenta preko sušilnega transportnega sistema premakne v prvo fazo termične obdelave, kjer vstopi v IR peč. Ta uporablja infrardeče žarke za enakomerno segrevanje površine in začetno sušenje sloja laka, s čimer se zmanjša tveganje za nastanek površinskih napak, kot so mehurčki ali valovitost. Tu izhlapijo vsa topila v laku.

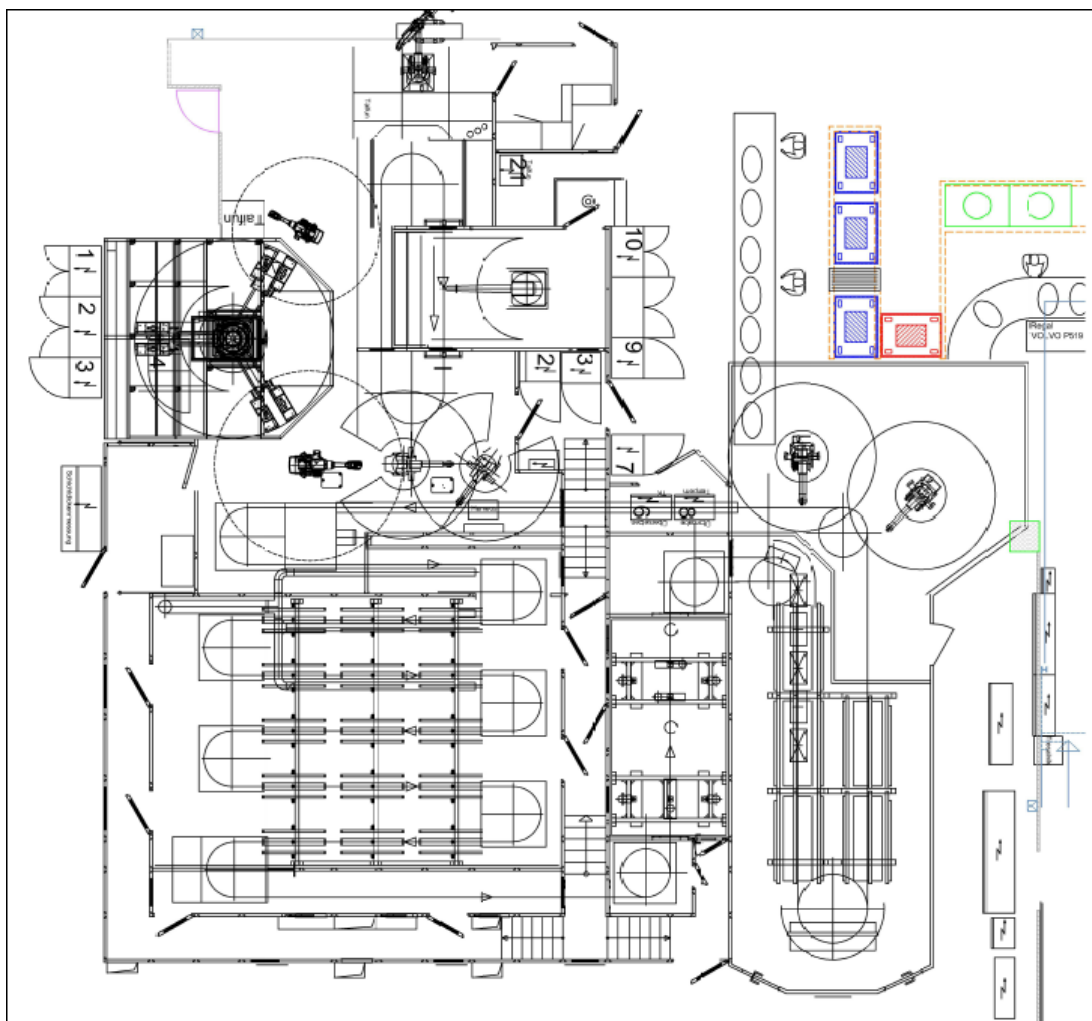
Sledi UV komora, kjer pride do zamreževanja laka (ang. UV crosslinking). Ta faza je bistvena pri lakih, ki vsebujejo fotoiniciatorje in omogoča hitro utrjevanje s pomočjo UV svetlobe. Rezultat je trd, kemično odporen sloj, ki ustreza mehanskim in optičnim zahtevam.

V nadaljevanju je komponenta izpostavljena temperirni peči, kjer se izvede počasno in kontrolirano segrevanje. Namen te faze je zmanjševanje notranjih napetosti v materialu in laku, ki lahko nastanejo zaradi toplotnih razlik in hitrosti strjevanja. Če te napetosti ostanejo v izdelku, lahko vodijo do kasnejših deformacij, pokanja laka ali optičnih nepravilnosti.

Po zaključenem sušenju se izdelki prenesejo na vizualni kontrolni trak, kjer operater vsak kos preveri pod definirano svetlobo in z optičnimi pripomočki. Glavni namen te faze je odkrivanje morebitnih napak na proizvedeni leči. Podatke o izmetu oziroma neustreznem kosu nato beležijo v računalniškem sistemu iTAC, ki omogoča sledenje vsaki komponenti in analizira napako glede na časovno obdobje, strojno opremo ali serijo.

Robotizacija in natančna avtomatizacija lakirnega postopka na tem oddelku omogoča visoko učinkovitost, dosledno kakovost ter znatno zmanjšanje človeškega vpliva in izmeta. Celoten proces je zasnovan tako, da zadosti strogim zahtevam avtomobilske industrije, hkrati pa omogoča hitro prilagoditev pri spremembah produktov ali lakirnih zahtev.

Na spodnji sliki je prikazan layout lakirnice in sušilnih peči.



Slika 5: Postavitev lakirnice
(Lastni vir)

2.2.1 Lak UVHC 5000

V procesu zunanjšega lakiranja leč se uporablja enokomponenten lak tipa Hard Coat UVHC5000 Clear, ki je posebej razvit za zaščito optičnih in estetskih plastičnih površin. Gre za UV utrjevalni premaz, ki se aktivira pod vplivom ultravijolične svetlobe in je primeren za nanos na polikarbonatne materiale, kot je Makrolon in Bayblend.

Lak UVHC5000 Clear se odlikuje po visoki mehanski odpornosti, predvsem na praske, udarce ter kemične vplive, kar je ključno za komponente, ki so izpostavljene zunanjim vplivom in vsakodnevni uporabi. Po utrjevanju tvori prozoren, trd in elastičen sloj, ki ne vpliva na optične lastnosti materiala, hkrati pa zagotavlja dolgotrajno zaščito in ohranja videz.

Pomembna prednost tega laka je hitra UV polimerizacija, ki omogoča večjo proizvodno pretočnost ter zmanjšanje časa obdelave. Poleg tega njegova sestava omogoča dobro adhezijo na obdelano plastično površino, minimalno krčenje in visoko optično čistost, kar je posebej pomembno pri komponentah za avtomobilsko razsvetljavo.

Zaradi vseh teh lastnosti je lak Hard Coat UVHC5000 Clear idealna izbira za zaščitni premaz pokrivnih leč in panelov v avtomobilski industriji, kjer so kakovost, trajnost in vizualna brezhibnost ključnega pomena.

2.2.2 Prelagalni robot IRB 1600

V sklopu avtomatiziranega tehnološkega procesa prelaganja leč in panelov med brizganjem in lakirnico se uporablja industrijski robot ABB IRB 1600-5/1.45 Type A. Gre za šestosnega robotskega manipulatorja, ki je zasnovan za hitro, natančno in ponovljivo izvajanje nalog v zahtevnem industrijskem okolju. Model IRB 1600 v izvedbi 5 kg nosilnosti in dosega 1,45 metra omogoča zanesljivo rokovanje s plastičnimi komponentami, kot so avtomobilske leče in paneli, brez mehanskih poškodb ali kontaminacije površine.

Robot se uporablja za avtomatizirano prelaganje komponent z uporabo pnevmatskega prijemala, ki je posebej zasnovano za manipulacijo občutljivih optičnih delov. Integracija robota v proizvodnjo celico omogoča zmanjšanje ročnega dela, večjo konsistentnost procesov in zmanjšanje možnosti napak zaradi človeškega faktorja. Robot je krmiljen preko ABB-jevega naprednega krmilnega sistema IRC5, ki omogoča enostavno programiranje, hitro učenje poti ter varno delovanje v sožitju z drugimi avtomatiziranimi sistemi.

Robotska rešitev vključuje tudi namenski transportni sistem in namensko paleto, s katero se zagotavlja stabilnost in varno pozicioniranje komponent med manipulacijo. Visoka stopnja ponovljivosti robota ($\pm 0,02$ mm) zagotavlja natančnost pozicioniranja, kar je bistvenega pomena za nadaljnji proces lakiranja, kjer so tolerance minimalne, zlasti pri prozornih delih.

Uporaba robota ABB IRB 1600-5/1.45 Type A pomembno prispeva k večji fleksibilnosti in učinkovitosti proizvodne linije, saj omogoča hitro prilagajanje različnim izdelkom in orodjem ter s tem tudi lažje uvajanje novih izdelkov v proizvodnjo (ABB robotics, 2022).

Na sliki spodaj je prikazan robot IRB 1600.



*Slika 6: Prelagalni robot IRB1600
(Lastni vir)*

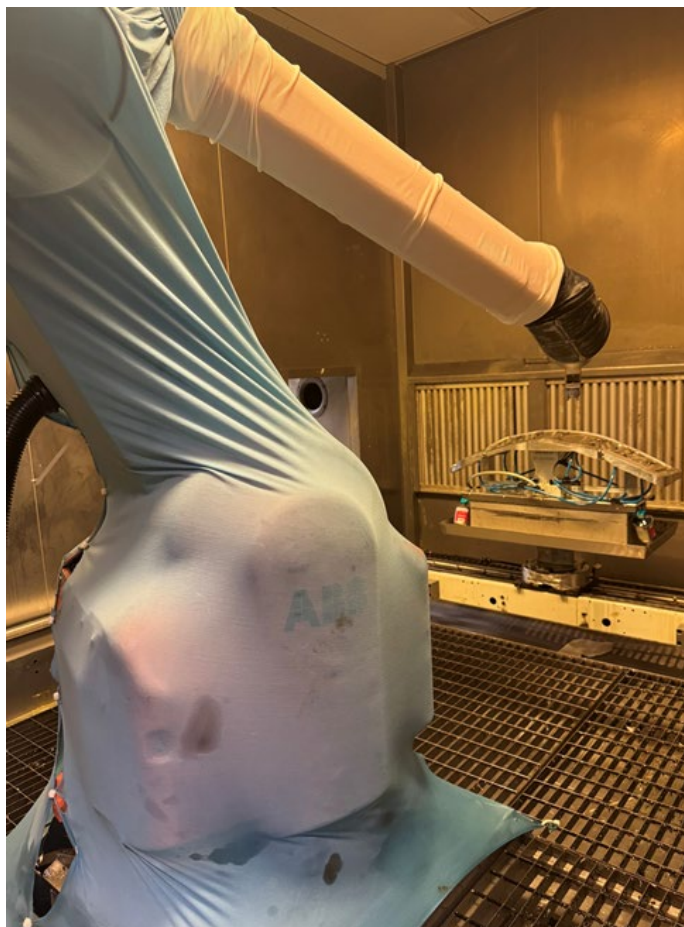
2.2.3 Lakirni robot IRB 580

V industrijskem lakiranju so natančnost, ponovljivost in varnost ključnega pomena. Z napredkom avtomatizacije so lakirni roboti postali nepogrešljivi del sodobne proizvodnje (Potočnik, 2019).

V tem poglavju je predstavljen industrijski lakirni robot ABB IRC5P v EX (protieksplzijski) izvedbi, ki je posebej zasnovan za delo v eksplozijsko ogroženih okoljih, kot so lakirnice in prostori, kjer se uporabljajo vnetljive snovi.

ABB IRC5P je del robotske serije za lakiranje, namenjene natančnemu nanašanju premazov v okoljih z visokimi zahtevami po kakovosti površinske obdelave. V kombinaciji z roboti serije IRB (npr. IRB 580) predstavlja popolno rešitev za avtomatizacijo lakirnih procesov.

Na spodnji sliki je prikazan robot IRB 580.



*Slika 7: Lakirni robot IRB 580
(Lastni vir)*

- Modularni sistem krmiljenja s podporo za lakirne funkcije.
- Visoka natančnost pozicioniranja ($\pm 0,15$ mm).
- Šest osi gibanja za kompleksne površine.
- Možnost integracije z različnimi vrstami lakirnih pištol.
- EX zaščita za varno delovanje v ATEX conah 1 in 2.

Krmilnik IRC5P temelji na arhitekturi ABB-jevega standardnega IRC5 sistema, vendar je optimiziran za potrebe lakiranja, in sicer

- omogoča natančen nadzor hitrosti, tlaka in pretoka barve,
- podpira ABB-jevo programsko okolje RAPID ter uporabo simulacijskega orodja RobotStudio Paint,
- vsebuje integrirane funkcije za nadzor lakirne pištole, barvnih ventilov ter dozirnih sistemov in
- omogoča povezavo z zunanjim sistemom prek industrijskih protokolov (EtherNET/IP, ProfiBus ipd.).

Ex izvedba robota pomeni, da so vsi njegovi sestavni deli zasnovani in certificirani za delovanje v eksplozijsko ogroženih okoljih, kjer obstaja nevarnost vžiga in/ali eksplozije zaradi prisotnosti topil, barv in prahu. Robot je opremljen z:

- antistatično prevleko in materiali,
- zatesnjenim ohišjem za preprečevanje vdora plinov in
- sistemi za nadzor tlaka in temperature znotraj robota.

Robot izpolnjuje evropske varnostne zahteve po direktivi ATEX (2014/34/EU) ter ustreza razredu zaščite EX II 2G T6.

Prednosti uporabe lakirnega robota:

- Kakovost: konstanten nanos barve brez nihanja v debelini sloja,
- Učinkovitost: hitrejše lakiranje z manj porabe materiala,
- Varnost: zaščita delavcev pred izpostavljenostjo nevarnim hlapom,
- Fleksibilnost: enostavna menjava barv in nastavitev za različne izdelke,
- Trajnost: manj odpada, manj čiščenja, večja ponovljivost.

Robot lahko izvaja različne načine lakiranja, kot so:

- Elektrostatika,
- Airless (brezzračno brizganje),
- HVLP (High Volume Low Pressure),
- Kombinacije zgoraj navedenih tehnologij.

V praktični uporabi se gibanje robota programira glede na geometrijo izdelka, želeno debelino nanosa, hitrost gibanja in razdaljo od površine. Robot omogoča samodejno nastavitvev poti s pomočjo vnaprej določenih točk, ki jih lahko enostavno simuliramo v okolju RobotStudio.

Naša lakirna tehnologija je HVLP (High Volume Low Pressure) in je ena najpogostejših uporabljenih tehnologij nanašanja laka v avtomobilski industriji, saj omogoča visoko učinkovitost nanosa ob hkratnem zmanjšanju izgub materiala in emisij v okolje (Zupančič, 2018).

Pri tej metodi se za razprševanje laka uporablja velik pretok zraka pri nizkem tlaku (običajno med 0,7 in 1,0 b), kar omogoča boljši nadzor nad curkom laka in zmanjšuje pojav meglice (overspray).

Glavne značilnosti HVLP tehnologije:

- Večja učinkovitost prenosa: Do 70 % laka se prenese neposredno na površino, kar pomeni manj izgube v zraku.
- Manjši povratni odboj: Lak se nanese mehkeje in počasneje, kar zmanjša odboj delcev s površine.

- Ekološka prednost: Zaradi manjšega razprševanja v okolico je metoda skladna z okoljskimi zahtevami in omogoča manjšo porabo topil.
- Primerna za fine zaključne premaze: Uporablja se predvsem za natančne in gladke premaze, kjer je pomembna kakovost videza končnega izdelka.

HVLP pištote delujejo tako, da stisnjen zrak z visokim pretokom skozi šobo razprši lak v drobne kapljice. Zaradi nizkega tlaka so kapljice večje kot pri klasičnih visokotlačnih metodah, vendar se bolj usmerjajo in lepše oprimejo površine. To omogoča večji izkoristek laka in manjšo porabo barve ter topil. Sistem je lahko integriran z robotskim aplikatorjem, kot je ABB IRB 580, kar omogoča popolnoma avtomatiziran, konstanten in natančen nanos.

HVLP je v avtomobilski industriji standard pri zaključnih slojih (top coat), saj omogoča visok sijaj, enakomernost in debelino sloja. Tehnologija je še posebej primerna za lakiranje manjših komponent, kot so avtomobilске pokrivne leče, kjer je kakovost površine bistvenega pomena.

2.2.4 Lakirna pištola AGMDPRO

Lakirna pištola AGMDPRO je profesionalna HVLP pištola (High Volume Low Pressure), posebej zasnovana za natančen in kakovosten nanos barve ter premazov v industrijskih lakirnih sistemih. Pištola je kompatibilna z različnimi vrstami premazov (vključno z vodnimi in topilnimi barvami) ter je primerna za uporabo v avtomatiziranih ali ročnih lakirnih procesih. V okviru optimiziranega lakirnega procesa avtomobilskih pokrivnih leč je lakirna pištola nameščena na koncu robotske roke robota. V tej konfiguraciji pištola omogoča konsistenten nanos laka z optimalnim razprševanjem in minimalnimi izgubami. Zaradi natančne šobe in kontroliranega pretoka materiala omogoča visoko kakovost površinske obdelave, kar je ključno za estetsko dovršene in funkcionalno ustrezne izdelke.

Lakirna pištola AGMDPRO sodi med pištote, ki omogočajo učinkovit in enakomeren nanos laka pri nizkem tlaku. Opremljena je s šobo premera 0,85 mm, kar omogoča fino razprševanje materiala. Za svoje delovanje potrebuje pretok zraka med približno 270 in 300 litri na minuto, pri delovnem tlaku med 0,7 in 1,0 bara. Telo pištote je izdelano iz eloksiranega aluminija, kar zagotavlja nizko težo in odpornost proti obrabi, medtem ko sta dizna in igla izdelani iz nerjavnega jekla, odpornega proti koroziji in kemikalijam, kar podaljšuje življenjsko dobo naprave. Vhod za barvo je standardiziran z notranjim navojem G1/4", kar omogoča enostavno priključitev na dozirni sistem.

Na spodnji sliki je prikazana lakirna pištola, ki jo uporabljamo pri lakiranju, AGMDPRO.



*Slika 8: Lakirna pištola AGMDPRO
(Lastni vir)*

2.2.5 Nalagalni robot IRB 2600

V okviru avtomatizacije procesa prelaganja leč po procesu lakiranja se uporablja industrijski robot ABB IRB 2600-12/1.85. Gre za šestosni industrijski robotski manipulator z visoko nosilnostjo in velikim delovnim dosegom, ki omogoča hitro, natančno in zanesljivo izvajanje nalog rokovanja s komponentami.

Robot IRB 2600 v izvedbi 12 kg nosilnosti in dosegom 1,85 metra je zasnovan za srednje zahtevne do težje manipulacije naloge, kjer so ključnega pomena tako delovna hitrost kot visoka natančnost. V našem primeru se uporablja za prelaganje avtomobilskih leč in panelov na transportne sušilne palete in njihov nadaljnji prenos v sušilne peči. Zaradi večjega dosega omogoča fleksibilno pozicioniranje tudi v prostorsko zahtevnejših postavitvah.

Robot je opremljen z namenskim pnevmatskim prijemalom, ki omogoča varno in nežno rokovanje z občutljivimi optičnimi komponentami. Celoten sistem je zasnovan tako, da preprečuje poškodbe površin ali kontaminacijo delov, kar je bistveno za doseganje kakovostnih standardov v nadaljnjem procesu po lakiranju.

Krmilni sistem ABB IRC5 omogoča enostavno integracijo v obstoječo avtomatizirano linijo, hitro programiranje ter učinkovito upravljanje robotskega gibanja. Robot podpira tudi napredne funkcije, kot so sensorika, sledenje poti in nadzor sile, kar je še posebej pomembno pri rokovanju z različnimi oblikami in velikostmi komponent.

Uporaba robota IRC 2600-12/1.85 pomeni pomemben korak k večji avtomatizaciji in zmogljivosti procesa, saj omogoča:

- zmanjšanje ročnega dela,

- povečanje ponovljivosti in stabilnosti prelagalnih operacij,
- optimizacijo pretoka materiala in krajšanje ciklov,
- izboljšanje varnosti zaposlenih in zmanjša tveganja za poškodbe.

Zahvaljujoč tehnični dovršenosti, prilagodljivosti in robustnosti robot IRB 2600 predstavlja idealno rešitev za potrebe sodobne avtomobilske proizvodnje, kjer so standardi kakovosti in učinkovitosti izjemno visoki.

Na sliki spodaj je prikazan prelagalni robot IRB 2600.



*Slika 9: Nalagalni robot IRB 2600
(Lastni vir)*

2.3 Sušilne peči

Po zaključenem nanosu laka na avtomobilske panele sledi ključen korak v procesu – termična obdelava oziroma sušenje lakirnih površin. Lakirane leče se z drugega prelagalnega robota, ki je nameščen neposredno za lakirno kabino, avtomatsko preložijo z lakirnega transporta na sušilni transportni sistem, imenovan tudi »suha veriga«. Ta sistem je zasnovan kot verižni transport s 80 univerzalnimi nosilci, ki

omogočajo prevoz različnih leč različnih oblik in dimenzij, ne glede na specifičen projekt.

Transportna veriga sušenja se premika s stalno hitrostjo 0,14 m/s, kar omogoča natančno določen čas sušenja vsakega kosa skozi posamezne faze procesa. Pomembna značilnost tega sistema je odsotnost podmazovanja verige. Olja in maziva bi namreč pri višjih temperaturah v pečeh izparevala in s tem povečala tveganje kontaminacije lakirne površine. To bi lahko povzročalo napake, kot je t. i. neomočenost, pri kateri se lak površine izdelka ne oprime pravilno.

Sušilni transport vodi leče zaporedno skozi več sušilnih komor oziroma peči, kjer se termično aktivirajo kemijske vezi v laku. Namen teh peči je odstranitev topil, stabilizacija nanosa in zagotavljanje končnih mehanskih ter optičnih lastnosti laka. Vsaka peč ima svojo temperaturo in časovno nastavitvev, ki je optimizirana glede na uporabljeni lak (UVHC 5000) in vrsto komponente. Običajno so temperature v pečeh prilagojene tako, da ne povzročajo deformacij plastičnih materialov, temveč omogočajo enakomerno in popolno sušenje zaščitnega sloja.

2.3.1 Sušilna IR peč

Prvi del sušilnega procesa poteka v infrardeči (IR) peči, ki je razdeljena na pet temperaturnih con. Vsaka cona vsebuje tri sklope grelnih elementov, sestavljenih iz več infrardečih panelov. Grelniki so nameščeni v dveh nivojih – osrednji nad transportno potjo ter bočno levi in desni strani, pod kotom 90 stopinj, kar omogoča celovito in enakomerno obsevanje površine leče. Temperature IR panelov se glede na pozicijo znotraj peči gibljejo med 220 °C in 350 °C.

Čas prehoda lakiranega panela skozi IR peč je približno 240 sekund. Med tem postopkom površina leče doseže največjo temperaturo približno 80 °C. Namen IR peči je predvsem izparevanje topil iz nanesenega laka ter zagotavljanje enakomernega razlivanja lakirnega sloja po površini leče. Ta proces preprečuje nastanek površinskih nepravilnosti laka, kot je učinek »pomarančne kože«.

Pomemben del tega postopka je tudi tvorba t. i. interpenetracijske plasti (IPL – interpenetration layer), ki nastane z difuzijo laka v zgornji sloj polikarbonatne površine. IPL plast igra ključno vlogo pri adheziji med lakom in substratom ter vpliva na končno mehansko in kemično odpornost premaza. Z nadzorom temperature v posameznih conah peči lahko neposredno vplivamo na hitrost izparevanja topil in posledično na debelino IPL sloja, ki mora ustrezati točno določenim specifikacijam in se običajno meri skupaj z debelino lakiranega sloja.

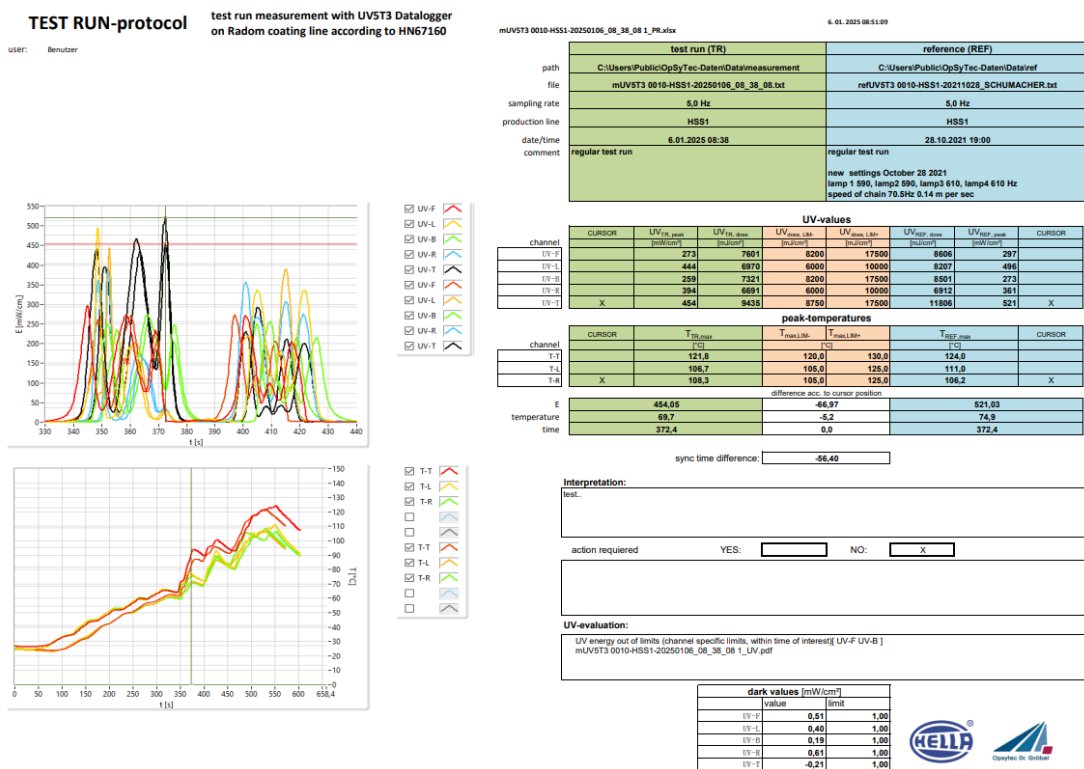
2.3.2 UV zamrežilna peč

Po prehodu skozi IR peč nadaljujejo lakirani paneli svojo pot po sušilnem transportnem sistemu v UV peč, kjer poteka postopek fotopolimerizacije laka. V notranjosti UV peči je nameščenih dvanajst visokozmogljivih UV žarnic, strateško razporejenih levo, desno, centralno in pod kotom 45° glede na pot sušilne verige. Ker se v procesu uporablja UV utrjevalni lak, je osvetlitev z UV svetlobo ključna za popolno zamreženje oziroma utrjevanje lakirnega sloja.

Lakirna površina je UV žarkom izpostavljena približno 95 sekund, pri čemer se moč posamezne žarnice giblje med 120 W/cm^2 in 200 W/cm^2 . Natančnost osvetlitve je ključna, saj mora biti količina prejete UV energije optimalna za popolno strjevanje laka, ne da bi pri tem prišlo do pregrevanja ali poškodb materiala.

Zaradi kompleksnih geometrijskih oblik leč in njihove raznolikosti je še posebej pomembno, da so leče na univerzalnih nosilcih sušilne verige natančno pozicionirane, saj lahko že manjši odmik od optimalnega položaja ali nepravilno naravnana UV žarnica povzroči nepopolno strjevanje laka. Takšna neustrezna izpostavljenost vodi do površinskih napak, kot so neposušeni deli, ki ne dosegajo zahtevanih mehanskih in estetskih lastnosti.

Na spodnji sliki je prikazana stara meritev UV



Slika 10: Stara meritev UV peči pred predelavo (Lastni vir)

2.3.3 Temperirna IR peč

Zadnja temperirna peč ima ključno vlogo v zaključni fazi procesa lakiranja, saj omogoča sproščanje notranjih napetosti, ki nastanejo med lakirnim nanosom in osnovnim materialom – polikarbonatom. Leče vstopajo v temperirno peč neposredno po izhodu iz UV peči, kjer je bil lak utrjen z UV žarki. V kolikor teh napetosti ne bi ustrezno sprostili, bi lahko prišlo do neželenih geometrijskih sprememb leče ali celo do mikrorazpok v lakirnem sloju, kar bi bistveno zmanjšalo mehansko stabilnost in optično kakovost izdelka.

Notranjost peči je razdeljena na šest temperaturnih con, kjer vsako od njih sestavlja pet sklopov IR grelnikov. Ti IR grelniki so nameščeni na več ravneh: nad transportnim sistemom, lateralno levo in desno ter na spodnji strani, kar omogoča enakomerno segrevanje celotne površine panela. Glede na pozicijo posameznega grelnika se temperatura IR panelov gibljejo med 315 °C in 450 °C, pri čemer temperatura same leče doseže približno 120 °C.

Proces temperiranja traja približno 100 sekund in je skrbno nadzorovan, saj mora zagotoviti ravnovesje med učinkovitim sproščanjem napetosti in ohranjanjem

geometrijske stabilnosti ter optične čistosti leče. Temperirna peč tako bistveno prispeva k dolgoročni obstojnosti in funkcionalnosti lakiranih komponent.

2.4 Klimatski sistemi

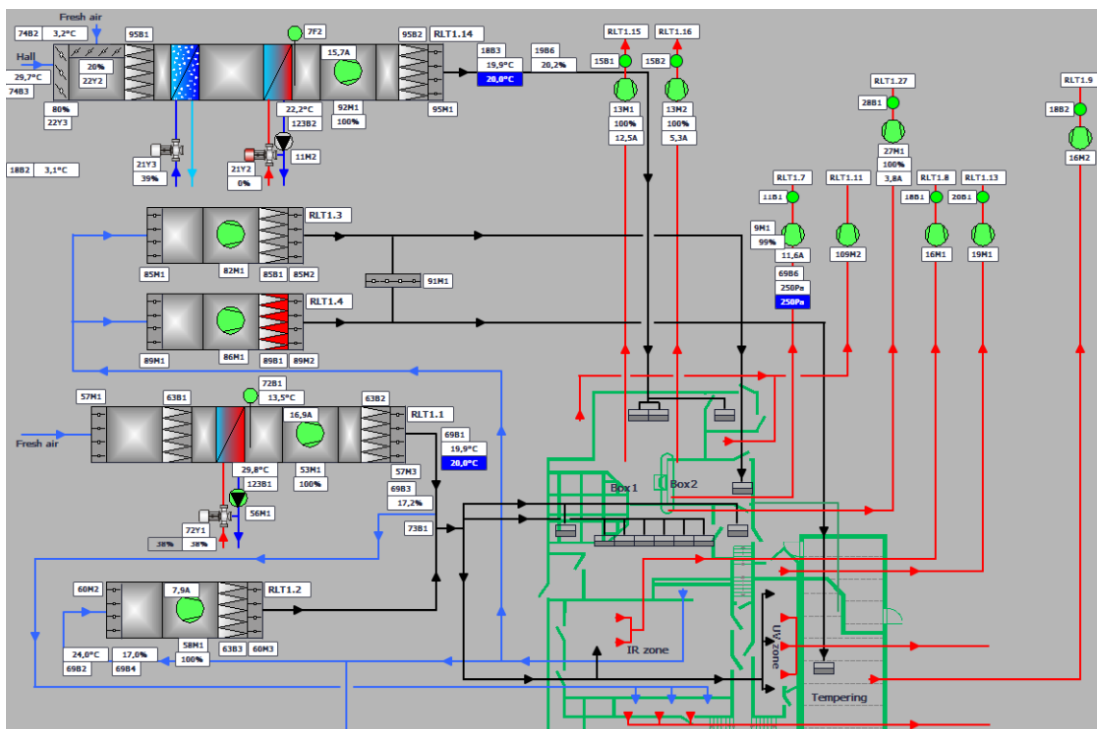
Vsi prostori, vključeni v proces lakiranja, so opremljeni s centralnim sistemom klimatizacije. Dovodni zrak se pred vstopom v prostore obdeluje s pomočjo večstopenjskega filtracijskega sistema, ki učinkovito odstranjuje prašne delce in druge nečistoče, ki bi lahko povzročale kontaminacijo lakirne površine ali vplivale na kakovost lakirnega nanosa.

Delovanje lakirne linije je neposredno pogojeno s pravilnim delovanjem klimatskega sistema. V primeru okvare ali nedelovanja zagon linije iz varnostnih razlogov ni mogoč. Klimatski sistemi zato predstavljajo ključno komponento zagotavljanja stabilnih pogojev in so vključeni v sistem vzdrževanja.

Filtracijski sistem vključuje več filtrov, skladnih s standardom ISO 16890 in EN 779. V prvi fazi zrak prihaja skozi predfilter M6, ki odstrani 70 % delcev velikosti 0,4 µm. Nato sledi termična obdelava (ogrevanje in hlajenje) zraka, ki nato potuje skozi fini filter F9, z minimalno učinkovitostjo filtracije 95 % za enako velikost delcev.

Zmes zunanega in notranjega zraka se po tem postopku vodi proti lakirni liniji, kjer pred vstopom v čisti prostor preide še skozi končni filter ULPA H15, ki zagotavlja visoko stopnjo čistosti zraka, skladno z zahtevami lakirnega procesa.

Na spodnji sliki je prikazan klimatski sistem lakirnice.



Slika 11: Klimatski sistem
(Lastni vir)

3 PREDELAVA LAKIRNE LINIJE

Zaradi vse večjih zahtev kupcev in razvoja sodobnih oblik vozil, ki vključujejo tudi večje in optično zahtevnejše pokrivne leče oziroma panele, je bila na oddelku KAS1 nujna prilagoditev obstoječega tehnološkega procesa lakiranja (Frumen, 2007).

Obstoječa lakirna linija je bila prvotno načrtovana in namenjena za klasične avtomobilске žaromete manjših dimenzij in komponent, zato ni omogočala stabilne obdelave večjih kosov, dolžine tudi 1,5 metra. V okviru praktičnega dela diplomske naloge so bile zato analizirane, načrtovane in izvedene naslednje ključne tehnične in procesne spremembe.

3.1 Avtomatsko prelaganje in transport do lakirnice

Po zaključenem procesu brizganja na stroju Engel Duo 1700 2K sledi avtomatizirano prelaganje leč in panelov na transportni sistem, ki vodi do lakirnice. Glede na visok standard kakovosti in občutljivost optičnih površin je bil celoten transportni in manipulativni sistem zasnovan s poudarkom na nežnem ravnanju, natančnosti pozicioniranja ter sledljivosti komponentam.

Prelaganje leč iz stroja na transportno linijo izvaja industrijski robot ABB, ki s pomočjo namenskega pnevmatskega prijemala natančno zajame sveže brizgan panel. Prijemalo je zasnovano posebej za tovrstne izdelke, saj omogoča varno oprijemanje brez mehanskega pritiska, ki bi lahko povzročil mikrodeformacije ali poškodbe na optični površini. Konstrukcija prijemala vključuje mehko obložen oprijemni del ter pnevmatski sistem z nastavljivim tlakom, kar omogoča prilagoditev različnim velikostim in oblikam leč, čeprav za vsak projekt uporabljamo drugo prijemalo.

Zajem in prelaganje potekata povsem avtomatizirano in sinhronizirano s ciklom stroja, s čimer dosežemo optimalen pretok proizvodnje brez nepotrebnih zastojev. Robot odloži lečo ali panel na namensko paleto, ki je prilagojena obliki izdelka in omogoča fiksno pozicioniranje, s čimer se preprečijo tresljaji, premiki ali neželeni stiki med posameznimi kosi. Paleta je izdelana iz antistatičnega materiala, kar zmanjšuje nabiranje prahu in drugih nečistoč, ki bi lahko negativno vplivale na nadaljnje lakiranje.

Transport palete do lakirne linije poteka po servo krmiljenem transportnem sistemu, ki zagotavlja natančno premikanje, zanesljivo pozicioniranje in možnost vključitve v širši digitalni nadzor sistem (npr. iTAC).

Na spodnji sliki je prikazan transportni sistem od brizgalnega stroja do lakirne linije.



Slika 12: Servo transport
(Lastni vir)

Tovrsten sistem prelaganja in transporta pomembno prispeva k avtomatizaciji celotnega proizvodnega procesa na oddelku KAS1, saj omogoča zmanjšanje človeškega vpliva, višjo ponovljivost, boljše kakovost izdelkov in zmanjšanje možnosti napak ali poškodb, ki bi nastale zaradi ročnega rokovanja.

3.2 Kontrolna točka in čiščenje

Na vmesni točki pred vhomom v lakirnico se panel na paleti samodejno ustavi na kontrolni točki, kjer je nameščena ionizacija in kamera visoke ločljivosti za prvi vizualni pregled. Ta pregled omogoča zaznavo grobih napak (npr. delna deformacija panela) že pred vstopom v lakirno linijo, kar preprečuje nepotrebno obdelavo napake in s tem povečuje učinkovitost procesa.

Po pozitivni potrditvi kontrole sistema panel skupaj s paletto samodejno usmeri proti vhomu v lakirnico. Tukaj je nameščen prvi prelagalni robot ABB IRC 1600, ki s pomočjo namenskega pnevmatskega prijemala natančno dvigne izdelek s transportne palete.

Da bi zagotovili čistejšo površino in preprečili kontaminacijo med transportom panela od brizgalnega stroja do lakirnice, robot obdelovalno površino panela obriše z v izopropanolom navlaženo antistatično krpico (IPA), potem pa aktivni ionizacijski sistem »tajfun«, ki uporablja vrteče se šobe s stisnjenim zrakom (2–3 bar) z uporabo

usmerjenega zraka in električnega toka nevtralizira elektrostatični naboj, kar zmanjša privlačnost delcev na površini leče.

Na sliki so prikazane ionizacijske šobe in IPA čistilni sistem.



*Slika 13: Tajfun in IPA krpica
(Lastni vir)*

3.3 Vstavljanje panela v lakirno šablono

Lakirna šablona služi kot nosilna podlaga za odlaganje panela pred vstopom v lakirno kabino. Vsaka šablona je posebej izdelana za določen projekt in je ločena za levo ter desno lečo (v primeru lakiranja par manjših leč). Ob zamenjavi proizvodnega projekta je obvezna tudi menjava ustreznih lakirnih šablon, ki morajo biti pred uporabo suhe in temeljito očiščene, da preprečimo kontaminacijo lakirne površine z ostanki laka ali vlage iz sistema za prepihanje lakirne šablone s stisnjenim zrakom, ki je namenjen za prepihanje šablone, da bi preprečili vdor laka na spodnjo stran leče. V zgornjem delu šablone so vgrajene šobe z usmerjevalnimi ploščicami oziroma pokrovčki, ki omogočajo enakomerno razporeditev zraka. Tako ustvarjen nadtlak učinkovito preprečuje, da bi se lak oprijel spodnje strani leče.

Šablona je sestavljena iz osnovne plošče, ki se namesti na dvižno postajo in vključuje fiksni ter pomični del lakirne šablone. Zgornji del šablone je natančno oblikovan po konturah panela ter opremljen z utorom, kamor se panel natančno usede med odlaganjem. Ta utor zagotavlja stabilno pozicijo panela med postopkom lakiranja ter ščiti spodnjo površino pred neželenim nanosom laka.

3.4 Lakirni program panela

Zaradi uvedbe večjih in kompleksnejših avtomobilskih panelov, ki v dolžino presegajo tudi več kot 1 meter, je bilo potrebno prilagoditi strategijo gibanja lakirnega robota. Pri

obdelavi takšnih kosov je bil ključen prehod na širše poti gibanja lakirnega programa (t. i. brush), ki omogoča enakomerno in učinkovitejšo, predvsem pa hitrejšo pot porazdelitve laka po širši in večji površini. S širšim razpršilnim kotom smo zmanjšali število potrebnih prehodov robota čez površino panela, s čimer smo pohitrili cikel lakiranja, hkrati pa ohranili želeno kakovost nanosa.

Za večji panel smo zato razvili prilagojen program gibanja, kjer je bil poudarek na dolgih ravnih in vzporednih potezah robota z višjo hitrostjo gibanja, v primerjavi z običajnimi programi za lakiranje za manjše leče. Hitrost gibanja je bila povišana na optimalno vrednost, ki omogoča homogeno debelino sloja, hkrati pa preprečuje prekomeren nanos laka in s tem povezane napake, kot so kapljanje ali pretirana debelina oziroma pomanjkanje laka na panelu.

Na spodnji sliki je prikazan del lakirnega programa.

```

49 PROC main180()
50 !-----
51 TPhWrite "PANEL";
52 ! Stand: 06.07.2024
53 ! Config: LM ???
54 ! ZL 100
55 ! HL 100
56 !Izdelal Mescic Danijel odelčni tehnolog lakiranja
57 !-----
58 ! Air for PaintMask
59 SetAO aoMaskAir, 5;
60 !-----
61 TPhWrite "MB RADOM";
62 MoveAbsJ jHomepos, v2000, fine, tGun;
63 PaintL p25, vPaint2000, z100, tGun\WObj:=wturntable;
64 !B1
65 PaintL p1, vPaint2000, z30, tGun\WObj:=wturntable;
66 SetBrush 1\Y:=649.15;
67 PaintL p31, vPaint2000, z100, tGun\WObj:=wturntable;
68 PaintL p2, vPaint1500, z100, tGun\WObj:=wturntable;
69 PaintL p32, vPaint1500, z100, tGun\WObj:=wturntable;
70 SetBrush 0\Y:=580.28;
71 PaintL p3, vPaint2000, z30, tGun\WObj:=wturntable;
72 !B2
73 PaintL p4, vPaint1800, z30, tGun\WObj:=wturntable;
74 SetBrush 2\Y:=588.56;
75 PaintL p33, vPaint1500, z100, tGun\WObj:=wturntable;
76 PaintL p5, vPaint1500, z100, tGun\WObj:=wturntable;
77 PaintL p34, vPaint1500, z100, tGun\WObj:=wturntable;
78 SetBrush 0\Y:=637.08;
79 PaintL p6, vPaint2000, z30, tGun\WObj:=wturntable;
80 !B3
81 PaintL p7, vPaint2000, z30, tGun\WObj:=wturntable;
82 SetBrush 3\Y:=694.92;
83 PaintL p35, vPaint2000, z100, tGun\WObj:=wturntable;
84 PaintL p8, vPaint2000, z50, tGun\WObj:=wturntable;
85 PaintL p36, vPaint2000, z100, tGun\WObj:=wturntable;
86 SetBrush 0\Y:=662.64;
87 PaintL p9, vPaint2000, z30, tGun\WObj:=wturntable;
88 !OBRAČANJE
89
90 !B4
91 PaintL p10, vPaint2000, z30, tGun\WObj:=wturntable;
92 SetBrush 4\Y:=721.96;
93 PaintL p37, vPaint1500, z100, tGun\WObj:=wturntable;
94 PaintL p11, vPaint1500, z100, tGun\WObj:=wturntable;
95 PaintL p38, vPaint1500, z100, tGun\WObj:=wturntable;
96 SetBrush 0\Y:=656.52;
97 PaintL p12, vPaint1500, z30, tGun\WObj:=wturntable;
98 !B5
99 PaintL p13, vPaint2000, z30, tGun\WObj:=wturntable;
100 SetBrush 5\Y:=586.28;
101 PaintL p39, vPaint1500, z100, tGun\WObj:=wturntable;
102 PaintL p14, vPaint1500, z100, tGun\WObj:=wturntable;
103 PaintL p40, vPaint1500, z100, tGun\WObj:=wturntable;
104 SetBrush 0\Y:=623.38;
105 PaintL p15, vPaint1500, z30, tGun\WObj:=wturntable;
106 !B6
107 PaintL p16, vPaint2000, z30, tGun\WObj:=wturntable;
108 SetBrush 6\Y:=587.72;
109 PaintL p41, vPaint1500, z100, tGun\WObj:=wturntable;
110 PaintL p17, vPaint1500, z100, tGun\WObj:=wturntable;
111 PaintL p42, vPaint1500, z100, tGun\WObj:=wturntable;
112 SetBrush 0\Y:=575.01;
113 PaintL p18, vPaint1500, z30, tGun\WObj:=wturntable;
114 !B7
115 PaintL p19, vPaint2000, z30, tGun\WObj:=wturntable;
116 SetBrush 7\Y:=537.51;
117 PaintL p20, vPaint1000, z100, tGun\WObj:=wturntable;
118 SetBrush 0\Y:=571.3;
119 PaintL p21, vPaint1000, fine, tGun\WObj:=wturntable;
120 MoveAbsJ jHomepos, v2000, z200, tGun;
121 !-----
122 !Air for PaintMask
123 SetAO aoMaskAir, 0;
124 !-----
125 ENDPROC

```

Slika 14: Del lakirnega programa panela
(Lastni vir)

Pojasnila:

- MoveJ: hitri premiki med pozicijami (dodatna varnost pri vstopu/izstopu iz lakirnega območja),
- MoveL: linearni premiki za enakomerno lakiranje površine,
- SetDO: vklop/izklop digitalnih izhodov, ki simulira vklop/izklop lakirne pištole,

- robtarget: definicija točke gibanja (nastaviš glede na dejanske koordinate izdelka),
- tooldata & wobjdata: orodje (lakirna pištola) in bazna ravnina (koordinatni sistem).

Robotski program je bil strukturiran tako, da se robot najprej pozicionira v začetno točko, nato pa po vnaprej določenih koordinatah opravi prehode preko površine panela. Vsak nanos se začne in konča zunaj roba izdelka, s čimer se prepreči lokalno prekrivanje in omogoči gladek prehod pri spremembi smeri. Uporabljeni parametri za tlak in količino laka so bili nastavljeni s priporočili proizvajalca laka, prav tako pa je bila optimizirana razdalja med šobo in površino panela (cca. 200 mm), kjer je ključnega pomena pri zagotavljanju enakomernega nanosa.

Pri pripravi programa je bila uporabljena kombinacija testiranja v simulacijskem okolju in kasnejših fizičnih validacij na liniji. Rezultati so pokazali znatno izboljšanje učinkovitosti – čas cikla se je skrajšal, delež izmeta zaradi neustreznega nanosa pa se je zmanjšal. Tak pristop predstavlja pomemben korak v smeri nadaljnje avtomatizacije in optimizacije lakirnega procesa za zahtevne večje izdelke.

3.5 Prelaganje na sušilni transport

Po končanem postopku zunanjega lakiranja v lakirni kabini sledi faza prelaganja panelov na sušilni transport. Ta korak, tako kot vsi do sedaj, je ključnega za nadaljnje utrjevanje nanosa laka in pripravo izdelka na nadaljnje procese.

Obstoječi sušilni transportni sistem je bil zasnovan za obdelavo manjših avtomobilskih pokravnih leč, z do 120 standardiziranimi nosilci, razporejenimi vzdolž transportne verige. Z razširitvijo proizvodnega programa in vključitvijo večjih plastičnih kosov in panelov je bilo treba sistem prilagoditi novim dimenzijam, masi in zahtevam procesnega sušenja.

Prelaganje opravi šestosni industrijski robot ABB IRB 2600, ki je opremljen s pnevmatskim prijematlom, prilagojenim za občutljivo manipulacijo lakirnih površin. Robot panel prime na namenskem robu leče – t. i. lepilnem robu – kjer ni lakirana površina, s čimer se prepreči poškodovanje nanosa ali kontaminacija površine.

Po prijemu robota panel usmeri pod infrardeči (IR) grelec znamke Heraeus, kjer se s pomočjo IR sevanja aktivirajo kemijske vezi v nanosu laka. Ta korak izboljša oprijem in začetno zamreževanje laka, kar prispeva k boljši mehanski odpornosti in daljši obstojnosti izdelka. Izpostavljenost IR sevanju je časovno natančno določena in usklajena z dinamiko gibanja robota, da se prepreči pregrevanje, deformacije ali druge neželene spremembe na površini.

Po prehodu izpod IR grelca robot panel odloži na sušilni transportni sistem, ki je sestavljen iz 80 sušilnih palet ali vozičkov. Ti so namenjeni nadzorovanemu transportu izdelkov skozi sušilno fazo, ki vključuje dodatno temperaturno obdelavo v temperiranih pečeh ter UV zamreževanje laka, kar zagotavlja popolno utrditev površine.

Celoten proces je avtomatiziran, natančno sinhroniziran z delovanjem lakirne linije in nadzorovan preko PLC sistema, ki zagotavlja visoko stopnjo ponovljivosti in kakovosti končnega izdelka.

3.6 Grelec Heraeus

Uporaba infrardečega sistema Heraeus MX 350/600 v procesu lakiranja avtomobilskih komponent:

Na spodnji sliki je prikazan IR grelec Heraeus.



*Slika 15: Grelec Heraeus
(Lastni vir)*

3.6.1 Uvod v IR tehnologijo sušenja

Za učinkovito sušenje lakiranih površin, predvsem pri uporabi sodobnih dvokomponentnih ali UV akrilnih premazov, je proces sušenja z IR tehnologijo hiter in usmerjen na površino. Infrardeče (IR) sušenje omogoča ciljno ogrevanje lakirnih delov, kar vodi do krajših časov sušenja, nižje porabe energije in boljšega nadzora nad kakovostjo premaza.

Tehnične značilnosti so:

- Tip sevalcev: srednjevalovni infrardeči (Medium Wave IR), kar omogoča globinsko penetracijo v premaz.
- Moč enote: 350 W do 600 W na posamezni IR modul.
- Valovna dolžina: skoraj takojšen odziv (polna moč v nekaj sekundah).
- Hlajenje: pasivno ali aktivno (z zrakom), odvisno od konfiguracije.
- Krmiljenje: integrirano ali ločeno, možnost PID regulacije in povezave z avtomatiziranim nadzornim sistemom.
- Možnost povezovanja več enot v linijo.
- Nastavljiva razdalja in naklon na obliko kosa.
- Primerno za statične in dinamične transportne sisteme (npr. transportna veriga).

3.6.2 Vloga v procesu lakiranja in sušenja

IR-sistem Heraeus MX 350/600 je nameščen v sušilnem delu linije, kjer deluje bodisi kot predušenje pred vstopom v sušilne peči, bodisi kot glavni vir energije pri hitro sušičih premazih. Uporablja se za:

- pospešeno izhlapevanje topil pri osnovnih slojih (primer, baza),
- utrjevanje prozornih zaščitnih lakov,
- zmanjšanje časa potrebnega za rokovanje z izdelkom po nanosu laka (manj čakanja na sušenje),
- zmanjšanje mehanskega odtisa (manjši potreben prostor v dolžino, ker je sušenje hitrejše).

Prednosti uporabe Heraeus MX 350/600 so:

- zmanjšanje časa sušenja: skrajšanje ciklov za 30–50 %, odvisno od debeline premaza;
- manjša poraba energije: IR toplota se prenese neposredno na premaz, brez potrebe po ogrevanju zraka;
- boljša kakovost površine: zmanjšana možnost neenakomernega sušenja ali nastanka mikro razpok;
- enostavna integracija: modularne zasnove omogočajo enostavno vgradnjo v obstoječe linije;
- nizki stroški vzdrževanja: dolga življenjska doba IR cevi in zanesljivo delovanje.

Sistem Heraeus MX 350/600 predstavlja sodobno rešitev za učinkovito sušenje lakiranih avtomobilskih delov, predvsem plastičnih pokrivnih leč, ki zahtevajo hitro, natančno in energijsko učinkovito obdelavo. V kombinaciji z robotiziranim lakiranjem in predelanim transportnim sistemom IR-sistem omogoča večjo produktivnost, večjo kakovost in manjšo porabo virov v celotnem tehnološkem procesu.

3.7 Predelava UV peči

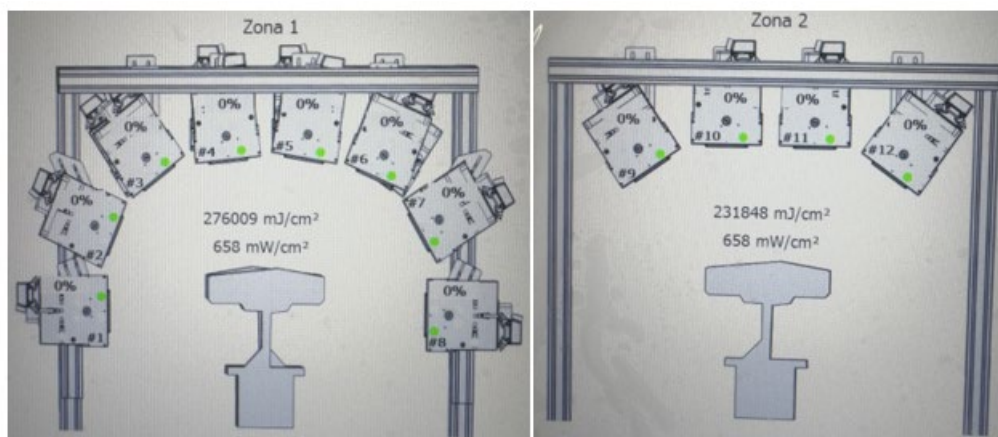
Obstoječo UV peč, sestavljeno iz zaporedno vezanih UV reflektorjev, smo predelali v tunelsko UV peč. S tem smo dosegli enakomernejše in učinkovitejše UV sušenje oziroma zamreževanje laka ter boljši nadzor nad temperaturnimi pogoji v procesu.

Glavne tehnične značilnosti so:

- Zasnova nove konstrukcije za montažo UV reflektorjev, prilagojeno za tunelski prehod izdelkov.
- Nova električna napeljava, prilagojena novi konfiguraciji reflektorjev in zahtevam po varnosti.
- Vpeljan je sistem hlajenja reflektorjev z mrzlim zrakom, kar zmanjšuje termično obremenitev komponent in izboljšuje stabilnost procesa.
- Možnost boljšega servisiranja in nadzora posameznih komponent reflektorskega sistema.

Nova tunelska UV peč je razdeljena na dve coni s skupno 12 UV reflektorji.

Na spodnji sliki je prikazana nova postavitev UV reflektorjev.



Slika 16: Nova postavitev UV reflektorjev in žarnic
(Lastni vir)

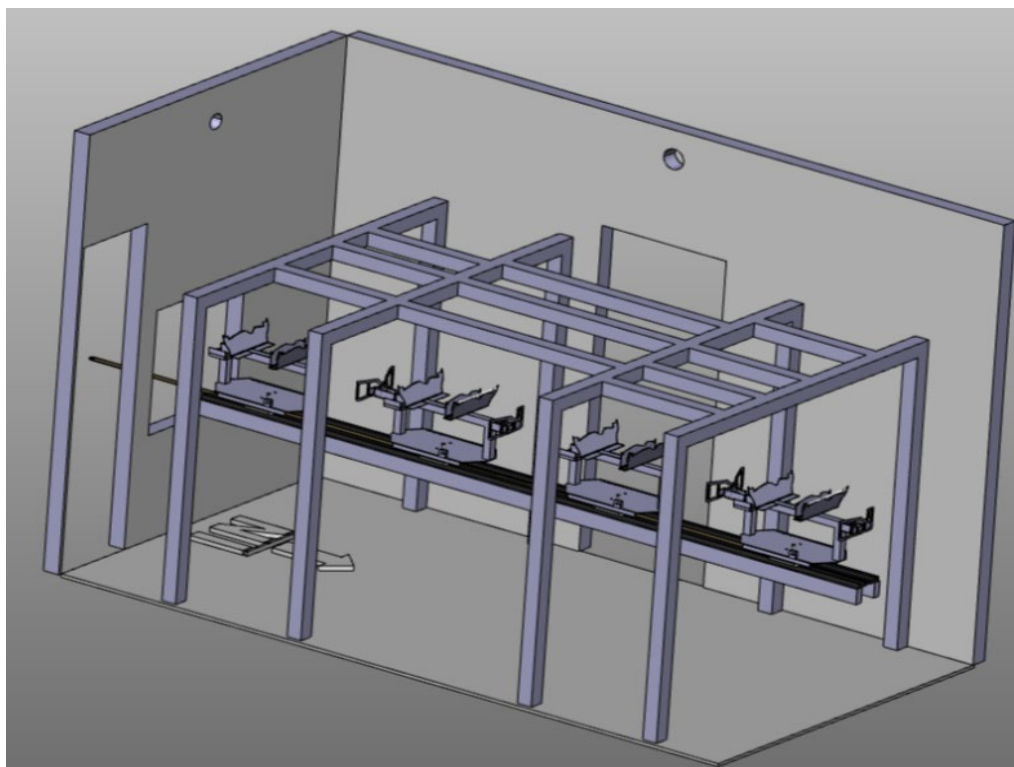
- **CONA 1:**
 - 8 UV reflektorjev
 - Skupna doza: 276.009 mJ/cm²
 - Intenziteta: 658 mW/cm²
 - Reflektorji so nameščeni v neposredni bližini, kar omogoča enakomerno izpostavljenost izdelkov z UV sevanjem iz več smeri.

- **CONA 2:**
 - 4 UV reflektorji
 - Skupna doza: 231.4848 mJ/cm²
 - Intenziteta: 658 mW/cm²
 - Reflektorji so nameščeni linijsko, nad izdelkom, kjer se sušenje zaključí.

Dodatne tehnične izboljšave so:

- Nov okvir in nosilna konstrukcija za montažo reflektorjev.
- Električna predelava za ločeno upravljanje con in reflektorjev.
- Hladilni sistem z vnosom hladnega zraka za stabilizacijo temperaturnih pogojev.

Na spodnji sliki je prikazana konstrukcija za postavitev UV reflektorjev.



*Slika 17: Nova konstrukcija v UV peči
(Lastni vir)*

3.8 Pohitritev sušilne verige

Da bi omogočili transport večjih kosov in preprečili prekrivanje ali mehanske poškodbe med sušenjem, je bilo število nosilcev zmanjšano:

- Z 120 na 75 nosilcev, kar omogoča večji razmik med posameznimi elementi.

- Novi razporeditveni koraki: 600 mm (prej 375 mm), kar zagotavlja več prostora za večje kose.
- Posledično je sistem primeren tudi za večslojne premaze, saj se zmanjša nevarnost prenosa delcev med izdelki.

Za večjo fleksibilnost v mešanih proizvodnih serijah sta bila razvita in vpeljana dva tipa nosilcev:

- Nosilci za večje kose – robustnejši, širši, s prilagodljivimi pritrdišči, namenjeni izdelkom širine do 500 mm.
- Nosilci za manjše kose – ožji, lažji, omogočajo večjo gostoto obdelave pri manjših serijah.

Zaradi zmanjšanega števila nosilcev in izboljšane toplotne enakomernosti v pečeh se je odprla možnost za pohititev procesa. Ključne spremembe:

- Povečanje hitrosti transporta z 1,5 m/min na 1,7 m/min.
- Optimizacija temperature in pretok zraka v sušilnih pečeh, da se kljub višji hitrosti ohrani enakomerno sušenje kosov.
- V nekaterih primerih se je čas sušenja skrajšal do 15 %, brez vpliva na kakovost površine kosov.
- Povečana fleksibilnost proizvodnje: možna menjava med različnimi tipi kosov brez večjih mehanskih sprememb.
- Zmanjšani zastoji in hitrejši pretok izdelkov skozi sušilni proces.
- Manj obrabe transportnega sistema, ker je masa enakomerno porazdeljena in ni več preobremenitve z gostoto nosilcev.
- Prilagoditev sistemu robotiziranega lakiranja, saj večji razmiki omogočajo boljše dostop prelagalnega robota brez večjih poškodb pri odlaganju panelov.

Predelava sušilnega transporta je bila nujna za sledenje zahtevam sodobne avtomobilske industrije, kjer se vse bolj uporablja večje in kompleksnejše plastične komponente. Z zmanjšanjem števila nosilcev, uvedbo dveh dimenzij nosilcev in pohitritvijo transportnega sistema se je zagotovila večja zmogljivost, kakovost izdelkov in boljša usklajenost z ostalimi fazami avtomatizirane proizvodnje.

3.9 Stanje pred in po optimizaciji procesa zunanjega lakiranja avtomobilskih panelov

Primerjava stanja lakirnega postopka pred in po uvedbi optimizacije predstavlja ključno točko vrednotenja učinkov reorganizacije tehnološkega procesa lakiranja avtomobilskih panelov. V tej analizi ne gre zgolj za prikaz izboljšav v produktivnosti, temveč za celostni vpogled v preoblikovanje delovnega okolja, avtomatizacijo postopkov, zmanjšanje napak ter dvig ponovljivosti in kakovosti končnega izdelka.

Temeljna razlika med izhodiščnim in optimiziranim stanjem je prehod iz ročno vodenega, delno avtomatiziranega lakirnega postopka v celovito robotiziran sistem z visoko stopnjo standardizacije in digitalnega nadzora. Spremembe so zajele tako strojno opremo, programsko podporo kot tudi organizacijske vidike dela (usposabljanje operaterjev, definicija odgovornosti, uvajanje kontrolnih točk).

Najpomembnejše izboljšave se kažejo v treh ključnih dimenzijah:

- Učinkovitost nanosa laka
- Zmanjšanje odstopanj in napak
- Optimizacija porabe materiala

Tehnična čistoča in nadzor procesa sta ključna za preprečevanje napak na optičnih komponentah (Škofic, 2013).

V nadaljevanju je prikazana tabela, ki povzema bistvene razlike med obema fazama procesa.

POSTOPEK	PRED OPTIMIZACIJO	PO OPTIMIZACIJI
PRIPRAVA LAKIRNE LINIJE	Ročno nastavljanje, visoka variabilnost	Standardizirana priprava z robotskim vodenjem
UPORABA OPREME	Polavtomatske pištrole, človeški faktor pomemben	Robotizirane lakirne celice z avtomatskim doziranjem
ENAKOMERNOST NANOSA	Spremenljiva debelina sloja, vidni defekti	Visoka enakomernost nanosa ($\pm 0,5\mu\text{m}$), manj popravil
PORABA LAKA	Visoka poraba zaradi premazov in ponavljanja	Optimizirano razprševanje, do – 25 % porabe laka
NAPAKE (PRAH, ZRAČNI MEHURČKI, KAPLJICE)	Povprečno 60 % panelov z napakami	Pod 20 % napak, standardna ponovljivost
ČAS LAKIRANJA NA KOS	29,1 sekunde	16,5 sekunde (43 % krajši cikel)
USPOSOBLJENOST ZAPOSLENIH	Praktično brez standardov, izkušenj posameznikov	Validirana usposobljenost, interni preizkusi znanja
SLEDLJIVOST IN REVIZIJA	Ročni zapisi, pomanjkljivi digitalni arhivi	Digitalni zapis parametrov (SAP)
VARNOST IN ERGONOMIJA	Visoka izpostavljenost hlapom in vibracijam	Zaprti roboti, ločeno servisno območje
VZDRŽEVANJE OPREME	Nepregledno, reaktivno	Prediktivno vzdrževanje s senzorji in alarmi

*Tabela 1: Primerjalna analiza lakirnega postopka pred in po optimizaciji
(Lastni vir)*

Zgornja primerjava jasno nakazuje, da je robotizacija postopka lakiranja prinesla večplastne koristi. Najbolj očitna je povečana procesna stabilnost, ki pomeni manj popravil, manj odpada in manj nezadovoljstva pri končnih kupcih. Standardizirani postopki, ki jih izvajajo industrijski roboti, omogočajo ponovljivo kakovost, ki ni več odvisna od posameznikovega trenutnega psihofizičnega stanja.

Digitalna podpora omogoča sprotno spremljanje količine porabljenega laka, debeline sloja, temperature in vlage v lakirnici, kar omogoča takojšnje ukrepanje ob odstopanjih. S tem se poveča odzivnost proizvodnje in zmanjša količina izmeta.

Pomembno je tudi, da optimizacija ni bila izključno tehnološka, temveč je zahtevala tudi organizacijsko prilagoditev. Z uvedbo validacijskih sistemov za operaterje in stalnega spremljanja ključnih parametrov procesa, se je dvignila raven notranje kakovosti. Lakirna linija je tako iz klasične proizvodne enote postala digitalno vodena kontrolna točka, kjer se podatki o vsakem nanosu shranjujejo in omogočajo revizijo, sledenje in dolgoročno analizo učinkovitosti.

V prihodnje se pričakuje prehod na industrijo 5.0, kar pomeni, da bodo postopoma avtomatizirane tudi tiste faze proizvodnega procesa, ki so trenutno ročne. To bi dodatno zmanjšalo možnost človeških napak ter prispevalo k višji kakovosti in večji zanesljivosti celotnega procesa. Namesto končne vizualne kontrole bi se lahko uvedel avtomatiziran sistem za prepoznavanje napak, ki bi omogočil natančnejšo identifikacijo in odstranjevanje neustreznih izdelkov. V nadaljevanju bi bil vzpostavljen tudi avtomatski sistem pakiranja, pri katerem bi robot sam vstavljale leče v ustrezno embalažo. Podjetje je že uvedlo avtonomne transportne enote (AGV), ki brez voznika prevažajo zapakirane izdelke do skladišča. Prav tako je zgrajeno popolnoma avtomatizirano skladišče.

4 ZAKLJUČEK

Temeljni cilj diplomskega dela je bil preučiti in optimizirati proces zunanjega lakiranja avtomobilskih panelov z osredotočenjem na predelavo obstoječe lakirne linije in uvedbo avtomatizacije preko industrijskih robotov. S tem projektom smo želeli doseči izboljšano kakovost izdelkov, večjo procesno stabilnost, zmanjšanje človeških napak in višjo produktivnost.

Analiza obstoječega stanja je pokazala številne pomanjkljivosti v ročnem in delno avtomatiziranem postopku lakiranja – od neenakomerne porabe laka, velike odvisnosti od spretnosti operaterjev, do pomanjkljive sledljivosti in ponovljivosti rezultatov. Z uvedbo robotiziranega sistema za nanos laka in prilagoditvijo lakirne linije glede na dimenzije in geometrijo panelov smo dosegli pomembne korake k optimizaciji.

Ključne pridobitve po optimizaciji vključujejo:

- Povečano ponovljivost in konsistentnost nanosa laka
- Zmanjšano porabo materiala (zlasti laka in topil)
- Znižanje števila napak in reklamacij
- Skrajšan čas cikla lakiranja
- Izboljšano ergonomsko in varnostno okolje za zaposlene
- Višjo sledljivost podatkov in možnosti analitike preko digitalnega nadzora procesov

Avtomatizacija je omogočila, da smo nekdanji ročni in polavtomatski proces lakiranja panelov spremenili v stabilen, zanesljiv in energetsko učinkovitejši sistem. Robotiziran nanos laka ne le zagotavlja enakomernost in natančnost, ampak omogoča tudi hitro prilagoditev parametrov glede na tip izdelka in proizvodni nalog.

S predelavo lakirne linije smo omogočili lakiranje tudi večjih ali kompleksnejših kosov, s čimer se je povečala fleksibilnost proizvodnje in razširila ponudba za stranke. Prav tako so bile vpeljane kontrolne točke za zagotavljanje kakovosti, kar dodatno zmanjšuje možnost napak v končnih izdelkih.

Zaključimo lahko, da uvedeni optimizacijski ukrepi niso zgolj tehnološki napredek, temveč strateška investicija v dolgoročno konkurenčnost podjetja. Povečanje kakovosti, zmanjšanje stroškov in dvig zadovoljstva kupcev so jasni pokazatelj uspešnosti izvedene prenove. V prihodnje bi bilo smiselno razmisliti še o popolni digitalizaciji spremljanja procesa in vključitvi dodatnih senzornih sistemov za sprotno analizo kakovosti, s čimer bi dodatno utrdili temelje sodobne, industrijsko proizvodnje po načelih Industrije 4.0 in kasneje tudi 5.0.

Avtomatizirana proizvodnja predstavlja pomemben korak k digitalni in pametni tovarni prihodnosti (Schwab, 2017).

5 LITERATURA IN VIRI

ABB Robotics (2022). *Paint Automation Solution*, ABB Group. Pridobljeno 07. 05. 2025 z naslova <https://new.abb.com/robotics>

Dolenc, B. (2020). *Avtomatizacija proizvodnih procesov*. Diplomsko delo, Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo.

Frumen, P. (2007). *Tehnološka prenova lakirnice v lastnem podjetju*. Diplomsko delo, Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta.

Maschinenhandel Borowski GmbH. (b. l.). *Purchasing and trading with used injection moulding machines*. Pridobljeno 24. 03. 2026 s <https://www.mhborowski.de/>
SIC Ljubljana. (2024). *Hella Saturnus Slovenija d. o. o.* Pridobljeno 24. 03. 2026 z naslova <https://siclj.si/oglas/hella-saturnus-slovenija-d-o-o/>

Potočnik, J. (2019). *Industrijski roboti in avtomatizacija proizvodnje*. Diplomsko delo, Maribor: Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko.

Schwab, K. (2017). *The Fourth Industrial Revolution*. New York: Crown Business.

Škofic, J. (2013). *Tehnična čistoča v avtomobilski industriji: analiza in primeri dobre prakse*. Diplomsko delo, Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo.

Zupančič M. (2018). *Osnove lakirnih sistemov in tehnologij*, Ljubljana: Tehniška založba Slovenije.