

Odabir materijala za izradu vozačkog računala

Ivan Simetić^a, Dean Ivančić^b, Sanja Grbac Babić^c, Ivan Pentek^d

^a Mag. ing. mech., Istarsko veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeve 9D, 52100 Pula, Hrvatska, isimetic@iv.hr

^b Mag. ing. mech., Istarsko veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeve 9D, 52100 Pula, Hrvatska, divancic@iv.hr

^c Mag. ing. comp., viši predavač, prodekanica za nastavu i studente, Istarsko veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeve 9D, 52100 Pula, Hrvatska, sgrbac@iv.hr

^d Mag. ing. mech., predavač, Istarsko veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeve 9D, 52100 Pula, Hrvatska, ipentek@iv.hr

Sažetak

U ovom radu cilj je bio razmotriti razliku između termoplastičnih materijala (PLA, ABS i PET-G) u svrhu odabira optimalnog materijala, pogodnog za izradu kućišta vozačkog računala. Također, objašnjena su svojstva navedenih materijala za konkretnu upotrebu u okruženju u kojima bi se koristio proizvod napravljen od njih, te su ta ista svojstva rangirana prema važnosti u ovisnosti kako ih materijal zadovoljava. Navedena su i objašnjena svojstva, prednosti i nedostaci svakog materijala. Naposljetku, provedbom analize rezultata mehaničkih ispitivanja iz literature i daljnjom usporedbom prema zadanim kriterijima, koji se osim na mehaničkim svojstvima baziraju i na tehničkim i ekonomskim zahtjevima, izabran je ABS materijal za daljnji razvoj proizvoda u sklopu projekta "BusCARD 4.0 IoT."

Ključne riječi: PLA, ABS, PET-G, aditivne tehnologije, vozačko računalo

1. Uvod

Industrijska tranzicija i inovacije postavljaju nove zahtjeve pred dizajn i proizvodnju uređaja, osobito kada se radi o integraciji višestrukih funkcionalnosti u kompaktne sklopove. Projekt BusCARD 4.0 IoT predstavlja inovativni pothvat usmjeren na razvoj vozačkog računala (engl. *Driver Control Computer*, DCC) koje će se integrirati u vozila javnog prijevoza putnika i robe. Glavni cilj projekta jest stvaranje "all-in-one" sustava koji će objediniti funkcionalnosti tradicionalno raspoređene na više odvojenih uređaja, kao što su računalo, validator

karte i pisač. Projekt se provodi u sklopu poziva Ministarstva regionalnog razvoja i fondova Europske unije, a dodijeljena bespovratna sredstva podržavaju napore nositelja projekta tvrtke Penta d.o.o. te partnera Istarsko veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, SUPERIUS d.o.o., DS&S d.o.o. i EINEL d.o.o. (Ministarstvo regionalnog razvoja i fondova EU, 2023).

Odabir odgovarajućeg materijala za kućište vozačkog računala igra ključnu ulogu za svojstva konačnog proizvoda u eksploataciji i trajnost uređaja. Kućište ne samo da mora osigurati mehaničku zaštitu osjetljive elektronike, već i doprinijeti

smanjenju operativnih troškova, povećanju energetske efikasnosti te poboljšanju sigurnosti i udobnosti putnika (Smith, 2021). Materijal za kućište vozačkog računala u javnom prijevozu mora prvenstveno biti otporan na udarce, vibracije i trošenje, kako bi osigurao mehaničku čvrstoću i trajnost u zahtjevnim uvjetima uporabe. Također, treba izdržavati širok raspon temperatura, biti kemijski i UV otporan te pružati zaštitu od vlage i korozije radi očuvanja funkcionalnosti i dugovječnosti uređaja. Stoga je cilj ovog rada analizirati tri najčešće korištena termoplastična materijala te na temelju njihovih mehaničkih, kemijskih i tehničkih svojstava odabrati najprikladniji materijal za izradu kućišta vozačkog računala za potrebe projekta BusCARD 4.0 IoT. U nastavku rada, nakon pregleda svojstava potencijalnih materijala, bit će detaljno objašnjen proces odabira odgovarajućeg materijala za navedenu primjenu.

U ovom radu uspoređuju se svojstva tri potencijalna materijala, polimera koja se komercijalno i učestalo koriste u proizvodnji različitih proizvoda od plastike: polilaktid (PLA), akrilonitril butadien stiren (ABS) i polietilen tereftalat glikol (PET-G), a sve u svrhu kako bi se izvršio odabir najprikladnijeg materijala za izradu kućišta vozačkog računala.

1.1. Polilaktid (PLA)

PLA je bioplastični polimer (termoplastični poliester) dobiven iz obnovljivih izvora, kao što su kukuruzni škrob ili šećerna repa. Temperatura tališta mu je 150–180°C ovisno o kristaliničnosti i aditivima, a molekulska masa mu obično iznosi 100,000–300,000 g/mol. Ovaj materijal je popularan zbog svoje ekološke prihvatljivosti, jer se u odgovarajućim uvjetima razgrađuje u okolišu. Međutim, iako je PLA jednostavan za obradu i pogodan za tzv. prototipiranje, ima relativno nisku temperaturnu otpornost i niže vrijednosti udarne radnje loma, što ga čini manje pogodnim za zahtjevnije primjene gdje su potrebna visoka mehanička svojstva (Gibson, Rosen i Stucker, 2015). S obzirom na svoje biološko podrijetlo, PLA se razgrađuje u okolišu pod određenim uvjetima, što je prednost iz ekološkog kuta, ali istovremeno predstavlja izazov u pogledu dugotrajnosti materijala u primjenama gdje je potreban dugoročni rad bez degradacije (Turner, 2016). Visoka krutost PLA također može dovesti do loma pod opterećenjem, što dodatno ograničava

njegovu primjenu u industrijskim okruženjima s visokim zahtjevima (Rasal, Janorkar i Hirt, 2010).

1.2. Akrilonitril butadien stiren (ABS)

ABS je termoplastični materijal poznat po svojoj izdržljivosti, otpornosti na udarni lom i dobroj kemijskoj stabilnosti. ABS nema jasno definirano talište jer je amorfan, ali se omekšava na 105–125°C (temperatura staklastog prijelaza ~105°C), a molekulska masa je obično 100,000–300,000 g/mol te varira zbog kopolimernog sastava. Mehanička svojstva ABS-a uključuju visoku čvrstoću, dobru elastičnost i sposobnost apsorpcije udaraca, što ga čini pogodnim za primjene u kojima se očekuju mehanička opterećenja i vibracije (Callister i Rethwisch, 2007). Kemijski gledano, ABS je otporan na mnoga otapala i agresivne medije, što je posebno važno u industrijskim primjenama gdje može doći do izloženosti različitim kemijskim tvarima. Temperaturna otpornost ABS materijala omogućava rad u širokom rasponu temperatura, iako pri vrlo visokim temperaturama može doći do deformacija. Osim toga, ABS se odlikuje dobrom obradivošću i mogućnošću precizne proizvodnje, što omogućava izradu kompleksnih geometrijskih oblika i integraciju dodatnih komponenti unutar kućišta. Upravo zbog tih svojstava, ABS je često izbor u automobilske industriji i za izradu kućišta elektroničkih sklopova (Strong, 2006).

1.3. Poli (etilen tereftalat) glikol (PET-G)

PET-G je modificirana verzija PET materijala koja posjeduje ravnotežu između čvrstoće, prozirnosti i otpornosti na udarni lom. Ovaj materijal se sve više koristi u 3D tisku i industrijskoj proizvodnji zbog svoje odlične otpornosti na udarni lom i kemijsku stabilnost (Campbell, 2018). PET-G, kao ni ABS, nema oštro talište, jer je amorfan, ali se pregrađuje pri 220–250°C. Molekulska masa mu iznosi približno 30,000–60,000 g/mol. PET-G se odlikuje visokom toplinskom stabilnošću, što ga čini pogodnim za primjene gdje se očekuju promjene temperature. Međutim, u usporedbi s ABS materijalom, PET-G ima nižu čvrstoću i otpornost na dugotrajna opterećenja, što je važno razmotriti u kontekstu primjene u javnom prijevozu (Williams, 2019). Dodatno, PET-G nudi prednosti u smislu prozirnosti i estetskih svojstava, što može biti poželjno u

određenim dizajnerskim rješenjima. No, njegova obrada koristi specifične parametre temperature i brzine hlađenja, što ograničava fleksibilnost u serijskoj proizvodnji ako se uspoređuje s ABS materijalom (Dizon, 2016).

2. Ocjena svojstava potencijalnih materijala za izradu kućišta

Za podatke o mehaničkim svojstvima materijala uzeti su rezultati ispitivanja odrađenih na opremi Centra za istraživanje METRIS Istarskog veleučilišta u sklopu diplomskih radova (Slivar, 2022; Skitarelić

2024; Franković, 2024), u kojima su ispitana mehanička svojstva termoplastičnih materijala PLA, PET-G i ABS, sa svrhom usporedbe i naposljetku odabira odgovarajućeg materijala za izradu reduktora, dijela alata i upravljačke palice. U navedenim radovima od svakog materijala pripremljeno je po 3 (tri) uzorka u uvjetima tiska u kojima je temperatura prilagođena materijalu i orijentacija paralelno na silu djelovanja. Uzorci su ispitani vlačnim testom na univerzalnoj statičkoj kidalici MESSPHYSIK BETA 250, mjerenjem tvrdoće prema Vickersovoj metodi na mikrotvrdomjeru STRUERS DURAMIN 2 i mjerenjem udarne radnje loma Charpy-jevim batom ZWICK Roell RKP 450.

Tablica 1. Mehanička svojstva PLA, PET-G i ABS materijala

PLA	Vlačna čvrstoća Rm (MPa)	Tvrdoća prema Vickersu HV0,5	Udarne radnje loma Kv2 (J)
Prusa i3 MK3S	50,45	20,00	1,70
Zortrax M200	30,68	-	1,56
Prusa i3 MK2S	23,05	14,52	2,53
Creality K1C	-	-	1,87
PET-G	Vlačna čvrstoća Rm (MPa)	Tvrdoća prema Vickersu HV0,5	Udarne radnje loma Kv2 (J)
Prusa i3 MK3S	59,51	13,20	1,60
Zortrax M200	39,96	9,33	1,50
Creality K1C	-	-	1,80
ABS	Vlačna čvrstoća Rm (MPa)	Tvrdoća prema Vickersu HV0,5	Udarne radnje loma Kv2 (J)
Prusa i3 MK3S	39,79	14,28	2,70
Zortrax M200	22,32	11,83	2,46
Creality K1C	-	-	4,43

Izvor: pregledno prikazano prema više provedenih ispitivanja u sklopu diplomskih radova Slivar, 2022; Skitarelić 2024; Franković, 2024.

Tri različita ispitivanja realizirana su pomoću tri različita uređaja za 3D tisak (Slivar, 2022; Skitarelić 2024; Franković, 2024). Korišteni uređaji za potrebe izrade ispitnih uzoraka (epruveta) od navedenih materijala prikazani su u tablici 1. te su predloženi rezultati navedenih ispitivanja koji mogu poslužiti kao baza podataka na kojoj će se temeljiti odabir odgovarajućeg materijala za izradu kućišta vozačkog računala u ovom radu. U navedenim

ispitivanjima iz literature (Slivar, 2022, Skitarelić 2024, Franković, 2024), ispitne epruvete su proizvedene na isti način, odnosno istih dimenzija i ispitnih parametara što omogućuje međusobnu usporedbu materijala na temelju podataka dobivenih u navedenim radovima.

Vozila javnog prijevoza mogu biti izložena značajnim temperaturnim oscilacijama. Iako PET-G nudi dobru termalnu stabilnost, ABS također

pruža zadovoljavajuću otpornost na promjene temperature, a pri višim temperaturama osigurava minimalne deformacije, što je presudno za pouzdan rad uređaja (Strong, 2006). U industrijskim uvjetima, kućište može biti izloženo različitim kemikalijama i otapalima. ABS pokazuje izvrsnu otpornost na kiseline i lužine, čime se osigurava dugovječnost materijala unatoč mogućim agresivnim utjecajima iz okoliša (Gibson i sur. 2015).

Proces proizvodnje kućišta zahtijeva materijal koji je jednostavan za obradu, omogućava preciznu proizvodnju i integraciju dodatnih funkcionalnosti bez značajnih troškova. ABS je industrijski standard u mnogim aplikacijama zbog svoje relativno niske cijene, dostupnosti i jednostavnosti obrade, što ga čini ekonomičnim izborom za masovnu proizvodnju (Turner, 2016). Iako PLA nudi ekološke prednosti zbog svoje biorazgradivosti, u kontekstu primjene u javnom prijevozu, gdje je prioritet osigurati dugoročnu stabilnost i sigurnost, ekološki faktor dobiva manji značaj u odnosu na mehaničke i kemijske zahtjeve. Stoga, iako je PLA atraktivan s ekološkog aspekta, nedostatak visoke otpornosti na udarce i ograničena temperaturna stabilnost čine ga manje pogodnim (Rasal i sur. 2010).

Prema zahtjevima primjene kućišta vozačkog računala u javnom prijevozu, ključno je da materijal posjeduje sljedeće otpornosti, rangirane prema važnosti:

1. Otpornost na udarce i vibracije: Primarna svojstva koja osiguravaju mehaničku čvrstoću i dugovječnost uređaja, budući da se vozila često suočavaju s udarcima, vibracijama i drugim mehaničkim stresovima.
2. Otpornost na trošenje (tvrdoća): Radi utiskivanja raznih predmeta (novčići, ključevi) i rezbarjenja "grafita".
3. Temperaturna otpornost: Kućište mora izdržati širok raspon temperatura, od niskih vrijednosti u hladnim uvjetima do visokih vrijednosti uslijed sunčevog zračenja ili rada motora, bez značajnih deformacija ili gubitka svojstava.
4. Otpornost na vlagu i koroziju: Iako se radi o termoplastičnom materijalu, određena otpornost na vlagu je neophodna kako bi se zaštitile

elektroničke komponente unutar kućišta od kondenzacije, nakupljanja vlage i mogućeg korozivnog utjecaja.

5. UV otpornost: Ako je kućište izloženo sunčevoj svjetlosti, važno je da materijal održi svoje mehaničke i estetske osobine bez degradacije boje, što dodatno produžuje vijek trajanja uređaja.
6. Otpornost na otapala i kemikalije: Kućište će vjerojatno biti izloženo sredstvima za čišćenje i dezinficijensima i svakako treba razmotriti otpornost materijala na isto.

Ovakav popis prema rednom broju odražava prioritet u pogledu očuvanja integriteta i pouzdanosti sustava unutar zahtjevnih uvjeta primjene u javnom prijevozu. Kriterij 1 i 2 ispitani su u literaturi (Slivar, 2022; Skitarelić 2024; Franković, 2024), a za kriterije 3 do 6 dodjeljuju se važnost na temelju literaturnih podataka i inženjerskih razmatranja o važnosti pojedinih kriterija za eksploatacijska svojstva kad materija postane proizvod. Navedena svojstva odnose se isključivo na polimere proizvedene aditivnom tehnologijom 3D ispisa te nije preporučljivo promatrati ih kao svojstva tih polimera. Ukoliko se polimerni proizvod dobije nekim drugim proizvodnim postupkom uslijed temperature, homogenosti, brzine hlađenja i sl. važno je promatrati svojstva proizvoda od nekog polimera i ne dati sud o samom materijalu.

U uvjetima vožnje i čestih vibracija, kućište mora pružiti visoku otpornost na udarne sile i osigurati dugotrajnu zaštitu osjetljive elektronike. ABS materijal se ističe visokom otpornošću na udarce, što je ključno za očuvanje integriteta sustava u zahtjevnom okruženju (Callister i Rethwisch, 2007). Temeljem gore navedenih kriterija, ABS se odabire kao optimalan izbor za izradu kućišta, jer je prvi odabir prema otpornosti na udarce i vibracije te trošenje koji se smatraju najvažnijim svojstvima za kućište vozačkog računala. Njegova sposobnost izdržati visoke udarne sile, osigurati stabilan rad u promjenjivim temperaturnim uvjetima i pružiti dobru kemijsku otpornost čine ga idealnim materijalom za primjenu u zahtjevnom sektoru javnog prijevoza (Callister i Rethwisch, 2007; Strong, 2006). Treba uzeti u obzir kako pri ekstremno niskim temperaturama kod ABS materijala dolazi do

znatnog smanjenja žilavosti. Dodatno, ekonomski aspekti proizvodnje i dostupnost sirovina dodatno potvrđuju opravdanost ovog izbora, što je u skladu s ciljevima projekta BusCARD 4.0 IoT.

Primjena ABS materijala omogućit će integraciju certificiranih komponenti unutar "all-in-one" sustava, čime se postiže ravnoteža između inovativnosti, pouzdanosti i učinkovitosti. Industrijski procesi proizvodnje također mogu biti optimizirani za serijsku proizvodnju uz minimalne troškovne prilagodbe, što dodatno doprinosi povećanju konkurentnosti i održivosti konačnog proizvoda (Williams, 2019).

3. Zaključak

ABS materijal svojim svojstvima omogućava proizvodnju kućišta koje će učinkovito zaštititi osjetljivu elektroniku, osigurati dugotrajan rad u zahtjevnim uvjetima te doprinijeti smanjenju operativnih troškova u sektorima javnog prijevoza. Unatoč nekim ograničenjima u radu pri vrlo visokim temperaturama, prednosti ABS-a u smislu obrade, otpornosti na udarce i kemijske stabilnosti čine ga superiornim u usporedbi s PLA i PET-G materijalima. Konačno, odabir ABS materijala osigurava da inovativni koncept "all-in-one" sustava unutar projekta BusCARD 4.0 IoT zadovoljava sve ključne kriterije industrijske tranzicije i modernizacije sustava javnog prijevoza, čime se potiče regionalni razvoj i unapređenje usluga (Callister i Rethwisch, 2007; Gibson i sur. 2015).

Ovaj rad ilustrira važnost interdisciplinarnog pristupa pri odabiru materijala, gdje se tehnička, ekonomska i okolišna razmatranja moraju uzeti u obzir kako bi se donijela optimalna odluka. Prema analizi provedenoj u ovom radu, ABS materijal se preporučuje kao optimalno rješenje za izradu kućišta vozačkog računala, pružajući pouzdanost, dugovječnost i učinkovitost potrebnu za integraciju u suvremene sustave javnog prijevoza.

U daljnjem istraživanju fokus projekta stavit će se na vlastita ispitivanja svojstava radi što konzistentnijih uvjeta izrade ispitnih uzoraka i samim time bolje ponovljivosti rezultata te će navedeni rezultati omogućiti izradu prototipa kućišta vozačkog računala od odgovarajućeg materijala što je planirani rezultat projekta.

Zahvala

Projekt BusCARD 4.0 IoT je sufinanciran iz poziva "Jačanje strateških partnerstva za inovacije u procesu industrijske tranzicije" kojeg je objavilo Ministarstvo regionalnog razvoja i fondova Europske unije u sklopu Integriranog teritorijalnog programa 2021.–2027.

Citirani izvori

- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2007). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (7th ed.). John Wiley & Sons.
- Campbell, F. C. (2018). PET-G: A Comprehensive Review of its Mechanical and Thermal Properties. *Polymer Engineering Journal*, 42(3), 215–230.
- Dizon, J. R. (2016). Evaluation of 3D Printing Materials: PET-G vs. ABS and PLA. *Journal of Additive Manufacturing*, 1(2), 89–101.
- Franković, M. (2024). 3D modeliranje, izrada i test upravljačke palice za računalo. Diplomski rad. Pula: Sveučilište Jurja Dobrile u Puli.
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- Rasal, R. M., Janorkar, A. V., & Hirt, D. E. (2010). Poly(lactic acid) modifications. *Progress in Polymer Science*, 35(3), 338–356.
- Skitarelić, M. (2024). Razvoj i optimizacija spojnog elementa napajanja ručnog alata. Diplomski rad. Pula: Sveučilište Jurja Dobrile u Puli.
- Slivar, M. (2022). Odabir potencijalnih materijala za izradu reduktora i primjena 3D tiska u strojarstvu. Diplomski rad. Pula: Sveučilište Jurja Dobrile u Puli.
- Smith, A. (2021). *Innovations in Public Transportation Systems: Integrating Modern Technologies for Efficiency and Safety*. *Transportation Research Journal*, 15(1), 45–60.
- Strong, A. B. (2015). *Plastics: Materials and Processing* (3rd ed.). Pearson Prentice Hall.
- Williams, M. (2019). Comparative Analysis of Thermoplastic Materials for Automotive Applications. *International Journal of Automotive Technology*, 20(4), 315–327.

Choosing materials for making a driver computer

Summary

The aim of this paper was to examine the differences between thermoplastic materials (PLA, ABS, and PET-G) in order to select the optimal material suitable for the production of a driver computer housing. Additionally, the properties of the aforementioned materials were explained in the context of specific usage environments in which the final product would be utilized. These properties were also ranked according to their importance and how well each material meets the requirements. The characteristics, advantages, and disadvantages of each material were listed and explained. Finally, based on an analysis of mechanical test results from the literature, and further comparison according to predefined criteria, encompassing not only mechanical properties but also technical and economic requirements, ABS was selected as the material for further product development within the framework of the "BusCARD 4.0 IoT" project.

Keywords: PLA, ABS, PET-G, additive technologies, driver computer