

## MODELIRANJE KOMPLEKSNOСТИ MIKROSTRUKTURE VZORCEV SELEKTIVNEGA LASERSKEGA TALJENJA

MATEJ BABIČ

**Sprejeto**  
12. 12. 2025

Univerza Novo mesto, Fakulteta za informacijske študije, Novo mesto, Slovenija; e-pošta: [matej.babic83@gmail.com](mailto:matej.babic83@gmail.com)

**Izdano**  
31. 3. 2026

DOPIŠNI AVTOR  
[matej.babic83@gmail.com](mailto:matej.babic83@gmail.com)

**Ključne besede:**

selektivno  
lasersko  
taljenje,  
kompleksnost,  
kovinski  
materiali,  
Fraktalna  
dimenzija,  
nevronska  
mreža

**Povzetek** Lasersko taljenje je aditivni proizvodni postopek, pri katerem se komponente izdelujejo plast za plastjo neposredno iz praškastega materiala. Selektivno lasersko taljenje (SLM) je postopek, pri katerem se kovinske komponente izdelujejo s taljenjem kovin v prahu plast za plastjo z uporabo laserskega žarka. Postopek selektivnega laserskega taljenja omogoča hitro proizvodnjo komponent iz aluminija, nerjavečega jekla, Inconela in drugih materialov, od prototipov do industrijskih standardnih serijskih delov. V tem članku predstavljam modeliranje kompleksnosti mikrostrukture selektivnega laserskega taljenja kovinskih materialov.



<https://doi.org/10.18690/po.13.25.35-44.2026>  
Besedilo © Babič, 2026



## 1. Uvod

Postopek selektivnega laserskega taljenja (SLM) se bistveno ne razlikuje od postopka selektivnega laserskega sintranja (SLS) [1]. Vendar pa se za razliko od (SLS) material v prahu pri SLM ne sintra. Pri postopku SLM se material v prahu lokalno stopi neposredno na mestu obdelave z uporabo toplotne energije laserskega žarka. Komora za izdelavo, ki vsebuje praškasti material, se segreje tik pod temperaturo taljenja. Da se prepreči oksidacija materiala, je delovna komora običajno napolnjena z zaščitnim plinom. Pri selektivnem laserskem taljenju se fizični 3D-predmet ustvari s taljenjem kovinskega prahu. Nabor 3D-podatkov se razreže na posamezne plasti in zgradi glede na konture digitalne datoteke. 3D-predmet se nato predhodno utrdi in infiltrira, nato segreje na več kot 1000 °C v plavžu in na koncu polira. Postopek je zapleten in zato traja več delovnih dni. Selektivno lasersko taljenje je ena najbolj zapletenih in impresivnih tehnologij, ki jih ponuja hitra izdelava prototipov. Vstavljeni deli, modeli in kompleksne zasnove, ki jih ni mogoče izdelati s konvencionalnimi metodami, se izdelujejo izključno iz podatkov CAD. Kalup ni potreben. Postopek 3D-tiskanja SLM nam ponuja izdelke iz aluminija, medenine, brona in bakra, pa tudi iz jekla iz nerjavečega jekla SS420 in 1.4404 (L 316). Možne so tudi različne zlitine, kot so zlato, srebro, nikelj in bron. Ena glavnih prednosti 3D-tiskanja s postopkom selektivnega laserskega taljenja je, da omogoča enostavno ustvarjanje občutljivih oblik, pa tudi kompleksnih struktur in geometrij – možni so celo spodrezi in votline. Za izdelavo komponente se kovinski prah nanaša plast za plastjo v montažni komori 3D-tiskalnika. Laser zlije posamezne plasti skupaj na območju, kjer se komponenta ustvarja. Z vsako obdelano plastjo se montažna platforma v montažni komori spusti za debelino nove plasti, ki jo je treba nanesti. To postopoma napolni montažno komoro, dokler komponenta ni dokončana. Okoliški prah ohrani svojo praškasto obliko in se na koncu postopka izdelave odstrani. 3D-tiskanje kovin odpira nove dimenzije v obdelavi kovin. Hkrati 3D-tiskanje z uporabo SLM odpira možnost proizvodnega procesa brez orodij. Zaradi velikih količin izdelave, ki jih ponuja 3D-aktivacija, kovinski 3D-tiskanje omogoča izdelavo še posebej kakovostnih demonstracijskih modelov. SLM ima prednost pred konvencionalnimi proizvodnimi metodami, da odpravlja potrebo po razvoju in proizvodnji kompleksnih in dragih orodij in kalupov.

### **Prednosti so:**

- Oblikovanje novih, kompleksnih geometrij in funkcij.

- Neobdelane površine v kakovosti tlačnega ulitka.
- Proizvodnja skoraj neomejenih geometrij komponent.
- Kratki proizvodni časi.
- Prilagodljiva proizvodnja na kraju samem in po naročilu.
- Zmanjšanje stroškov skladiščenja.
- Možna hibridna konstrukcija.
- Možno delovanje brez orodja.
- Trajnostni proces zaradi nizke porabe materiala.

Postopek SLM je primeren tako za prototipno kot serijsko proizvodnjo in se lahko uporablja v avtomobilski, vesoljski, medicinski tehnologiji, motošportu, izdelavi kalupov/orodij in strojništvu.

Fraktalna geometrija [2] je relativno nova veja matematike. Ukvarja se z geometrijskimi objekti, tako imenovanimi fraktali, katerih lastnosti se bistveno razlikujejo od lastnosti "klasične" geometrije. Najpomembnejša značilnost fraktalov je nespremenljivost merila, kar pomeni, da je mogoče podrobnosti prepoznati pri kateri koli stopnji povečave, ne glede na to, kako blizu prodremo v objekt. Po drugi strani pa, če povečamo rob "klasičnega" objekta, kot je krog, ta z naraščajočo povečavo vse bolj spominja na preprosto premo črto. Takšni objekti se zato imenujejo gladki. Pri fraktalu pa nikoli ne bomo mogli prepoznati premo črte, temveč bomo vse bolj razločevali zapletenosti objekta. Od tod izvira izraz "fraktal", iz latinskega "fractus" za "zlomljen", kar pomeni "prekrit z nešteti podrobnostmi". Takšni objekti so znani že od začetka 20. stoletja, vendar je bil njihov temeljni pomen prepoznan šele okoli leta 1970. Prej so te objekte imenovali "matematične pošasti", ker imajo, kot je pojasnjeno spodaj, paradoksalne lastnosti, ki se človeškemu umu zdijo bolj ali manj "nerazumljive". To se je spremenilo šele z delom matematika Benoîta Mandelbrota. Spoznal je, da se fraktali lahko uporabijo za nekaj povsem novega, nekaj, kar je do takrat veljalo za praktično matematično nemogoče: modeliranje in opisovanje "nepravilnih" naravnih objektov, zlasti živih, za katere so verjeli, da jih je geometrijsko nemogoče opisati. Fraktali so geometrijske oblike, katerih struktura se ponavlja v različnih merilih. Če torej povečate del fraktalne oblike, povečan del spominja na celoten fraktal. Če za primer vzamemo božično drevo, si lahko predstavljate, da povečate veliko vejo in vidite vse manjše veje, ki se same razvejajo in po strukturi spominjajo na večjo vejo. Naravno rastoča veja se

lahko razveja le trikrat ali štirikrat, v matematiki pa je mogoče takšne strukture opisati s formulami in jih razširiti v nedogled. To ustvarja geometrijske figure, ki hitro postanejo zelo kompleksne – in pogosto izgledajo čudovito. Fraktali so množice, ki kažejo poljubno fine strukture, tj. ki pri vsaki povečavi razkrijejo nove podrobnosti. Fraktalna geometrija ponuja koncepte in metode za analizo takšnih množic. Fraktali ne ponujajo le čudovitih vizualizacij, ampak jih je mogoče veliko tudi matematično opisati na presenetljivo preproste in elegantne načine. Njihova študija daje številne presenetljive rezultate, ki včasih nasprotujejo našemu dožemanju. Fraktali so na začetku 20. stoletja spodbudili razvoj teorije mer. Z razvojem računalnikov jih je postalo lažje vizualizirati in so našli pot v številne aplikacije – in celo v umetnost.

Inteligentni sistem [3] je stroj z vgrajenim računalnikom, povezanim z internetom, ki je sposoben zbiranja in analiziranja podatkov ter komunikacije z drugimi sistemi. Drugi dejavniki za inteligentne sisteme vključujejo sposobnost učenja iz izkušenj, varnost, povezljivost, sposobnost prilagajanja trenutnim podatkom in sposobnost oddaljenega spremljanja in upravljanja. V IT je sistem opredeljen kot zbirka medsebojno povezanih elementov ali komponent, organiziranih za skupni namen. Čeprav se pogosto omenjajo naprave, inteligentni sistemi kot taki ne vključujejo le pametnih naprav, temveč tudi medsebojno povezane zbirke takšnih naprav, vključno z omrežji in drugimi vrstami večjih sistemov. Podobno lahko inteligentni sistemi vključujejo tudi sofisticirane programske sisteme, ki temeljijo na umetni inteligenci, kot so klepetalni roboti, ekspertni sistemi, strojno učenje, globoko učenje in druge vrste programske opreme.

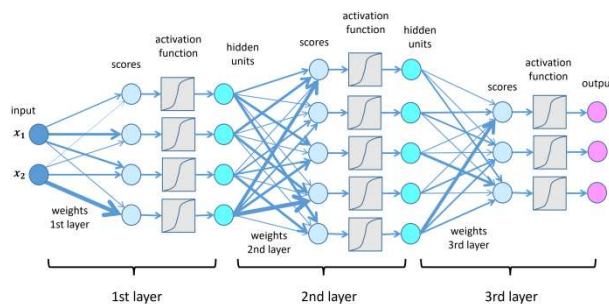
V tem članku predstavljam modeliranje kompleksnosti mikrostrukture selektivnih lasersko taljenih kovinskih materialov.

## **2. Priprava in postopek materialov**

EOS M 290 [4] se od leta 2014 uporablja v serijski proizvodnji številnih aplikacij. Gradi na močni in zanesljivi zmogljivosti svojih treh predhodnikov ter zagotavlja dosledno kakovost delov pri vseh strojih, nalogah in delih. Zaradi široke palete materialov, celovitega nabora za spremljanje in enostavne integracije v vašo proizvodnjo je jasna izbira za prilagodljivo serijsko proizvodnjo kovinskih komponent.

Material, ki ga uporabljamo, je EOS Maraging Steel MS1 [5]. EOS Maraging Steel MS1 je orodni prah, ki se uporablja pri obdelavi sistemov EOS DMLSTM. Kemična sestava komponent, izdelanih iz EOS Maraging Steel MS1, je skladna z nemškim standardom X3NiCoMoTi 18-9-5, evropskim standardom 1.2709 in ameriškim standardom 18% Ni Maraging 300. Maraging Steel (MS1) je jekleni prah, ki izstopa po svoji izjemni trdnosti in vzdržljivosti. Deli se po izdelavi enostavno obdelujejo in naknadno utrjujejo pri temperaturah nad 50 HRC. Poleg širokega nabora orodij, kot so brizganje, tlačno litje lahkih kovinskih zlitin, štančanje, ekstrudiranje itd., je ta material idealen za visokozmogljive industrijske in tehnične dele, kot so tisti, ki se uporabljajo v motošportu in vesoljski industriji.

Za modeliranje kompleksne površine 3D SLM vzorca uporabljam metode inteligentnih sistemov, in sicer: nevronske mreže [6]. Nevronske mreže (NN) so kot del nadzorovanega učenja trenutno najpomembnejše podpodročje strojnega učenja. Odgovorne so za trenutni hype okoli umetne inteligence, ker so še posebej sposobne analizirati velike količine nestrukturiranih podatkov in iskati vzorce v njih. Nestrukturirani podatki vključujejo slike, videoposnetke in zvoke – vse podatke, ki jih v vsakdanjem življenju proizvajamo v velikih količinah. Izraz si sposodijo iz biologije. V človeških možganih je nevron živčna celica, ki je povezana z drugimi živčnimi celicami in jim prenaša električne signale. Možgani so sestavljeni iz milijard nevronov, njihova aktivnost pa tvori naš um. Umetna nevronska mreža deluje podobno: tukaj je nevron matematična formula, ki obdeluje vhod in generira izhod. Vrednosti formule so določene z vhodnimi podatki. Številni umetni nevroni sodelujejo in tvorijo umetno nevronska mrežo (ANN).



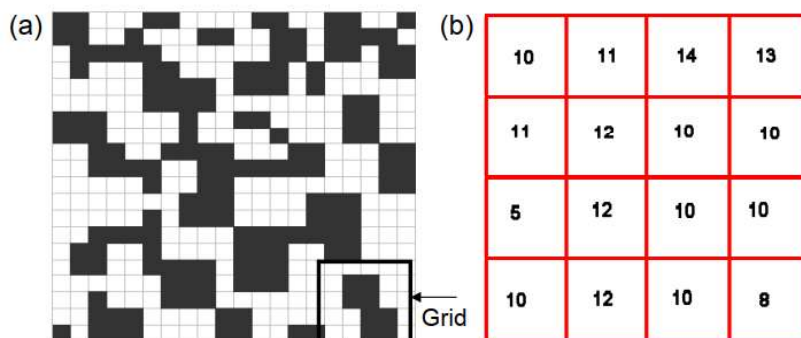
Slika 1: Nevronska mreža

Vir: <https://lamarr-institute.org/blog/deep-neural-networks/>

Fraktalna dimenzija je izraz, ki se v geometrijski znanosti uporablja za zagotavljanje racionalnega statističnega indeksa podrobnosti kompleksnosti vzorca [7]. Za določitev fraktalne dimenzije, ki predstavlja kompleksnost vzorcev, uporabljamo metodo, ki temelji na teoriji informacij. Metoda, ki temelji na teoriji informacij, kjer je kvadrat velikosti  $k$  zvit na binarni sliki ali nizu podatkovnih nizov. Znotraj vsakega polja se število temnih slikovnih pik šteje kot  $n_i$ . Vsako število je izraženo z verjetnostjo.

$$P_i(k) = n_i(k)/N$$

kjer je  $N$  skupno število točk v množici. Za oceno informacijske dimenzije  $D1$  in korelacijske dimenzije  $D2$  se izračunata Shannonova entropija  $S(k)$  in Simpsonov indeks raznolikosti  $C(k)$ .



Slika 2: Analiza točkovnega vzorca: informacijska in korelacijska dimenzija. (a) Samopodoben točkovni vzorec (b) Število točk na polje za velikost polja 5 x 5.

Vir: Lasten

Omejitev te metode:

Učinki robov so problem. Povečanje velikosti okna ( $k$ ) povzroči izključitev večjega deleža slikovnih pik vzdolž oboda zemljevida.

### 3. Rezultati in razprava

Tabela 1 prikazuje lastnosti vzorca SLM. Prvi stolpec navaja vzorce od S1 do S17. V drugem stolpcu je prikazana moč laserja v W; ta parameter je označen z X1. Drugi stolpec prikazuje hitrost laserja v mm/s; ta parameter je predstavljen z X2. Zadnji stolpec Y prikazuje kompleksnost vzorca SLM. Uporabljena je bila razdalja šrafure 0,11 mm. Tabela 1 prikazuje parametre vzorcev SLM.

Tabela 1: Parametri vzorcev SLM

Vzorec	Power (W) X1	Speed (mm/s) X2	FD Y
S1	320	1000	1,45
S2	320	1150	1,76
S3	320	1300	1,55
S4	270	850	1,65
S5	270	1000	1,49
S6	270	1150	1,52
S7	270	1300	1,66
S8	220	700	1,78
S9	220	850	1,58
S10	220	1000	1,38
S11	220	1150	1,42
S12	220	1300	1,39
S13	170	700	1,57
S14	170	850	1,71
S15	170	1000	1,69
S16	170	1150	1,75
S17	170	1300	1,46

Tabela 2 prikazuje napoved kompleksnosti vzorcev SLM z nevronske mrežo (NN). Stolpec IV prikazuje izračunane vrednosti kompleksnosti vzorca. Stolpec P NN prikazuje prediktirane vrednosti kompleksnosti z nevronske mrežo. Vzorec S8 ima največjo kompleksnost mikrostrukture. Vzorca S10 imajo minimalno kompleksnost mikrostrukture. Nenatančna izbira parametrov lahko privede do nastanka napak v komponentah SLM. Te površinske napake lahko drastično zmanjšajo splošno trdnost in zmogljivost dela SLM z ustvarjanjem središča koncentracije napetosti ter začetkom in širjenjem zlomov.

Tabela 2: Napovedovanje kompleksnosti vzorcev SLM z nevronske mrežo.

Vzorec	IV	P NN
S1	1,45	1,40
S2	1,76	1,66

S3	1,55	1,57
S4	1,65	1,54
S5	1,49	1,52
S6	1,52	1,59
S7	1,66	1,58
S8	1,78	1,70
S9	1,58	1,44
S10	1,38	1,51
S11	1,42	1,49
S12	1,39	1,31
S13	1,57	1,51
S14	1,71	1,61
S15	1,69	1,58
S16	1,75	1,71
S17	1,46	1,49

#### 4. Zaključek

V tem članku predstavljam kompleksnost modeliranja vzorca SLM. Tehnika aditivne proizvodnje, imenovana taljenje z laserskim žarkom, ustvarja komponente neposredno iz praškastega materiala, plast za plastjo. Med postopki SLM in SLS ni bistvenih razlik. Vendar pa selektivno lasersko taljenje (SLM) ne sintra materiala v prahu, kot to počne selektivno lasersko sintranje (SLS). Postopek SLM uporablja toplotno energijo laserskega žarka za lokalno taljenje materiala v prahu neposredno na mestu obdelave. Praškasti material se segreje na temperaturo nekoliko pod tališčem v območju namestitve. Delovno okolje je običajno napolnjeno z zaščitnim plinom, da se prepreči oksidacija materiala. Neželene posledice, vključno z upogibanjem komponent, ožganinami in tako imenovanim zvijanjem ali upogibanjem robov komponent, lahko nastanejo zaradi nepravilno izvedenega postopka zaradi znatne temperaturne razlike med najmlajšo ravno komponente in plastmi, ki so se že ohladile. To preprečimo z uporabo podporne strukture za varno privarjanje obdelovancev na osnovno ploščo. Kasneje je treba ta podporni sistem ročno odstraniti. Ker se lahko dodatni material v veliki meri ponovno uporabi in predela s presejanjem, je selektivno lasersko taljenje metoda varčevanja z viri, ki ustvarja minimalno količino odpadkov. Kovinski prah se stopi, da se z uporabo selektivnega laserskega taljenja (SLM) ustvari oprijemljiv 3D-objekt. Fraktalna

geometrija je zelo zanimiva, a hkrati zelo obsežna veja matematike, ki smo jo uporabili za opis kompleksnosti mikrostrukture SLM vzorcev.

**Literatura in viri**

- [1] *Additive Manufacturing*. Kymera International. Archived from [the original](#) on 18 January 2021. Retrieved 29 October 2019.
- [2] Lesmoir-Gordon, Nigel; *The Colours of Infinity: The Beauty, The Power and the Sense of Fractals*. 2004.
- [3] [Ciarabella, Alberto](#); *Ciarabella, Marco (2024). Introduction to Artificial Intelligence: from data analysis to generative AI. Intellisemantic Editions. ISBN 978-8-8947-8760-3.*
- [4] EOS (2024). from <https://www.eos.info/de>.
- [5] EOS *Maraging Steel MS1 M400-4: Material Data Sheet*. Available online: <https://www.eos.info/metal-solutions/metalmaterials/data-sheets/mds-eos-maragingsteel-ms1> (accessed on 11 March 2025).
- [6] Prieto, A.; Prieto, B.; Ortigosa, E.M.; Ros, E.; Pelayo, F.; Ortega, J.; Rojas, I. *Neural networks: An overview of early research, current frameworks and new challenges*. *Neurocomputing* **2016**, 214, 242–268.
- [7] Caicedo-Ortiz, H. E.; Santiago-Cortes, E.; López-Bonilla, J.; Castañeda, H. O. (2015). "Fractal dimension and turbulence in Giant HII Regions". *Journal of Physics: Conference Series*. 582 (1): 1–5. arXiv:1501.04911. Bibcode:2015JPhCS.582a2049C. doi:10.1088/1742-6596/582/1/012049.

**O avtorju\***

Matej Babič je doktoriral iz računalništva in informatike na Fakulteti za elektrotehniko in računalništvo Univerze v Mariboru, Slovenija. Študiral je matematiko na fakulteti za naravoslovje in matematiko v Mariboru. Trenutno je višji znanstveni sodelavec na Fakulteti za informacijske študije Novo mesto. Njegov raziskovalni interes je fraktalna geometrija, teorija grafov, omrežja, inteligentni sistemi, hibridno strojno učenje, topografija materialov po kaljenju, 3D tiskanje in javni potniški promet.