



D.1.3.1 Poročilo o trajnostnem potencialu AM tehnologij

Kontaktni podatki

Koordinator projekta:

Naslov:

Podrobnosti o projektu

ID projekta	SIAT00036
Akronim projekta	ADDCIRCLES
Naslov projekta	Spodbujanje trajnostnega regionalnega razvoja s pomočjo dodajalnih tehnologij: Čezmejna iniciativa za odporno in krožno gospodarstvo
Datum začetka	1. November 2024
Trajanje v mesecih	36
Razpis	Open Call for proposals for standard projects
Prednostna naloga programa	P1-A - Odpornejša in bolj trajnostna regija
Specifični cilj	1.2 - Spodbujanje prehoda na krožno gospodarstvo, gospodarno z viri

Podrobnosti o dokumentu

Delovni paket	Skupen razvoj inovativnih rešitev in metodologij za Green AM
Dejavnost	Analiza trajnostnega potenciala tehnologij AM
Številka dosežka	D.1.3.1
Različica	1
Ime datoteke	
Vrsta dosežka	Poročilo
Raven razširjanja	Javno
Vodja delovnega paketa	Janez Slapnik (FTPO)
Vodja dejavnosti	Branka Mušič (ZAG)
Avtor(ji)	Branka Mušič (ZAG), Davor Kvočka (ZAG)
Datum dokončanja dosežka	31 October 2024
Datum predložitve	

Upravljanje različic

Zgodovina revizij in preverjanje kakovosti			
Različica	Ime	Datum	Komentar:
V0.1			
V0.2			
V1			

Kazalo vsebine

Preglednica s kraticami.....	2
Preglednica slik	4
1. Uvod	5
1.1. Razumevanje, klasifikacija in pravilna raba terminologije na področju aditivne proizvodnje, v skladu z mednarodnimi standardi	6
1.2. Različne tehnike dodajalne proizvodnje.....	9
1.3. Uporaba materialov v dodajalni proizvodnji	12
2. Osnove LCA in njihov pomen pri oblikovanju inovativnih poslovnih primerov	19
3. Opolnomočenje regionalnih podjetij: Vloga projekta AddCircles pri pospeševanju aditivne proizvodnje in krožnega gospodarstva	23
3.1. Pregled znanstvenih izsledkov o aditivni proizvodnji in oceni življenjskega cikla.....	30
4 Primeri najboljših praks v aditivni proizvodnji in priporočila za MSP	39
4.1 Primeri najboljših praks v aditivni proizvodnji	39
1.2 Priporočila za MSP.....	44
5. Zaključek	49
6. Dodatne informacije	50
6.1. Priloga 1.....	50
6.2. Priloga 2.....	52
7. Literatura	54

Preglednica s kraticami

V tem razdelku so po abecednem vrstnem redu navedene okrajšave (kratice), potrebne za razumevanje besedila. Te okrajšave niso pomembne le v okviru tega poročila, temveč se na splošno uporabljajo tudi v znanstveni in strokovni literaturi ter na internetnih straneh.

Glede na različno uporabo kratic v različnih virih lahko spodnji seznam v nekaterih primerih vsebuje več kratic za isto besedno zvezo.

AM - aditivna proizvodnja

ASTM - Ameriško združenje za testiranje in materiale

BJ - brizganje veziva

CFF - neprekinjena izdelava vlaken

CLIP - neprekinjena proizvodnja tekočih vmesnikov

CM - konvencionalna proizvodnja

CNC - računalniško numerično krmiljenje

DED - usmerjeno nanašanje energije

DLP - digitalna obdelava s svetlobo

DMLS - neposredno lasersko sintranje kovin

EBM - taljenje z elektronskim snopom

FDM - modeliranje s taljenim nanosom

FFF - izdelava taljenih filamentov

GWP - potencial globalnega segrevanja

ISO - mednarodna organizacija za standardizacijo

LCA - ocena življenjskega cikla

LCCA - ocena stroškov življenjskega cikla

LOM - laminiran predmet

ME - ekstrudiranje materiala

MEX - iztiskanje materiala

MJ - brizganje materiala

MJT - brizganje materiala

Celovit pregled za uporabnike dodajalne proizvodnje
AddCircles, Interreg SLO – AUT

MJM - MultiJet modeliranje

PBF - zlivanje v prašni plasti

SETAC - društvo za okoljsko toksikologijo in kemijo (Zavod za okoljsko toksikologijo in kemijo)

SHL - laminiranje listov

SIST EN ISO - Slovenski inštitut za standardizacijo (usklajeno s standardi ISO)

SL - laminiranje pločevine

SLA - stereolitografija

SLCA - družbena ocena življenjskega cikla

SLM - selektivno lasersko taljenje

SLS - selektivno lasersko sintranje

TRL - stopnja tehnološke pripravljenosti

USEPA - Ameriška agencija za varstvo okolja (ameriški oddelek za okolje)

VP - fotopolimerizacija v kadi

VVP - fotopolimerizacija v kadi

Preglednica slik

Slika 1: Sedem procesnih kategorij dodajalnih proizvodnih procesov, kot jih opredeljujeta standarda ISO in ASTM.

Slika 2: Primeri kompozitov na osnovi biorazgradljivih in nerazgradljivih polimerov, ki se uporabljajo za aditivno proizvodnjo

Slika 3: Izbira polimerov glede na izbor dodajalne proizvodnje

Slika 4: Dodajalna proizvodnja in možna stanja/oblike surovine

Slika 5: Glavne faze LCA

Slika 6: Tabelarični zapis sestavnih delov SLS, ME, DMLS in FDM

Slika 6a: Shematski prikaz SLS, SLM in DMLS

Slika 7: Tabelarični zapis sestavnih delov ME in FDM

Slika 7a: Shema ekstrudiranja/izstiskanja materiala za dodajalno proizvodnjo s pomočjo polža

Slika 7b: Shema ekstrudiranja/izstiskanja materiala za aditivno proizvodnjo na osnovi batov

Slika 7c: Shema ekstrudiranja/izstiskanja materiala za aditivno proizvodnjo na osnovi filamentov

Slika 8: Ocenjena življenjskega cikla vrednostne verige za aditivno proizvodnjo

1. Uvod

Pojmi, kot so digitalizacija, industrije 4.0, ocena življenjskega cikla (LCA), ocena stroškov življenjskega cikla (LCCA), recikliranje, vpliv na okolje, zelene tehnologije, trajnost itd., se dandanes pogosto prepletajo.

Trajnost je temeljno načelo, ki usmerja sodobne industrijske prakse. Vključuje zadovoljevanje sedanjih potreb brez ogrožanja prihodnjih generacij. Doseganje trajnosti torej vključuje čim večje zmanjšanje škodljivih vplivov na okolje.

Po drugi strani je za industrijo 4.0 značilno vključevanje digitalnih tehnologij, avtomatizacije in izmenjave podatkov v proizvodne procese, kar prispeva k trajnosti z optimizacijo uporabe virov, zmanjšanjem količine odpadkov in povečanjem učinkovitosti s pomočjo pametnih tehnologij in odločanja na podlagi podatkov. Aditivna proizvodnja (AM) je ključni sestavni del industrije 4.0 in omogoča proizvodnjo kompleksnih, prilagojenih sestavnih delov z manj odpadnim materialom v primerjavi s tradicionalnimi proizvodnimi metodami, spodbuja prilagodljivost, proizvodnjo na zahtevo in decentralizirane (lokalne) proizvodne procese, ki zmanjšujejo emisije, povezane s prevozom ter spodbuja trajnostne prakse dobavne verige, ki vodijo k boljšim LCA in trajnosti. Prizadevanjem za trajnost koristi LCA, saj zagotavlja celovito razumevanje okoljskega odtisa izdelka in pomaga pri opredelitvi področij za izboljšave, ki so osnova družbenega napredka.

V bistvu združitvev oziroma dosledno upoštevanje trajnosti, vpeljava industrije 4.0, tudi AM, in LCA odražajo celostni pristop k sodobnim industrijskim praksam. Cilj te integracije ni le povečati donosnost, učinkovitost in inovativnost, temveč tudi zagotoviti, da so industrijski procesi usklajeni s sprejemljivimi in dolgoročnimi okoljskimi cilji.

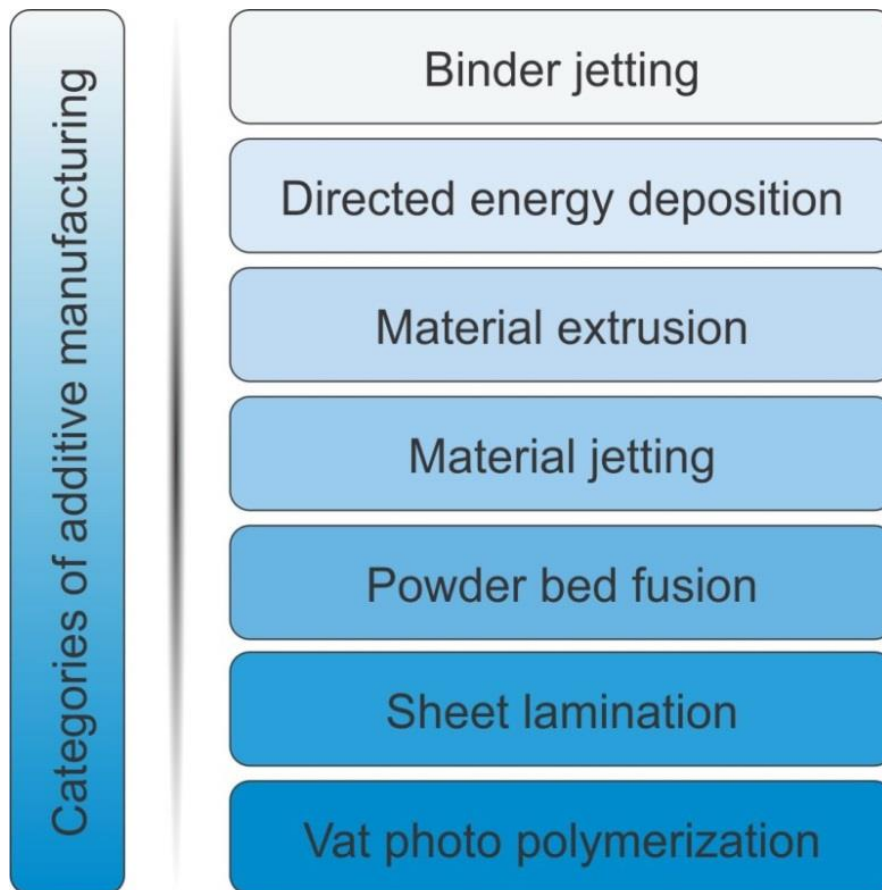
1.1. Razumevanje, klasifikacija in pravilna raba terminologije na področju aditivne proizvodnje, v skladu z mednarodnimi standardi

Obstaja veliko različic AM (pogosto uporabljeno kot 3D tiskanja ali 3D print) in z razvojem področja se pojavljajo nove in/ali prilagojene tehnologije, kar lahko povzroči nekaj zmede pri razumevanju tehnik AM. Poleg tega so se med razvojem AM uporabljali številni različni izrazi in opredelitve, pogosto v povezavi s posebnimi področji uporabe in blagovnimi znamkami. Postopki AM so standardizirani, klasifikacija AM v skladu z Mednarodno organizacijo za standardizacijo/ Ameriškim združenjem za testiranje in materiale (ISO/ASTM) pa je navedena v nadaljevanju¹.

V standardu ISO/ASTM 52900:2022, *Additive Manufacturing - General Principles - Fundamentals and Vocabulary* (Aditivna proizvodnja - Splošna načela - Osnove in besednjak) je navedeno, da je AM splošni izraz za tehnologije, ki zaporedno združujejo materiale za ustvarjanje fizičnih predmetov, kot jih določajo podatki 3D modela. Te tehnologije se trenutno uporabljajo za različne aplikacije v inženirski industriji in na drugih družbenih področjih, kot so medicina, izobraževanje, arhitektura, kartografija, proizvodnja igrač in drugih vsebin za prosti čas.

V skladu s standardom 52900:2022 Mednarodne organizacije za standardizacijo (ISO)/Ameriškega združenja za testiranje in materiale (ASTM) je AM razvrščen v sedem kategorij² (Slika 1):

Celovit pregled za uporabnike dodajalne proizvodnje
AddCircles, Interreg SLO – AUT



Slika 1: Sedem procesnih kategorij dodajalne proizvodnje, kot jih opredeljujejo standardi ISO in ASTM.

(1) Brizganje veziva je opredeljeno kot postopek AM, pri katerem se tekoče vezivo selektivno nanese za spajanje materialov v prahu.

(2) Usmerjeno nanašanje energije (DED) je opredeljen kot postopek AM, pri katerem se usmerjena toplotna energija uporablja za spajanje materialov s taljenjem med nanašanjem.

(3) Ekstrudiranje materiala (ME/MEX) je opredeljen kot postopek AM, pri katerem se material selektivno dozira skozi šobo ali odprtino.

(4) Brizganje materiala (MJ/MJM/MJT) je selektivno brizganje ali nanašanje kapljic materiala, običajno tekočega fotopolimera, na gradbeno platformo, ki se nato strdi ali strdi. Primeri postopkov v tej kategoriji vključujejo modeliranje PolyJet in MultiJet.

Celovit pregled za uporabnike dodajalne proizvodnje
AddCircles, Interreg SLO – AUT

(5) Fuzija praškaste plasti (PBF) je opredeljena kot proces, pri katerem toplotna energija selektivno spaja dele praškaste plasti.

(6) Laminiranje pločevine (SL/SHL) je postopek aditivne proizvodnje, pri katerem se pločevina poveže, da nastane predmet.

(7) Fotopolimerizacija v kadi (VP/VPP) je trenutno široko uporabljena metoda hitrega 3D-tiskanja³.

Namen tega dokumenta je zagotoviti osnovno razumevanje temeljnih načel za postopke dodajalne proizvodnje in na podlagi tega podati jasne opredelitve izrazov in nomenklature, povezane s tehnologijo dodajalne proizvodnje. Cilj te standardizacije terminologije za aditivno proizvodnjo je olajšati komunikacijo med vsemi deležniki, ki se ukvarjajo s tem tehnološkim področjem. Nadaljnji cilj dokumenta je tudi predstaviti osnove LCA, kot učinkovitega orodja za oceno vpliva produktov na okolje, predstaviti povzetek literaturnega pregleda o vplivih AM na okolje, podati seznam skupin izdelkov z največjim potencialom za optimizacijo ter navesti primere dobre prakse in združiti priporočila iz literature za mala in srednja podjetja (MSP) pri vpeljavi AM.

1.2. Različne tehnike dodajalne proizvodnje

AM omogoča ustvarjanje kompleksnih modelov neposredno iz digitalnih modelov. Ta pretvorba iz digitalnega v fizično obliko ne poenostavi le proizvodnega procesa, temveč tudi olajša izvajanje pametnih proizvodnih praks, vključno s spremljanjem v realnem času, napovednim vzdrževanjem in nadzorom kakovosti. Zato je bilo razvitih toliko različnih metod v praksah, ki dodatno vplivajo na učinkovitost proizvodnje AM.

Za uvod navajamo nekaj glavnih tehnik AM, s katerimi smo se srečali v našem pregledu stanja tehnike. Vsaka od njih ima svoje prednosti. Izbira, katero tehniko uporabiti, je odvisna od dejavnikov, kot so zahteve glede materiala, natančnost, hitrost tiskanja in specifična uporaba natisnjene predmeta.

Bistveno je poudariti, da se med hitrim napredkom nenehno pojavljajo nove oziroma prilagojene metode. Spremljanje teh inovacij je bistvenega pomena za ohranjanje stika z novostmi na tem področju.

1. Fuzija v praškastem sloju (PBF) je široka kategorija dodajalnih proizvodnih postopkov, pri katerih se plast materiala v prahu selektivno tali, da se ustvari 3D predmet.

Pri postopku PBF, pogosto imenovanem zlitje plasti v prahu, se uporablja plast materiala v prahu, pogosto kovinskega ali polimernega prahu.

Ta kategorija vključuje več tehnik, kot so selektivno lasersko sintranje (SLS), selektivno lasersko taljenje (SLM) in taljenje z elektronskim snopom (EBM). Pri vseh teh postopkih laserski ali elektronski žarek selektivno spaja material v prahu plast za plastjo, da nastane končni predmet.

a) Pri selektivnem laserskem sintranju (SLS) se za sintranje (segrevanje in spajanje) materialov v prahu, običajno najlona ali drugih polimerov, uporablja visokozmogljiv laser. Z njo je mogoče ustvariti močne in trajne dele, zato se pogosto uporablja v industriji.

b) Selektivno lasersko taljenje (SLM) je tehnologija 3D-tiskanja kovin, ki ima več prednosti, zato je priljubljena izbira za izdelavo kovinskih delov v različnih industrijah.

Celovit pregled za uporabnike dodajalne proizvodnje
AddCircles, Interreg SLO – AUT

c) Taljenje z elektronskim snopom (EBM) se uporablja za 3D tiskanje kovinskih delov. Uporablja elektronski žarek za taljenje kovinskega prahu plast za plastjo v vakuumu, pri čemer nastanejo močni in gosti kovinski sestavni deli.

2. Iztiskanje materialov (ME/MEX) AM je znan po svoji preprostosti, stroškovni učinkovitosti in vsestranskosti pri delu z različnimi materiali. Je pogosta tehnika v AM in vključuje izdelavo 3D predmetov z iztiskanjem materiala skozi šobo ali šobi podobno opremo. Običajno se uporablja v namiznih 3D-tiskalnikih in industrijskih sistemih aditivne proizvodnje. Nekatere priljubljene metode in tehnologije znotraj AM z ekstrudiranjem materiala vključujejo:

a) Modeliranje s taljenim nanosom (FDM) je ena najbolj znanih in široko uporabljenih tehnik iztiskanja materiala. Deluje s segrevanjem in iztiskanjem termoplastičnega filameta skozi šobo, pri čemer se plast za plastjo nalaga in tako nastane končni predmet. Tehnologijo FDM uporabljajo priljubljeni 3D-tiskalniki, kot sta tiskalnika MakerBot in Ultimaker. Fused Filament Fabrication (FFF) je izraz, ki se izmenično uporablja s FDM in se v bistvu nanaša na isti postopek iztiskanja materiala. FFF/FDM ima več prednosti, npr. na splošno so tiskalniki v primerjavi z drugimi tehnologijami dodajalne proizvodnje cenovno dostopnejši, uporabljajo lahko različne termoplastične materiale, vključno s PLA, ABS, PETG in drugimi, ter so enostavni za uporabo, zato je to široko sprejeta tehnologija 3D tiskanja tako za profesionalno kot ljubiteljsko uporabo.

b) Tiskanje z ekstrudiranjem taline. Ta metoda je podobna metodi FDM, vendar lahko vključuje širši nabor materialov, ki niso omejeni na termoplaste. Vključuje uporabo materialov, kot so vosek, čokolada ali keramika, v staljenem stanju za izdelavo predmetov.

c) Ekstrudiranje peletov. Pri tej različici ekstrudiranja materialov se kot surovina namesto filamentov uporabljajo plastični peleti. Peleti se stopijo in iztisnejo skozi šobo, da se ustvari 3D predmet.

d) Proizvodnja z neprekinjenimi vlakni (Continuous Fiber Fabrication - CFF) je napredna oblika AM, ki združuje tradicionalno 3D-tiskanje z neprekinjenimi vlakni, običajno ogljikovimi ali steklenimi vlakni. Ta tehnologija ponuja več prednosti za ustvarjanje močnih in lahkih kompozitnih delov.

Celovit pregled za uporabnike dodajalne proizvodnje
AddCircles, Interreg SLO – AUT

3. Fotopolimerizacija v kopeli: Tekoča fotopolimerna smola se selektivno utrdi ali polimerizira z uporabo vira svetlobe, običajno laserja ali UV-svetlobe. Primeri postopkov v tej skupini vključujejo:

a) Stereolitografija (SLA) z UV-laserjem strjuje tekočo smolo plast za plastjo. S to tehniko nastanejo zelo podrobni in natančni odtisi, ki se pogosto uporabljajo v aplikacijah, ki zahtevajo natančnost, kot so npr. zobozdravstveni modeli in nakit.

b) Digitalna obdelava s svetlobo (DLP) je podobna SLA, vendar uporablja digitalni svetlobni projektor za hkratno strjevanje celotne plasti smole. Znana je po svoji hitrosti in se uporablja v različnih panogah, vključno z zobozdravstvom in izdelavo nakita.

4. Neposredno lasersko sintranje kovin (DMLS) je postopek 3D tiskanja kovin, pri katerem se za sintranje kovinskega prahu uporablja visokozmogljiv laser. Pogosto se uporablja v letalski, avtomobilski in medicinski industriji za izdelavo kompleksnih kovinskih delov.

5. Brizganje veziva vključuje selektivno nanašanje tekočega veziva na prašni material (kovina, pesek, keramika itd.) plast za plastjo. Ta tehnika se pogosto uporablja za izdelavo kovinskih delov in peščenih kalupov za litje.

6. Material Jetting (MJ) 3D-tiskalniki delujejo podobno kot brizgalni tiskalniki, vendar na gradbeno platformo nanesejo kapljice tekočega fotopolimera. Te kapljice se nato strdijo z UV-svetlobo, da nastane končni predmet. Z brizganjem materiala je mogoče izdelati 3Dprinte z visoko ločljivostjo in iz več materialov.

7. Izdelava laminiranih predmetov (LOM) omogoča izdelavo predmetov s plastenjem in lepljenjem slojev materiala, pogosto papirja ali plastike, ki se nato z laserji ali drugimi metodami razrežejo ali stapljajo. Tehnika LOM je manj razširjena.

8. Continuous Liquid Interface Production (CLIP) je patentirana tehnologija 3D tiskanja, ki uporablja svetlobo in kisik za neprekinjeno strjevanje tekoče smole, kar omogoča hitrejše in učinkovitejše tiskanje.

Tehnologija AM se je začela intenzivno razvijati in uvajati v zgodnjih osemdesetih in devetdesetih letih prejšnjega stoletja. Kot lahko vidimo zdaj, je veliko tehnologij AM, ki so se pojavile pozneje. Podjetja in industrije so od takrat sprejela številne postopke AM, da bi bolje dosegla svoje proizvodne cilje. Zato je seveda pričakovati še naprej razvoj in rast na tem področju.

1.3. Uporaba materialov v dodajalni proizvodnji

Materiali, ki se uporabljajo pri 3D tiskanju, so prav tako pomembni kot sami tiskalniki.

Glede na vrsto je trg materialov za AM razdeljen na plastiko, keramiko in druge, ki vključujejo vosek, les, biomateriale in različne kovine⁴. Leta 2022 je bilo ugotovljeno, da je imel segment kovin največji, skoraj 56% delež, segment plastike pa drugi največji delež na trgu materialov za 3D tiskanje.

Sposobnost AM, da uporablja različne materiale, vključno z recikliranimi, je v skladu z vse večjim poudarkom na praksah krožnega gospodarstva, kar podpira tudi projekt AddCircles. S spodbujanjem ponovne uporabe materialov in zmanjševanjem količine odpadkov aditivna tehnologija prispeva k bolj trajnostnemu in okolju prijaznemu proizvodnemu ekosistemu. Tako so številni članki o „krožnem gospodarstvu 3D tiskanja“ podprti z različnimi viri^{5, 6, 7, 8}.

Prav tako lahko kot primer izrecno navedemo, da recikliranje kovinskih prahov v postopkih dodajalne proizvodnje, kot je fuzija z laserskim prahom (LPBF), prinaša pomembne trajnostne koristi, saj zmanjšuje količino odpadkov in zmanjšuje vpliv na okolje. Vendar pa zahteva skrbno upravljanje, da se zagotovi, da reciklirani prah ohrani stalno kakovost in lastnosti^{9, 10}, saj lahko onesnaženje prahu med proizvodnjo vpliva na kakovost prahu in posledično vpliva na kritične parametre, kot sta debelina in gostota plasti pri LPBF, kar vpliva na ločljivost dela in mehanske lastnosti¹¹. Laboratorijsko testiranje za zagotavljanje kakovosti povzroča zamude, zato proizvajalci zaradi varnosti pogosto zavržejo uporaben prah. Pomembno je, da lahko ponovna uporaba in recikliranje kovinskih praškov drastično zmanjšata ogljični odtis in spodbujata krožno gospodarstvo. Pri tipični uporabi LPBF se lahko uporabi le 20% razpoložljivega prahu, zato recikliranje preostalih 80% zmanjša količino odpadkov. Kovinski praški, ki se uporabljajo v LPBF, so pogosto dragi, zato ima recikliranje finančne koristi.

Na voljo je tudi več drugih znanstvenih člankov na temo recikliranja v AM, ki so zelo dobro povzeti v članku *Napredno recikliranje plastike: Izzivi in priložnosti pri integraciji 3D tiskanja in distribuiranega recikliranja za krožno gospodarstvo (Advancing Plastic Recycling: Challenges and Opportunities in the Integration of 3D Printing and Distributed Recycling for a Circular Economy)*¹², ki med drugim ponuja izčrpen povzetek objavljenih preglednih člankov, nedavnih študij, ki preučujejo faze in izzive recikliranja plastike, skupaj z razčlenitvijo operativnih stroškov po posameznih reciklažnih centrih itd. V tem preglednem članku so navedeni številni viri (približno 250), ki podpirajo te raziskave.

Kot je znano, se polimeri in njihovi kompoziti zaradi svoje prilagodljivosti pri razvoju izdelkov po meri zdaj pogosto uporabljajo v mnogih industrijskih sektorjih. Velik porast uporabe plastike je privedel do resnega izziva pri ravnanju z izrabljenimi plastičnimi odpadki. V študiji *Aditivna proizvodnja za trajnost, krožnost in brez odpadkov: 3DP izdelki iz odpadnih plastenek (Additive manufacturing for sustainability, circularity and zero-waste: 3DP products from waste plastic bottles)*¹³, je predstavljena trajnostna pot za pretvorbo plastičnih odpadkov v surovino za AM, kjer se odpadne plastenke (predvsem polietilen tereftalat, PET) reciklirajo z uporabo lastnega sistema za iztiskanje filamentov s 3D-tiskom za proizvodnjo filamentov za postopek izdelave staljenih filamentov (FFF). Poleg recikliranega PET (rPET) so bili za proizvodnjo hibridnih surovinskih filamentov uporabljeni tudi neobdelani/prvotni polimerni kompoziti poliamida-6 (PA6-CF), ojačeni z ogljikovimi vlakni. Kompozitna vlakna rPET in rPET/PA6-CF so bila ekstrudirana s pomočjo naprave za ekstrudiranje vlaken. Pri rPET sta bila ugotovljena boljša deformacija ob porušitvi in Young modul, kar dokazuje, da so lahko reciklirani materiali ustrezni za industrijsko in potrošniško uporabo. Rezultati te študije so razkrili obetavne rezultate za spodbujanje trajnostne proizvodnje in potrošnje, ki dopolnjujejo prakse krožnega gospodarstva z enostavno proizvodno potjo za pretvorbo plastičnih odpadkov v surovino za AM.

Nekateri izzivi pri proizvodnji z AM tehnologijami so še vedno nerešeni¹⁴. Številni preboji se dogajajo na področju razvoja novih materialov, posebej zasnovanih za 3D-tiskanje, kot sta ekstrudiranje kompozitnih materialov, pri katerem lahko nekateri napredni sistemi za ekstrudiranje materialov delujejo tako, da mešajo različne vrste materialov ali v tisk vključijo ojačitve, in bioprinting, pri katerem se ekstrudirani materiali uporabljajo tudi za ustvarjanje

3D-struktur z živimi celicami in biomateriali, ki se uporabljajo v medicini in tkivnem inženirstvu.

Po navedbah Brombergerja in drugih nekateri izzivi vključujejo izboljšanje hitrosti, celovite avtomatizacije in integracije z obstoječimi proizvodnimi sistemi, reševanje vprašanj v zvezi s certificiranjem, razpoložljivostjo in stroški materialov ter vzpostavljanje spretnosti in procesov za uporabo teh hitro razvijajočih se tehnologij¹⁵. Poleg tega morajo materiali, ki se uporabljajo v AM, izpolnjevati zahteve, kot so sposobnost večkratnega taljenja in strjevanja, enakomerna velikost delcev in nemoten pretok skozi šobo tiskalnika. Te težave materialov za aditivne proizvodne tehnologije zato vključujejo omejen izbor materialov v primerjavi s tradicionalnimi proizvodnimi postopki in manj uveljavljenih standardov za materiale, kar lahko predstavlja izziv, zlasti pri varnostno kritičnih aplikacijah, kot so letalske in medicinske naprave¹⁶. Poleg tega lahko razlike v kakovosti delov nastanejo zaradi dejavnikov, kot je kemijska sestava materiala, zaradi česar je potrebnih več materialov z enakimi lastnostmi. Reševanje teh vprašanj v zvezi z materiali je ključnega pomena za pospešitev uporabe AM v proizvodnji in zagotavljanje konkurenčnosti tehnologije v primerjavi s tradicionalnimi proizvodnimi metodami¹⁷.

Tudi Guggenbiller et al.¹⁸ so pisali o napredku tehnologije 3D tiskanja v smeri trajnosti in zelene proizvodnje, zlasti z osredotočenjem na uporabo naravnih in obnovljivih materialov. Aditivna proizvodnja naravnih izdelkov pridobiva na zagonu s poudarkom na kemijah ali modifikacijah naravnih izdelkov. Uporabljene strategije vključujejo predelavo naravnih polimerov ali polimerov biološkega izvora v filamente za AM na podlagi ekstruzije, oblikovanje fotopolimernih smol in črnih za različne postopke tiskanja ter uporabo praškov za selektivno lasersko sintranje. Pregled obravnava materiale, primerne za AM, njihove fizikalne lastnosti in posledične aplikacije, vključno s prednostmi in omejitvami. V več preglednicah podajata seznam zelenih materialov, ki se lahko uporabljajo za metode tiskanja VP, SLA, DLP, SLS in FFF, ter izpostavljata različne prednosti, povezane z okoljsko trajnostjo, vidiki njihovega recikliranja ali primerjavo nezelenih materialov z zelenimi. Prihodnje priložnosti se skrivajo v biomaterialih in medicinskih pripomočkih, elektroniki in baterijah ter pri sanaciji okolja in čiščenju vode. Navedene so tudi sorodne študije o trajnostnem shranjevanju energije in UV-utrjajočih bioosnovanih termosetih.

Celovit pregled za uporabnike dodajalne proizvodnje AddCircles, Interreg SLO – AUT

Več podjetij, ki se ukvarjajo z materiali za AM, se osredotoča na razvoj novih materialov, kot sta BASF¹⁹ in Evonik Industries²⁰. Podjetja za materiale za AM, kot so General Electric, Sandvik, Höganäs in Carpenter Technology, skrbijo le za trg kovin za AM, vendar so osredotočena na vrhunske industrije, kot sta letalska in vesoljska industrija ter trg industrijskih izdelkov. Tudi druga podjetja za materiale za AM, kot so Materialise, Henkel, Proto Labs, Formlabs, Arkema in Markforged (PEKK in kompozitni materiali za vrhunske aplikacije), ponujajo široko paleto izdelkov, vključno s kovinami, plastiko in keramiko za AM trg.

Razvoj novih materialov za AM naj bi pripomogel k razširitvi področij uporabe metod AM v nišnih sektorjih, kot so tiskana elektronika ter industrija energetike. Podjetje Stratasys je na primer leta 2023 predstavilo novo smolo za AM v zobozdravstvu, ki jo je odobrila FDA. Smola TrueDent je monolitna, barvna AM rešitev za trajne proteze, ki je zasnovana tako, da odpravlja več ovir, ki se pojavljajo v zobozdravstveni industriji, kot so prilagajanje in personalizacija, izboljšana estetika in izboljšana izkušnja pacientov²¹.

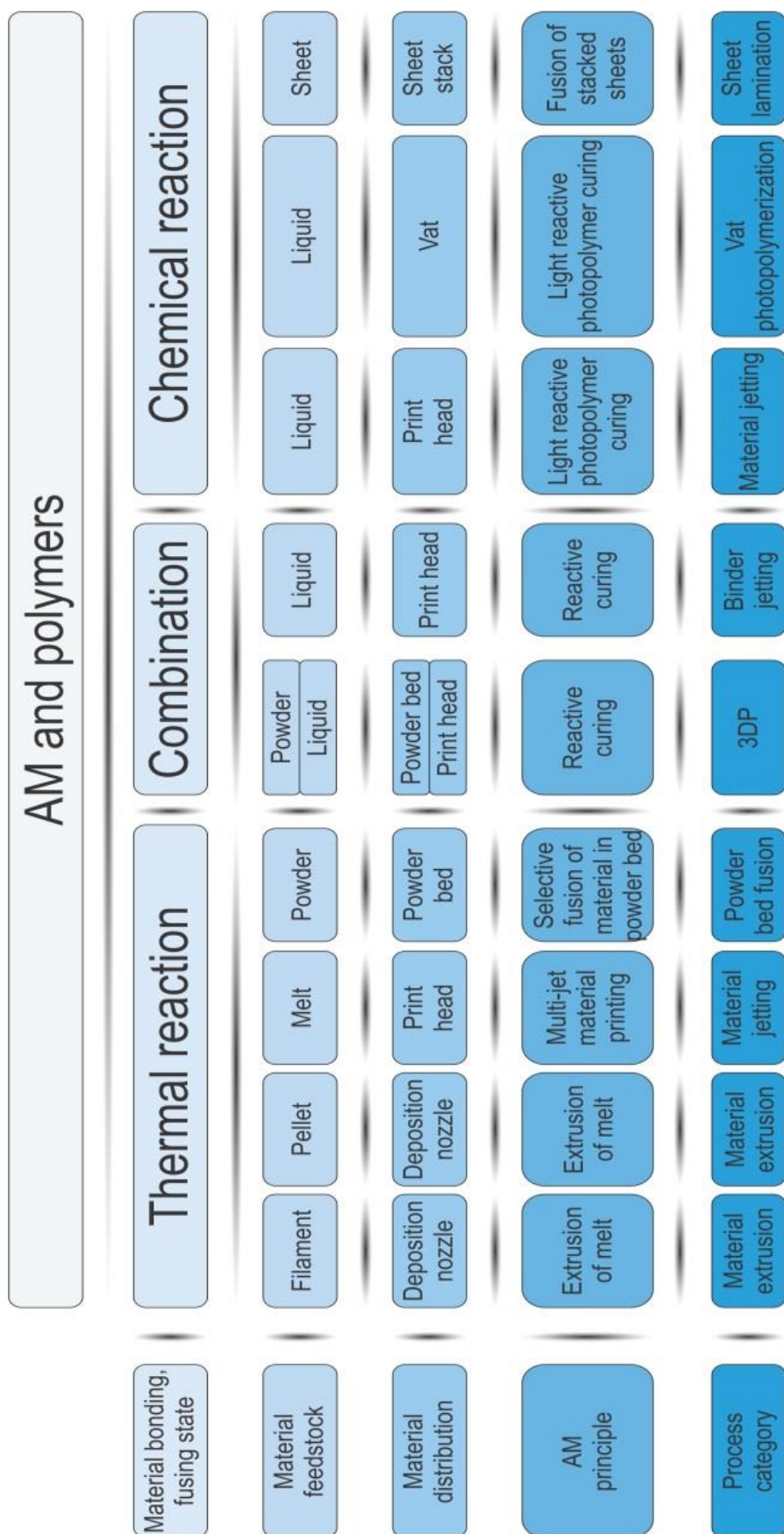
Če povzamemo, je uporaba materialov v AM hitro razvijajoče se področje, ki ponuja številne priložnosti za proizvodnjo številnih izdelkov iz različnih materialov, kot so na osnovi nabe oz. neobnovljivih virov, biološko osnovani, biološko razgradljivi, iz sekundarnih surovin, reciklirani, kompozitni (še en hitro razvijajoči se razred), itd. (Slika 2).

Celovit pregled za uporabnike dodajalne proizvodnje
AddCircles, Interreg SLO – AUT

Composites	Biodegradable	Polymer blends	Polylactic acid, Polycaprolactone, Polyhydroxybutyrate, Polybutylene succinate, Polylactic-co-glycolic acid
		Polymer ceramic composites	Beta-tricalcium phosphate, Zirconia, Alumina, Hydroxyapatite
		Natural fillers in composites	Wood and Wood flour, Bamboo wood and powder, Sugarcane, Kenaf, Cork, Pinus radiata wood chips, Cocoa shell
		Natural fibres in composites	Harakeke, Hemp, Jute fibre, (Continuous) flax fibre, Thermomechanical pulp, Natural cellulose fibre
	Non-biodegradable	Polymer blends	Polyethylene, Polyethylene terephthalate, High-density polyethylene, Polypropylene, Polystyrene
		Polymer metal composites	Iron, Magnetic iron, Aluminium, Brass copper
		Fibre reinforced composites	Short fibre: Carbon fibre Long fibre: Glass fibre, Kevlar fibre
		Nano composites	(Multi-walled) carbon nanotubes, Nano clay, Barium titanate

Slika 2: Primeri kompozitov na osnovi biorazgradljivih in nerazgradljivih polimerov, ki se uporabljajo za dodajalno proizvodnjo

Očitno je, da je izbira veziva (polimera) kot nosilnega medija za material v veliki meri odvisna od izbranega razpoložljivega ali prednostnega postopka AM in obratno. Na naslednji Sliki 3 je opisanih nekaj različnih možnosti izbire polimerov, ki so odvisne od določenega postopka AM, njihove združljivosti reakcij vezave materiala, na Sliki 4 pa so prikazane možnosti izbire materiala glede na stanje surovine²².



Slika 3: Izbira polimera glede na tip izbrane proizvodnje dodajalne tehnike

Celovit pregled za uporabnike dodajalne proizvodnje
AddCircles, Interreg SLO – AUT

AM of polymers			Feedstock state		
Process category	AM technique	Abbreviation	Solid-bulk	Solid-powder	Liquid
Material extrusion	Fused filament fabrication	FFF	x		
	Fused granular fabrication	FGF	x	x	
	Robocasting	/	x		x
Material jetting: thermal bonding of the material	Multijet modelling	MJM			x
	Ballistic particle manufacturing	BPM			x
	Thermojet	/			x
Powder bed fusion	Selective laser sintering	SLS		x	
Binder jetting	3D printing	3DP		x	x
	Binder jetting	/			x
Material jetting: chemical bonding of the material	Stereolithography	SLA			x
	Digital light processing	DLP			x
	Continuous liquid interface production	CLIP			x
Vat photo-polymerization	Multi-photon polymerization	MPP			x
	Two-photon polymerization	2PP			x
Vat photo-polymerization	Laminated object manufacturing	LOM	x		
	Solid foil polymerization	SFP	x		

Slika 4: Dodajalna proizvodnja in možnosti stanja surovine

2. Osnove LCA in njihov pomen pri oblikovanju inovativnih poslovnih primerov

LCA je metodologija, ki obravnava okoljske vplive, povezane z različnimi fazami življenjskega cikla izdelka. Te faze vključujejo pridobivanje surovin, dostavo pridobljenih virov v tovarno, predelavo materialov in proizvodnjo izdelka, uporabo izdelka, popravila in vzdrževanje ter končno ponovno uporabo, recikliranje ali končno odstranitev izdelka. Zaradi celostnega pristopa se LCA izogne problematičnemu prehajanju med kategorijami vpliva na okolje in fazami življenjskega cikla. Zato je LCA dragoceno orodje na različnih področjih, kot so načrtovanje izdelkov ali procesov, odločanje v industriji in politiki ter za trženje.

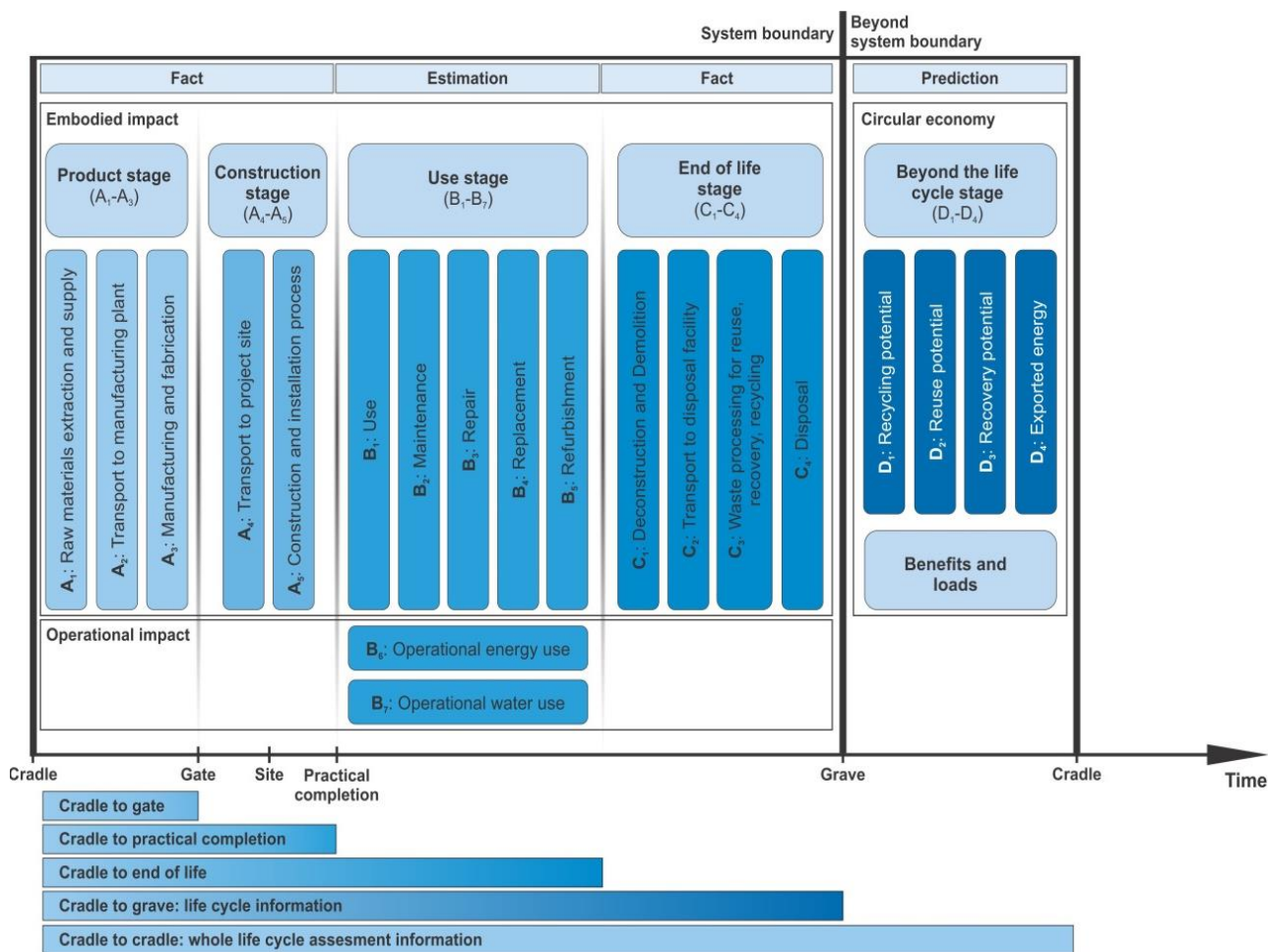
Načela in okvir za LCA so opredeljeni v mednarodnih standardih ISO 14040 ISO 14040²³ in ISO 14044²⁴.

Študija LCA je sestavljena iz štirih faz:

- **Faza opredelitve cilja in obsega določa** kontekst študije z opredelitvijo funkcionalnih ali deklariranih enot, sistemskih meja ter morebitnih predpostavk in omejitev študije.
- **Faza analize popisa** ustvari popis vhodnih in izhodnih tokov v proučevani sistem in iz njega, kot so vhodi vode, energije in surovin ter izhodi v zrak, tla in vodo.
- Cilj **faze presoje vplivov** je oceniti pomen in obseg morebitnih vplivov na okolje na podlagi rezultatov analize tokov iz popisa.
- V **fazi interpretacije** se povzamejo in ovrednotijo ugotovitve iz rezultatov faze analize popisa in/ali faze presoje vplivov glede na opredeljen cilj in obseg študije.

Vse faze so medsebojno odvisne, npr. zbrani popisi življenjskega cikla morajo ustrezati cilju in obsegu glede na čas in prostor. V praksi je zaradi te soodvisnosti LCA iterativen pristop, saj razpoložljivost podatkov na začetku študije LCA pogosto ni v celoti znana. Poleg tega na celoten okvir ocenjevanja življenjskega cikla vpliva njegova domnevna neposredna uporaba in obratno²⁵.

Slika 5 prikazuje glavne faze LCA in ekološke parametre, za katere je treba zbrati informacije o vplivih na okolje, ki se nato preučujejo in ocenjujejo z metodo LCA.



Slika 5: Glavne faze LCA

Na splošno se študija LCA začne z izrecno izjavo o cilju študije, ki določa kontekst študije, opisuje razloge za izvedbo študije in pojasnjuje, kako naj se sporočijo rezultati. Po cilju je treba opredeliti obseg z opisom kvalitativnih in kvantitativnih informacij, vključenih v študijo, kot so opredelitev funkcij sistema izdelka in funkcionalne ali deklarirane enote, sistemskih meja in postopkov dodeljevanja, pa tudi metodologije presoje vplivov na okolje, postopka razlage, vseh predpostavk in omejitev ter zahtev glede kakovosti podatkov.

Izvedejo se lahko različne vrste analiz LCA:

- (i) **od vrat do vrat**, ki ocenjuje okoljske vplive posameznega proizvodnega koraka ali procesa,
- (ii) **od zibelke do vrat (cradle-to-gate)**, ki ocenjuje delni življenjski cikel izdelka od pridobivanja virov („zibelka“) do vrat tovarne (tj. preden je izdelek prepeljan do potrošnika),

(iii) **od zibelke do dokončanja (cradle-to-completion)**, ki ocenjuje delni življenjski cikel izdelka od pridobivanja virov, proizvodnje in prevoza materialov do gradbišča skupaj z emisijami, ki nastanejo med gradnjo,

(iii) **od zibelke do groba**, ki ocenjuje celoten življenjski cikel od pridobivanja virov („zibelka“) do faze uporabe in faze odlaganja („grob“), in

(iv) **od zibelke do zibelke**, ki je posebna vrsta ocene od zibelke do groba, pri kateri je stopnja odstranjevanja izdelka ob koncu življenjske dobe postopek recikliranja, tj. postopek recikliranja se uporablja za ponovno uporabo materialov ali sestavnih delov za drug izdelek („zapiranje zanke“).

Vrsto in strategijo zbiranja podatkov je treba načrtovati že v najzgodnejših fazah študije LCA. Odvisno od novega in osnovnega sistema študije se je mogoče odločiti, ali je treba zbirati podatke za posamezno lokacijo za pomembne procese in/ali povprečne podatke za manj ključne vidike analize LCA. Zbiranje povprečnih podatkov se lahko izvede neposredno iz podatkovnih zbirk LCI. Vendar je za zbiranje podatkov za posamezno lokacijo običajno potrebno več časa, saj vključuje veliko različnih ukrepov, kot so meritve, vzpostavljanje stikov z različnimi zainteresiranimi stranmi, organizacija in udeležba na sestankih, da bi dosegli podjetja, strokovnjake in druge partnerje itd. Zato je lahko zbiranje kakovostnih podatkov dolgotrajen proces, ki zato zahteva aktivno sodelovanje med izvajalci LCA in projektnimi partnerji. LCA je pomemben pri oblikovanju inovativnih poslovnih primerov z ocenjevanjem življenjskega cikla izdelkov. Možno bo predvideti morebitne izboljšave v zvezi z okoljem, saj pomaga pri prepoznavanju in preprečevanju prelaganja bremen, uporabnikom pa omogoča, da določijo najboljše metode za zmanjšanje okoljskih obremenitev²⁶.

Ocenjevanje okoljske uspešnosti izdelka ne bi smelo biti obravnavano le kot povečanje želje proizvajalcev in uporabnikov po trajnostni ozaveščenosti, temveč tudi kot pomembna tržna prednost. Zelo priporočljivo je, da se LCA uporablja skupaj z LCCA^{27,28} saj ta pristop podpira bolj informirano sprejemanje odločitev v skladu z dolgoročnimi okoljskimi in gospodarskimi cilji²⁹.

LCCA upošteva vse stroške, povezane s projektom ali izdelkom, vključno s stroški nabave, proizvodnje, delovanja, vzdrževanja in odstranjevanja. Cilj LCCA je zagotoviti celovito sliko finančnih posledic projekta v celotni življenjski dobi, ki zajema neposredne stroške (ali „zasebne stroške“) in sekundarne (ali „zunanje“) stroške.

Neposredni stroški zajemajo stroške, neposredno povezane s proizvodnjo posameznih izdelkov, vključno s prevozom blaga, sestavljanjem in razstavljanjem izdelkov ter vzdrževanjem in recikliranjem. Te stroške je mogoče razvrstiti v naslednje kategorije:

1. Stroški proizvodnje in priprave surovin vključujejo stroške, povezane s proizvodnjo in pripravo surovin, ki so sestavni del proizvodnega procesa določenega izdelka. Primeri vključujejo elektriko, gorivo, plače zaposlenih in amortizacijo.
2. Transportni stroški zajemajo stroške goriva, plače prevoznikov in amortizacijo prevoznih sredstev. Ti stroški se nanašajo na logistiko premikanja blaga z ene lokacije na drugo.
3. Stroški sestavljanja vključujejo plače, uporabo opreme za naloge, ki se izvajajo na visokih višinah, in elektriko. Stroški sestavljanja zajemajo izdatke, povezane s sestavljanjem komponent izdelka.
4. Stroški vzdrževanja zajemajo stroške energije in reprodukcijskega materiala, potrebnega za redno vzdrževanje proizvodne opreme in objektov.
5. Stroški odstranitve ali recikliranja zajemajo uporabo tovornjakov, plače delavcev, vključenih v dejavnosti odstranjevanja ali recikliranja, ter uporabo odlagališč ali sežigalnic. Ti stroški so povezani s pravilnim odlaganjem ali recikliranjem izdelkov.

Sekundarni stroški se pojavljajo v proizvodnih procesih kot neželeni učinki, ki vplivajo na ekonomske, socialne in okoljske sisteme, pa tudi na odnose med gospodarskimi sektorji, proizvodnjo in okoljem ter proizvajalci in potrošniki. Ti stroški se kažejo tako v denarni kot tehnološki razsežnosti. Predvsem ne upoštevajo negativnih posledic, ki jih lahko ima proizvodnja energije na zdravje ljudi in okolje. Primeri sekundarnih stroškov vključujejo nastajanje emisij CO₂ in SO₄ v izpušnih plinih med zgorevanjem motorjev ali pri proizvodnji električne energije. Poleg tega ti stroški zajemajo posledice nastajanja odpadkov in škodo, ki jo povzroči onesnaževanje s hrupom.

LCA in LCCA sta dragoceni orodji za spodbujanje trajnosti in usmerjanje odločanja k okolju prijaznejšim praksam.

3. Opolnomočenje regionalnih podjetij: Vloga projekta AddCircles pri pospeševanju aditivne proizvodnje in krožnega gospodarstva

Neposredne uporabe LCA za regionalna podjetja in uporabnike AM so:

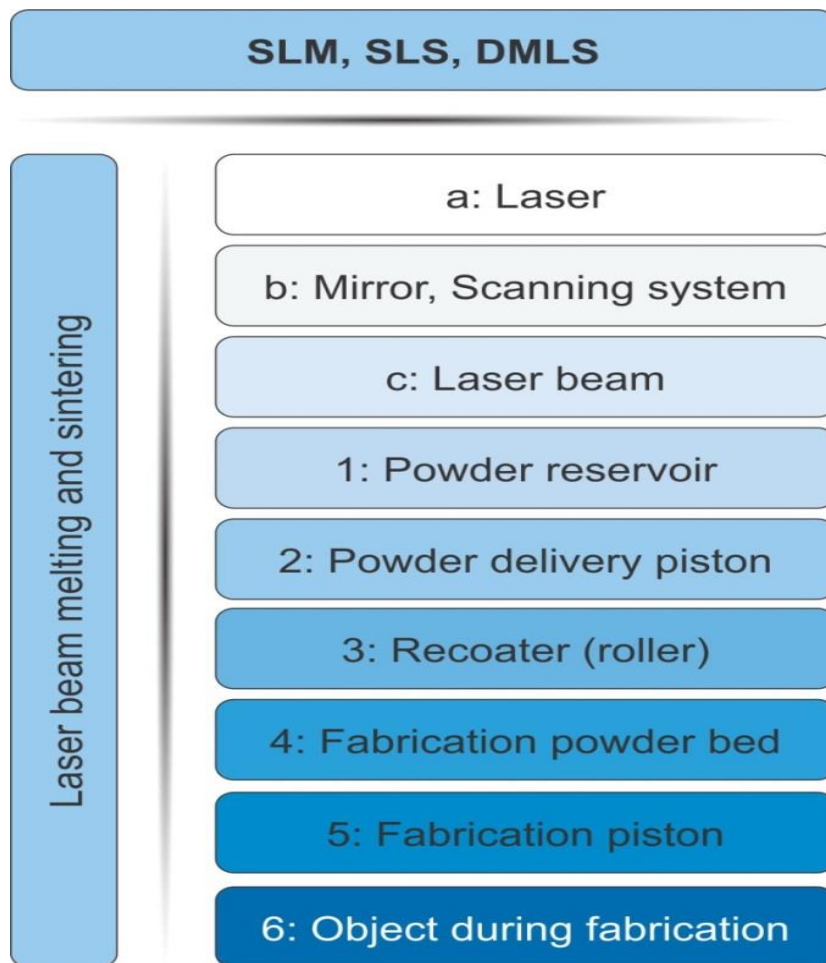
1. razvoj in izboljšave izdelkov,
2. strateško načrtovanje,
3. smernice za oblikovalce politike (okoljske in druge) in
4. trženje.

Vloga projekta AddCircles pri pospeševanju regionalnega poslovanja tako krožnega gospodarstva kot AM odraža njegov najsodobnejši pristop k spodbujanju trajnosti, ki zahteva pregled znanstvenih publikacij, dognanj in s tem tudi TRL pregled različnih AM tehnologij, ozkih grl, in odprta vprašanja na tem območju.

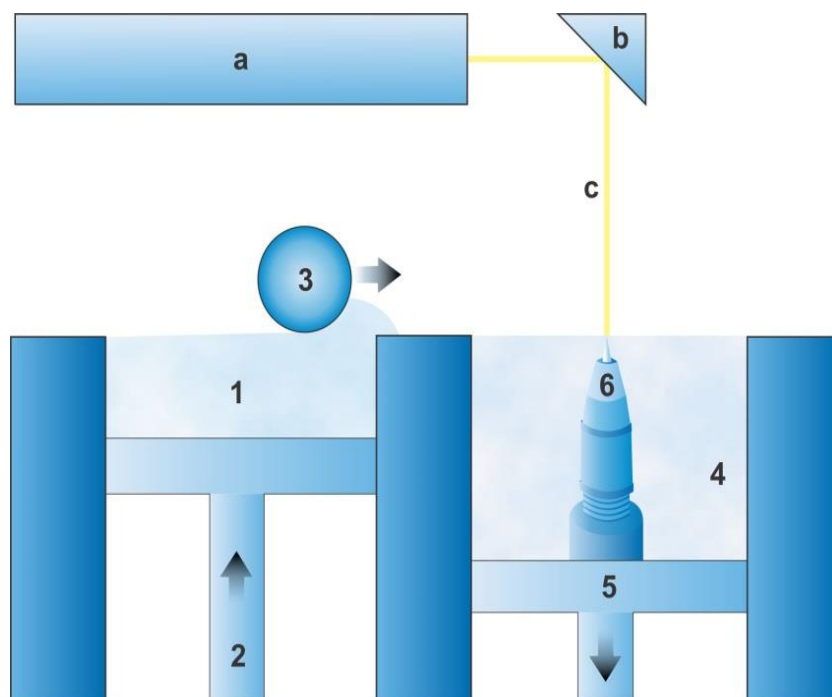
AddCircles se v glavnem osredotoča na AM tehnike, navedene spodaj:

1. PBF, s poudarkom na selektivnem laserskem sintranju (SLS),
2. Ekstrudiranje materialov (MEX) AM, s poudarkom na izdelavi neprekinjenih vlaken (CFF)
3. Neposredno lasersko sintranje kovin (DMLS)

Spodaj ponujamo tabelarični zapis komponent in shematske predstavitve tehnologij aditivne proizvodnje SLS, SLM, DMLS (Slika 6 in Slika 6a), MEX in FDM (Slika 7, Slika 7a, Slika 7b in Slika 7c).



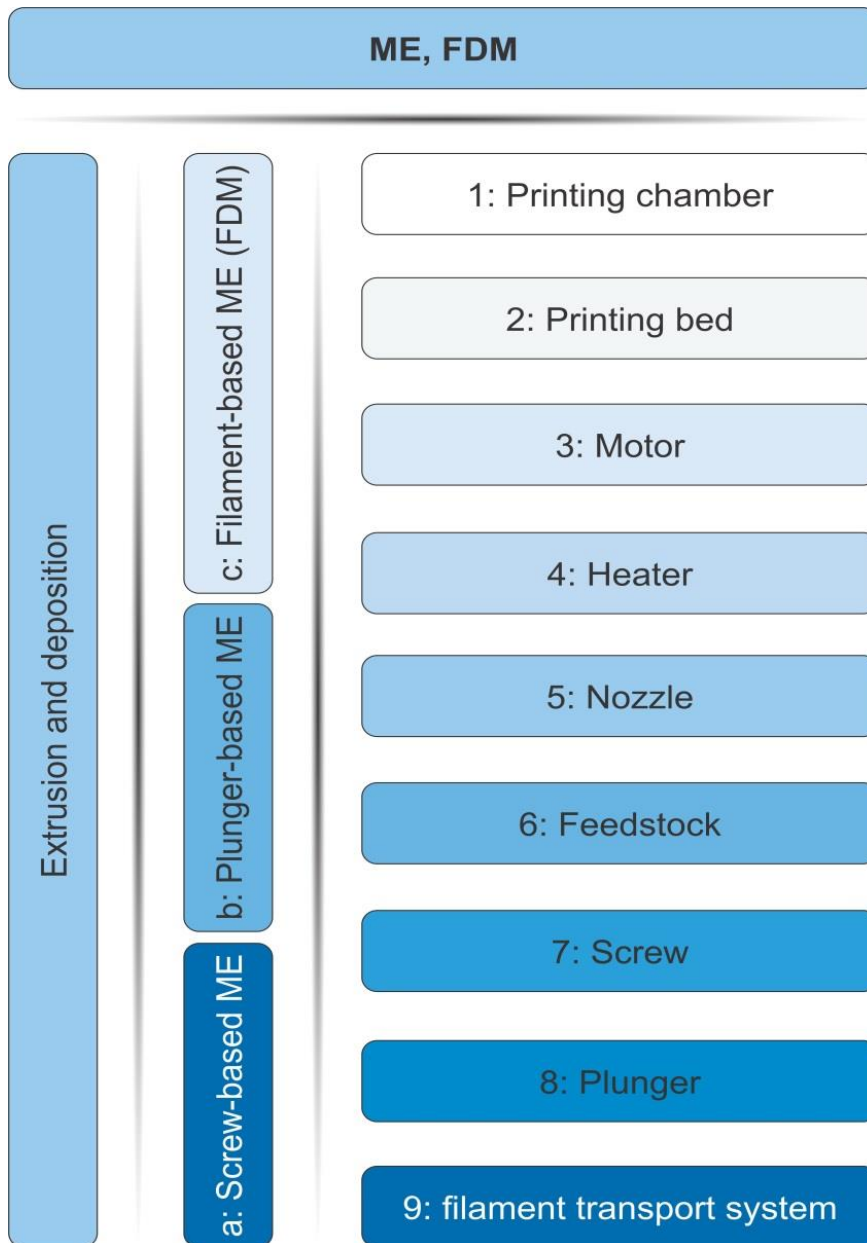
Slika 6: Tabelarični zapis komponent SLS, ME, DMLS in FDM



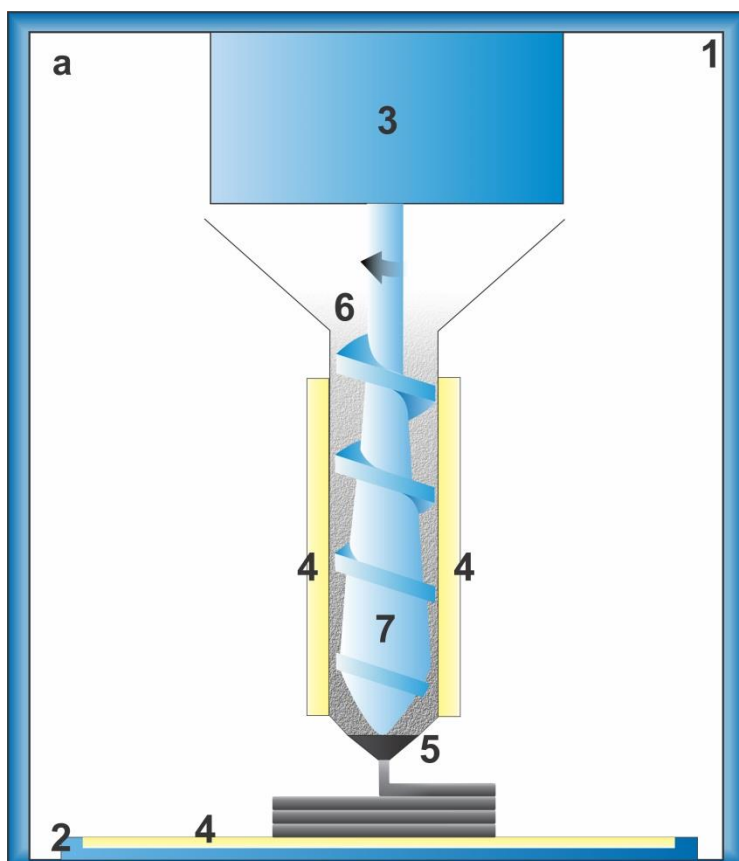
Slika 6a: Shematski prikaz SLS, SLM in DMLS

Specifični podatki o porabi energije za posamezne tehnike AM niso prosto dostopni na spletu, vendar se razume, da imajo tehnike izdelave kovinskih dodatkov, kot je DMLS, običajno višje energetske zahteve v primerjavi s tehnikami SLS, ki tiskajo materiale na osnovi plastike.

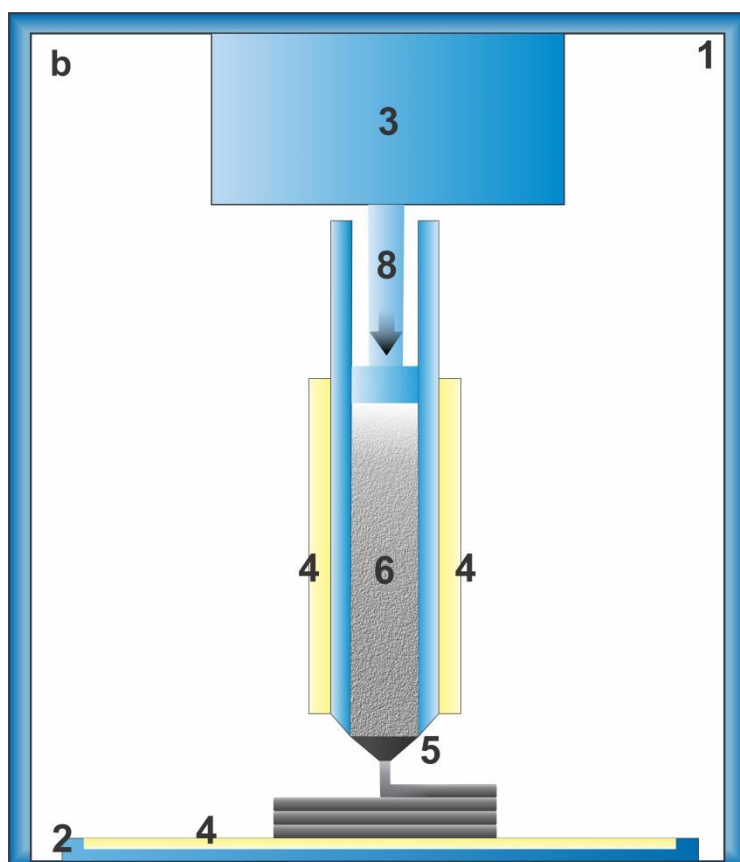
Postopek SLM je idealen za čiste kovine, kot sta titan ali aluminij, in zahteva višjo temperaturo kot druge tehnike 3D tiskanja kovin, kot je DMLS. DMLS je sposoben tiskati funkcionalne kovinske dele visoke trdnosti, vendar je ugotovljeno, da je znatno dražji od SLS z višjimi energetske zahtevami in dražjimi surovinami³⁰. O merilu energetske učinkovitosti za ocenjevanje energetske učinkovitosti procesov selektivnega laserskega taljenja so razpravljali v študiji Hu et al., 2023³¹. Poleg tega standardi ISO/ASTM 52910:2018 vključujejo energetske učinkovitost z obravnavo optimizacije uporabe materiala, teže in koncentracije napetosti v dizajnih³².



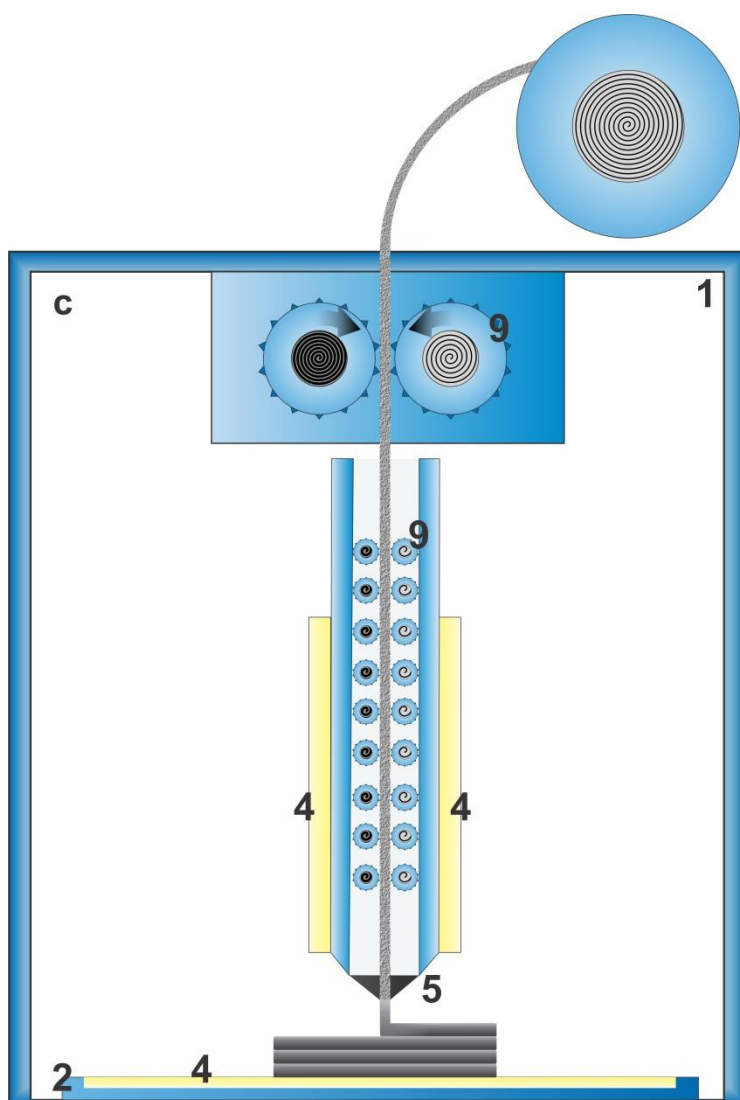
Slika 7: Tabelarični zapis komponent ME in FDM



Slika 7a: Shematki prikaz dodajalne proizvodnje ekstruzije materiala s polžem



Slika 7b: Shematki prikaz dodajalne proizvodnje ekstruzije materiala z batom



Slika 7c: Shematski prikaz ekstrudiranja filamentov z aditivno proizvodnjo

Čeprav lahko ME dokaže nižjo porabo energije v primerjavi s tradicionalnimi proizvodnimi metodami in postopki FDM, je treba za natančno oceno splošnih energetske potreb vsake metode aditivne proizvodnje upoštevati posebne uporabljene materiale, uporabljene nastavitve in proizvodne stopnje³³. Študija, ki je analizirala porabo energije in natezno trdnost poli(metil metakrilata) v ME, je poudarila vpliv različnih krmilnih nastavitev na energetske zahteve in mehanske lastnosti delov³⁴. Dejavniki, kot so temperatura ekstrudiranja, ogrevanje vgradne plošče, hitrost tiskanja in sistemi motorja/gibanja, igrajo pomembno vlogo pri vplivu na porabo

energije v procesih ME³⁵. Na primer, v procesih, kot je FDM, se precejšen del energije porabi za ogrevanje okolja med proizvodnjo³⁶.

Za oceno okoljskih posledic inovativnih rešitev, ki izhajajo iz projekta AddCircles, načrtujemo izvedbo celovite ocene poslovnih primerov AddCircles z uporabo LCA. Zato se bo naslednje poglavje 3.1 poglobilo v ustrezne objavljene znanstvene raziskave v zvezi z AM in LCA. V 4. poglavju bomo podali temeljni pregled načel LCA.

3.1. Pregled znanstvenih izsledkov o aditivni proizvodnji in oceni življenjskega cikla

Med hitrim napredkom na različnih področjih, nastajajoči procesi in tehnologije 3D-tiskanja poudarjajo pomen seznanjanja z znanstvenimi publikacijami. Kljub napredku na trgu, zelene aditivne proizvodnje ostajajo izzivi, ki zahtevajo znanstvene raziskave in strokovno znanje na področju tehnične izvedbe, izbire materialov, obdelave, simulacije procesov AM, simulacije komponent, analize življenjskega cikla in načel krožnega gospodarstva.

Vzpon tehnik 3D-tiskanja je delno mogoče pripisati tudi vse večji okoljski ozaveščenosti. Posledično je na tem področju vse več raziskav in člankov, osredotočenih na LCA.

AM se je izkazal kot pomembna digitalna tehnologija pri izboljšanju proizvodne učinkovitosti. Zato so v študiji *Proti trajnostni proizvodnji za prehod na aditivno proizvodnjo: študija primera v predelovalni industriji (Towards Sustainable Production for Transition to Additive Manufacturing: A Case Study in the Manufacturing Industry)*³⁷ raziskali vplive, preoblikovanih izdelkov za prehod v AM tehnologije, na trajnostne proizvodne procese. V tej študiji je bil izdelek v industrijskem merilu preoblikovan v skladu z načeli AM in izdelan s tehniko FDM. Vplivi proizvodnih metod na okolje so bili ocenjeni glede na porabo materiala in emisije ogljikovega dioksida (CO₂), z uporabo LCA. Tako je glede na rezultate LCA uporaba ene same vrste materiala in proizvodne metode za preoblikovan izdelek ter zmanjšanje količine uporabljenega materiala z odpravo pritrdilnih elementov povzročila 60,45 % zmanjšanje porabe materiala in 85,59% zmanjšanje pri emisijah CO₂ v primerjavi s konvencionalno proizvodnjo. Čeprav je proizvodni čas pri običajni proizvodnji krajši od FDM, je potreba po oblikovanju kalupa in izdelavi s predhodno obdelavo podaljšala dobavni čas. Rezultati kažejo, da so stroški materiala na enoto za obe metodi izdelave zelo podobni.

Kot raziskovalno delo je bil objavljen tudi članek *Primerjalni LCA konvencionalne proizvodnje v primerjavi z aditivno proizvodnjo: primer brizganja recikliranih polimerov članek (Comparative LCA of Conventional Manufacturing vs. Additive Manufacturing: The Case of Injection Moulding for Recycled Polymers)*³⁸. Primerjalna analiza je bila izvedena med dvema proizvodnima procesoma z uporabo črnih recikliranih peletov akrilonitril butadien stirena, da bi ocenili potencialne vplive na okolje med brizganjem kot CM (konvencionalna proizvodnja) in FDM 3D tiskalnikom kot AM. Sprejeta sta bila metodologija LCA in popis življenjskega

cikla enote. Študija se je osredotočila predvsem na primerjavo potenciala globalnega segrevanja (GWP), kumulativnega povpraševanja po energiji in mehanske natezne trdnosti delov, proizvedenih z uporabo CM in AM. GWP obeh sistemov CM in AM je bil ocenjen z dvema različnima metodama, Impact 2002+ (Priloga št. 1) in ReCiPe 2016 (Priloga št. 2). Opaženo je bilo, da se GWP delov AM spreminja z različnimi odstotki polnila. Rezultati so pokazali, da je povečanje odstotka polnila v delih AM povzročilo povečanje kumulativnega povpraševanja po energiji. Nasprotno pa je GWP CM pokazal zmanjšanje, ko se je povečala velikost serije. Ko se je velikost serije CM povečala s 7 na 14 delov, se je GWP zmanjšal za do 40%. Poleg tega je prišlo do 56 % zmanjšanja GWP za velikost serije CM 50 delov v primerjavi s 14 deli. To zmanjšanje je bilo pripisano zmanjšani porabi električne energije na del, ko so se velikosti serij povečale. Pokazala se je pozitivna korelacija med tema dvema dejavnikoma.

Trajnost je koncept zadovoljevanja trenutnih potreb družbe, hkrati pa varuje potrebe prihodnjih generacij. Cilj študije Ocena okoljskega življenjskega cikla avtomobilske komponente, izdelane z aditivno in konvencionalno proizvodnjo (*Environmental life cycle assessment of an automobile component fabricated by additive and conventional manufacturing*)³⁹, je oceniti okoljski odtis sestavnih delov, izdelanih s postopki AM in CM. Ta študija posebej ocenjuje nihajno roko, avtomobilsko komponento, glede na njeno zasnovo, uporabo surovin, proizvodne procese in njihove učinke na posledice življenjskega cikla procesov AM in CM. Komponenta je preoblikovana z uporabo optimizacije topologije in pristopa Design for Additive Manufacturing (DfAM). Izvedena je bila študija LCA od zibelke do vrat te komponente. Informacije za inventar življenjskega cikla so pridobljene iz literature, ustreznih baz podatkov in poskusov. Rezultati kažejo, da ima nihajna roka, ki jo proizvaja CM, manjšo okoljsko škodo za 14,53% v primerjavi z AM brez optimizacije topologije. AM z optimizacijo topologije ima 21,31% manj okoljske škode v primerjavi s CM. Energija, porabljena za proizvodnjo izdelkov s postopkom selektivnega laserskega taljenja (SLM), je glavni vzrok okoljskega odtisa. Z vključitvijo optimizacije se zmanjša vpliv na okolje zaradi zmanjšane porabe električne energije in materiala.

V članku *Okoljska presoja selektivnega laserskega taljenja in selektivnega laserskega sintranja (Environmental Assessment of Selective Laser Melting and Selective Laser Sintering)*⁴⁰, Kellens et al. ocenil proizvodne postopke SLM in SLS kot sposobne izdelati kompleksne skoraj neto oblikovane obdelovance, ki ponujajo možnosti za minimalne odpadke in trajnostno proizvodnjo. Beležili so porabo električne energije in porabljenega materiala. Dokument na podlagi izvedenega LCA opisuje možnosti izboljšav za SLM/SLS stroje s selektivnim vklapljanjem in izklapljanjem podsistemov, uvedbo zunanjih hladilnih ciklov,

skrajšanjem skupnega strojnega časa (v stanju pripravljenosti) in zmanjševanjem proizvodnega časa (npr. učinkovitost gnezdenja, višina zgradbe). Pri uporabi materiala, predvsem za SLS, je bil ugotovljen velik vpliv na okolje zaradi velike količine odpadnega prahu. Poleg ukrepov, ki povečujejo učinkovitost gnezdenja (npr. zmanjšanje višine), bi lahko optimalnejši postopki recikliranja zmanjšali količino odpadkov.

Dotchev et al.⁴¹ predstavijo praktično metodo za zbiranje in ločevanje nesintranega prahu. Za nadzor kakovosti vhodnega materiala in učinkovitejšo uporabo svežega prahu predlagajo uporabo različnih stopenj glede na pretok taline recikliranega prahu. Najpomembnejša je premišljena izbira opreme SLM/SLS (npr. optimalna velikost procesne komore in strukture posode), saj fleksibilne procesne komore omogočajo izdelavo najrazličnejših izdelkov (serij) na isto strojno orodje, ki omejuje ustvarjen vpliv na okolje.

Nagarajan in Haapala⁴² sta ugotovila, kako DMLS prispeva k vplivom na okolje (izgube materiala in energije) z uporabo energetske analize in z uporabo življenjske cikla na veliki proizvodni skali. Vpliv DMLS praškov železnih kovin na okolje je bil okarakteriziran s termodinamično analizo in porabo energije ter ocene od zibelke do vrat. Ugotovljeno je bilo, da le 6 % vseh procesnih vložkov v DMLS prispeva k obdelavi materiala, medtem ko se 94 % izgubi kot veliki odpadki, toplota in delo. Rezultati kažejo, da poraba električne energije ključno prispeva k centralnemu procesu in z njim povezanim procesom skaliranja. Sistemski vpliv GWP za DMLS je bil določen na 7,2 kg CO₂ eq. Splošni kazalnik ReCiPe 2008 (metodologija, ki se uporablja za ocenjevanje in količinsko opredelitev vplivov izdelkov in procesov na okolje v več kategorijah, kot so zdravje ljudi, kakovost ekosistema in izčrpavanje virov) kaže, da je škoda za zdravje ljudi večja od škode za kakovost ekosistema (kakovost ekosistema = 84 %, zdravje ljudi = 58 %, izčrpanost virov = 51 %) in razpoložljivost virov (kakovost ekosistema = 74 %, zdravje ljudi = 29 %, izčrpanost virov = 19 %) za postopek DMLS.

Seveda, medtem ko primeri in ugotovitve raziskav podpirajo okoljske koristi aditivne proizvodnje, je pomembno priznati, da ta tehnologija morda ne bo povsod presegla tradicionalnih proizvodnih metod v smislu okolju prijaznosti. V določenih scenarijih se lahko konvencionalne proizvodne metode izkažejo za bolj trajnostne, zlasti če upoštevamo posebne materiale, obseg proizvodnje ali operativno učinkovitost. Poleg tega lahko analiza življenjskega cikla izdelkov, proizvedenih s postopki dodajanja, razkrije skrite okoljske stroške, kot so tisti, povezani z odlaganjem neuporabljenih ali okvarjenih materialov, ali energetsko intenzivno naravo nekaterih dodajalnih tehnik. Številni primeri in študije poudarjajo pretanjeno naravo te primerjave, kot je prikazano v naslednjih primerih.

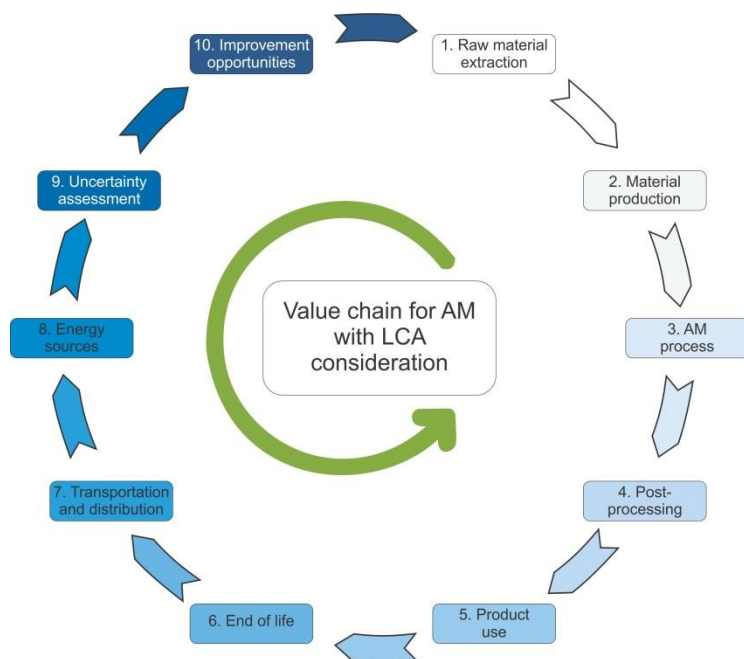
Študija, ki je primerjala podatke AM iz LCA literature s podatki o običajni proizvodnji iz baze podatkov Granta EduPack⁴³ je pokazala, da kovinski AM na splošno kaže višje ogljične odtise na kg obdelanega materiala v primerjavi s postopki CM, kot so litje, ekstrudiranje, valjanje, kovanje in vlečenje žice. Dejavniki, ki vplivajo na trajnost, vključujejo geometrijo delov, pri čemer je AM ugodnejši za votle lupine ali rešetke, in uporabo v vesoljski industriji, kjer lahko lahki deli zmanjšajo vplive. Zato priporočila vključujejo uporabo ustrežnejših funkcionalnih enot za primerjave, kot so standardni referenčni deli, ki predstavljajo tipične aplikacije v kovinskih AM in CM. Celoviti LCA bi moral upoštevati vplive, ki presegajo procesno energijo, vključno s potrošnim materialom, kot je argon za AM in orodje za CM, ter vplive materialov in vidike ob koncu življenjske dobe. Tudi študija primera brizganja recikliranih polimerov⁴⁴ kaže, da je vpliv FDM na okolje manjši pri velikostih serij, manjših od 14 delov. Pri večjih serijah pa je lahko običajna proizvodnja okolju prijaznejša. V nekaterih primerih ima lahko AM večji toksični vpliv na človeka v primerjavi s konvencionalno proizvodnjo, vendar to ne pomeni nujno, da je AM slabši v vseh pogledih⁴⁵. Pregledni članek o LCA AM procesov⁴⁶ razpravlja o LCA analizah AM procesov, vendar pa ne daje dokončnega odgovora, ali je AM slabši ali boljši od običajne proizvodnje. Če povzamemo, rezultati iskanja ne dokazujejo vedno dokončno, da ima AM slabši ali boljši vpliv na okolje kot običajna proizvodnja v vseh scenarijih. Raziskave različnih vidikov in orodij AM, vključno z *EcoPrintAnalyzer: Ocenjevanje trajnosti v aditivni proizvodnji ekstruzije materialov za informirano odločanje (EcoPrintAnalyzer: Assessing Sustainability in Material Extrusion Additive Manufacturing for Informed Decision-Making)*⁴⁷, poudarja potencial za izboljšanje trajnosti z ozaveščanjem o njegovih koristih za okolje. Ključna gonila sta optimizacija dizajna in večja ozaveščenost, ki inženirjem omogočata ustvarjanje učinkovitejših dizajnov. Orodje EcoPrintAnalyzer, vtičnik za UltiMaker Cura, pomaga oceniti okoljski vpliv AM z zagotavljanjem podatkov o ogljičnem odtisu in porabi energije. Spodbuja premišljene odločitve o materialih in oblikah, zmanjševanje odpadkov in izboljšanje energetske učinkovitosti. Študija primera z uporabo modela 3DBenchy prikazuje učinkovitost in enostavnost uporabe orodja pri optimizaciji procesov AM za trajnost. Ker se znatno povpraševanje po energiji sistematično obravnava tudi kot eden od glavnih razlogov za ekološko škodo v FFF, strategije ublažitve pogosto temeljijo na skrajšanju časa tiskanja (na primer uporaba debelejših plasti) ali znižanja porabe energije na del (npr. z gnezdenjem, kar pomeni s tiskanjem več delov hkrati). Pričakuje se tudi, da bo uporaba električne energije iz obnovljivih virov povečala trajnost porazdeljene proizvodnje prek FFF⁴⁸.

Pomembni znanstveni članek, ki obravnava aditivno proizvodnjo z ekstruzijo materiala (MEX) v lahkih konstrukcijah in njen vpliv na okolje prek LCA, je naslovljen z *Ekstruzija materiala novih lahkih kolinearnih polimernih rešetk izdelanih z AM (Material extrusion additive manufacturing of novel lightweight collinear stayed polymer lattices)*⁴⁹.

Študija *Primerjalna analiza ocene življenjskega cikla aditivnih proizvodnih tehnik SLS in mFFF za proizvodnjo kovinskega vzorca (Additive Manufacturing Techniques for the Production of a Metal Specimen)*⁵⁰, predstavlja podrobno analizo LCA, ki primerja SLS z modificirano izdelavo taljenih filamentov (mFFF). Poudarja, da ima SLS bistveno nižjo porabo energije in vpliv na okolje v primerjavi z mFFF, zaradi česar je bolj trajnostna možnost za proizvodnjo kovinskih vzorcev. Ocena zajema različne kategorije vpliva, vključno s potencialom globalnega segrevanja in izčrpavanjem virov.

V literaturi je primerjava poročil LCA izziv zaradi razlik v podatkih v raziskovalnih člankih in metodologijah LCA. Vsak LCA morda ne vključuje dosledno istih podatkov ali jih enotno predstavlja. Poleg tega je rezultat LCA pogosto odvisen od opredeljene vrednostne verige za določen izdelek^{51,52,53} (see Slika 8) ter obsega in namena LCA, kar smo podrobneje opisali v poglavju o osnovah LCA analize.

Omeniti moramo, da je AM preoblikovala tradicionalne dobavne verige s preходом iz potisnega v vlečni sistem. O tem, kaj ta oblika dobavne verige prinaša, si lahko preberete v članku *Posledice aditivne proizvodnje na upravljanje dobavne verige (Implications of Additive Manufacturing on Supply Chain Management)*⁵⁴, ki raziskuje tveganja, priložnosti in strategije, ki jih podjetja uporabljajo za prilagajanje. Ključne spremembe vključujejo izboljšani čas, kakovost, hitrost in vpliv na okolje, kar vodi k boljšemu upravljanju virov, nižjim stroškom, krajšim dobavnim časom in povečanemu zadovoljstvu strank s prilagajanjem. Pridobljena fleksibilnost in učinkovitost sta v skladu s cilji trajnostnega razvoja in nakazujeta prihodnje trende v industriji⁵⁵.



Slika 8: Vrednostna veriga ocene življenjskega cikla za aditivno proizvodnjo

Poenostavljena splošna vrednostna veriga za AM z upoštevanjem LCA:

Ad.1: Ocena vplivov pridobivanja surovin na okolje (poraba energije, emisije itd.).

Ad. 2: Predelava surovin v ustrezno obliko za tisk (filamenti, prah itd.). Ocena porabe energije, emisij in odpadkov pri proizvodnji.

Ad. 3: Upoštevanje porabe energije, emisij in odpadkov, ki nastanejo med tiskanjem.

Ad. 4: Analiza okoljskih vplivov korakov naknadne obdelave, npr. odstranjevanje nosilne strukture, čiščenje in končna obdelava potiskanega predmeta.

Ad. 5: Ocena porabe energije v življenjski dobi izdelka. Upoštevanje dejavnikov, kot so vzdrževanje, popravila in energetska učinkovitost.

Ad. 6: Ocena možnosti odstranjevanja (reciklaža, odlaganje itd.) ob koncu življenjske dobe. Kvantificiranje vpliva odlaganja na okolje.

Ad. 7: Upoštevanje porabe energije in emisij, povezanih s prevozom in distribucijo surovin in končnih izdelkov.

Ad. 8: Pregled vseh virov energije, ki se uporabljajo skozi njihov življenjski cikel (obnovljivi ali neobnovljivi). Normiranje in ocena vplivov na okolje na podlagi upoštevanja vseh energentov.

Ad. 9: Ocena negotovosti v podatkih in predpostavkah za razumevanje stopenj zaupanja v rezultate LCA.

Ad. 10: Identifikacija področij za optimizacijo (npr. izbira materiala, energetska učinkovitost tiskanja, zmanjšanje odpadkov) in raziskovanje raziskovalnih poti za boljše modele in podatke LCA.

Čeprav je nizka količina odpadkov materiala pri uporabi AM okolju prijazna, je treba njene vplive na okolje oceniti z uporabo LCA. Sprejetje postopkov AM je treba oceniti tudi ekonomsko, da se zagotovi njihova gospodarska upravičenost. V študiji *Ocena življenjskega cikla in ekonomika aditivnih proizvodnih procesov (Life cycle assessment and economics of additive manufacturing processes)*⁵⁶, so pregledane obstoječe študije o LCA in ekonomski oceni procesov AM. Učinkovitost AM procesov so primerjali tudi s tradicionalnimi proizvodnimi tehnologijami in okoliščinami, v katerih je AM okolju prijaznejši in poceni v primerjavi s konvencionalnimi proizvodnimi procesi. Strokovnjaki AM lahko uporabijo ta pregled, da izberejo bolj ekonomičen in ekološki proizvodni proces za svoje izdelke ter zmanjšajo emisije in proizvodne stroške.

V nadaljevanju podajamo tudi povzetek poročila Ex-ante ekološka učinkovitost aditivnih proizvodnih tehnologij (*Ex-ante ecological performance of additive manufacturing technologies*)⁵⁷, ki sta ga leta 2023 oblikovala Wood K plus (dr. Franziska Hesser, Julia Velkovski) in Fraunhofer Austria (dr. Arko Steinwender). Da bi bolje izkoristili ekološki potencial proizvodnih tehnologij AM, je bil njihov cilj sistematično raziskati okoljske vidike in možne vplive med razvojem za industrijsko uporabo ter izpeljati priporočila za ukrepanje:

Cilj študije je bil uporabiti pristop od spodaj navzgor (z vidika tehnologije ali aplikacije) in pristop od zgoraj navzdol (z vidika ocene življenjskega cikla), da bi ugotovili, na katerih področjih je mogoče lokalizirati ekološke prednosti AM in kako te so izražene kvantitativno. Dodaten cilj je bil ugotoviti, kako je mogoče te ekološke koristi uporabiti za podporo preobrazbe k bolj trajnostni proizvodnji in gospodarstvu. Prvič, študija je opredelila začetne prednosti AM v smislu njegovega vpliva na okolje, pri čemer so to nizke zahteve po surovinah, prilagodljiva zasnova izdelka, decentralizacija in s tem povezano zmanjšanje transporta, manjše število posameznih delov, avtomatizacija, možnosti popravil prek AM in lahka konstrukcija. Po drugi strani sta bili kot kritični žarišči opredeljeni tudi poraba energije in poraba materialov. Največji porabniki energije so pridobivanje surovin, proizvodnja materialov in proces tiskanja. Poraba energije je odvisna od vzorcev uporabe, uporabe opreme, izbranega materiala, postopka AM in kompleksnosti komponente. Vendar pa je mogoče prihraniti z

optimizacijo razporeditve komponent, optimizacijo proizvodnega procesa ter primerno zasnovano procesa in komponent. Medtem ko se pri uporabi materialov kritizira pomanjkanje možnosti recikliranja, se raznolikost in učinkovitost materialov obravnavata kot prednost.

Drugič, študija je opredelila tudi izzive in potencial AM v primerjavi z običajnimi postopki. Ti izzivi vključujejo povečanje učinkovitosti uporabe prahu, povečanje učinkovitosti proizvodnega procesa, visoko porabo energije pri proizvodnji, nizko kakovost površine, visoko porabo energije pri proizvodnji prahu, recikliranje odpadkov in okolju prijazno uporabo večjih količin. Identificirani potenciali so prihranek materiala, lahka konstrukcija, boljša okoljska učinkovitost pri visoki izkoriščenosti zmogljivosti, možnost uporabe hibridnih procesov, visoka učinkovitost pri majhnih serijah, možnost okolju prijazne proizvodnje geometrično kompleksnih delov in fleksibilnega dizajna, zmanjšanje odpadkov, možnost proizvodnje brez orodja, prihranek energije v celotnem življenjskem ciklu izdelka in možnost individualizirane velikoserijske proizvodnje uporabniško definiranih komponent.

V smislu LCA avtorji študije ugotavljajo, da primerjava obstoječih okoljskih podatkov predstavlja velik izziv, saj študije izbirajo različne funkcionalne enote in sistemske meje. Poleg tega se podatki običajno nanašajo na določeno aplikacijo, ne da bi upoštevali možnost prenosljivosti v druge aplikacije. Znanstvena skupnost zato zahteva standardizirane metode in modele.

vtorji študije so izvedli tudi serijo večperspektivnih strokovnih panelov na delavnicah, kjer so v sodelovanju z ustreznimi deležniki iz industrije identificirali izzive in vpliv na AM. Na podlagi teh intervjujev so bili kot najpomembnejši izzivi opredeljeni energetska učinkovitost, varčevanje z viri in zmanjšanje količine odpadkov, recikliranje in krožno gospodarstvo, varstvo okolja z zmanjšanjem uporabe nevarnih snovi, prihranki CO₂ in podaljšanje življenjske dobe izdelkov. AM ponavadi ugodno vpliva na ohranjanje virov, prihranke CO₂ in podaljšuje življenjsko dobo izdelkov.

Končno, študija predlaga priporočila za ukrepanje za ekološko proizvodnjo prek AM temelji na pregledu literature, intervjujih s strokovnjaki iz industrije in LCA. Priporočila za ukrepanje so razdelili v tri skupine: industrijo, raziskave in javnost. Za industrijo je študija priporočila uporabo ekološke zasnove, ki temelji na inteligentni uporabi in izdelavi izdelkov, podaljšanju življenjske dobe izdelkov in recikliranju materialov ter uporabi bioloških materialov in sekundarnih materialov, uporabi odpadnih materialov, tako znotraj in zunaj AM sektorja, optimizacija in avtomatizacija procesov ter krepitev izmenjave izkušenj med podjetji. Za

raziskave in razvoj avtorji priporočajo razvoj rešitev za lažjo ekološko presojo, sistematično obdelavo različnih konceptov uporabe in aplikacij, povečanje učinkovitosti v materialu in proizvodnji ter razvoj novih ali izboljšanih simulacijskih orodij, ki temeljijo na načelih ekološkega dizajna. Nazadnje, študija politike in javnega sektorja priporočata povečanje financiranja raziskav in programov usposabljanja, spodbude za upoštevanje življenjskih ciklov na ravni končnega izdelka, izmenjavo informacij in razvoj skupnih strategij za bolj zeleno proizvodnjo, povečan dialog s sektorjem AM, ustvarjanje več infrastrukture za recikliranje in spodbujanje uporabe sekundarnih materialov, ustvarjanje standardov za zahteve glede kakovosti in merila za različne aplikacije in industrije AM ter ustvarjanje spodbud v drugih industrijah.

Da bi izboljšali naše razumevanje vplivov na okolje, postane nujno izvesti temeljite študije LCA za vsako omenjeno fazo procesa AM in obravnavati vsak primer posebej.

4 Primeri najboljših praks v aditivni proizvodnji in priporočila za MSP

AM se je hitro razvila in ponuja različne priložnosti za inovacije in učinkovitost. Za mala in srednje velika podjetja (MSP) lahko uvedba AM znatno poveča produktivnost in kakovost izdelkov. Po pregledu literature ugotavljamo, da je bil AM uspešno implementiran na različnih področjih, npr. za dele avtomobilske industrije, medicinsko in športno opremo, različne kompleksne industrijske izdelke, itd. V nadaljevanju predstavljamo nekaj uspešnih zgodb implementacije AM, ki so našle svoje mesto na trgu in končni uporabi.

4.1 Primeri najboljših praks v aditivni proizvodnji

Podjetje GE Aviation že od leta 2015 aktivno tiska 3D šobe za gorivo za reaktivne motorje in je leta 2018 doseglo skupno 30.000 3D natisnjenih šob za gorivo v svojem centru za proizvodnjo aditivov v Auburnu v Alabami. GE je uporabil aditivno proizvodnjo za izdelavo enodelne šobe za gorivo, ki je bila prej izdelana iz 20 različnih delov. To je izboljšalo zmogljivost, zmanjšalo težo za 25% in povečalo vzdržljivost.

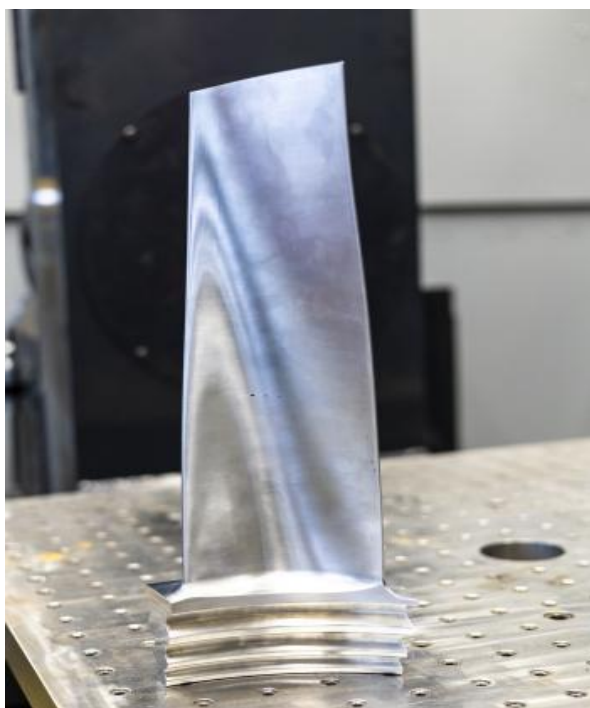


Vir: LEAP šoba za gorivo <https://3dprint.com/284243/ge-aviation-announces-100000th-3d-printed-fuel-nozzle-shipped-from-auburn-plant/>

Znanstveni članek, ki razpravlja o uporabi aditivnega tehnologije za izdelavo šobe za gorivo reaktivnih motorjev, je naslovljen z *Simulacija temelječe analize aditivnih proizvodnih*

sistemov za šobe za gorivo (*Simulation-Based Analysis of Additive Manufacturing Systems for Fuel Nozzles*)⁵⁸. Ta študija se osredotoča na proizvodnjo šob za gorivo plinskih turbin z uporabo tehnologije aditivne proizvodnje. Uporablja modeliranje z diskretnimi dogodki in simulacijski pristop za ovrednotenje proizvodne zmogljivosti, pri čemer upošteva različne proizvodne parametre, kot sta izkoriščenost virov in pretočni čas. Raziskava poudarja napredek v aditivni proizvodnji, zlasti v kontekstu nove šobe za gorivo GE, zasnovane za motor CFM International LEAP, ki je znatno lažja in učinkovitejša od tradicionalnih modelov.

Oak Ridge National Laboratory (ORNL) je v sodelovanju s Siemens Technology uporabil kovinsko 3D tiskanje za ustvarjanje velikih, vrtljivih lopatic parne turbine za elektrarne (lopatic plinske turbine)⁵⁹. Ta dosežek z aditivno proizvodnjo žičnih oblikov (WAAM), pomeni pomemben mejnik v proizvodnji velikih kovinskih delov, zlasti za energetski segment. Siemens je izdelal lopatice plinske turbine z aditivno proizvodnjo, ki je omogočala kompleksne notranje hladilne kanale, ki so izboljšali učinkovitost in zmogljivost.



Oblikovane lopatice parne turbine zahtevajo zelo natančno obliko, z oblikovanimi krivuljami, ki se zožijo proti konici. 3D-tiskanje z žičnim lokom prej ni bilo uporabljeno za izdelavo vrtljive komponente tega obsega (Carlos Jones/ORNL).

Vir: <https://3dprint.com/305846/siemens-and-ornl-3d-print-25-pound-turbine-blade-with-waam/>

Ključni izzivi pri izdelavi turbinskih lopatic z AM vključujejo optimizacijo parametrov aditivnih proizvodnih procesov, naknadno obdelavo tiskanih delov in zagotavljanje, da mehanske lastnosti izpolnjujejo stroge zahteve za turbinske lopatice. Številne korporacije in

raziskovalne skupine se že spopadajo s tovrstnimi izzivi, zato je na to temo precej literature mogoče najti tudi v znanstveni literaturi^{60, 61}.

Ayush Sinha et al so preučevali metode obdelave 3D-tiskanih lopatic za letalske turbine in predstavili eksperimentalne rezultate testiranja teh lopatic na 13-megavatni industrijski plinski turbini tipa SGT-400. Ugotovili so, da so 3D-natisnjene lopatice sposobne vzdržati ekstremne delovne pogoje⁶².

Nekateri izmed najbolj zapletenih proizvodnih postopkov, ki se rutinsko izvajajo, so namenjeni izdelavi ortopedskih pripomočkov za vsaditev. Za izdelavo vsadkov, ki niso le geometrijsko natančni, temveč so izdelani iz materiala, ki posnema porozno strukturo kosti, na primer pri uporabi v hrbtenici, podjetje Stryker ni razvilo le lastnega postopka izdelave materiala, temveč tudi lastno strojno in programsko opremo za aditivno izdelavo komponent⁶³. Podjetje Stryker se s področjem AM ukvarja že več kot 10 let in pravi, da postopek, ki so ga razvili za izdelavo kirurških vsadkov, „omogoča ustvarjanje prej težkih ali nemogočih zasnov izdelkov“. Ena od temeljnih razlik, ki so jo pri podjetju Stryker razvili za aditivno uporabo, je tako imenovana „tehnologija rasti titana“ (Titanium In-Growth Technology). S titanovo zlitino nastanejo deli, ki so močni, togi in, kar je pomembno, biokompatibilni. Družba Stryker uporablja aditivno proizvodnjo za izdelavo prilagojenih, za pacienta specifičnih vsadkov s kompleksno geometrijo, ki spodbuja boljšo integracijo kosti.



Sistem Stryker Monterey AL Interbody System je izdelan s patentiranim sistemom za fuzijo v prahu, imenovanim „AMagine“. Podjetje Stryker izdeluje vsadke s poroznim matriksom, ki posnema kost. Med kirurškim posegom kirurg vstavi kletko, ki je izdelana z dodatkom, ki drži odmične ključavnice (zlate elemente). Trije vijaki se vstavijo skozi kletko in v telesa vretenc. Nato se zaklepi zavrtijo, da se pritrdijo na svoje mesto. Foto: Stryker

Vir: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/stryker-using-additive-for-implants>

Pregledni članek Tridimenzionalno tiskanje v ortopedski kirurgiji (Three-dimensional Printing in Orthopaedic Surgery) poudarja preobrazbeno vlogo 3D tiskanja v ortopedski kirurgiji in poudarja njegovo zmožnost ustvarjanja vsadkov in instrumentov, prilagojenih posameznim

pacientom. Obravnava prednosti 3D-tiskanja, vključno s prilagajanjem, učinkovitostjo proizvodnje in prednostmi personaliziranih vsadkov, ki izboljšajo osteointegracijo in skrajšajo čas operacije. Članek obravnava tudi prihodnji potencial 3D-bio-tiskanja pri obnovi kosti in hrustanca ter razpravlja o omejitvah, vključno s potrebo po napredni programski opremi za modeliranje in regulativnih smernicah, ki bi lahko ovirale širšo uporabo v kliničnih okoljih^{64, 65}. Več proizvajalcev, med njimi tudi Adidas, se zanima za uporabo tehnologije 3D tiskanja pri oblikovanju čevljev, saj vedo, da lahko z njo iz različnih mešanic materialov izdelajo kompleksne oblike. Adidas je želel s 3D-tiskanjem ustrezno izkoristiti potencial tehnologije za izdelavo neverjetno zapletenih mrežnih struktur, prilagojenih za optimalno blaženje in zmogljivost. V sodelovanju s podjetjem Carbon je zasnova 3D-tiskanega vmesnega podplata Futurecraft temeljila na optimiziranih podatkih (točkah pritiska pri nošenju čevljev), zbranih od športnikov po vsem svetu. Zaradi tega je zapletena mrežna struktura vmesnega podplata na določenih območjih gostejša, trša ali mehkejša. Vmesni podplat je bil natisnjen na [3D-tiskalniku M2 podjetja Carbon](#) (tehnologija Carbon Digital Light Synthesis) iz UV-smol in poliuretana. Natančno ta mešanica materialov tudi absorbira več energije kot standardni vmesni podplat, kar naj bi izboljšalo tekaške zmogljivosti. Vmesni podplati so tudi precej gladki, zaradi česar jih je enostavno čistiti.



Vir: <https://all3dp.com/2/adidas-3d-printed-shoes/>

Zaradi napredka na področju AM so veliko pozornosti deležne tudi druge raziskave kompleksnih mrežnih struktur za (športne) čevlje. Na primer, v raziskavi *Efficacy of Auxetic Lattice Structured Shoe Sole*⁶⁶, je bil raziskan učinek podplatov čevljev na plantarno biomehaniko in udobje. Osredotoča se na tridimenzionalne reverzibilne mrežaste strukture, ki lahko optimizirajo porazdelitev pritiska na stopalo in povečajo udobje. Raziskava primerja različne mrežaste strukture, ustvarjene s 3D tiskanjem, in razkriva, da imajo te strukture edinstvene mehanske lastnosti, ki so koristne za obutev. Podoben znanstveni članek o

oblikovanju podplatov čevljev z mrežastimi strukturami, izdelanimi z AM, obravnava možnosti prilagajanja podplatov čevljev z uporabo različnih topologij mrež, vključno z diamantom, mrežo, obliko X⁶⁷. Študija poudarja, kako lahko različni vzorci rešetk vplivajo na mehanske lastnosti podplatov čevljev. Tehnologija AM je zelo tesno povezana z digitalizacijo. Prilagojen podplat s porozno rešetko ima lahko podatkovno vodeno zasnovo, kar je bilo prikazano z raziskavo metode za generiranje popolnoma prilagojenega poroznega podplata čevlja z uporabo algoritma za optimizacijo podatkovno vodene zasnove. Pristop omogoča prilagajanje premerov prečk znotraj mrežaste strukture za zmanjšanje največjega plantarnega pritiska, kar kaže na potencial za prilagojene rešitve za obutev, ki lahko preprečijo ali zdravijo stanja, kot so diabetične razjede⁶⁸.

Prelomne informacije so povezane z dejstvom, da so v medicinski, zobozdravstveni, živilski in farmacevtski industriji že izdane odobritve FDA podjetjem za uporabo aditivne proizvodnje. Eno takih podjetij je Align Technology. Podjetje Cubicure (v lasti družbe Align Technology) ima patente, povezane s tehnologijo vroče litografije, in uporablja zelo natančne postopke 3D tiskanja, ki temeljijo na mehanizmu toplote in prevleke, za proizvodnjo močnih, temperaturno odpornih polimerov iz zelo viskoznih smol. Družba Align je decembra 2023 prejela dovoljenje FDA za svoj prvi ortodontski pripomoček, natisnjen neposredno s 3D-tiskalnikom, Invisalign Palatal Expander System, ki obravnava razširitev skeleta in zob pri mlajših pacientih⁶⁹. Družba Align Technology uporablja 3D-tiskanje za izdelavo po meri prilagojenih prozornih nastavkov Invisaling za ortodonsko zdravljenje in s tem revolucionira zobozdravstveno industrijo s personaliziranimi izdelki.



Manj boleči kot tradicionalni razteznički za raztezanje neba.
Klinično dokazano varni in učinkoviti.
Revolucionarna nova zasnova brez kovinskih vijakov.

Vir:

<https://www.invisalign.com/palatal-expander>

Aditivna proizvodna tehnologija je močno prodrla v različne panoge in zdaj se na trgu vse pogosteje pojavljajo 3D natisnjeni izdelki. Podjetja in panoge prilagajajo AM svojim posebnim potrebam. Kot je razvidno iz literature, se pogosto povezujejo s proizvajalci opreme za 3D tiskanje, oblikovalci IT in drugimi strokovnjaki z željo po izboljšanju procesov AM na načine,

ki povečajo koristi/učinkovitost/uproščajo izdelavo zahtevnih izdelkov za njihove izdelke in proizvodne procese.

Podjetja, ki so AM že vključila v svoje procese, objavljajo tudi rezultate, pogosto skupaj s smernicami, ki so lahko koristne za MSP. V nadaljevanju smo zbrali in oblikovali nekaj priporočil, ki se pogosto pojavljajo v literaturi.

1.2 Priporočila za MSP

V nadaljevanju smo opisali nekaj nasvetov za MSP o hibridni (AM-konvencionalni) proizvodnji, vendar se moramo zavedati, da bi sicer lahko hibridna proizvodnja dolgoročno povečala konkurenčnost, vendar pa morajo MSP skrbno preučiti finančne in operativne stroške ter druga vprašanja že v času odločanja prehoda na hibridni model.

Trenutno so stroški nove opreme AM visoki, zlasti v naprednih industrijah (npr. v letalski in vesoljski industriji, zdravstvu). Čeprav lahko hibridna proizvodnja racionalizira procese, nakup novih strojev AM vzporedno z uporabo konvencionalnih strojev zahteva znatne začetne kapitalske naložbe. Donosnost naložbe (ROI) hibridne proizvodnje lahko traja dlje, da se uresniči. Poleg tega bodo potrebni finančni vložki usposobljene delavcev za upravljanje in vzdrževanje novih strojev. Za začetek so lahko alternativne rešitve za MSP za zmanjšanje teh stroškov zunanje izvajanje/najem ali sprejetje modularnih nadgradenj obstoječih konvencionalnih strojev, ki jih je včasih mogoče naknadno opremiti tako, da vključujejo osnovne zmogljivosti AM brez popolne zamenjave.

- Začnite z izdelavo prototipov, da skrajšate čas in stroške razvoja novih izdelkov. V ta namen bi bilo dobro investirati v namizne 3D-tiskalnice za izdelavo prototipov v podjetju, ki omogočajo hitro potrditev zasnove.

Na primer:

<https://formlabs.com/applications/rapid-prototyping/>

<https://www.3dsourced.com/rankings/best-3d-printer-for-small-business/>

- Izkoristite možnost prilagajanja in ponudite edinstvene izdelke, prilagojene potrebam posameznih strank. Z raziskovanjem trga in tržnih niš, kjer prilagajanje dodaja pomembno vrednost (npr. pri medicinskih pripomočkih in športnih izdelkih), je mogoče ustvariti/oblikovati/obdelati pomembne finese. S tem se lahko ustvari prednost pred konkurenco.
- Sprejmite hibridno proizvodnjo z združevanjem tradicionalne in aditivne proizvodnje za optimizacijo proizvodnje. Vključite 3D-tiskanje za izdelavo kompleksnih ali majhnih sestavnih delov, medtem ko tradicionalne metode uporabite za enostavnejše dele večjih količin. Raziskave so pokazale, da sta učinkovitost in upravičenost proizvodnega postopka (AM ali tradicionalnega) odvisna od kompleksnosti izdelka in množične proizvodnje (število izdelanih kosov).
- Osredotočite se na inovacije na področju materialov za izboljšanje funkcionalnosti in učinkovitosti izdelkov. Raziščite in uporabljajte napredne materiale, kot so visoko zmogljivi polimeri, kovine in kompoziti, primerni za aditivno proizvodnjo. Razvoj novih materialov bo vedno ena od spremenljivk, ki bo omogočila izboljšanje tako 3D-tiska (postopka) kot tudi izboljšanje lastnosti 3D-tiskanega izdelka.
- Izboljšanje prožnosti dobavne verige za zmanjšanje odvisnosti od zunanjih dobaviteljev in skrajšanje dobavnih rokov. Uporabite aditivno proizvodnjo za izdelavo rezervnih delov in orodij po meri na zahtevo, kar bo zmanjšalo stroške zalog in povečalo prilagodljivost poslovanja⁷⁰.
- Usposabljanje in nadgrajevanje delovne sile za zagotavljanje strokovnega znanja na področju najnovejših tehnologij in metodologij AM. Vlagajte v programe usposabljanja in delavnice za izobraževanje zaposlenih o načelih oblikovanja za aditivno proizvodnjo (Design for Additive Manufacturing, DfAM) in delovanju strojev AM.

Za usposabljanje in nadgradnjo na področju tehnologij AM je v letu 2024 na voljo več tečajev in programov:

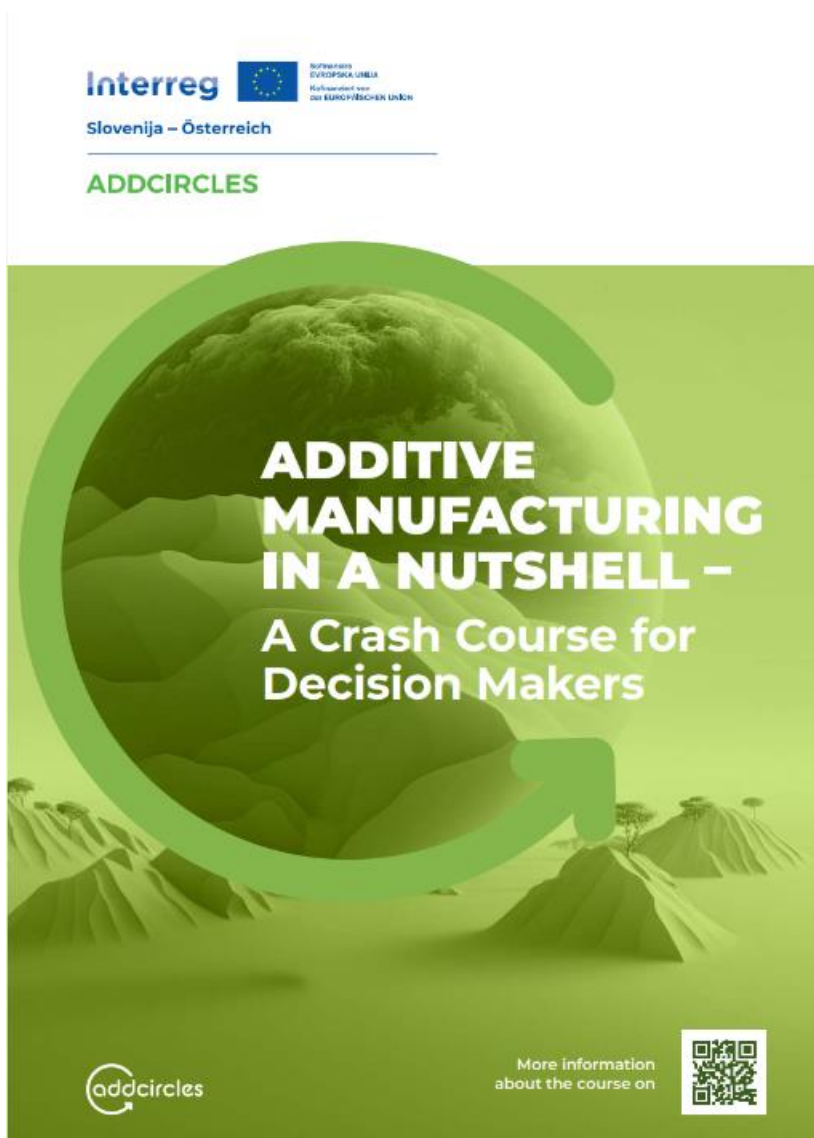
- a) MIT xPRO, Additive Manufacturing for Innovative Design and Production. Ta program strokovnega certifikata omogoča celovito razumevanje tehnologij AM s poudarkom na inovativnih metodah oblikovanja in proizvodnje. Vključuje

praktične vaje, študije primerov in interakcijo s strokovnjaki iz industrije. (<https://learn-xpro.mit.edu/additive-manufacturing>).

- b) V Evropi, Italija, Rim: 4. mednarodna konferenca o 3D tiskanju in dodajalnih tehnologijah (iC3DPAM-2025). 20.-22. februar 2025. Konference bodo zagotovile forum za raziskovalce, ki se ukvarjajo z vsemi vidiki 3D-tiskanja in AM.
- c) Evropa, Francija, Pariz: Inovine Meetings LLC zagotavlja izjemno priložnost za komunikacijo z znanstveniki, astronauti in strokovnjaki svetovnega razreda na svetovnem vrhu o 3D tiskanju med 4. in 5. junijem 2025 v Parizu, Francija. Cilj te konference je predstaviti najnovejše dosežke, trende in aplikacije na tem področju ter udeležencem omogočiti celovito razumevanje potenciala in vpliva 3D-tiskanja.
- d) Evropa, Avstrija, Dunaj: 7. konferenca M3d+it CONFERENCE, ki bo 29. in 30. novembra 2024 potekala v Dunaju, Avstrija. Na tej konferenci se bomo poleg znanstvenih izzivov, kot so vrhunski materiali za vsadke, ki jih je mogoče natisniti v 3D, napredek na področju mikro/nano 3D-tiskanja in nove metode načrtovanja medicinskih pripomočkov, ukvarjali tudi s praktičnimi vprašanji, kot so regulativne ovire in povračilo stroškov za izvajanje 3D-tiskanja na mestu oskrbe. Dogodek bo vključeval mednarodne seje, na katerih bodo sodelovali predstavniki nacionalnih mrež za 3D-tiskanje po vsej Evropi, in vpogled v tekoče evropske raziskovalne projekte. Poleg tega bo na tej konferenci potekalo letno srečanje „Evropske posebne interesne skupine za 3D tehnologije v bolnišnicah“.
- e) UC San Diego, Additive Manufacturing Technologies. Ta tečaj zajema vrsto tehnologij 3D-tiskanja, kot so modeliranje s staljenim nanašanjem (FDM), polimerizacija v kadi, brizganje veziva in zlivanje v praškastem sloju. Poudarja vključevanje AM v industrijo 4.0 in vključuje usposabljanje o podporni programski opremi, materialih in naknadni obdelavi (<https://extendedstudies.ucsd.edu/courses-and-programs/additive-manufacturing-technologies>).
- f) Univerza Illinois v Urbani-Champaign, specializacija za 3D tiskanje in aditivno proizvodnjo. Ta specializacija je sestavljena iz petih predmetov, ki obravnavajo strojne in

programske vidike 3D tiskanja. Vključuje praktične projekte, ki učencem omogočajo oblikovanje, izdelavo in izmenjavo predmetov, natisnjenih v 3D. (<https://www.coursera.org/specializations/3d-printing-additive-manufacturing>).

- g) Tudi projekt ADDCIRCLES Interreg SLO-AUT ponuja različne delavnice in predstavitve, ki širijo znanje o tehnologiji AM.



- Sodelovanje s ponudniki storitev AM za dostop do naprednih tehnologij brez večjih kapitalskih naložb. Sodelujte s specializiranimi storitvenimi uradi AM za potrebe vrhunske proizvodnje ali raziskovanje novih materialov in tehnik. Kot dobro se je izkazalo tudi sodelovanje s strokovnjaki za digitalizacijo in umetno inteligenco.

- Vzpostavitev protokolov za testiranje in zagotavljanje kakovosti, značilnih za postopke aditivne proizvodnje, vključno s testiranjem materialov in pregledovanjem natisnjenih delov. Nadzor in testiranje za zagotavljanje dosledne in zanesljive kakovosti izdelkov sta ključnega pomena pri uvajanju novih procesnih tehnologij.
- Pred vzpostavitvijo novih procesov je priporočljivo raziskati nove poslovne modele za ustvarjanje novih virov prihodkov in doseganje konkurenčne diferenciacije. To odpira nove ideje in pogled na trenutno stanje dobrih praks. Razmislite o proizvodnji na zahtevo, digitalnih zalogah in naročniških storitvah za izdelke po meri.

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-19-7071-9_5

<https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/the-mainstreaming-of-additive-manufacturing>

- Nenazadnje je danes bistven trajnostni pristop za zmanjšanje vpliva na okolje in zadovoljitev vse večjega povpraševanja po trajnostnih praksah in izdelkih. Uporabite AM za zmanjšanje odpadnih materialov, izdelavo lahkih sestavnih delov in raziskovanje biološko razgradljivih ali recikliranih materialov^{71, 72}.
- Ne pozabite, da so inovacije stalne spremenljivke v proizvodnji vsakega izdelka, saj lahko z njimi vedno izboljšamo konkurenčnost. Za ponazoritev pomena inovacij za izboljšanje konkurenčnosti upoštevajte vzorec S-krivulje inovacij, ki prikazuje, kako se industrije, izdelki ali poslovni modeli razvijajo skozi čas. Stalno inoviranje je ključnega pomena za ohranjanje konkurenčnosti na trgu (Future Business Tech; Vir: <https://www.futurebusinesstech.com/blog/the-s-curve-pattern-of-innovation-a-full-analysis>).

5. Zaključek

Ena od ključnih prednosti AM tehnologij v okviru industrije 4.0 je njena zmožnost, da omogoča agilne in prilagodljive proizvodne procese. Tradicionalna proizvodnja se pogosto zanaša na metode množične proizvodnje, ki vključujejo obsežne nastavitve in izdelavo orodij, kar povzroča višje stroške in daljše dobavne roke. Nasprotno pa dodajalna proizvodnja omogoča izdelavo kompleksnih, prilagojenih in maloserijskih proizvodnih serij s krajšim časom priprave, kar zagotavlja neprimerljivo prilagodljivost za izpolnjevanje zahtev dinamičnih trgov. Najpogostejše je 3D tiskanje povezano z okoljskimi vprašanji in LCA z

- (i) zmanjšanjem odpadnega materiala, saj je lahko 3D tiskanje, zlasti pri uporabi tehnik, kot sta iztiskanje materiala ali taljenje v prahu, učinkovitejše, ker se predmeti gradijo plast za plastjo;
- (ii) 3D tiskanje je lahko energetsko učinkovitejše za nekatere aplikacije, ko porabi malo energije in le, kadar je to potrebno za taljenje ali taljenje materiala. Tradicionalni subtraktivni proizvodni postopki, kot je obdelava CNC, lahko zahtevajo več energije za odstranjevanje odvečnega materiala;
- (iii) lokalna proizvodnja in proizvodnja na zahtevo, kar je zlasti pomembno za proizvodnjo majhnih količin; (iv) optimizacija 3D-tiska omogoča izdelavo kompleksnih, lahkih struktur, ki bi jih bilo težko ali nemogoče izdelati s tradicionalnimi metodami. To lahko privede do zmanjšanja porabe materialov in stroškov prevoza; (v) nekateri postopki 3D tiskanja, kot je selektivno lasersko taljenje za kovinske dele, omogočajo uporabo recikliranih materialov.

Vse navedeno je v skladu z načeli krožnega gospodarstva, kjer so izdelki zasnovani z mislijo na trajnost.

6. Dodatne informacije

V zadnjem času je trajnost v ospredju pozornosti podjetij in potrošnikov. Zato AM postaja vse pomembnejši kot trajnostna alternativa tradicionalni proizvodnji v nekaterih primerih, kot so hitra izdelava prototipov, rezervni deli in množično prilagajanje.

V okviru projekta AddCircles bomo izvedli tudi poglobljeno analizo treh poslovnih primerov AM in pripravili poročilo bo na podlagi analiz LCA in LCCA.

6.1. Priloga 1

Poglavje 5.1 vsebuje dodatna pojasnila posebnih izrazov in besednih zvez v poročilu za boljše razumevanje vsebine.

No. 1: Impact 2002+: V novi metodologiji IMPACT 2002+ za oceno vpliva življenjskega cikla je predlagana izvedba kombiniranega pristopa srednjih vrednosti/pristop škode, ki povezuje vse vrste rezultatov popisa življenjskega cikla (osnovni tokovi in drugi posegi) prek 14 kategorij srednjih točk/vrednosti s štirimi kategorijami škode. Za program IMPACT 2002+ so bili razviti novi koncepti in metode, zlasti za primerjalno oceno strupenosti za ljudi in ekotoksičnosti. Faktorji škode za človeka se izračunajo za rakotvorne in nerakavorne snovi, pri čemer se uporabljajo deleži vnosa, najboljše ocene faktorjev naklona med odmerkom in odzivom ter resnosti. Prenos onesnaževal v hrano za ljudi ne temelji več na raziskavah o porabi, temveč na podatkih o ravni kmetijske in živilnorske proizvodnje. Emisije v zrak v zaprtih prostorih in na prostem je mogoče primerjati, upoštevana pa je tudi občasna narava padavin. Faktorji učinka toksičnosti za ljudi in ekotoksičnosti temeljijo na povprečnih odzivih in ne na konzervativnih predpostavkah. Druge kategorije srednjih vrednosti so prilagojene obstoječim metodam za opredelitev (Ekoindikator 99 in CML 2002). Vse ocene srednjih točk so izražene v enotah referenčne snovi in povezane s štirimi kategorijami škode: zdravje ljudi, kakovost ekosistemov, podnebne spremembe in viri. Normalizacija se lahko izvede na srednji točki ali na ravni škode.

Metoda IMPACT 2002+ trenutno zagotavlja karakterizacijske faktorje za skoraj 1500 različnih rezultatov LCI, ki jih lahko prenesete <http://www.epfl.ch/impact>.⁷³

No. 2: ReCiPe 2016: ReCiPe 2016 je izboljšana različica metode ReCiPe, ki je bila prvotno uvedena leta 2008. Metoda ReCiPe 2016, ki so jo razvili nizozemski nacionalni inštitut za javno zdravje in okolje (RIVM), Univerza Radboud v Nijmegenu, Norveška univerza za znanost in tehnologijo ter PRé Sustainability, je namenjena pretvorbi rezultatov popisa življenjskega cikla v omejeno število točk kazalnikov, ki predstavljajo kategorije vplivov na okolje. Metoda vključuje 18 kazalnikov srednjih točk in 3 kazalnike končnih točk, ki zajemajo zdravje ljudi, kakovost ekosistemov in pomanjkanje virov kot področja varstva. ReCiPe 2016 posodablja prejšnje različice z vključitvijo novih podatkov in raziskav, zagotavljanjem karakterističnih faktorjev za različne kategorije vplivov in ponujanjem faktorjev za posamezne države, kjer je to primerno⁷⁴.

No. 3: Potencial globalnega segrevanja (Global Warming Potential, GWP) je ključnega pomena za podnebno znanost in oblikovanje politik, saj znanstvenikom in odločevalcem omogoča razumevanje kumulativnega prispevka različnih toplogrednih plinov h globalnemu segrevanju.

GWP je metrika, ki se uporablja za primerjavo učinkovitosti različnih toplogrednih plinov pri prispevanju h globalnemu segrevanju v določenem časovnem obdobju glede na ogljikov dioksid (CO₂), ki ima GWP 1. GWP upošteva dve glavni značilnosti toplogrednih plinov: (i) njihovo sposobnost absorpcije infrardečega sevanja (imenovana sevalna učinkovitost) in (ii) njihov čas zadrževanja v ozračju (življenjska doba ozračja).

Višji GWP pomeni, da plin v primerjavi s CO₂ v izbranem obdobju povzroča večje globalno segrevanje na enoto mase. Na primer, GWP metana je približno 25-krat večji od GWP CO₂ v obdobju 100 let, GWP dušikovega oksida pa je približno 273-krat večji od GWP CO₂.⁷⁵

V literaturi smo poleg tukaj navedenih tehnik za presojo vplivov na okolje najpogosteje zasledili še naslednje tehnike, ki se razlikujejo po obsegu, metodologiji in usmeritvi, na primer:

No. 4: Analiza ekološkega odtisa ocenjuje človekovo povpraševanje po naravi s primerjavo človekove porabe naravnih virov z ekološko sposobnostjo Zemlje, da jih obnovi.

No. 5: Analiza ogljičnega odtisa se osredotoča zlasti na merjenje in zmanjševanje emisij toplogrednih plinov, povezanih z izdelkom, storitvijo ali dejavnostjo.

No. 6: Analiza snovnih tokov (MFA) spremlja tokove in zaloge materialov v sistemu, da bi razumeli uporabo virov, nastajanje odpadkov in vplive na okolje.

No. 7: Ocena vodnega odtisa ocenjuje količino vode, ki jo izdelek ali postopek neposredno in posredno porabi, pri čemer upošteva vidike porabe in onesnaževanja.

6.2. Priloga 2

Drugi pogosto uporabljeni izrazi za AM, ki jih je mogoče najti v literaturi:

- Hitra izdelava prototipov (RP)
- Neposredna CAD proizvodnja
- Namizna proizvodnja
- Takojšnja ali instant izdelava
- Proizvodnja po plasteh
- Proizvodnja z odlaganjem materiala
- Proizvodnja dodajanja materiala
- Prosto oblikovanje trdnih teles

Novice:

ZDA: Trenutno je najbolj odmevna novica na področju aditivne tehnologije Nasin projekt RAMPT (Rapid Analysis and Manufacturing Propulsion Technology), v okviru katerega se uporablja aditivna proizvodnja v velikem obsegu za izdelavo kompleksnih, visoko zmogljivih sestavnih delov raket. Cilj projekta je zmanjšati stroške in skrajšati proizvodni čas za bistvene dele, kot je motor RS-25, ki je ključni sestavni del misij za raziskovanje globokega vesolja. Prav tako je aditivna izdelava ključnega pomena za skrajšanje časa za dajanje na trg in izboljšanje učinkovitosti v proizvodnji polprevodnikov, kjer je vse bolj vključena zlasti v izdelavo kompleksnih komponent z visoko gostoto, kot so polprevodniški pomnilniki in visokozmogljivi procesorji.

Izredno pomemben nedavni razvoj na področju regulacije AM je povezan z ameriško zvezno upravo za letalstvo (FAA), ki je začela izvajati obsežen osemletni načrt, usmerjen v

vključevanje AM v letalsko in vesoljsko industrijo. Ta načrt je ključnega pomena, saj določa strateški pristop za zagotavljanje varnosti in doslednosti pri proizvodnji delov z uporabo tehnologij AM. Zajema ključna področja, kot so certificiranje delov, vzdrževanje strojev ter raziskave in razvoj, pri čemer pomembno prispevajo NASA, ameriška vojska in drugi ključni akterji industrije.

Poleg tega so se na širšem regulativnem področju povečale pozornosti drugih vladnih agencij, vključno z General Services Administration (GSA), ki dejavno sodeluje s ponudniki AM, da bi razširila zvezne zmogljivosti. Ta pobuda kaže na vse večja prizadevanja vlade za standardizacijo in regulacijo tehnologij AM v različnih sektorjih (US General Services Administration). Razvoj regulacije AM je vse bolj vključen v kritične industrije, zlasti tiste, kjer sta varnost in zanesljivost najpomembnejši.

EU: Regulativno okolje za AM v Evropski uniji se razvija, zlasti na področju medicinskih pripomočkov in farmacevtskih izdelkov. Uvedba uredbe EU o medicinskih pripomočkih leta 2017, ki je začela veljati maja 2021, je pomembno vplivala na razvrščanje in urejanje 3D natisnjenih medicinskih pripomočkov. Uredba MDR (medical Device Regulation) je na novo opredelila, kaj je medicinski pripomoček, izdelan po meri. V skladu z novimi predpisi je po meri izdelan izdelek tisti, ki ima posebne oblikovne značilnosti, prilagojene izključno za uporabo določenega pacienta, in sicer na podlagi pisnega recepta usposobljenega zdravstvenega delavca. Vendar pa uredba MDR izključuje množično proizvedene pripomočke, ki so zgolj prilagojeni posameznim pacientom, iz razvrstitve med pripomočke, izdelane po meri^{76, 77}.

7. Literatura

V poglavju Literatura smo pripravili nabor znanstvenih člankov in odprto dostopnih publikacij, ki so na voljo na internetu, vsak pa je neposredno povezan z določeno temo v tem poročilu. Raziščite te vire za poglobljen vpogled v podrobnosti, ki vzbudijo vaše zanimanje v tekstu.

¹ SIST EN ISO/ASTM 52900:2022 Additive manufacturing – General principles – Fundamentals and vocabulary (ISO/ASTM 52900:2021) = Aditivna proizvodnja – Splošna načela – Osnove in terminologija (ISO/ASTM 52900:2021)

² Tofail, S.A.M., Koumoulos, E.P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., Donoghue, L.O., Charitidis, C.: Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. Mater. Today 21, 22–37 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>

³ Heng Deng, Jian Lin, Chapter 8 – 4D Printing: 3D Printing of Responsive and Programmable Materials,

Editor(s): Lijie Grace Zhang, John P. Fisher, Kam W. Leong, 3D Bioprinting and Nanotechnology in Tissue Engineering and Regenerative Medicine (Second Edition), Academic Press, 2022, Pages 213-237, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824552-1.00012-8>.

⁴ About Additive Manufacturing. <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/materials/>. (Accessed 23.1.2024)

⁵ Ans Al Rashid, Muammer Koç, Additive manufacturing for sustainability and circular economy: needs, challenges, and opportunities for 3D printing of recycled polymeric waste, Materials Today Sustainability, Volume 24, 2023, 100529, <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100529>.

⁶ Matthew A. Olawumi, Bankole I. Oladapo, Omolayo M. Ikumapayi, John O. Akinyoola, Waste to wonder to explore possibilities with recycled materials in 3D printing, Science of The Total Environment, Volume 905, 2023, 167109, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167109>.

- ⁷ Ruiz, L.E.; Pinho, A.C.; Resende, D.N. 3D Printing as a Disruptive Technology for the Circular Economy of Plastic Components of End-of-Life Vehicles: A Systematic Review. *Sustainability* 2022, *14*, 13256. <https://doi.org/10.3390/su142013256>
- ⁸ Hayley Everett, CIRCULAR ECONOMY 3D PRINTING: OPPORTUNITIES TO IMPROVE SUSTAINABILITY IN AM, 2021 (Accessed 23.1.2024)
- ⁹ John Duffy, PowderCleanse: Solving powder-bed fusion's waste problem. 2023 (Assessed on 10.9.2024)
- ¹⁰ HE, Xing, et al. Powder recycling effects on porosity development and mechanical properties of Hastelloy X alloy during laser powder bed fusion process. *Additive Manufacturing*, 2022, *55*: 102840.
- ¹¹ Prima Additive S.r.l., Material Reuse in Additive Manufacturing: Prima Additive's Sustainable Approach. 2024 (Assessed on 10.9.2024)
- ¹² Kassab, A.; Al Nabhani, D.; Mohanty, P.; Pannier, C.; Ayoub, G.Y. Advancing Plastic Recycling: Challenges and Opportunities in the Integration of 3D Printing and Distributed Recycling for a Circular Economy. *Polymers* 2023, *15*, 3881. <https://doi.org/10.3390/polym15193881>
- ¹³ Ans Al Rashid, Muammer Koç. Additive manufacturing for sustainability, circularity and zero-waste: 3DP products from waste plastic bottles, *Composites Part C*. 2024. Vol. 14, 100463. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100463>.
- ¹⁴ Manu Srivastava, Sandeep Rathee, Vivek Patel, Atul Kumar, Praveennath G. Koppad, A review of various materials for additive manufacturing: Recent trends and processing issues, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 21, 2022, 2612-2641, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.015>.
- ¹⁵ Jörg Bromberger, Julian Ilg, and Ana Maria Miranda. The mainstreaming of additive manufacturing. McKinsey & Company. 2022 (Accessed 1.2.2024)
- ¹⁶ The Top Challenges in Additive Manufacturing and How to Overcome Them. SyBridge Technologies. October 26, 2022 (Accessed 1.2.2024)

¹⁷ 10 of the Biggest Challenges in Scaling Additive Manufacturing for Production in 2020 [Expert Roundup]. AMFG Autonomous Manufacturing. 2022 (Accessed 1.2.2024)

¹⁸ Grant Guggenbiller, Scott Brooks, Olivia King, Eric Constant, David Merckle, Andrew C Weems. 3D Printing of Green and Renewable Polymeric Materials: Toward Greener Additive Manufacturing. ACS Appl. Polym. Mater. 2023. <https://doi.org/10.1021/acsapm.2c02171>

¹⁹ <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2018/04/p-18-161.html> (Accessed 1.2.2024)

²⁰ <https://www.infinam.com/en/3d-printing-materials> (Accessed 1.2.2024)

²¹ Oliver Johnson Stratasys launches new FDA-cleared resin for dental 3D printing TrueDent resin is Stratasys' first FDA-cleared medical device. 2023 (Accessed 1.2.2024)

²² Fabio A. Cruz Sanchez, Hakim Boudaoud, Mauricio Camargo, Joshua M. Pearce. Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy, Journal of Cleaner Production 2020, 264, 121602. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121602>.

²³ ISO 14040:2006. (2006). Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

²⁴ ISO 14044:2006. (2006). Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

²⁵ Müller Leonard Jan , Kätelhön Arne , Bachmann Marvin , Zimmermann Arno , Sternberg André , Bardow André. A Guideline for Life Cycle Assessment of Carbon Capture and Utilization. Frontiers in Energy Research. 2020, Vol. 8. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00015>

²⁶ Adisa Azapagic, Roland Clift, Allocation of environmental burdens in multiple-function systems, Journal of Cleaner Production, Volume 7, Issue 2, 1999, 101-119, [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(98\)00046-8](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(98)00046-8).

²⁷ Simon Fowell, LCA and LCCA – Are you sure you know the difference? 2021 (Accessed 23.1.2024)

²⁸ Marcella Ruschi Mendes Saade, Ammar Yahia, Ben Amor, How has LCA been applied to 3D printing? A systematic literature review and recommendations for future studies, Journal of Cleaner Production, Volume 244, 2020, 118803, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118803>.

²⁹ Samruddha Kokare, J.P. Oliveira, Radu Godina, Life cycle assessment of additive manufacturing processes: A review, Journal of Manufacturing Systems, Volume 68, 2023, 536-559, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.05.007>.

³⁰ SLS vs. DMLS: Differences and Comparison. <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/sls-vs-dmls-3d-printing/> (Assessed 11.3.2024)

³¹ Fidan, Ismail, Vivekanand Naikwadi, Suhas Alkunte, Roshan Mishra, and Khalid Tantawi. 2024. "Energy Efficiency in Additive Manufacturing: Condensed Review" *Technologies* 12, no. 2: 21. <https://doi.org/10.3390/technologies12020021>

³² ISO/ASTM 52910:2018. Additive manufacturing—Design—Requirements, guidelines and recommendations.

³³ P. Ramesh and Sekar Vinodh. Analysis of factors influencing energy consumption of material extrusion-based additive manufacturing using interpretive structural modelling, Rapid Prototyping Journal, 2021, 27, (7), 1363-1377. <https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2020-0100>

³⁴ Vidakis, Nectarios, Markos Petousis, Nikolaos Mountakis, Amalia Moutsopoulou, and Emmanuel Karapidakis. 2023. "Energy Consumption vs. Tensile Strength of Poly[methyl methacrylate] in Material Extrusion 3D Printing: The Impact of Six Control Settings" *Polymers* 15, no. 4: 845. <https://doi.org/10.3390/polym15040845>

³⁵ Fidan, Ismail, Vivekanand Naikwadi, Suhas Alkunte, Roshan Mishra, and Khalid Tantawi. 2024. "Energy Efficiency in Additive Manufacturing: Condensed Review" *Technologies* 12, no. 2: 21. <https://doi.org/10.3390/technologies12020021>

- ³⁶ JIANG, Sheng. Processing rate and energy consumption analysis for additive manufacturing processes: Material extrusion and powder bed fusion. 2017. PhD Thesis. Massachusetts Institute of Technology.
- ³⁷ Top, N., Sahin, I., Mangla, S. K., Sezer, M. D., & Kazancoglu, Y. (2023). Towards sustainable production for transition to additive manufacturing: a case study in the manufacturing industry. *International Journal of Production Research*, 61(13), 4450-4471.
- ³⁸ Garcia, F. L., Nunes, A. O., Martins, M. G., Belli, M. C., Saavedra, Y. M., Silva, D. A. L., & Moris, V. A. D. S. (2021). Comparative LCA of conventional manufacturing vs. additive manufacturing: the case of injection moulding for recycled polymers. *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(6), 1604-1622.
- ³⁹ Ramadugu, S., Ledella, S., Gaduturi, J. et al. Environmental life cycle assessment of an automobile component fabricated by additive and conventional manufacturing. *Int J Interact Des Manuf* 18, 847–858 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01532-0>
- ⁴⁰ KELLENS, Karel; Yasa, Evren; Dewulf, Wim; Duflou, Joost R. Environmental assessment of selective laser melting and selective laser sintering. *methodology*, 2010, 4(5).
- ⁴¹ Dotchev, K. and Yusoff, W. (2009), "Recycling of polyamide 12 based powders in the laser sintering process", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 15 No. 3, pp. 192-203.
- ⁴² Hari P.N. Nagarajan, Karl R. Haapala. Environmental Performance Evaluation of Direct Metal Laser Sintering through Exergy Analysis, *Procedia Manufacturing*, 2017, 10, 957-967. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.087>.
- ⁴³ van Sice, C., & Faludi, J. (2021). Comparing environmental impacts of metal additive manufacturing to conventional manufacturing. *Proceedings of the Design Society*, 1, 671-680. <https://doi.org/10.1017/pds.2021.67>
- ⁴⁴ Fabricio Leon Garcia, Andréa Oliveira Nunes, Mariane Guerra Martins, Maria Cristina Belli, Yovana M.B. Saavedra, Diogo Aparecido Lopes Silva & Virgínia Aparecida da Silva Moris (2021) Comparative LCA of conventional manufacturing vs. additive manufacturing: the case

of injection moulding for recycled polymers, *International Journal of Sustainable Engineering*, 14:6, 1604-1622, DOI: [10.1080/19397038.2021.1990435](https://doi.org/10.1080/19397038.2021.1990435)

⁴⁵ Jung S, Kara LB, Nie Z, Simpson TW, Whitefoot KS. Is Additive Manufacturing an Environmentally and Economically Preferred Alternative for Mass Production? *Environ Sci Technol*. 2023 Apr 25;57(16):6373-6386. doi: 10.1021/acs.est.2c04927. Epub 2023 Apr 17. PMID: 37066969; PMCID: PMC10134501.

⁴⁶ Samruddha Kokare, J.P. Oliveira, Radu Godina, Life cycle assessment of additive manufacturing processes: A review, *Journal of Manufacturing Systems*, 2023, 68, 536-559. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.05.007>.

⁴⁷ Aruanno, Beatrice. 2024. "EcoPrintAnalyzer: Assessing Sustainability in Material Extrusion Additive Manufacturing for Informed Decision-Making" *Sustainability* 16, no. 2: 615. <https://doi.org/10.3390/su16020615>

⁴⁸ Sola, A.; Rosa, R.; Ferrari, A.M. Environmental Impact of Fused Filament Fabrication: What Is Known from Life Cycle Assessment? *Polymers* 2024, 16, 1986. <https://doi.org/10.3390/polym16141986>

⁴⁹ OU, Yating, et al. Material extrusion additive manufacturing of novel lightweight collinear stayed polymer lattices. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2024, 1-17.

⁵⁰ Presciutti A, Gebennini E, Liberti F, Nanni F, Bragaglia M. Comparative Life Cycle Assessment of SLS and mFFF Additive Manufacturing Techniques for the Production of a Metal Specimen. *Materials (Basel)*. 2023 Dec 23;17(1):78. doi: 10.3390/ma17010078. PMID: 38203933; PMCID: PMC10779992.

⁵¹ Charlotte Roux, Kateryna Kuzmenko, Nicolas Roussel, Romain Mesnil, **Adélaïde** Feraille. Life cycle assessment of a concrete 3D printing process. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2023, 28, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02111-3>

⁵² Li, Jujube. 2015. A Comparative Meta-Life Cycle Inventory Analysis: Energy and Water Consumption of 3D Printing Methods vs. Conventional Manufacturing in Clothing Production.

Master's thesis, Harvard Extension School. <https://dash.harvard.edu/handle/1/24078377> (Assessed 13.3.2024)

⁵³ Beth McGrath, Jaymes Hanna, Runze Huang, Amar Shivdasani. 3D opportunity for life cycle assessments Additive manufacturing branches out. Deloitte University Press, an imprint of Deloitte Development LLC.

https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/additive-manufacturing-in-lca-analysis/DUP_719-3D-opportunity-life-cycle_MASTER.pdf (Assessed 13.3.2024).

⁵⁴ Bhasin, Shallu; Singari, Ranganath M.; Arora, Pawan Kumar; Kumar, Harish. Implications of Additive Manufacturing on Supply Chain Management. 2024. Journal of Industrial Integration and Management. Vol.9, 117-131. DOI: 10.1142/S2424862221500299

⁵⁵ Woldesilassiea, Tekalign Lemma, Hirpa G. Lemu, and Endalkachew Mosisa Gutema. 2024. "Impacts of Adopting Additive Manufacturing Process on Supply Chain: Systematic Literature Review" Logistics 8, no. 1: 3. <https://doi.org/10.3390/logistics8010003>

⁵⁶ Samruddha Kokare, João Pedro Oliveira, Radu Godina. 18 - Life cycle assessment and economics of additive manufacturing processes, Editor(s): Sanjay Mavinkere Rangappa, Vinod Ayyappan, Suchart Siengchin. In Additive Manufacturing Materials and Technologies, Additive Manufacturing Materials and Technology, Elsevier. 2024, 445-473. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18462-8.00018-0>.

⁵⁷ file:///C:/Users/music_b/Downloads/%C3%96ko_Performance_Fertigungstechnologien.pdf (assessed on 13.9.2024)

⁵⁸ <https://www.scielo.br/j/jatm/a/rrW5H7FGWtpDrbJSptZTJ7d/?format=pdf&lang=en>

⁵⁹ <https://3dprint.com/305846/siemens-and-ornl-3d-print-25-pound-turbine-blade-with-waam/>

⁶⁰ Liu, Xuan, Xingguo Han, Guofu Yin, Xiaohui Song, and Lixiu Cui. 2023. "Design and Processing of Gas Turbine Blades Based on Additive Manufacturing Technology" *Micromachines* 14, no. 9: 1675. <https://doi.org/10.3390/mi14091675>

⁶¹https://www.researchgate.net/publication/327326826_Additive_Manufacturing_for_the_Manufacture_of_Gas_Turbine_Engine_Components_Literature_Review_and_Future_Perspectives

⁶² <https://www.mdpi.com/2504-4494/6/1/16>

⁶³ <https://www.additivemanufacturing.media/articles/stryker-using-additive-for-implants>
(Accessed 31.7.2024)

⁶⁴ Meng Meng, Jinzuo Wang, Huagui Huang, Xin Liu, Jing Zhang, Zhonghai Li. 3D printing metal implants in orthopedic surgery: Methods, applications and future prospects, Journal of Orthopaedic Translation, 2023, Vol. 42, 94-112, <https://doi.org/10.1016/j.jot.2023.08.004>.

⁶⁵ <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8059996/>

⁶⁶ Zhang Jifa , Lu Shizhu , Yang Yadie , Liu Yiwen , Guo Yuqing , Wang Hongrui. Efficacy of auxetic lattice structured shoe sole in advancing footwear comfort—From the perspective of plantar pressure and contact area. Frontiers in Public Health, 2024, Vol. 12. DOI=10.3389/fpubh.2024.1412518 doi: [10.3389/fpubh.2024.1412518](https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1412518)

⁶⁷ <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.76>

⁶⁸<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.06.035>

⁶⁹ <https://www.dental-tribune.com/c/align-technology-switzerland-gmbh/news/3d-printing-acquisition-may-help-align-technology-to-break-the-mould/>

⁷⁰ <https://www.wilhelmsen.com/ships-service/digital-ventures-mp/3d-printing-Offering-A-Stronger-and-More-Resilient-Supply-Chain-for-Spare-Parts/>

⁷¹ https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-32280-8_27

⁷² <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/20/15081>

⁷³ Olivier Jolliet, Manuele Margni, Raphaël Charles, Sébastien Humbert, Jérôme Payet, Gerald Rebitzer, Ralph Rosenbaum. IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment

methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment. 2003, 8, 324–330.<https://doi.org/10.1007/BF02978505>

⁷⁴ Mark A. J.Huijbregts, Zoran J. N.Steinmann, Pieter M. F.Elshout, Gea Stam, Francesca Verones, Marisa Vieira, Michiel Zijp, Anne Hollander, Rosalie van Zelm. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint leve, The International Journal of Life Cycle Assessment. 2017, 22, 138–147 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>

⁷⁵ Climate Change Division, Office of Atmospheric Programs (MC-6207A), U.S. Environmental Protection Agency, 1200 Pennsylvania Ave NW, Washington, DC 20460. Understanding Global Warming Potentials. <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>.2023. (accessed 27/2/2024)

⁷⁶ Pettersson, Ante B. V., Rosa Maria Ballardini, Marc Mimler, Phoebe Li, Mika Salmi, Timo Minssen, Ian Gibson, and Antti Mäkitie. 2024. "Core Legal Challenges for Medical 3D Printing in the EU" *Healthcare* 12, no. 11: 1114. <https://doi.org/10.3390/healthcare12111114>

⁷⁷ <https://slcontrols.com/en/where-do-we-stand-with-the-new-eu-mdr-additive-manufacturing-and-customised-medical-devices/> (assessed at 30.8.2024)