

Additív gyártással készült fém rácsszerkezetek minőségbiztosításának lehetőségei

Quality Assurance Methods for Additively Manufactured Metallic Lattice Structures

Sándor Roland ^{1*}, Radics Renáta ²

¹ Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország, <https://orcid.org/0009-0005-4770-7737>

² ¹ Innovatív Járművek és Anyagok, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország, <https://orcid.org/0009-0003-4347-2307>
<https://doi.org/10.47833/2026.2.ENG.004>

Kulcsszavak:

minőségbiztosítás
ráccsal könnyített gyártmányok
additív gyártás

Keywords:

quality control
lattice-reinforced components
additive manufacturing

Cikktörténet:

Beérkezett 2025. november 27.
Átdolgozva 2026. június 25.
Elfogadva 2026. június 28.

Összefoglalás

A cikk az additív gyártással készült fém rácsszerkezetek minőségbiztosításának főbb kérdéseit áttekintő jelleggel tárgyalja, kitérve az alkalmazási területekre, a jellegzetes geometriai és anyaghibákra, valamint ezek hatására. Röviden bemutatja az in-situ folyamatmonitorozás, a roncsolásmentes vizsgálatok, különösen a röntgen komputertomográfia, és a mechanikai vizsgálatok szerepét az ipari minőségbiztosításban. A munka összefoglaló jellegű, célja a meglévő minőségbiztosítási eszközök rácsszerkezet-specifikus, rendszerszintű áttekintése, nem pedig új kísérleti vagy módszertani eredmények közlése.

Abstract

This paper provides an overview of the key aspects of quality assurance for additively manufactured metallic lattice structures, addressing application areas, the characteristic geometrical and material defects, and their effects. It briefly outlines the role of in-situ process monitoring, non-destructive testing—particularly X-ray computed tomography—and mechanical testing in industrial quality assurance. The work is a review: its aim is a lattice-structure-specific, systems-level overview of existing quality assurance tools, rather than the presentation of new experimental or methodological results.

1. Bevezetés

A fém alapú additív gyártás térnyerésével a rácsszerkezetek olyan funkcionálisan optimalizált, könnyű és multifunkcionális alkatrészek előállítását teszik lehetővé, amelyek hagyományos technológiákkal csak nagy kompromisszumok árán vagy egyáltalán nem gyárthatók. A technológia ipari bevezetése ugyanakkor megköveteli a gyártott ráccs alkatrészek minőségének reprodukálható, mérhető és szabályozható biztosítását, mivel ezek az elemek gyakran biztonságkritikus alkalmazásokban jelennek meg. Az additív gyártás és a rácsszerkezetek kontextusában a minőségbiztosítás azon tervezési, gyártásközi és gyártás utáni tevékenységek összessége, amelyek célja annak igazolása, hogy az előállított alkatrész geometriai,

* Kapcsolattartó szerző. Sándor Roland
E-mail cím: sandor.roland@nje.hu

anyagszerkezeti és mechanikai jellemzői a teljes gyártási láncon keresztül a meghatározott tűrésmezőkön belül, reprodukálhatóan teljesülnek.

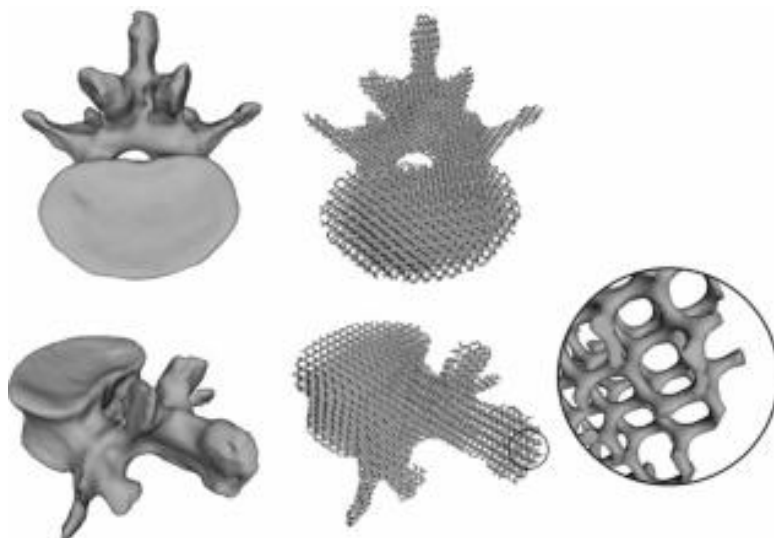
Jelen tanulmány áttekintő (összefoglaló) jellegű: a rácsszerkezetek minőségbiztosításának eszközeit a teljes gyártási lánc mentén, rendszerszintű megközelítésben mutatja be, a meglévő szakirodalomra támaszkodva. A munka nem új kísérleti adatok vagy önálló módszertani fejlesztés közlésére törekszik, hanem a területen elérhető megoldások rácsszerkezet-specifikus értelmezésére és integrált bemutatására.

A rácsszerkezetek gyártása hagyományos forgácsoló technológiákkal, lemezmegmunkálással vagy öntéssel csak erősen korlátozott geometriájú, viszonylag egyszerű cellastruktúrák esetén valósítható meg, miközben a belső üregek, komplex csatornarendszerek és gradált porozitás tipikusan elérhetetlen marad. A fém additív gyártási eljárások – elsősorban a porágyas lézeres és elektronsugaras olvasztás, valamint a huzal- és poralapú felrakó technológiák – ezzel szemben rétegről rétegre építve komplex, topológiaiilag optimalizált rácsgéometriák formálását teszik lehetővé, akár belső, zárt csatornarendszerekkel együtt [6]. A digitális gyártásból fakadó rugalmasság révén a rácsszerkezetek lokális sűrűsége, cellamérete és rúdelem-átmérője a terhelésállapothoz, hűtési vagy biológiai követelményekhez igazítható, ami a funkcionálisan gradált rácsok széleskörű megjelenéséhez vezet.

Az additív gyártással készült fém rácsszerkezetek minőségbiztosítása több, egymásra épülő szintből áll. Ezek a por- és alapanyag-minősítés, a folyamatparaméterek validálása, az in-situ monitorozás, valamint a kész alkatrészek roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálata. A folyamat elején a fémpor szemcseeloszlását, alakját, oxid- és szennyezőanyag-tartalmát, illetve újrahasznosítási ciklusait szükséges kontrollálni, mivel ezek közvetlenül befolyásolják a rácselemek geometriáját és a kialakuló porozitást. A technológiai paraméterek (lézerteljesítmény, pásztázási sebesség, rétegvastagság, pásztázási stratégia) előzetes kísérleti optimalizációja során tipikusan próbablokkokon, egyszerűsített rácsgéometriákon történik a beállítások validálása, amelyet mikrostruktúra- és porozításvizsgálat követ. A sorozatgyártás során mindezt in-situ érzékelőkkel támogatott folyamatfelügyelet egészíti ki, amelynek célja a hibás rétegek, nem kívánt hőterhelés vagy olvadátkedence-instabilitás korai detektálása, és szükség esetén a gyártási tétel selejtezése. A kész rácsos alkatrészekon végül (alkalmazásfüggő mértékben) geometriai ellenőrzés, roncsolásmentes belső vizsgálat, valamint mechanikai és funkcionális próbák biztosítják, hogy a szerkezet a tervezett terheléviszonyok mellett biztonságosan üzemeltethető legyen [6].

2. Additív gyártással készült fém rácsszerkezetek alkalmazásának lehetőségei

Az additív módon előállított fém rácsszerkezetek legfontosabb előnye az, hogy kedvező fajlagos szilárdság és merevség mellett jelentős tömegcsökkentést tesznek lehetővé, miközben a belső geometria a funkcionális igényekhez illeszthető, így különösen alkalmassá válnak repülőgépipari, járműipari és energetikai alkalmazásokban teherhordó, illetve energiaelnyelő elemekként. A hőcserélő és termikus menedzsment rendszerek területén a finom cellaméretű, nagy fajlagos felületű rácsos hőcserélők additív gyártása lehetővé teszi rendkívül kompakt, nagy hatásfokú egységek létrehozását, amelyek a hagyományos lamellás vagy csöves hőcserélőkkel szemben kisebb tömeggel és térfogattal, ugyanakkor jobb hőátadási jellemzőkkel rendelkeznek. Az orvostechikai alkalmazásokban a titán és kobalt-króm ötvözetekből gyártott porózus rács implantátumok a természetes csont mechanikai tulajdonságaihoz igazított rugalmassági moduluszt és a csontbenövést támogató porozitást biztosítanak, csökkentve a stresszárnýékolás jelenségét és javítva az implantátum hosszú távú stabilitását[14] (1. ábra)



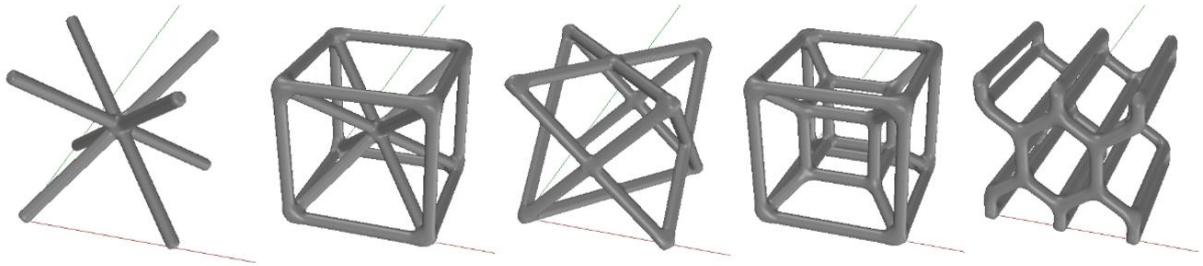
1. ábra Orvostechnikai alkalmazás [14]

A tömegcsökkentés mértékét néhány jellemző ipari példa szemlélteti. Az Airbus A320 generatív tervezéssel és additív gyártással kialakított, rácsszerű belső szerkezetű „bionikus” válaszfala a hagyományos kialakításhoz képest mintegy 45%-kal könnyebb, ami repülőgépenként évente tonnás nagyságrendű tüzelőanyag-megtakarítást és CO₂-kibocsátás-csökkenést eredményez [1]. Fogaskerekeken végzett numerikus vizsgálatok szerint a kerékagy TPMS (gyroid) rácsozásával a tömeg akár 50%-os csökkentése mellett is a fogtőben következik be tönkremenetel, ami a könnyítés további lehetőségére utal [18]. Az ilyen fajlagos teljesítménymutatók ugyanakkor erősen geometria- és terhelésfüggők, ezért alkalmazásonként önálló minősítést igényelnek.

Gazdasági szempontból a rácsszerkezetek anyagmegtakarítást eredményeznek, ugyanakkor a gyártási ciklusidő és az utófeldolgozás összetettsége miatt az optimális geometria meghatározása során az anyagfelhasználás, a gyártási idő, az energiafelhasználás és az utómegmunkálási lépések összköltségét kell figyelembe venni. A légi- és űrparban a magas egységárat ellensúlyozza a tömegcsökkentésből és az integrált funkciókból fakadó üzemeltetési költségcsökkenés, míg az orvostechnikai területen a páciensre szabott, egyedi implantátumoknál a személyre szabhatóság és a jobb klinikai kimenetel igazolja az additív gyártás többletköltségét. A kritikus infrastruktúrák, például gázturbinák vagy vegyipari berendezések esetén a rácsszerkezetekkel kombinált hőcserélők, statikus keverők és katalizátorhordozók alkalmazása az energiahatékonyság növelésén keresztül közvetett gazdasági előnyt is jelent, ami hosszú távon a technológia szélesebb ipari adaptációját támogatja.

3. Rácsszerkezetek típusai

A fém rácsszerkezetek típusai több szempont alapján csoportosíthatók, így például a cellageometria, a topológia, a porozitás eloszlása vagy a funkcionális gradáltság szerint, amelyek együttesen határozzák meg a szerkezet mechanikai, termikus és folyadékáramlási tulajdonságait. A hagyományos, strut-alapú rácscok esetén (2. ábra) a rácselemek explicit rúdelem-hálózatot alkotnak (pl. BCC, FCC, octet, diamond), amelyekben a rúdátmérő, cellaméret és elrendezés paraméterezésével széles határok között szabályozható a fajlagos merevség és energiaelnyelő képesség. Az utóbbi években nagy figyelmet kaptak az úgynevezett tripla periódusos minimális felület (TPMS) alapú rácscok – például gyroid, Schwartz D vagy Neovius geometriák –, amelyek folytonos felületszerkezetük révén kedvezőbb feszültségeloszlást és magas fajlagos felületet biztosítanak, ezáltal különösen előnyösek hőcserélő és biomedikai alkalmazásokban.



2. ábra Strut-alapú rácsok

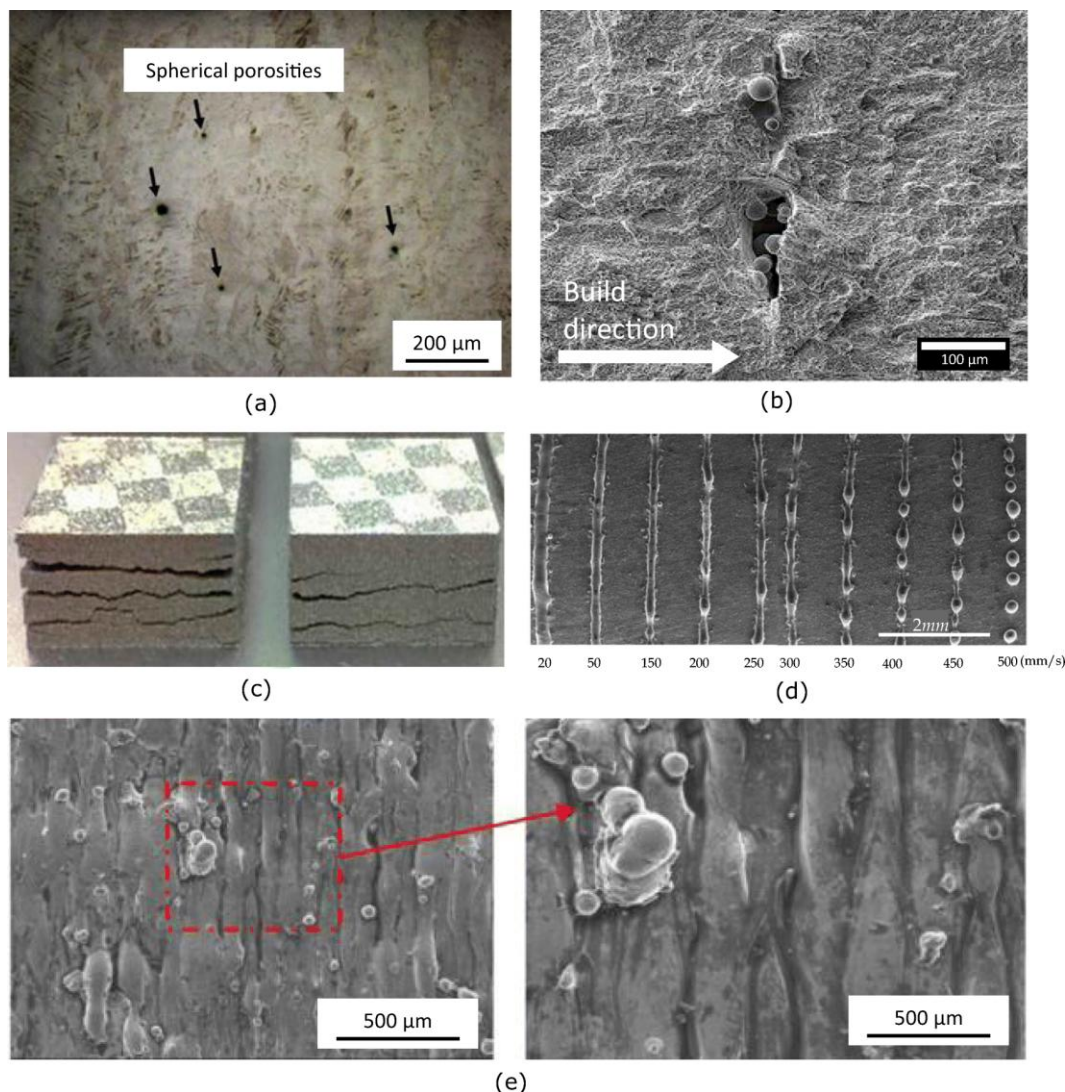
Emellett megjelentek a funkcionálisan gradált rácsszerkezetek, amelyekben a cellaméret, rácssűrűség vagy topológia a térben változik, követve a terhelési vagy biológiai követelményeket, illetve a hierarchikus rácsok, amelyek több szintű, egymásra épülő cellastruktúrával kombinálják a mikro- és makroszintű optimalizáció előnyeit. [15] [11] [19]

A két fő topológiacsald eltérő minőségbiztosítási kihívásokat támaszt. A strut-alapú rácsoknál a vízszintes és ferde rudak túlnyúló jellege miatt nagyobb dimenziós pontatlanság és felületi érdesség jelentkezik, a csomópontokban pedig anyagfelhalmozódás és feszültségkoncentráció lép fel. Ezek a geometriai discontinuitások a korai fáradásos tönkremenetel kiindulópontjai lehetnek, ami a csomópontokra fókuszáló geometriai és felületi ellenőrzést indokol. A TPMS-alapú rácsok folytonos, görbületfolytonos felülete egyenletesebb feszültségeloszlást és jellemzően kedvezőbb fáradással szembeni ellenállást ad, ugyanakkor a felület görbületfüggő jellege miatt már kis méreteltérés is megváltoztatja a relatív sűrűséget és a szerkezeti teljesítményt, a bikontinuus geometria pedig megnehezíti a beszorult por eltávolítását és rontja a belső felületek hozzáférhetőségét. Emiatt a strut-rácsoknál a rúd- és csomópont-geometria, a TPMS-rácsoknál pedig a falvastagság, a relatív sűrűség és a belső felületi épség ellenőrzése kerül előtérbe. [9] [14]

4. Additív gyártással készült fém rácsszerkezetek lehetséges hibái

A fém additív gyártásra általánosan jellemző hibák (például a porozitás, a kötéselegtelenység, a mikrorepedések vagy a maradó feszültségek) a rácsszerkezetek esetében a kis keresztmetszetek, vékony falak és komplex hőterhelési viszonyok következtében felerősödve jelenhetnek meg, közvetlenül befolyásolva a mechanikai és funkcionális teljesítményt. Gyakori geometriai eltérés a strut-átmérők és falvastagságok szisztematikus túlépülése vagy alulépülése, amely a névleges CAD-geometriához képest megnövekedett vagy csökkentett rúdvastagságot eredményez, továbbá a csomóponti régiókban jelentkező anyagfelhalmozódás, amely lokális merevség- és feszültségkoncentrációt okozhat. A felületi hibák, így a nagymértékű érdesség, a félig megolvadt por szemcséinek felrakódása, illetve az olvadékmedence instabilitásából eredő „cseppképződés” és kidudorodások, különösen a fáradási tulajdonságokat rontják, illetve áramlástechnikai alkalmazásoknál a hidraulikai veszteséget növelik. [3]

A belső anyaghibák közül kiemelhetők a különböző típusú pórusok: a kötéselegteleniségből eredő, lapos, szabálytalan alakú lack-of-fusion pórusok; a gömbszerű gázpórusok; valamint a keyhole jellegű üregek, amelyek mind a gyártási paraméterek és a hőbevitel nem megfelelő kombinációjához köthetők, és a rácselemek kis keresztmetszete miatt a teherátadás szempontjából kritikus gyenge helyeket hoznak létre. Üreges vagy vékony falú rácsoknál további hiba a belső csatornák porral vagy részlegesen összeolvadt anyaggal történő eltömődése, illetve a túlzott energiasűrűség hatására létrejövő falátégés, úgynevezett „through-hole” jelenség, amely a funkcionális keresztmetszet jelentős módosulásával jár. [12] A komplex hőciklusok és a geometriai bonyolultság következtében lokálisan jelentős maradó feszültségek és vetemedés is kialakulhat, amelyek globális alakeltérést és illeszkedési problémákat okoznak, különösen nagyméretű vagy aszimmetrikus rácsblokkoknál. A rácselemek esetleges lokális összeolvadása, illetve a topológia akaratlan megváltozása tovább bonyolítja a tervezés és a gyártás közötti megfeleltethetőséget, ezért a hibák azonosítása és kvantifikálása kiemelt minőségbiztosítási feladat. (3. ábra) [9]



3. ábra A porágyas lézeres olvasztási (PBF) eljárások során kialakuló hibák példái: a) porozitás, b) nem teljes fúzió, c) súlyos repedés, amely delaminációt okoz, d) „balling” jelenség nagyobb pásztázási sebességeknél, e) fröccsenés (spatter). [9]

A jellegzetes hibatípusokat, azok tipikus kiváltó okait és a legalkalmasabb ellenőrzési módszereket az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat A rácsszerkezetek jellemző hibái, kiváltó okaik és ajánlott ellenőrzési módszereik

Hibatípus	Tipikus kiváltó ok	Ajánlott ellenőrzési módszer
Kötéselégtelenség	Túl alacsony energiasűrűség, túl nagy rétegvastagság, nem megfelelő pásztázási átfedés	Röntgen-CT (XCT), metallográfia, in-situ rétegmonitorozás
Gázpórus	Porban oldott gáz; túl nagy energiasűrűség miatti gőzcsatorna-összeomlás	Röntgen-CT, relatívsűrűség-mérés (pl. Arkhimédész-elv), pirometria / fotodióda
Strut-átmérő eltérése (alul-/túlépülés), csomóponti anyagfelhalmozódás	Túlnyúló geometria, hőtörlődés a csomópontokban, nem megfelelő orientáció	CT-alapú CAD-összevetés (eltérés-térkép), optikai / tapintós koordinátamérés

Magas felületi érdekesség, ráragadt félig olvadt por	Lefelé néző felületek, olvadékmedence-instabilitás, durva szemcseméret	Felületi érdekességmérés (optikai / konfokális), elektronmikroszkópia, belső felületeknél CT
Maradó feszültség és vetemedés	Nagy hőmérséklet-gradiensek, eltérő keresztmetszetek egyenlőtlen le- és felhűlése	Geometriai (CT / optikai) alakellenőrzés, feszültségmérés (pl. furatfúrásos, diffrakciós)
Belső csatorna eltömődése / beszorult por	Zárt vagy nehezen hozzáférhető üregek, elégtelen porkifúvatás (különösen TPMS-nél)	Röntgen-CT, tömegmérés a porkifúvatás előtt/után

5. Hibák ellenőrzésének és kiküszöbölésének lehetőségei

Az additív gyártással készült fém rácsszerkezetek minőségbiztosítása akkor tekinthető hatékonynak, ha nem csupán a kész alkatrészek „átvizsgálására”, hanem a teljes gyártási lánc megelőző jellegű, visszacsatolt szabályozására épül. Ennek megfelelően a hibák kezelése három fő pilléren nyugszik: (I) a hibakialakulás megelőzése a tervezés és technológiai paraméterezés szintjén, (II) a hibák korai felismerése in-situ és rétegenkénti monitorozással, valamint (III) a kész alkatrészek célzott, roncsolásmentes és mechanikai vizsgálata, amelynek eredményei visszacsatolhatók a tervezéshez és a folyamatoptimalizáláshoz.

5.1. Megelőzés a tervezés és az alapanyag oldaláról

A hibák elkerülésének első lépcsője a tervezési fázis, ahol a „design for additive manufacturing” (DfAM) elvek alkalmazásával már a geometria szintjén mérsékelhetők a gyárthatósági kockázatok. A rács topológiájának, cellaméretének és minimum rúdelem-vastagságának megválasztásakor figyelembe kell venni a technológia által reálisan elérhető legkisebb falvastagságot, a hővezetési viszonyokat és a támaszstruktúrák szükségességét. Kerülendők a túl vékony, kis hőelvezetésű rudak, a lokális hőtorlódást okozó, nagy tömegkoncentrációjú csomópontok, illetve azok az orientációk, amelyek a rétegsíkhöz képest extrém kicsi dőlésszöget eredményeznek, mert ezek fokozottan hajlamosak geometriatorzulásra, beomlásra vagy felpadásra.

Az alapanyag-oldali megelőzés elsősorban a por minősítésén keresztül valósul meg. A szemcseeloszlás, szemcseforma, látszólagos és tapasztott sűrűség, valamint az oxidszint és a szennyezők (pl. nedvesség, nemkívánatos ötvözők) ellenőrzése elengedhetetlen, mivel közvetlenül befolyásolják a porágy tömörödését, a hővezetést, az olvadékmedence stabilitását, így közvetve a pórusképződést és a kötéselégtelenséget. A por újrahasznosítási ciklusainak szigorú nyomon követése és előírt határértékei (pl. maximális újrahasznosítási szám, friss porral való keverési arány) szintén fontos eszköz a hibakockázat kontrollálására.

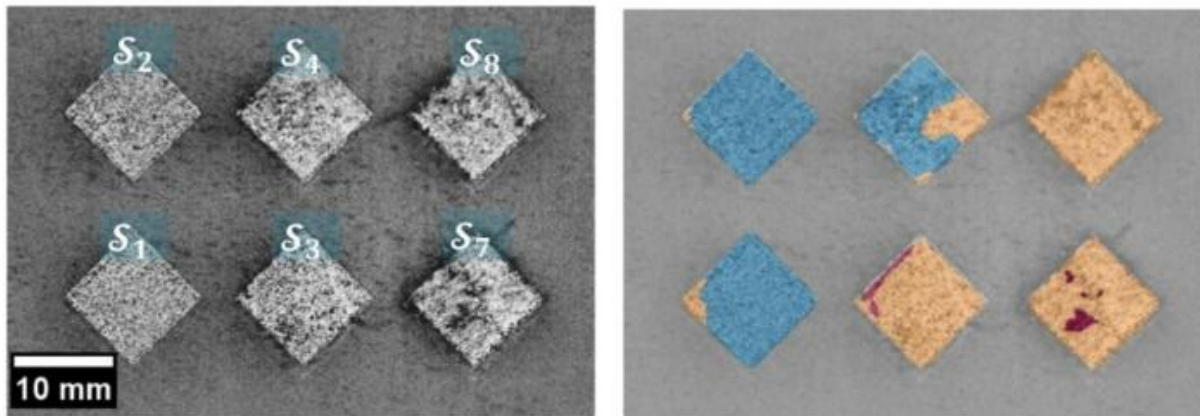
5.2. Folyamatparaméterek optimalizálása és próbatestek

A technológiai paraméterek – lézerteljesítmény, pásztázási sebesség, rétegvastagság, pásztázási stratégia, előmelegítés – meghatározása tipikusan kísérleti úton történik, kezdetben egyszerűbb, majd fokozatosan bonyolultabb rácisos próbatesteken. Ennek célja a stabil „process window” felvétele, amelyben a pórusarány alacsony, a geometriai pontosság megfelelő és a mikrostruktúra homogén.

A rácisos kupontesztek (lattice coupon) fontos szerepet töltenek be: olyan egyszerűsített rácsgemetriákat építenek, amelyek érzékenyen reagálnak a paraméterváltozásokra, miközben kis anyag- és időráfordítással vizsgálhatók. Ezek a kupontesztek CT-vizsgálatot, metallográfiát és nyomó-/fárasztó vizsgálatokat végeznek, majd a hibastruktúra és a mechanikai válasz alapján iteratívan finomhangolják a paramétereket. A cél egy olyan paraméterkészlet kialakítása, amely rác-specifikusan minimalizálja a lack-of-fusion pórusokat, a túlzott felrakódást és a vetemedést.

5.3. In-situ és rétegenkénti monitorozás

Az in-situ monitorozás a hibák korai felismerésének legfontosabb eszköze. A koaxiális és oldalnézeti kamerák, nagysebességű optikai rendszerek, pirometriai szenzorok és fotodiódák folyamatosan rögzítik az olvadékmedence méretét, fényességét, a fröccsenés (spatter) intenzitását, illetve a sugárreflexiók változását. Az ezekből származó idősorok és képsorozatok alapján detektálhatók a túl nagy vagy túl kicsi energiasűrűségű zónák, a pályakövetési hibák, a poradagolási rendellenességek és a lokális hőtorlódási jelenségek, amelyek később porozitáshoz, geometriai torzuláshoz vagy strut-szakadáshoz vezethetnek. (4. ábra)



4. ábra Példa a koaxiális kamerák által rögzített képsorozatok alkalmazására. [4]

A rétegenkénti képalkotás (layer-wise imaging, optikai tomográfia) során minden rétegepítés után nagyfelbontású felületkép készül a frissen olvasztott rétegről. Rácsszerkezeteknél ez különösen hasznos, mert jól láthatók a részlegesen megépült, hiányos vagy beomlott cellák, a lokális felrakódások és a rétegszennyeződések. Az ilyen képekből automatikus képfeldolgozással (szegmentálás, eltérésdetektálás, trendanalízis) „anomália-térképek” állíthatók elő, amelyek jelzik a potenciálisan hibás zónák jelenlétét. A fejlettebb rendszerek ezeket a jelzéseket a gyártási naplóval összekötve alkatrészszintű „digitális iker” hoznak létre, amely később a CT-eredményekkel és a mechanikai tesztekkel összefésülve erős alapot szolgáltat adatvezérelt minőségbiztosításhoz. [10] [4]

Az in-situ monitorozás ipari bevezetését ugyanakkor több gyakorlati korlát nehezíti. A nagy felbontású kamerák és szenzorok rétegenként nagy mennyiségű adatot termelnek, amelynek valós idejű tárolása, előfeldolgozása és kiértékelése jelentős számítási és infrastrukturális igényvel jár; a háttérzaj, az adatvesztés és a nagy adatmennyiség kezelése a megbízható hibadetektálás kulcskérdése [4]. A jelfeldolgozó és gépi tanuló modellek emellett hamis pozitív és hamis negatív jelzéseket is adhatnak: a normál üzemi ingadozást hibajelként értelmezhetik, vagy éppen valós hibát hagyhatnak figyelmen kívül, ami csökkenti a kimeneti megbízhatóságot. A megbízható osztályozást nehezíti a megfelelően címkézett, reprezentatív tanítóadatok hiánya, valamint a valós idejű kiértékelés és a fejlett modellek számításigénye közötti feszültség, ami a legtöbb fejlett megoldást egyelőre a koncepcióigazolás szintjén tartja [4].

Érdemes elkülöníteni az iparilag már rutinszerűen alkalmazott megoldásokat a kutatási fázisban lévő megközelítésektől. Iparilag bevettnek tekinthető az olvadékmedence optikai/pirometriás megfigyelése, a rétegenkénti felületi képalkotás és a gyártási naplózás, amelyek jellemzően utólagos, operátor általi felülvizsgálatot támogatnak. Ezzel szemben a teljes körű, valós idejű, alkatrészszintű „digitális iker”, a zárt szabályozási hurokban működő, automatikus visszacsatolásos hibajavítás, valamint a folyamatjelek és a végső hibák közötti prediktív, gépi tanuláson alapuló összerendelés nagyrészt még kutatás-fejlesztési, validálás alatt álló megközelítés. Ezt a megkülönböztetést a következtetések levonásakor célszerű szem előtt tartani.

5.4. Röntgen komputertomográfia és metrológia

A röntgen komputertomográfia (XCT, mikro-CT) mára a rácsszerkezetek minőség-ellenőrzésének kulcstechnológiájává vált, mivel egyedülálló módon képes a belső geometria és anyaghibák térbeli feltérképezésére. A rekonstrukció után a nyers voxeladatokból szegmentálással elkülöníthető a szilárd anyag, a porózus régiók és a teljes rácstérfogat, így numerikusan meghatározhatók a rúdelemek tényleges átmérői, a falvastagságok, a csomóponti alakváltozások, továbbá a pórusok száma, mérete és eloszlása. [8]

A CT-alapú metrológiai kiértékelés során a rekonstrukciót összevetik a névleges CAD-moddal: a felületek közti távolságmező (distance map) segítségével színekódolt eltérés-térképek állíthatók elő, amelyek egyértelműen mutatják az alulépített és túllepített zónákat, a rácsblokkok globális deformációját és a topológiai hibákat (pl. összenőtt vagy hiányzó rúdelemek). Mindez lehetővé teszi, hogy a geometriai eltérések ne csak szubjektív szemrevételezés alapján, hanem kvantitatív, statisztikailag feldolgozható formában jelenjenek meg a minőség-ellenőrzési dokumentációban. Az ipari bevezetés szempontjából fontos, hogy egyre több CT-rendszer rendelkezik tanúsított metrológiai képességekkel, így a rácsos alkatrészekon végzett geometriai ellenőrzés szabványosítható és nyomon követhető. [7] [5]

A CT-mérés metrológiai hitelességéhez hozzátartozik a mérési bizonytalanság, a felbontás és a méretfüggő kompromisszumok ismerete. A felbontást a voxelméret szabja meg: a voxelnél kisebb pórusok a zajtól nem különíthetők el, így a defektek alulbecsülhetők, a felület helyzete pedig jellemzően a voxelméret tizede körüli bizonytalansággal határozható meg [1]. A bizonytalanságot a GUM szerint Type A és Type B összetevőkre bontva célszerű budgetbe foglalni (a voxelméret, a sugárkeményedés, a geometriai nagyítás és a felületmeghatározás hozzájárulásával) [1]. Alapvető kompromisszum, hogy a kis voxelméret (nagy felbontás) csak kis látómezővel, azaz kis mintán érhető el, ezért egy adott berendezésen a teljes rácsblokk átvizsgálása és a finom hibák kimutatása nem optimalizálható egyszerre. A sűrűbb anyagok (titán, acél, Inconel) átvilágítása nagyobb röntgenteljesítményt igényel, ami a fókuszfolt megnövekedésén keresztül rontja a térbeli felbontást; a környező anyag vastagsága és a Feldkamp-műtermékek tovább korlátozzák a kimutathatóságot [1]. Ezért a kimutatható legkisebb hiba, az elérhető pontosság és a vizsgálható térfogat alkalmazásként egyeztetendő, és nagy alkatrészeknél gyakran csak roncsolásos referenciaméréssel (pl. metallográfia) validálható.

5.5. Kiegészítő roncsolásmentes vizsgálatok és mechanikai minősítés

Noha a CT a legteljesebb képet adja a rács belső állapotáról, gyakorlati okokból – idő- és költségigény, méretkorlát – sok esetben kiegészítő NDT-módszereket is alkalmaznak. Ilyen lehet például az ultrahangos vizsgálat (beleértve a rezonáns ultrahang spektroszkópiát), amely a sajátfrekvenciák és rezgésmódok változásából következtet a belső hibák jelenlétére és a globális merevségre; vagy az aktív termográfia, amely felszínközeli repedések, delaminációk detektálására alkalmas. Örvényáramos vizsgálat alkalmazható a könnyen hozzáférhető külső felületeken, különösen vezetőképes ötvözeteknél, míg folyadékbehatolásos (PT) és mágneses poros (MT) vizsgálat a makroszkopikus felületi repedések észlelésére szolgál.

A mechanikai és funkcionális vizsgálatok kiegészítik a roncsolásmentes ellenőrzést azzal, hogy közvetlenül méri a rácsszerkezet teherbírását, merevségét, energiaelnyelő képességét, fáradási élettartamát, illetve – alkalmazástól függően – hőtechnikai vagy áramlástechnikai teljesítményét. A mechanikai minősítés jellemzően standardizált, rácsspecifikus próbatesteken történik: nyomó- és kvázi-statisztikus terhelések, dinamikus ütközési vizsgálatok, valamint nagy ciklusszámú fárasztó tesztek formájában. A CT-vel feltárt pórusmező és geometriai hibák lokalizációját sok esetben korrelálják a törési felületekkel és a lokális deformációs mintázatokkal, így feltérképezhető, mely hibák kritikusak az adott alkalmazásban, és milyen szinten tolerálhatók. [5] [20]

Fontos nyitott kérdés ugyanakkor, hogy a rácsszerkezetek mechanikai vizsgálatára nincs egységesen elfogadott, rácsspecifikus próbatest-szabványosítás. Bár a porózus fémek nyomóvizsgálatára létezik szabvány (ISO 13314), amely legalább tíz cellányi szélességet és 1 és 2 közötti karcsúsági arányt ír elő a méreteffektusok elkerülésére, e tartományon kívüli geometriák jelentősen befolyásolják a látszólagos mechanikai jellemzőket, a húzóvizsgálathoz pedig máig nincs

általánosan bevett rácspróbatest-kialakítás[16]. A méreteffektus (a nagyobb mintákban statisztikailag több hiba) és a peremfeltételek (a terhelőlapok közelében kialakuló feszültségkoncentráció) miatt a kis kuponokon mért tulajdonságok nem feltétlenül vihetők át közvetlenül a teljes alkatrészeire, ami a fáradási tulajdonságok és a tönkremeneteli mód szabványosítását is nehezíti [16] [13].

A jellemző hibákra vonatkozó számszerű elfogadási kritériumok rögzítése a megfelelőség gyakorlati megítélésének előfeltétele, ezek azonban erősen alkalmazás- és szabványfüggők, így általánosan nem adhatók meg. Tájékoztató jelleggel: a porozításra a teljesen tömör állapothoz közeli relatív sűrűséget (jellemzően $\geq 99-99,5\%$) szokás célértékként megadni, és a relatív sűrűség mérésére önálló útmutató is létezik (ASTM F3637) [2]. A megengedhető pórus- vagy hibaméret nem önmagában, hanem a pórus alkatrészfelülethez viszonyított helyzetével együtt értelmezendő, mivel a felülethez közeli hibák kritikusabbak a fáradás szempontjából; biztonságkritikus, fáradásra méretezett alkatrészeken emiatt egyre inkább valószínűségi (probabilisztikus) megfelelőségi megközelítést alkalmaznak a determinisztikus biztonsági tényező helyett [2]. A geometriai eltérésekre és a felületi érdességre vonatkozó konkrét tűréshatárokat tipikusan az alkalmazás (légi-/űripar, orvostechika, energetika) vonatkozó előírásai és az adott alkatrész funkcionális követelményei rögzítik, ezért e küszöbértékeket az alkatrész minősítési tervében, nem pedig egységes általános határértékként célszerű meghatározni.

5.6. Utómegmunkálás és hibacsökkentés

A hibák kiküszöbölésének közvetlen eszközei az utófeldolgozási lépések. A hőkezelés – tipikusan feszültségmentesítő vagy öregítő eljárások – célja a maradó feszültségek csökkentése, a mikrostruktúra homogenizálása és a rideg, repedésre hajlamos fázisok arányának mérséklése. Rácsszerkezeteknél külön figyelmet igényel, hogy a vékony keresztmetszetek gyorsabb fel- és lehűlése hőmérséklet-gradiensbeli különbségeket okozhat a masszívabb csomóponti régiókhoz képest, ezért a hőkezelési ciklusokat ennek megfelelően kell megválasztani.

A felületjavító eljárások – például szemcseszórás, koptató- vagy vibrációs felületkezelés, kémiai maratás, elektropolírozás – elsősorban a felületi érdesség csökkentésére és a részlegesen megolvadt por szemcséinek eltávolítására szolgálnak. Ez egyrészt a fáradási repedésindító helyek számát csökkenti, másrészt áramlástechnikailag kedvezőbb, kisebb nyomásveszteségű csatornákat eredményez hőcserélők és folyadékvezető elemek esetén. Kihívást jelent ugyanakkor a belső, nehezen hozzáférhető rácsüregek kezelése; ennek megoldására fejlesztik az olyan speciális technológiákat, mint az elektrokémiai polírozás belső felületeken vagy fluidizált szemcsés rendszerek alkalmazása.

5.7. Adatvezérelt, integrált minőségbiztosítás

A modern megközelítésekben egyre nagyobb szerepet kap az adatvezérelt minőségbiztosítás, amely az in-situ szenzoradatokat, a CT- és egyéb NDT-eredményeket, valamint a mechanikai vizsgálatok kimeneteit egységes adatbázisban integrálja. Gépi tanulási és mintázatfelismerő algoritmusok segítségével kapcsolat teremthető a folyamatjelek (pl. olvadákmérendence-fényesség, spatter-intenzitás, rétegbeli anomáliák) és a később detektált hibák (pórusmező, geometriai eltérés, törési helyek) között. Így olyan prediktív modellek hozhatók létre, amelyek képesek már a gyártás közben jelzést adni arról, hogy egy adott alkatrész várhatóan megfelel-e a minőségi követelményeknek, vagy célszerű még a gyártási folyamat során selejtezni.

Hosszabb távon az a cél, hogy a minőségbiztosítás zárt szabályozási hurkot alkosson: a tervezési paraméterek, a gyártási beállítások és az utófeldolgozási lépések folyamatosan finomhangolhatók legyenek a visszamért minőségi adatok alapján. Az ilyen integrált, adatvezérelt rendszerek különösen fontosak a biztonságkritikus alkalmazások – légi- és űripar, orvostechika, energetika – esetében, ahol a rácsszerkezetek megbízható, reprodukálható gyártása nemcsak műszaki, hanem szabályozói és gazdasági követelmény is. [17]

6. Rövidítésjegyzék

AM: additív gyártás (additive manufacturing); CAD: számítógéppel segített tervezés (computer-aided design); CT / XCT: (röntgen) komputertomográfia ((X-ray) computed tomography);

DfAM: additív gyártásra tervezés (design for additive manufacturing); GUM: útmutató a mérési bizonytalanság kifejezéséhez (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement); MT: mágnesezhető poros vizsgálat (magnetic particle testing); NDT: roncsolásmentes vizsgálat (non-destructive testing); PBF: porágyas olvasztás (powder bed fusion); PT: folyadékbehatolásos vizsgálat (penetrant testing); TPMS: tripla periódusos minimális felület (triply periodic minimal surface).

7. Összefoglalás

Az additív gyártással készült fém rácsszerkezetek hibáinak kezelése csak akkor hatékony, ha a minőségbiztosítás a teljes láncot lefedi a tervezéstől az utómegmunkálásig. A megelőzés kulcsa a DfAM elvek alkalmazása, a reálisan gyártható rácsgéometria megválasztása, valamint a por és a technológiai paraméterek (energiasűrűség, pásztázási stratégia, rétegvastagság) gondos kísérleti optimalizálása rácscs próbatesteken. A gyártás közbeni in-situ és rétegenkénti monitorozás (optikai, hőkamerás, fotodiódás rendszerek) lehetővé teszi a folyamatbanomáliák és potenciális hibazónák korai felismerését. A kész alkatrészeknél a röntgen komputertomográfia kulcsszerepet játszik a belső geometria és porozitás háromdimenziós feltérképezésében, amelyet optikai, ultrahangos, termográfias és mechanikai vizsgálatok egészítenek ki. Az így nyert adatok visszacsatolhatók a tervezéshez és a folyamatparaméterezéshez, míg a hőkezelés és felületjavító utókezelések, valamint az adatvezérelt értékelés összességében a rácsszerkezetek megbízható és reprodukálható minőségét biztosítják.

Irodalomjegyzék

- [1] AIRBUS (2016): Pioneering bionic 3D printing. Airbus Newsroom. Elérhető: <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2016-03-pioneering-bionic-3d-printing>
- [2] ASTM INTERNATIONAL (2023): F3637-23 Standard Guide for Additive Manufacturing of Metal – Finished Part Properties – Methods for Relative Density Measurement. ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: <https://doi.org/10.1520/F3637-23>
- [3] CARERI, F.; KHAN, R. H. U.; TODD, C.; ATTALLAH, M. M. (2023): Additive manufacturing of heat exchangers in aerospace applications: a review. Applied Thermal Engineering, 235, 121387. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121387>
- [4] CHEN, L.; BI, G.; YAO, X. et al. (2024): In-situ process monitoring and adaptive quality enhancement in laser additive manufacturing: a critical review. Journal of Manufacturing Systems, 74, 527–574. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.04.013>
- [5] CHEN, W.; ZHANG, L.; GUO, H. et al. (2024): A novel method combining finite element analysis and X-ray computed tomography to predict defect-dependent mechanical behavior of additively manufactured AlSi10Mg lattice structures. Virtual and Physical Prototyping. doi: <https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2383302>
- [6] DU PLESSIS, A.; RAZAVI, S. M. J.; BENEDETTI, M. et al. (2021): Properties and applications of additively manufactured metallic cellular materials: a review. Progress in Materials Science, 125, 100918. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100918>
- [7] DU PLESSIS, A.; SCHWADERER, G.; CRISTOFOLINI, I. et al. (2021): Dimensional metrology of additively manufactured lattice structures by combined tactile probe and X-ray tomography. Material Design & Processing Communications, 3(6), e216. doi: <https://doi.org/10.1002/mdp2.216>
- [8] DU PLESSIS, A.; WALLER, J. M. (2018): Simple and standardised X-ray CT testing in metal additive manufacturing. Metal Additive Manufacturing, 4(4), 87–96. Elérhető: <https://www.metal-am.com/articles/simple-and-standardised-x-ray-ct-testing-in-metal-3d-printing/>
- [9] ECHETA, I.; FENG, X.; DUTTON, B. et al. (2020): Review of defects in lattice structures manufactured by powder bed fusion. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 106(5–6), 2649–2668. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04753-4>
- [10] EVERTON, S. K.; HIRSCH, M.; STAVROULAKIS, P.; LEACH, R. K.; CLARE, A. T. (2016): Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. Materials & Design, 95, 431–445. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.044>
- [11] FENG, J.; LI, H.; ZHANG, X. et al. (2022): Triply periodic minimal surface porous structures: from multi-scale design and additive manufacturing to multidisciplinary applications. Journal of Materials Research and Technology. doi: <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ac5be6>
- [12] HO, J. Y.; LEONG, K. C.; WONG, T. N. (2020): Additively-manufactured metallic porous lattice heat exchangers for air-side heat transfer enhancement. International Journal of Heat and Mass Transfer, 150, 119262. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119262>
- [13] KECHAGIAS, S.; OOSTERBEEK, R. N.; MUNFORD, M. J. et al. (2026): Lattice structures for bone replacement: the intersection of bone biomechanics, lattice design, and additive manufacturing. Advanced Materials Technologies. doi: <https://doi.org/10.1002/admt.202501885>

- [14] LI, J.; YANG, J.; GUO, H. et al. (2025): Additively manufactured metallic TPMS lattice structures: design strategies, fabrication, multifunctional properties, and applications. *npj Advanced Manufacturing*, 3, 57. doi: <https://doi.org/10.1038/s44334-025-00057-6>
- [15] LIU, R.; CHEN, W.; ZHAO, J. (2024): A review on factors affecting the mechanical properties of additively-manufactured lattice structures. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33, 4685–4711. doi: [10.1007/s11665-023-08423-1](https://doi.org/10.1007/s11665-023-08423-1)
- [16] LIU, W.; CHEN, X.; ZENG, W. et al. (2024): Comparison of X-ray computed tomography and coordinate-measuring system dimensional measurement for additive manufacturing parts using physical and simulation methods. *Measurement*, 229, 114414. doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114414>
- [17] PRANIEWICZ, M.; SPERLING, P.; DU PLESSIS, A. et al. (2022): Toward traceable XCT measurement of additive manufactured lattice structures. *NDT & E International*, 131, 102677. doi: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.05.010>
- [18] SZUST, A.; KOZIOR, T.; ZMARZŁY, P. et al. (2026): Evaluation of TPMS lattice parameters on the mechanical properties of lightweight gears produced by additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-026-17811-5>
- [19] TANCOGNE-DEJEAN, T.; SPIERINGS, A. B.; MOHR, D. (2016): Additively-manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading. *Acta Materialia*, 116, 14–28. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.05.054>
- [20] TUNINETTI, V.; BARIANI, P.; BORTOLIN, M. et al. (2025): Biomimetic lattice structures design and manufacturing for engineering applications. *Materials*, 18(7), 458. doi: <https://doi.org/10.3390/biomimetics10070458>