

REZUMAT

Procesele de fabricație aditivă (AM) de fuziune a patului cu pulberi (PBF) [1] sunt procese care facilitează dezvoltarea de noi concepte și abordări în domeniul designului de produse, al producției în sine și chiar în domeniul modelării proceselor de afaceri. Astfel, apar noi cerințe la nivelul proceselor de fabricație aditivă. Datorită caracteristicilor procesului aditiv de fabricare în straturi, este posibilă realizarea de piese cu funcționalități integrate, cu geometrii complexe, care, în același timp, pot avea un grad ridicat de personalizare. Cu toate acestea, este posibil că tehnologiile aditive să își croiască drumul în mediile industriale? Este posibil ca piese unice, extrem de personalizate, să fie produse aditiv la fel de eficientă ca și piesele produse în masă, prin procese convenționale de fabricație?

Marii producători de sisteme AM PBF livrează în prezent numai echipamentele în sine și nu susțin nevoile utilizatorilor, cea mai mare parte IMM-uri, în ceea ce privește asigurarea calității.

Începând să privim fabricația aditivă din punct de vedere industrial, afirmații fiabile, legate de calitatea produsului, sunt indispensabile. În același timp, în momentul în care este vizat un proces de certificare a produselor AM, declarații de conformitate cu privire la toleranțele geometrice și la parametri fizici cuantificabili precizi, sunt imperative. Cu cât identificarea, achiziționarea și influența în proces ale acestor parametri vor deveni mai repede realitate, cu atât va crește eficiența proceselor AM.

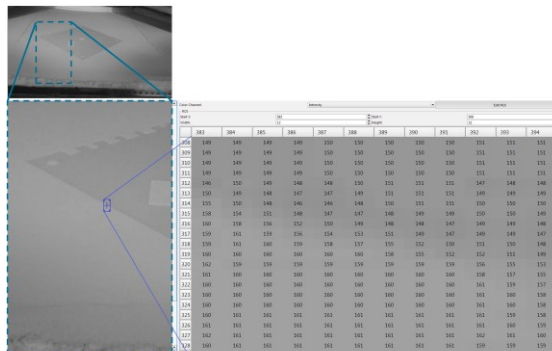
Sinterizarea selectivă cu laser -Selective Laser Sintering (SLS)- și sinterizarea directă (topire) cu laser a metalelor -Selective Laser Melting (SLM)- sunt cele mai importante tehnologii AM PBF. Ele reprezintă adevărate speranțe pentru utilizatorii pieselor AM PBF în domeniul industrial, variind de la aplicații în industria automobilelor și chiar cea aerospațială, până la aplicații în domeniul medical.

Calitatea și funcționalitatea pieselor SLS și SLM pot fi foarte ușor afectate, ținând cont de următoarele aspecte:

- în prezent nu sunt asigurate nici managementul calității (QM) și nici asigurarea calității (QA);
- nu există standarde de calitate, la fel cum nu există nici un standard sau sistem de QM general acceptat;
- o mare varietate de parametri influențează procesele de fabricație bazate pe aceste tehnologii, respectiv calitatea pieselor astfel fabricate.

Pentru procesele SLS și SLM, în ceea ce privește asigurarea calității, mai exact controlul calității (QC), respectiv optimizarea de proces inline, nevoile științifice sunt date de faptul că problemele de calitate, care apar în timpul procesului de producție și sunt cauzate de diferiți factori, conduc la vulnerabilități, la fisuri, respectiv la produse defectuoase.

O monitorizare inline fiabilă a produselor și proceselor, la fel ca și optimizarea în timp real a proceselor AM PBF, sunt cruciale, nu numai pentru prestatorii de servicii din acest domeniu, dar și pentru utilizatorii pieselor AM, astfel încât, piesele respective să îndeplinească standardele de calitate și siguranță, necesare în diferite domenii de aplicare.



Pentru a asigura o bază solidă necesară dezvoltării unui sistem inline de QC, respectiv pentru viitoarele scheme de control în proces, a fost implementată o prioritarizare a defectelor și defecțiunilor inline. Pentru ierarhizarea probabilității și severității a "Potential Quality Failure Causes" (vezi Figura 2) și a efectelor corespunzătoare acestora, într-un cuvânt, a defectelor și defecțiunilor inline, doi factori au fost luați în considerare: frecvența de apariție a acestora și costurile nerecuperabile direct implicate. Un design experimental (DoE) a fost implementat pentru a genera concluzii clare, privind ierarhizarea frecvenței de apariție a defectelor și defecțiunilor inline.

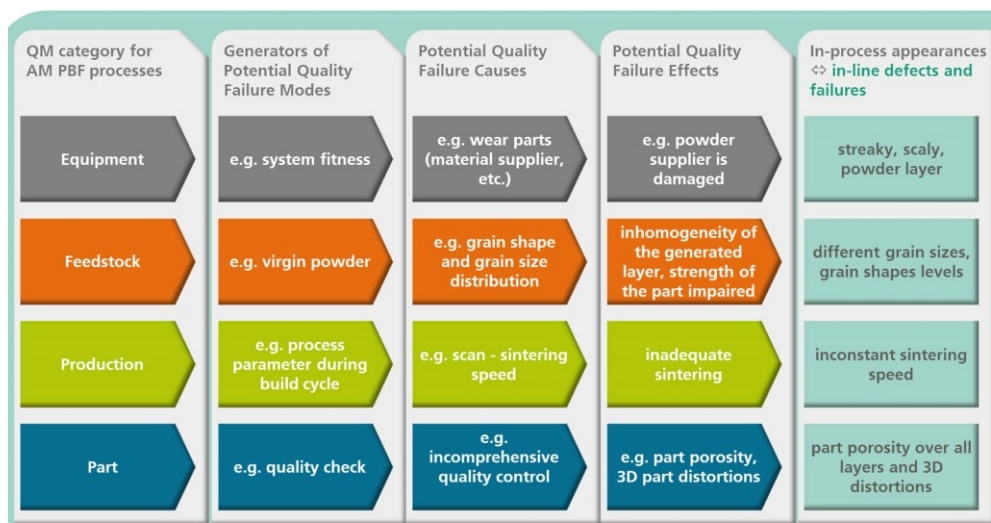


Figura 2. Diagramă schematică a abordării corespunzătoare identificării defectelor și defecțiunilor inline, cu apariție în timpul proceselor AM PBF.

Pentru un sistem inline de QC [3], respectiv pentru dezvoltarea unei platforme hardware (HW) cât și una software (SW), sarcinile ierarhizate au fost clasificate, ținând cont de pașii de producție ai proceselor AM PBF. Pe baza sarcinilor clasificate a fost elaborat un concept global pentru un sistem inline de QC în producția AM PBF, reprezentând o *noutate*¹.

Platforma HW este o platformă modulară, pentru a permite în viitor:

- adăugarea cu ușurință a altor senzori, pentru rezolvarea noilor probleme de calitate care vor apărea odată cu dezvoltarea mașinilor AM PBF;
- adaptarea facilă a sistemului dezvoltat la alte procese AM PBF;
- fusiunea, pe partea de SW, a datelor obținute de la diverși senzori.

Pentru un sistem inline de QC, exemplar pentru o mașină SLS de la firma EOS, tehnologiile și senzorii adecvați pentru o analiză și o monitorizare multisenzor au fost gupați în trei module de sistem, "Inline Quality Control System Modules" (IQCSM), necesare rezolvării tuturor sarcinilor globale ale sistemului [3]: două, corespunzătoare unor sisteme Machine Vision și unul, corespunzător unui sistem termografic. Mai mult, în ceea ce privește designul arhitecturii HW, a fost elaborat un concept global, incluzând interfețele corespunzătoare.

¹ "forming a distinct contribution to the knowledge of the subject and/or evidence of originality by the discovery of new facts and/or by the exercise of independent critical power" [14]

4 Rezumat

Pe partea de SW, a fost dezvoltat, pe baza [4], un framework dedicat ce poartă numele de *"AM PBF Inline Quality Control Platform"* (AM-IQCP). AM-IQCP pune accent pe o platformă de evaluare automată a datelor, platformă ce include diferite module, pentru diferite strategii de evaluare. Toate interfețele corespunzătoare, algoritmi (cei specifici pentru fiecare tehnologie în parte, la fel ca și cei corespunzători fuziunilor de date), împreună cu funcționalitatea lor complexă, pot fi implementați modular în framework-ul AM-IQCP. Aplicația AM-IQCP este dezvoltată în Microsoft Visual Studio (Visual C++), utilizând biblioteca Qt (32-bit și 64-bit). Concepută ca un framework modular, AM-IQCP permite, în orice moment, atât integrarea de noi plug-in-uri și biblioteci, cât și separarea funcționalității platformei în module independente și interschimbabile.

Implementarea HW s-a concentrat pe modulul IQCSM 2, pornind de la conceptul HW, respectiv de la tehnologiile și senzorii adecvați pentru achiziționarea de date și semnale necesare pentru rezolvarea tuturor sarcinilor sistemului; implementarea sa cu succes acoperind marea majoritate a sarcinilor sistemului. Dezvoltarea IQCSM 2, care este în fapt un sistem Machine Vision, specific pentru AM PBF, a fost realizată pe o mașină SLS de tip EOS Formiga P100. La baza construcției stă un sistem modular din profile din aluminiu; în acest fel modularitatea este asigurată în orice moment și în orice loc. Pentru fiecare componentă (de ex. cameră video industrială, surse de iluminare) au fost dezvoltați conectori speciali, astfel încât, pentru fiecare sensor adăugat, există posibilități de ajustare completă (de ex. poziția în (x,y,z) , unghi).

O altă componentă a sistemului Machine Vision, la fel de critică ca și componenta HW de achiziționare de imagini, este SW engine-ul de achiziționare și procesare a datelor care constituie și comunică rezultatul final.

Noutate¹. SW engine-ul implementat, al sistemului inline de QC pentru o fabricație AM PBF sigură și fiabilă, utilizând exemplul tehnologiei SLS, este constituit din două rutine IIP principale: cea de achiziție inline de imagini, sub denumirea *"IIP for Inline Image Acquisition"* și cea de control al calității, numită *"IIP for Quality Control"*. Modularitatea platformei SW permite integrarea cu ușurință, în orice moment, de noi algoritmi. Toți algoritmi au fost implementați în C++, în formă de plug-in-uri. Un framework modular, denumit EyeVision3, a fost integrat pentru a asigura un mediu de dezvoltare de bază (ex. spațiile de memorie alocate imaginilor sunt gestionate direct de către framework). De asemenea au fost integrate modulele "imgproc" și "calib3D" din OpenCV.

Pentru dezvoltarea, implementarea și validarea componentelor sistemului inline de QC, s-a utilizat artefactul de testare al NIST (US National Institute of Standards and Technology) [5].

Noutate¹. Sistemul dezvoltat este independent de mașină AM PBF: achiziția datelor este declanșată direct, de o subrutină SW, printr-o analiză directă a datelor furnizate de către componentele HW, de tip Machine Vision. Rutina SW globală de IIP avansată, nu numai că asigură inspecția strat cu strat a pieselor fabricate aditiv, dar și generează în același timp, pentru fiecare piesă în parte, un protocol de calitate. Aplicația SW standalone, cu o interfață utilizator prietenoasă, este, datorită implementării bazate pe biblioteca Qt, independentă de sistemul de operare. În acest fel, aplicația software poate să fie executată pe sisteme bazate pe diferite arhitecturi, nu numai de tip Intel sau AMD, ci și de tip ARM sau MIPS. Prin integrarea SW și HW s-a obținut un sistem care poate inspecta calitatea livrată de către producția AM PBF și care poate da un feedback operatorului mașinii respective.

Cele două rutine SW principale, *"IIP for Inline Image Acquisition"* și *"IIP for Quality Control"*, împreună cu subrutinele corespunzătoare au fost integrate și

conectate între ele, într-o rutină SW de IIP avansată, care asigură inline controlul calității pentru procesul AM PBF de tip SLS.

Rutina SW *"IIP for Inline Image Acquisition"*. Sistemul Machine Vision dezvoltat este independent de mașină, ceea ce înseamnă că nu există un semnal declanșator de sincronizare pentru achiziția de date. Provocarea științifică a fost aceea de a implementa o rutină SW de tip IIP, care să achiziționeze imaginile semnificative, la momentul potrivit, doar pe baza informațiilor imaginii live. Sincronizarea pentru achiziția imaginii corespunzătoare unui strat, sinterizat sau de pulbere, va fi declanșată de către mișcarea furnizorului de material (Figura 3). După ce imaginea a fost capturată, are loc atât corectarea distorsiei, cât și identificarea automată a tipului de strat.

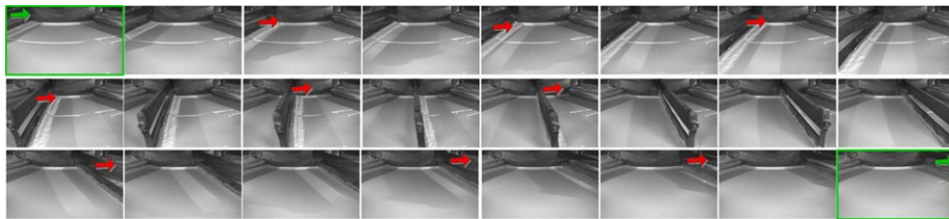


Figura 3. Mișcarea furnizorului de pulbere, în mod exemplar (de la stânga la dreapta) – prima și ultima imagine din această secvență vor fi achiziționate pentru controlul calității.

Rutina SW *"IIP for Quality Control"*. În cazul straturilor de pulbere (vezi Figura 4): dacă nu sunt identificate defecte grosiere, are loc inspecția de defecte subtile. Dacă, mai departe, nu se găsesc defecte, stratul este clasificat ca fiind i.O. (in order). Dacă, în timpul procesului de inspecție automată a stratului de pulbere, un defect grosier sau subtil este identificat, stratul este clasificat că fiind n.i.O. (not in order) iar defectul respectiv va fi înregistrat în protocolul de calitate al piesei.

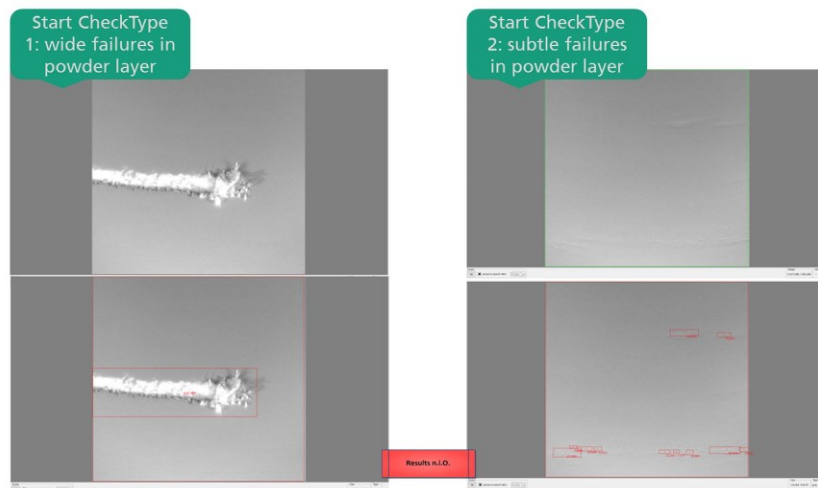


Figura 4. Inspecția straturilor de pulbere: exemplificarea rezultatelor rutinei SW *"IIP for Quality Control"*.

În cazul straturilor sinterizate (vezi Figura 5): dacă nu sunt identificate defecte grosiere sau subtile, are loc o comparație între valoarea nominală și cea actuală a numărului de caracteristici sinterizate. Dacă numerele sunt diferite, stratul

6 Rezumat

sinterizat va fi clasificat că n.i.O. Dacă numărul caracteristicilor este identic, sunt executate operații de măsurare pentru diverse caracteristici sinterizate, rezultatele fiind comparate cu valorile nominale, ținându-se cont de toleranțele corespunzătoare. Orice defect identificat este înregistrat în protocolul de calitate al piesei.

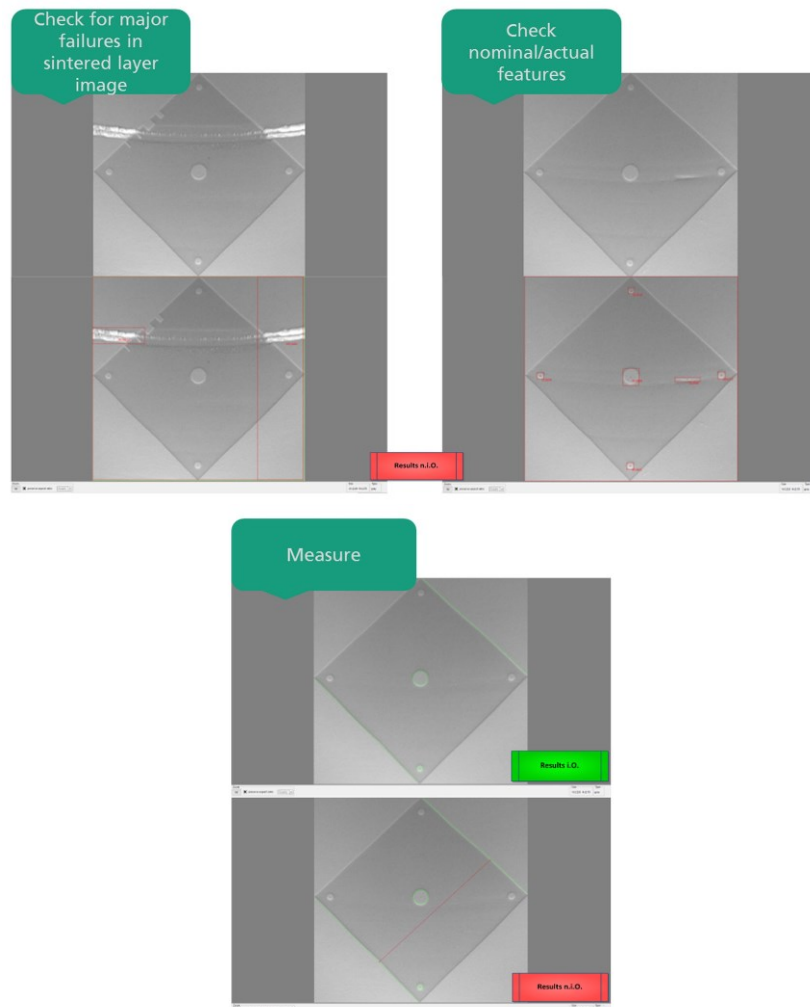


Figura 5. Inspecția stratului sinterizat: exemplificarea rezultatelor rutinei SW "IIP for Quality Control".

În ambele cazuri, după procedurile de evaluare, operatorul este informat despre rezultatele inspecției stratului respectiv, iar sistemul așteaptă, pentru a achiziționa următoarea imagine, noul declanșator de sincronizare pentru achiziție dat de rutina SW "IIP for Inline Image Acquisition".

Interfața cu utilizatorul este o interfață prietenoasă. Două layout-uri au fost implementate: unul corespunzător setării programului de inspecție, iar celălalt corespunzător inspecției inline (vezi Figura 6). Primul, este adresat unui utilizator avansat pentru parametrizarea SW a unui "build job". Cel de-al doilea, este

independent de gradul de calificare al utilizatorului; aici un program de inspecție specific unui "build job" poate fi direct încărcat și executat.

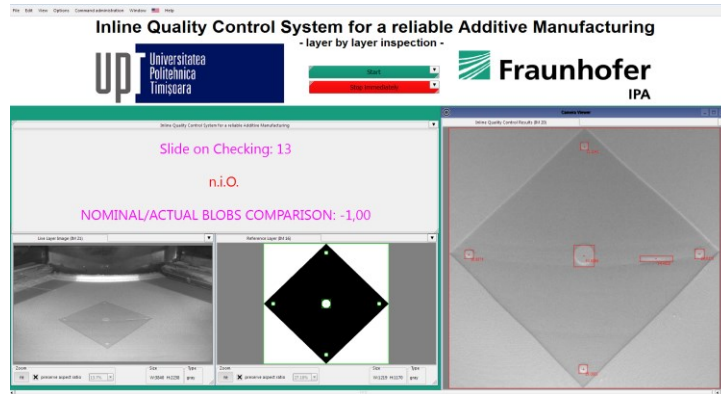


Figura 6. Interfața cu utilizatorul: layout-ul corespunzător inspecției inline.

Pentru a conecta componentele HW și SW ale sistemului, este necesar doar un cablu Ethernet care, prin placa de rețea GigE, asigură transferul de date de la camera Machine Vision la sistemul unde rulează aplicația. Sistemul implementat este prezentat în Figura 7. Sistemul a fost instalat pe mașina EOS Formiga P100 de tip SLS la Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation IPA (Fraunhofer IPA), unde a inspectat, în timpul procesului de producție, calitatea pieselor fabricate. Utilizatorul, pe lângă protocolul de calitate al piesei, are posibilitatea, în cazul apariției de defecte și/sau defecțiuni, să oprească în timp real procesul de fabricație.

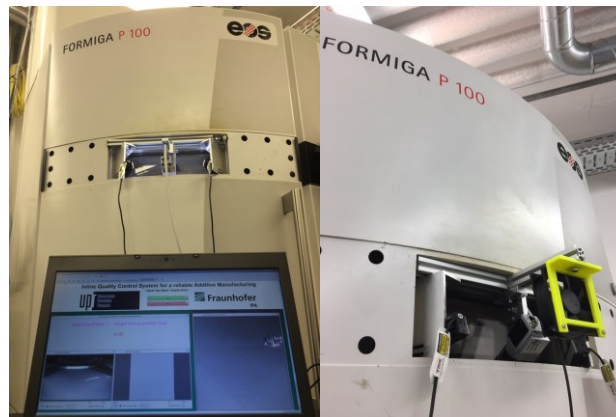


Figura 7. Integrarea modulelor HW și SW în sistemul final (stânga); HW cu ventilator integrat (dreapta).

Etapa de verificare a fost foarte importantă pentru măsurile de îmbunătățire a sistemului și pentru verificarea rezultatelor obținute. Ca și referință pentru verificarea rezultatelor a fost necesară folosirea unei tehnologii offline; aceasta deoarece, până la ora actuală, nu există nici un sistem inline care să asigure QC pentru piesele produse AM PBF. Astfel s-au folosit avantajele computer tomografiei industriale (CT) [6]. Rezultatele CT obținute au confirmat rezultatele sistemului inline de QC.

8 Rezumat

Precizia sistemului implementat este dată de către componentele HW. Camera industrială Machine Vision are o rezoluție de 10 MP (3856 x 2764 pixeli). Ținând cont de funcția de transfer a modulației - Modulation Transfer Function (MTF)- a lentilei folosite și de distanța de lucru a sistemului, de 350mm, câmpul visual al sistemului este de 320x240 mm. Astfel, rezoluția optică a sistemului corespunzătoare ariei inspectate, și anume a platformei de lucru a mașinii de 200x250mm, este de 82 de microni pe pixel. Datorită faptului că, camera sistemului nu este paralelă cu platforma de lucru a mașinii, este necesară o operație de corectare a distorsiei. Astfel mărimea unui pixel, în coordonate reale, scade la 116 microni. De aceea, pentru a evalua precizia de inspecție și măsurare, se vor referi în continuare direct unitățile de pixel.

Sistemul dezvoltat și implementat poate să identifice defecte cu o mărime de cel puțin trei pixeli, în condițiile în care rata de contrast în imagine este extrem de scăzută (vezi Figura 8).

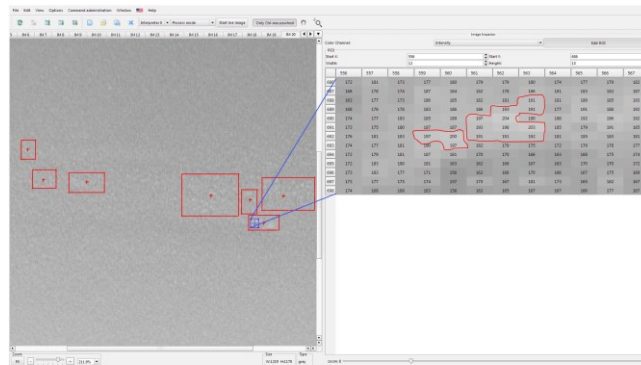


Figura 8. Imaginea unui strat de pulbere: o regiune n.i.O. cu valorile detaliate ale pixelilor.

Pentru măsurarea caracteristicilor straturilor sinterizate, cum ar fi diametre sau distanțe, precizia sistemului este dată de exactitatea cu care aceste elemente pot fi potrivite în imagine. Pentru un strat sinterizat, Figura 9 demonstrează capacitatea ridicată a sistemului de a potrivi automat astfel de geometrii, în imagini cu o rată de contrast extrem de scăzută.

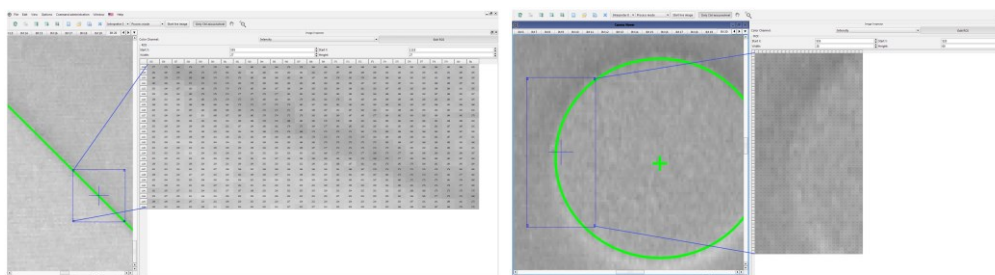


Figura 9. Imaginea unui strat sinterizat: elemente potrivite automat -line (stânga) si cerc (dreapta)-.

Ținând cont de rata de contrast extrem de scăzută în imagine, rezultatele globale obținute reprezintă o realizare care reflectă contribuția distinctă în domeniul QC inline pentru procesele AM PBF.

Concluzii

Principalul obiectiv al acestei teze de doctorat, pornind de la analiză critică a stadiului actual al tehnicii în domeniile de QC și QA pentru procesele AM PBF, a fost de a aduce contribuții distincte în domeniul de QC inline, propunându-și crearea unei baze solide, pentru o producție aditivă în lot, sigură și fiabilă.

Teza tratează o serie de aspecte teoretice legate de monitorizarea în timpul ciclurilor de fabricație a calității pieselor, calitate ce este influențată de un număr imens de parametri. A fost dezvoltată o abordare completă în scopul determinării efectelor globale ale acestor parametri, vizibile în timpul proceselor AM PBF. Astfel au fost determinate sarcinile globale ale sistemului și a fost realizat un concept comprehensiv, pentru un sistem inline de QC pentru producția AM PBF.

Partea aplicativă a tezei constă în dezvoltarea și implementarea unui sistem inline de QC pentru fabricația AM PBF, bazat pe IIP, folosind exemplul uneia dintre cele mai promițătoare tehnologii pentru producția AM, în lot sau chiar în serie: procesul de fabricație aditivă SLS. Activitățile de cercetare experimentală s-au desfășurat în cadrul Fraunhofer IPA.

Prin determinarea tehnologiilor și senzorilor necesari pentru achiziția de date și prin designul arhitecturii HW s-a realizat și implementat componenta HW a sistemului. De-a lungul etapei de dezvoltare, s-a ținut cont de diverse aspecte importante, cum ar fi, raportul preț-performanță și gradul de modularitate al platformei HW. O realizare deosebită a fost obținută prin faptul că platforma HW este independentă de mașină AM PBF.

În pasul următor, componentele SW pentru inspecția strat cu strat au fost dezvoltate sub forma a două rutine SW principale, bazate pe IIP: una, pentru achiziția de date, independentă de mașina AM PBF și cealaltă, pentru algoritmi dedicați evaluării datelor în timpul procesului de fabricație AM PBF. În timpul controlului inline al calității piesei aflate în procesul de fabricație, toate defectele și/sau defecțiunile sunt înregistrate într-un protocol dedicat. În acest fel, nu doar calitatea pieselor este asigurată, ci și condiția esențială pentru folosirea pieselor fabricate AM PBF în diverse medii industriale. Partea aplicativă a tezei conține implementarea și testarea unui sistem inline de control al calității, un sistem nou și inovator, montat pe o mașină SLS de la firma EOS [7] tip Formiga P100.

Faptul că, activitatea de cercetare desfășurată încheie o breșă în stadiul actual al tehnicii, în ceea ce privește QC și QA pentru procesele AM PBF, este subliniat de gradul înalt de aplicabilitate al rezultatelor obținute. Pentru instalarea sistemului nu este nevoie de acordul producătorilor de sisteme AM PBF, deoarece nu este necesară interacțiunea cu interfețele HW ale mașinii. Astfel, pentru instalarea sistemului pe o mașină de fabricație aditivă, nu este nevoie de certificate ISO. Sistemul oferă totodată posibilitatea de a fi extins, în orice moment, cu noi senzori și/sau algoritmi. Prin aceasta s-a realizat o bază solidă pentru un viitor proces de optimizare in-situ a proceselor AM PBF.

Ipotezele tezei de doctorat s-au dovedit a fi adevărate deoarece sistemul realizat asigură inline, neîntrerupt, calitatea pieselor fabricate pe o mașină de tip SLS la firma cirp GmbH [8]. Aici, în mod continuu, în timpul producției AM PBF, sistemul inline de QC:

- detectează defecțiuni de calitate în timpul procesului de fabricație,
- oferă un raport de calitate pentru piesele produse,
- oferă utilizatorului posibilitatea de a anula procesul de fabricație în cazuri extreme,
- nu necesită utilizatori cu cunoștințe de experți tehnici, deoarece necesită un număr mic de parametri de intrare.

10 Rezumat

Diseminarea rezultatelor activității de cercetare efectuată, reprezentând conținutul tezei de doctorat, a fost efectuată în [9] [10] [11] [3] [12] [13] [14].

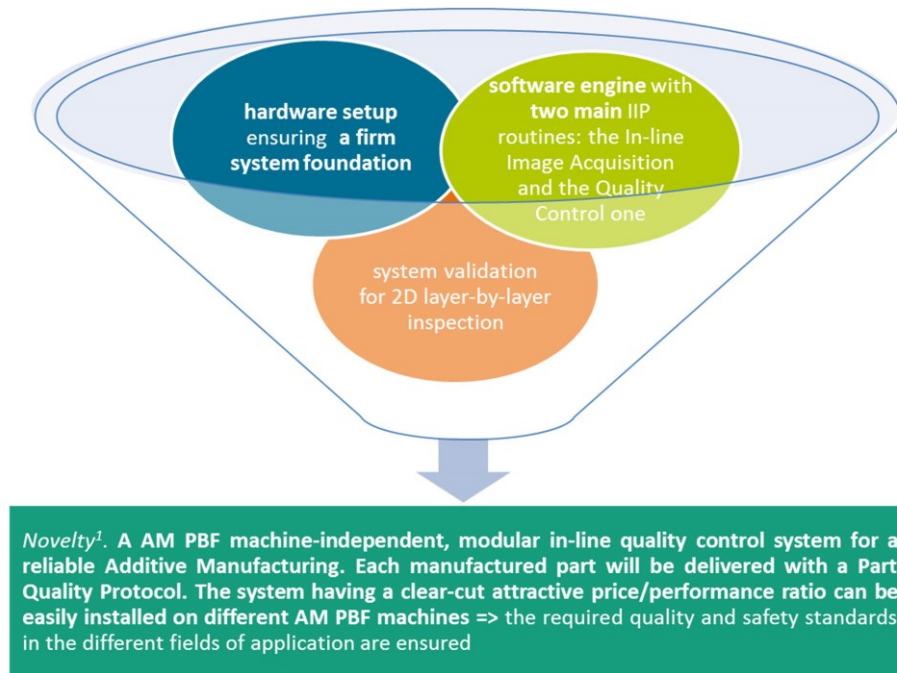


Figura 10. Sistem inline de QC pentru procesele AM PBF: principala contribuție, distinctă și originală la dezvoltarea cunoașterii în domeniul fabricației aditive a viitorului.

În concluzie, obiectivul principal al tezei de doctorat a fost atins. Prin intermediul tuturor contribuțiilor originale care au culminat într-un sistem inline de control al calității pentru o fabricație aditivă sigură (vezi Figura 10), a fost realizat primul declanșator al producției aditive în lot, și anume un sistem care:

- garantează o abordare independentă de mașină;
- efectuează neîntrerupt o inspecție inline 100%, rezultând atât o îmbunătățire a calității produselor fabricate aditiv, cât și o creștere a rentabilității, respectiv o scădere a costurilor de producție;
- poate detecta defecțiuni de calitate în timpul procesului de fabricație;
- crează un raport de calitate pentru fiecare piesă produsă în parte;
- poate, indirect, să oprească procesul de fabricație în cazuri extreme;
- are un raport preț-performanță deosebit de atractiv.

Prin aceste rezultate, această teza de doctorat deschide noi orizonturi de cercetare, cum ar fi: inspecția pieselor fabricate aditiv la nivel 3D; coroborarea cu metode care acompaniază producția în scopul asigurării calității operaționale a proceselor (de ex. controlul statistic al proceselor); corelații directe între fiecare defect identificat și parametrii de producție corespunzători pentru o optimizare in-situ a proceselor AM PBF.

REFERENCES

- [1] ASTM International, ISO/ASTM 52900-15, Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology, West Conshohocken: , 2015.
- [2] M. Schmid și G. Levy, „Quality Management and Estimation of Quality Costs for Additive Manufacturing with SLS,” în *Proc. of Direct Digital Manufacturing Conference 2012*, Berlin, 2012.
- [3] S. Fulga, A. Davidescu și I. Effenberger, „Conceptual approach for an in-line quality control system in Additive Manufacturing Powder Bed Fusion processes,” în *Paper will be presented at the 4th international conference on computing and solution in manufacturing engineering - CoSME'16*, Brasov, to be published, 2016.
- [4] I. Effenberger, T. Felix, A. Frommknecht și S. Fulga, „Machine vision platform for non-destructive testing methods of fibre reinforced plastics,” în *Proc. 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016*, Munich/Germany, 2016.
- [5] S. Moylan, J. Slotwinski, A. Cooke, K. Jurrens și M. A. Donmez, „An Additive Manufacturing Test Artifact,” *J. RES. NATL. INST. STAN. (Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology)*, vol. 119, p. 429, 2014.
- [6] J. Kroll, S. Botta, J. Breuninger și A. Verl, „Adaptive quality assurance of the product development process of Additive Manufacturing with modern 3D data evaluation methods,” în *IS&T/SPIE Electronic Imaging*, Burlingame, California, United States, 2013.
- [7] EOS GmbH, <http://www.eos.info/en>.
- [8] cirp GmbH, 2016. [Interactiv]. Available: https://www.cirp.de/verfahren/lasersintern_EN.php5.
- [9] S. Fulga, A. Davidescu, I. Effenberger și A. Verl, „In-line quality control system for a reliable Additive Manufacturing -layer by layer inspection-,” în *Paper will be presented at the International Conference on Additive Technologies - iCAT 2016*, Nürnberg, to be published, 2016.
- [10] S. Fulga, A. Davidescu, I. Effenberger și A. Verl, „Tasks for in-line quality control and in-situ optimisation of Additive Manufacturing Powder Bed Fusion Processes (Professional),” în *Paper will be presented at the International Conference on Additive Technologies - iCAT 2016*, Nürnberg, to be published, 2016.
- [11] S. Fulga, A. Davidescu și I. Effenberger, „Identification of in-line defects and failures during Additive Manufacturing Powder Bed Fusion processes,” în *Paper will be presented at the 4th international conference on computing and solution in manufacturing engineering - CoSME'16*, Brasov, to be published, 2016.
- [12] S. Fulga, „Qualität 4.0 für die additive Fertigung der Zukunft : Intelligente Qualitätssicherung und Optimierung,” în *Vortragsforum:Qualität 4.0 - Neue Herausforderungen an die Mess- und Prüftechnik*, Stuttgart, 2016.
- [13] S. Fulga, „Qualität 4.0 für die additive Fertigung von Kunststoffbauteilen : Intelligente Qualitätssicherung und Optimierung,” în *20. Anwenderforum Rapid Product Development*, Stuttgart, 2015.

12 References

- [14] G. Kreiseler, J. Kroll, S. Fulga și I. Effenberger, „Quality assurance for the complete process chain of Additive Manufacturing with modern metrology techniques,” *Proceedings of the 14th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology*, vol. 1, pp. 121-124, 2014.
- [15] D. Silverman, „Doing Qualitative Research,” Sage Publications, London, 2009.