



(12) CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: a 2018 00341

(22) Data de depozit: 16/05/2018

(41) Data publicării cererii:  
28/06/2019 BOPI nr. 6/2019

(71) Solicitant:  
• INSTITUTUL NAȚIONAL PENTRU FIZICA  
LASERILOR, PLASMEI ȘI RADIAȚIEI -  
INFILPR, STR. ATOMIȘȚILOR NR. 409,  
MĂGURELE, IF, RO

(72) Inventatori:  
• CHIOIBAȘU DIANA, STR. CIREȘAR  
NR. 12, BL.1, SC.A, ET.2, AP.20,  
BRAGADIRU, IF, RO;  
• POPESCU ANDREI, STR. FIZICIENILOR  
NR. 10, BL.M6, ET.3, AP.11, MĂGURELE, IF,  
RO

(54) METODĂ PENTRU CREȘTEREA REZOLUȚIEI DE SCRIERE  
ȘI IMPRIMARE 3D ÎN CAZUL DEPUNERII LASER  
PRIN TOPIRE

(57) Rezumat:

Invenția se referă la o metodă de creștere a rezoluției de scriere și imprimare 3D de materiale metalice prin tehnica de depunere laser prin topire. Această tehnică presupune suflarea unor particule de pulbere metalică într-un spot laser fierbinte, condiții în care pulberea este topită în spotul laser și se solidifică rapid, formând o structură metalică densă. Prin deplasarea concomitentă a spotului laser și a fasciculului de pulbere se pot trasa traiectorii complexe pe care crește material metalic nou, iar prin iradierea succesivă a aceluiași contur, se pot obține forme metalice 3D, însă rezoluția de scriere/impri-mare este grosieră, motiv pentru care tehnica de depunere laser prin topire este limitată la generarea de obiecte de mari dimensiuni. Metoda conform invenției

propune creșterea rezoluției de scriere/imprimare a tehnicii de depunere laser prin topire și constă în utilizarea unui flux de pulbere mai mare decât necesarul optim pentru depunere, cumulată cu o viteză mai mare de deplasare a brațului robotic pe care sunt montate dispozitivul de suflare a pulberii și sursa laser utilizată pentru topirea acesteia, în condiții de răcire accelerată a materialului iradiat laser, obținându-se, în acest fel, rezoluții mai mari, similare celor obținute prin tehnica de sinterizare laser selectivă.

Revendicări: 2  
Figuri: 8



48

## DESCRIERE

OFICIUL DE STAT PENTRU INVENȚII ȘI MĂRCI	
Cerere de brevet de invenție	
Nr. ....	a 2018 0341
Data depozit .....	16-05-2018...

Sursele laser de mare putere sunt instrumente de interes pentru prelucrarea materialelor, deoarece pot aduce inovare în procesele de fabricație existente prin precizia de poziționare, rezoluția mare de procesare, procesare fără contact, zonă mică afectată termic și timpi de lucru reduși.

Una dintre utilizările posibile ale fasciculelor laser de mare putere este de a transforma o pulbere metalică într-o structură compactă prin topire, urmată de solidificare rapidă. Prin execuția repetată a aceluiași contur de către fasciculele de pulbere și laser, se poate construi strat cu strat o formă 3D. Prin utilizarea unui program de grafică inginerască pentru realizarea unor forme 3D complexe, a unui program ce generează automat traiectorii pentru construirea strat cu strat a piesei și a unui sistem de translație concomitentă a unui fascicul laser și al unui fascicul de pulbere, se pot obține piese metalice într-o singură etapă. Se reduce astfel fluxul tehnologic, se pot crea noi abordări ingineresti și pot scădea semnificativ costurile de producție.

Fabricarea aditivă de materiale metalice este considerată o tehnologie care poate schimba industria în următorul deceniu. Deși conceptul de imprimare 3D a captat doar recent atenția publicului după raportare în mass-media ca o tehnica nouă de fabricare, există deja ramuri ale industriei care folosesc tehnologia și investesc din ce în ce mai mult în această metodă pentru a-și revoluționa procesele de fabricație (D. R. Eyers, A. T. Potter, Comput. Ind. 92-93 (2018) 208-218). Prin imprimare 3D se pot obține: armături ușoare în industria aerospațială, diverse părți ale motoarelor și componente electronice pentru industria automobilelor. De asemenea, în medicină implanturile corporale sunt ținta perfectă pentru fabricarea aditivă, deoarece sunt obligatorii precizia ridicată și o abordare personalizată. Pentru cazul metalelor, fabricarea aditivă necesită o sursă laser sau un fascicul de electroni care pot conferi energia necesară topirii pulberii și precizia necesară pentru a obține rezoluții satisfăcătoare de procesare.

Există două tehnici complementare de imprimare 3D a metarialelor metalice :

Depunerea Laser prin Topire (engl. Laser Melting Deposition-LMD) și Sinterizarea Laser Selectivă (engl. Selective Laser Sintering-SLS).

-LMD presupune suflarea unor fascicule de pulbere într-un spot laser fierbinte. Pulberea este topită în spotul laser și se solidifică rapid, formând o structură metalică densă. Prin deplasarea concomitentă a spotului laser și a fasciculului de pulbere, se pot trasa traiectorii complexe pe care crește material metalic nou. Prin iradiere succesivă a aceluiași contur, se pot obține forme metalice 3D. Deplasarea fasciculului laser se face de obicei prin intermediul unui braț robotic (Newkirk, F. F. Liou, R. Francis, US Patent 8,617,661 B2). Costurile pentru un montaj LMD sunt ridicate din cauza necesității utilizării unor surse laser de mare putere, a unor dispozitive de



*[Handwritten signature]*

translație cu multe grade de libertate și a unor softuri proprietar de control al mașinilor.

-SLS presupune iradierea cu un spot laser a unui pat de pulbere și topirea materialului iradiat în zonele pe care le străbate spotul laser. Structura solidă rezultată este acoperită ulterior de un strat de pulbere de către un dispozitiv de nivelare, iar fasciculul laser iradiază pulberea și solidifică stratul următor. Se crează astfel strat cu strat o piesa 3D (S. Das , J. J. Beaman, US Patent 6,676,892 B2). Iradierea laser în cazul SLS se face de obicei cu un scanner laser. Costurile sunt mai reduse decât în cazul metodei LMD, datorită utilizării unor surse laser cu fibră, mai ieftine decât cele cu mediu activ solid, a unui scanner fix și a unor softuri gratuite de generare a traiectoriilor.

Cele două tehnici sunt complementare în sensul că nu pot acoperi individual gama de cerințe de imprimare 3D necesară în industrie:

-LMD nu permite rezoluțiile de imprimare atinse de SLS, în schimb este posibilă execuția unor piese de dimensiuni foarte mari și completarea cu elemente constructive a unor piese, imposibil de realizat prin SLS (M. Ma, Z. Wang, X. Zeng, Mater Sci. Eng. A 685 (2017) 265-273).

Metoda de scriere/imprimare 3D prezentată în această invenție poate rezolva una dintre marile probleme ale tehnicii LMD: imprimarea grosiera a pieselor de mici dimensiuni. În general LMD se utilizează pentru acoperiri protectoare de suprafețe și reparații ale unor defecte morfologice ale pieselor prin placare laser (engl. cladding). De aceea, cantitatea de material depus trebuie să fie semnificativă.

În general metoda LMD este utilizată pentru generarea de obiecte de mari dimensiuni pentru industrie. Rezoluția nu este o problemă majoră, fie din cauza obiectelor monolitice care nu necesită cote cu precizie milimetrică, fie din cauza acceptului producătorului că tehnica este limitată în acest sens și asigurarea unei operații ulterioare de procesare (prelucrare prin așchiere, șlefuire) pentru nivelarea suprafețelor și ajustarea cotelor. Din această cauză, metoda este considerată limitată la generarea de corpuri masive cu dimensiuni de zeci de centimetri, până la metri. Aplicații de reparare precise, generate de elemente de finețe pe suprafață, sau producerea de piese de ordinul milimetrilor sau centimetrilor sunt considerate incompatibile cu această metodă de imprimare 3D.

O gamă largă de materiale metalice utilizate în industrie se pretează pentru imprimarea LMD: metale și aliaje neferoase, oțeluri, fonte.

Prezenta invenție a fost realizată utilizând ca material pulbere titanul (Ti) și aliajul său, Ti6Al4V. Au fost alese aceste materiale datorită unor proprietăți fizice și mecanice de interes pentru industriile aerospațială, medicală și de apărare, precum un raport excelent rezistență la tracțiune și respectiv oboseală/greutate, rezistența la coroziune excelentă datorată unui strat protector de oxid format la suprafață și biocompatibilitate excelentă cu corpul uman (este biotolerat) la care se adaugă un modul de elasticitate mai apropiat de cel al osului decât al altor materiale metalice utilizate.



pentru realizarea de implanturi și proteze (ex. oțel inox 316L sau aliaje Co-Cr). În plus, Ti este un material care se comportă bine la procesarea laser. Produce „spatter” (particule de material expulzat din cauza undei de soc cauzată de plasma laser generată din spotul laser) în cantități reduse, iar după solidificare nu are tendința să formeze pori sau fisuri în volumul său (L. Li, J. Wang, P. Lin, H. Liu, Ceram. Int. 43 (2017) 16638-16651).

Această invenție propune o metoda de scanare a suprafeței care să reducă semnificativ cantitatea de material depus prin tehnica LMD de imprimare 3D, păstrând în același timp continuitatea liniilor pe traiectoriile trasate.

Utilizând parametrii tehnologici propuși în această invenție se utilizează doar energia din centrul spotului laser pentru topirea materialului pulbere suflat în spot. Se reduce grosimea liniei depuse, crescând astfel rezoluția de scriere a tehnicii.

Materialul solidificat astfel depus va fi dens, fără pori și fără fisuri în volum.

Prin metoda noastră de depunere se păstrează compoziția inițială a materialului pulbere în toată structura solidă obținută, fără segregări sau zone sărăcite în anumite elemente chimice. Utilizând această metodă se pot extinde aplicațiile LMD pentru executarea de piese 3D într-un domeniu de operare abordat până în prezent doar de SLS.

Invenția este prezentată pe larg în continuare cu referire la Figurile 1–5, care reprezintă:

**Fig. 1** – imagine de microscopie electronică cu baleiaj a unei pulberi de Ti6Al4V cu particule cvasisferice cu diametre cuprinse între 20-100  $\mu\text{m}$ , utilizată pentru imprimare 3D prin metoda LMD;

**Fig. 2** – mașina automată pentru livrare de pulbere

**Fig. 3** – braț robotic utilizat pentru deplasarea fasciculului laser și a fluxului de pulbere în vederea imprimării de forme 3D prin metoda LMD;

**Fig. 4** – dispozitiv cu 3 canale pentru suflare de pulbere și prevăzut cu optica pentru focalizarea fasciculului laser. Cele 3 fluxuri de pulbere și fasciculul laser sunt convergente într-un punct pe substratul de creștere al formei 3D;

**Fig. 5a** – schema unei depuneri de material solid prin metoda LMD la o viteză de deplasare a brațului robotic care permite atingerea temperaturii de topire a pulberii pe toată aria spotului laser

**Fig. 5b** - schema unei depuneri de material solid prin metoda LMD la o viteză de deplasare a brațului robotic care permite atingerea temperaturii de topire a pulberii doar în centrul spotului laser

**Fig. 6** - imagini de microscopie optică pe suprafața neatacată a probei Ti6Al4V. M=200x (a) și M=500x (b)

**Fig. 7** - spectru EDX reprezentativ al unei structuri de Ti6Al4V crescută prin LMD (sus) și valoare



extrase din spectre pentru concentrațiile elementelor constituente (jos)

**Fig. 8** - hărți compoziționale prin EDX: a) zona investigată, b) distribuție Ti, c) distribuție V, d) distribuție Al

Pentru tehnologia LMD de imprimare 3D cu rezoluție crescută, se utilizează material pulbere din Ti sau aliaje de Ti cu particule sferice, având diametru mediu de 70  $\mu\text{m}$  (Fig. 1). Pulberea aflată într-un rezervor al unei mașini automate de livrare (Fig. 2), se transmite controlat prin intermediul unor furtunuri către un braț robotic prevăzut cu 6 axe de mișcare (Fig. 3). Cantitatea de pulbere livrată este controlată astfel: din rezervor, pulberea trece printr-o unitate de dozare care conține un platan prevăzut cu un șanț pentru stocarea pulberii și este transportată la furtunuri printr-o mișcare de rotație a platanului. Viteza platanului este reglabila, iar o rotație pe minut corespunde la 1 gr/min de material pulbere livrat. Pulberea este transportată prin furtunuri prin intermediul unui gaz purtător (ex. He, Ar), ajutat de o diferență de presiune dintre unitatea de dozare (aflată la suprapresiune) și mediul exterior, aflat la presiune de 1 atm. Amestecul de pulbere și gaz purtător ajunge la canalele unei duze de livrare (Fig. 4) aflată în capătul brațului robotic.

Radiația IR în domeniul de lungimi de undă 800-1200  $\mu\text{m}$ , emisă de o sursă laser de mare putere cu mediu activ solid (bară, disc sau fibră) este transportată prin intermediul unei fibre optice până la duza de livrare. Duza conține un drum optic prevăzut cu un colimator și cu o lentilă pentru focalizarea fascicului într-un spot circular, cu diametru de max. 1 mm. Pulberea suflată prin canalele duzei se intersectează cu fascicului laser în punctul de focalizare al acestuia. Pulberea este suflată în baia lichidă creată de fascicului laser și se topește, formând un nou strat de material. O formă imprimată 3D se realizează strat cu strat prin treceri repetate ale fascicului laser și pulberii peste același contur. Pentru imprimare 3D, după trasarea unui contur complet, brațul robotic se va ridica cu o distanță cuprinsă între 0.1-1 mm, aleasă în funcție de grosimea stratului depus. Contururile urmate de brațul robotic sunt programate într-un soft de grafică ingineriasca astfel: se proiectează piesa 3D și aceasta este ulterior feliată în secțiuni transversală de plane aflate la distanța aleasă de proiectant. Alegerea distanței dintre secțiuni se face în funcție de înălțimea depunerii LMD, care este dependentă de puterea laser și cantitatea de pulbere utilizată. Înălțimea depunerii se poate obține din teste premergătoare imprimării 3D, prin trasarea unor linii de material depus.

În cazul utilizării Ti pentru realizarea de piese, trebuie utilizate pentru imprimare substraturi de Ti sau dintr-un aliaj de Ti. Substraturile utilizate frecvent pentru imprimarea 3D de piese metalice precum Al, aliaje de Al sau oțel, nu sunt utilizabile pentru imprimarea pieselor de Ti din cauza diferenței mari dintre coeficienții de dilatare termică (Thermal Properties of Metals, Chapter 2 Thermal Expansion, F. Cverna (Ed.) ASM International, 2002), care determină aglomerarea Ti și



trasarea de contururi discontinue.

În vederea obținerii unei linii de material trasat care sa fie cât mai subțire, prezenta invenție propune pentru topirea pulberii, utilizarea energiei laser din centrul spotului creat pe suprafața substratului, mai precis partea centrală a spotului. Zona iradiată laser nu are timp să formeze o baie topită pe toată aria spotului. Pulberea suflată în spotul laser se va depune doar în zona centrală a spotului gaussian, care este cea mai fierbinte. Pentru a reduce dimensiunea băii de topitură, viteza brațului robotic joacă un rol crucial: dacă viteza brațului robotic este mică ( $<0.16$  m/s), temperatura spotului laser atinge pe toată aria sa nivelul temperaturii de topire a pulberii și se depune material pe toata aria spotului laser rezultând o amprență grosieră (Fig. 5a). Printr-o creștere a vitezei de deplasare a brațului robotic la  $>0.5$  m/s, temperatura spotului nu are timp sa se uniformizeze. Partea centrală a spotului gaussian va avea o temperatură mai mare decât marginile spotului. Doar partea centrală va avea temperatura necesară pentru topirea pulberii suflate în spotul laser, iar depunerea va fi mai mică decat aria spotului (Fig. 5b). Liniile trasate vor fi semnificativ mai subțiri la viteze mari de deplasare a spotului. Aceste linii subțiri vor servi drept substrat de creștere pentru următoarele straturi de material depuse, astfel că structurile imprimate își vor păstra dimensiunea mică a lățimii pe parcursul ridicării de la sol a formei 3D.

Creșterea vitezei de scanare trebuie compensată cu creșterea fluxului de pulbere, în caz contrar, liniile trasate vor fi discontinue, deoarece nu va fi depusă o cantitate suficientă de pulbere suflată în baia topită. La viteza de  $0.5$  m/s și pentru o putere laser de  $700$  W cu un spot laser circular de  $0.28$  mm<sup>2</sup>, cantitatea de pulbere livrată trebuie să fie de peste  $2.5$  gr/min. Sursa laser poate fi continuă sau în pulsuri, cu lungime de undă de  $800-1064$  nm.

Scrierea/imprimarea se poate realiza în atmosferă de gaz protector sau în aer.

Răcirea substratului de depunere pe care crește forma 3D este esențială pentru creșterea rezoluției procesului de imprimare LMD. Dacă substratul rămâne fierbinte după o scanare laser, există riscul ca la următoarea trecere, temperatura pe toată aria spotului laser să ajungă la o valoare care să producă topirea pulberii, ceea ce este de evitat. Răcirea eficientă se poate realiza prin utilizarea unei plăci masive executată dintr-un material metalic care disipează rapid căldura, precum aluminiu sau cupru sau a unui dispozitiv de răcire din Al prin care trece un flux continuu de apă răcită. Se poate folosi un sistem de ventilație suplimentar pentru a facilita disiparea căldurii, sau răcirea plăcii se poate realiza printr-o suflare continuă cu azot lichid pe suprafața ei. Nu este recomandată încercarea de a disipa căldura prin utilizarea unui jet de gaz în zona de procesare. Jetul poate modifica traiectoria pulberii generând defecte de imprimare. În plus, nu există control asupra procesului, fiind posibile diferențe mari de forma între probe obținute în condiții experimentale teoretic identice, de la experiment la experiment.



Mișcările robotului se pot programa manual de către utilizator sau automat de către un soft care generează coduri de mișcare pentru robot, pe baza contururilor și muchiiilor piesei de imprimat, plecând de la un desen tehnic al acesteia, executat într-un program de grafică inginerescă.

Prin această modalitate de creștere a unei forme 3D se modifică doar grosimea liniei trasate. Metalul/aliajul depus nu suferă modificări compoziționale sau structurale față de o depunere cu mișcare mai lentă a brațului robotic și debit mai mic de pulbere. În plus, materialul depus nu prezintă defecte micro- sau macroscopice precum porozitate sau fisuri în volumul său.

În sprijinul acestei afirmații prezentăm Fig. 6, care este imaginea obținută prin microscopie optică, la mărirea de 500X a suprafeței unei probe șlefuite, dar neatacată chimic. Se observă că materialul depus a fost omogen și nu a prezentat porozitate sau alte defecte microscopice. S-au evidențiat mici incluziuni în masa metalică, cel mai probabil particule netopite de radiația laser. Numărul lor a fost însă foarte mic, aceste particule putând fi considerate ne semnificative.

În Fig. 7 este prezentat un spectru achiziționat prin spectroscopie de raze X cu dispersie după energie (engl. Energy Dispersive X-ray Spectroscopy – EDX), reprezentativ pentru o piesă de Ti6Al4V depusă prin imprimare laser 3D. Sub fig.7 este prezentată compoziția elementală extrasă din spectre, care evidențiază exclusiv existența principalelor elemente de structură, adică Ti, Al și V, iar compoziția chimică este congruentă cu compoziția aliajului sub formă de pulbere, cu ~6% Al și ~4% V (procente masice).intrevazute

Fig. 8 prezintă harți cu distribuția fiecărui element constitutiv al aliajului, într-o zonă analizată de pe suprafața probei. Nu există segregări ale elementelor sau zone sărace în elemente, ci ele sunt răspândite omogen pe toată zona investigată.

Se pot astfel produce în condițiile experimentale prezentate mai sus, piese 3D cu rezoluții mai bune decât cele raportate în prezent prin metoda de scriere/imprimare LMD de materiale metalice și pot fi prevăzute noi aplicații ale acesteia, care implică scrierea unor elemente sau imprimarea unor piese cu dimensiuni milimetrice.



**REVENDICĂRI**

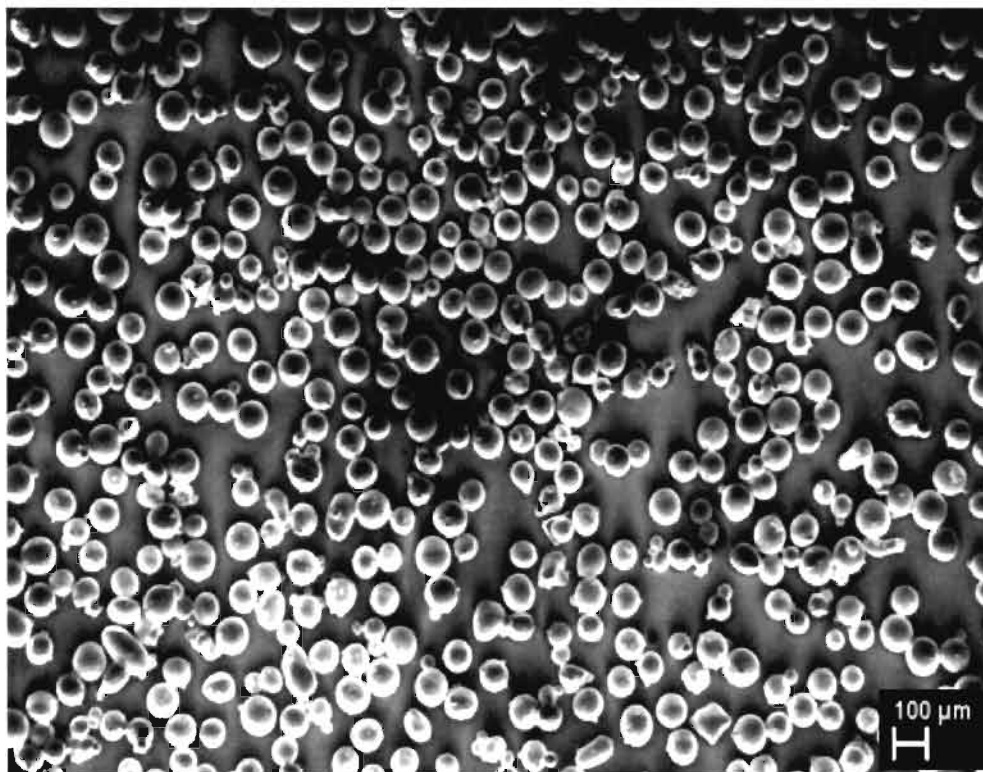
1. Se revendică metoda de creștere a rezoluției de scriere/imprimare a tehnicii ,Depunere Laser prin Topire’ (LMD) pentru aliaje de Ti, care produce structuri dense, fără porozitate și cu distribuție omogenă a elementelor constitutive în volum, prin:
  - a) utilizarea unui flux mare de pulbere (3 gr/min) care este suflat în baia de topitură generată de un fascicul laser cu emisie în infraroșu (800-1100 nm) coroborată cu
  - b) deplasarea rapidă ( $>0.8$  m/s) a dispozitivului de scanare (braț robotic, optică laser pe șine).
  - c) utilizarea puterii laser de 700-1000 W a unei surse laser cu emisie în modul continuu la lungimi de undă cuprinse între 800-1030 nm.
  - d) răcirea materialului iradiat laser prin utilizarea unei plăci masive de Cu sau Al, coroborată cu utilizarea unui sistem de ventilație, a unui jet de azot lichid sau a unui sistem de circulare cu apă răcite
2. Se revendică tehnica pentru creșterea selectivă a materialului, în zona centrală a spotului laser, care este cea mai fierbinte.





DESENE/FIGURI

Fig. 1



30

Fig. 2



Fig. 3



Fig. 4

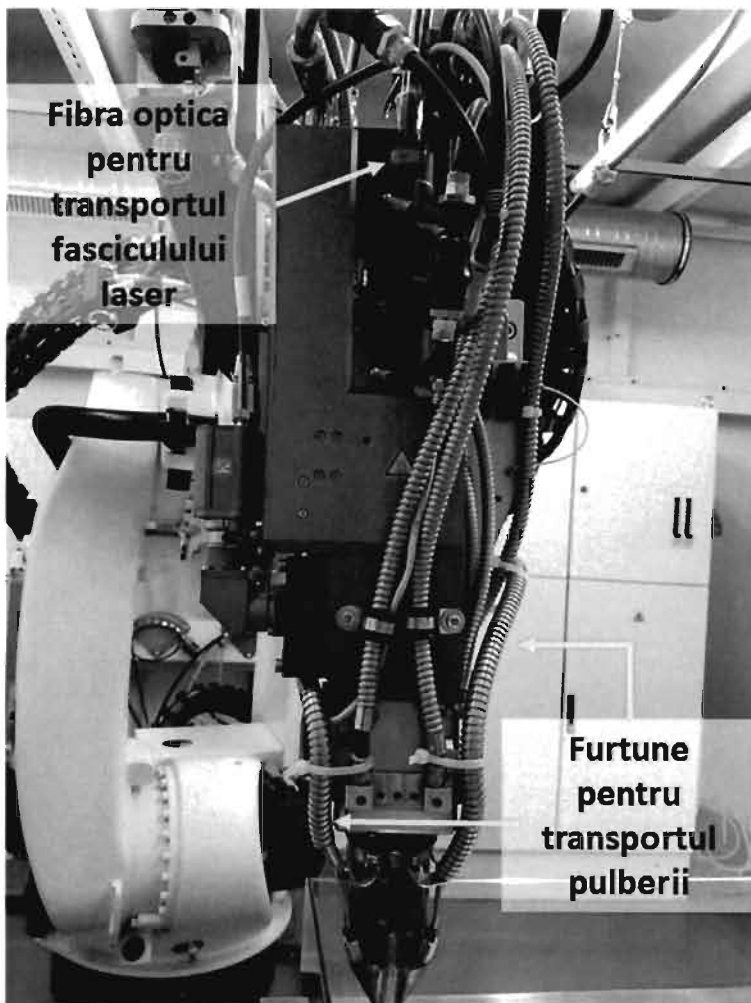


Fig. 5a



Fig. 5b

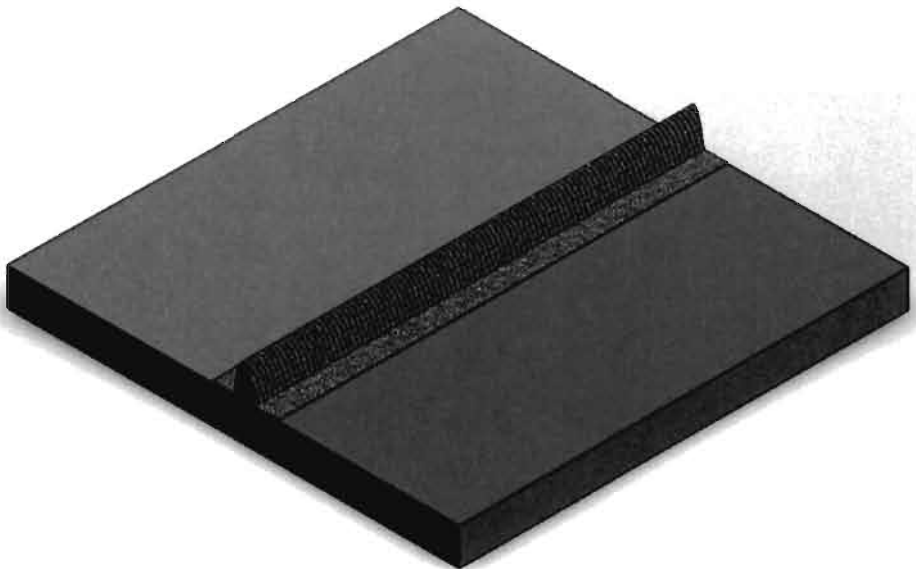


Fig. 6

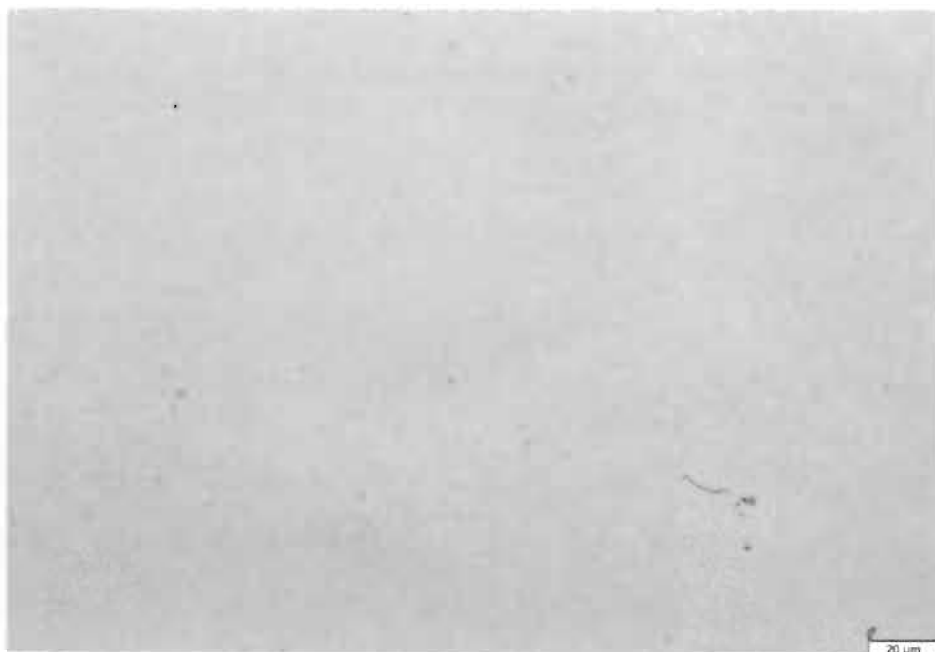
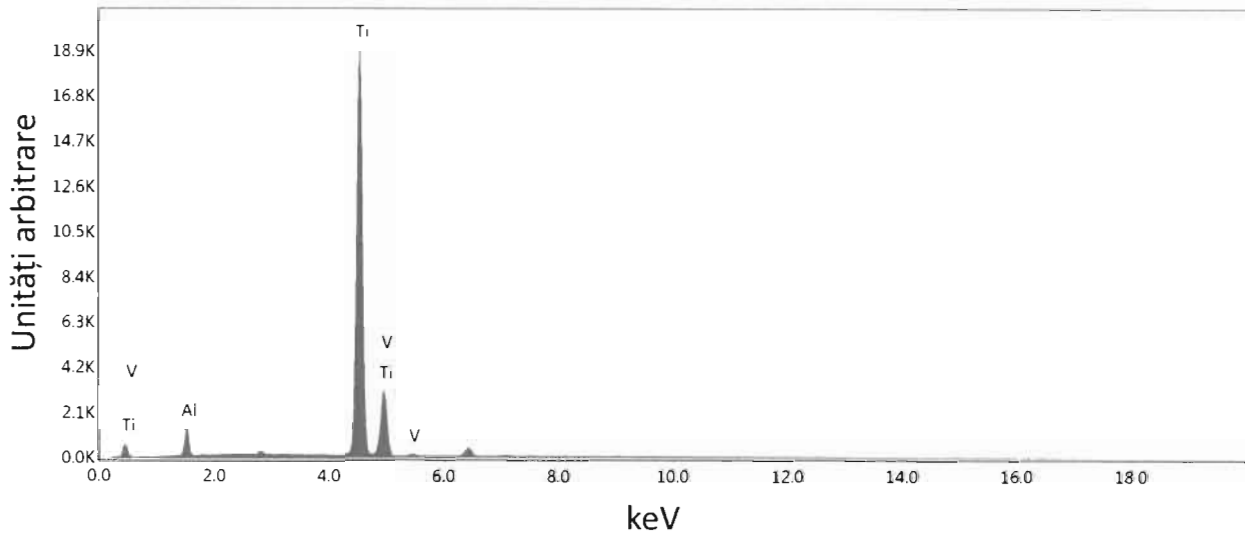


Fig. 7



Elemente	% masice	% atomice	Net Int.	Erori %
Al K	6.70	11.34	324.14	9.16
Ti K	88.43	84.30	7796.96	1.11
V K	4.87	4.36	356.69	3.85



Fig. 8

