

DISC DE FRÂNĂ CU MICROGEOMETRIE PROGRESIV-DIFERENȚIATĂ

BRAKE DISC WITH DIFFERENTIAL PROGRESSIVE MICROGEOMETRY

MIHAI¹ Sabin¹, IAMANDI Alexandru și PĂTRAȘCU² Valentin²

¹Facultatea: IIR, Specializarea: INPN, Anul de studii: 1, e-mail: mihai.sabin1996@gmail.com

²Facultatea: IIR, Specializarea: IPFP, Anul de studii: 1,

Conducător științific: Conf.dr.ing. **Elena LĂCĂTUȘ**

ABSTRACT: While laser processing is already a well-established fabrication method in automotive production, new techniques are being developed to bring further advantage to this prominent market sector. Some of these techniques, such as metal 3D printing and lightweight materials joining, are empowering new structural designs for the parts of automotive products.

This paper presents studies regarding the implementation of a coating process, known as “laser cladding”, used in order to produce brake discs with a progressive microgeometry able to generate an effective protection against wear and corrosion, on a fast and economic fabrication process.

CUVINTE CHEIE: disc de frână, pulbere metalică, LMD, placare laser

1. Introducere

Primele discuri de frână au fost folosite în anii 1890, în Anglia. Primul sistem de frânare de acest tip a fost patentat de Frederick William Lanchester, în Birmingham, Anglia, 1902, fiind folosit cu succes pe automobilele Lanchester. Totuși, în prima jumătate a secolului 20, singurul material din care erau executate discurile de frână era cuprul. Performanțele discurilor de frână realizate din cupru erau reduse.

Odată cu evoluția industriei constructoare de mașini și a foțelor la care este supus discul de frână din sistemul de frânare al autovehiculelor, forma constructivă a discurilor a suferit o serie de îmbunătățiri pentru a realiza un proces de frânare eficient. În figura 1 este prezentată dezvoltarea constructivă a discurilor de frână.

Dezvoltarea primelor prototipuri de automobile cu combustie internă (1886), a determinat începerea apariției primelor experimente pentru determinarea unor sisteme de frânare și a evoluției materiale cu proprietăți mecanice (fig. 2) care să îndeplinească noile cerințe pentru a efectua un proces de frânare în condiții optime de siguranță. Primul material folosit la fabricarea discurilor de frână a fost fonta cenușie deoarece este un material ce respectă cerințele impuse pentru realizarea condițiilor necesare unei frânări eficiente. În momentul actual fonta cenușie rămâne principalul material din care se fabrică discurile de frână datorită proprietăților sale fizico-chimice (punctul de topire ridicat, conductivitatea, stabilitate termică excelentă, duritate mare și rezistență ridicată la frecare) care previn supraîncălzirea și uzura suprafeței, dar și a costului scăzut [2]. Cu toate acestea, fonta cenușie prezintă unele dezavantaje, cum ar fi: rezistența slabă la coroziune, masa mare ce contribuie la creșterea consumului de combustibil și emisia de particule rezultate în urma uzurii discului de frână ce afectează mediul înconjurător [3], acest fapt ducând la continuarea experimentelor pentru a obține un material optim și astfel au apărut materiale cu elemente de natură organică și discurile de frână cu elemente ceramice. Utilizarea discurilor de frână ceramice care să elimine din limitările enunțate mai sus, prezintă ca dezavantaj prețul foarte mare în comparație cu prețul fontei cenușii.

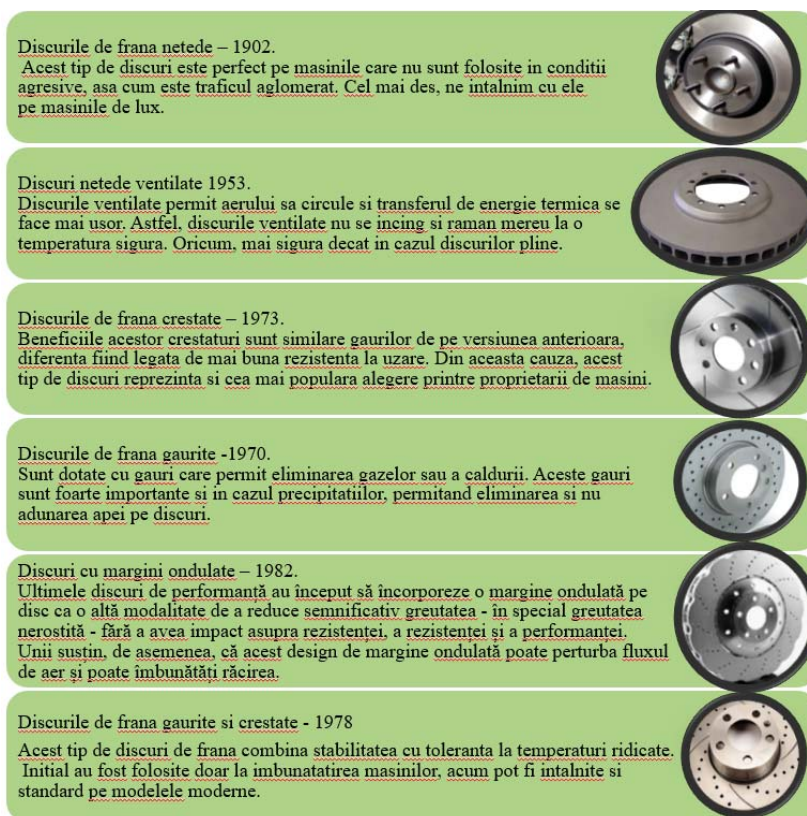


Fig. 1. Evoluția modelelor constructive a discurilor de frână[1]

Tabel 1. Evoluția materialelor utilizate pentru fabricarea componentelor de fricțiune din sistemul de frânare [4]

Descrierea Materialelor	Aplicatii	Anul de dezvoltare
Fontă pe oțel	utilizat în componentele frânelor auto	1870
Bumbac sau păr (curele)	roata de căruță și primul automobil	1897
Fibre de azbest și alte fibre pentru a crește rezistența și performanța	camioane și automobile	1908
Particule de bronz cu conținut, produse bituminoase, produse cu armarea internă a fibrelor scurte	camioane și automobile	1926
Material turnat dintr-un amestec uscat de post-metal pentru a înlocui discul de frână din fontă fragilă la trenurile electrice	Metroul Londonez	1930
Rășină flexibilă dezvoltată cu elemente uniform distribuite în structură	armare frână tambur	1930
Metal aliat cu rășină	utilizat în industria aeronautica	1950
Fibrele de sticlă, minerale, metalice, de carbon și sintetice, pentru a oferi semi-metalelor performanțe mai bune decât fibrele de azbest (începutul discuției despre siguranța folosirii fibrelor de azbest)	camioane și automobile	1960
Compuși fără azbest	pentru frâne cu tambur și echipament auto	1980
Sugestii privind utilizarea fibrelor de carbon	frâne auto	1991

Pentru asigurarea exigențelor actuale privind siguranța rutieră, dezvoltarea unei noi tehnologii care sa permită micșorarea influențelor termice și creșterea performanțelor sistemului de frânare, dar păstrând costurile de fabricație cât mai scăzute este necesară. Această tehnologie este una de acoperire a discurilor de frână prin placare laser pentru îmbunătățirea caracteristicilor mecanice și pentru

eficientizarea procesului de frânare astfel încât în urma utilizării discurilor, particule fine desprinse de pe suprafața acestora datorită interacțiunilor de natură mecanică, să fie într-o cantitate minimă pentru a nu afecta calitatea mediului înconjurător.

2. Stadiul actual

Există numeroase metode de acoperire a suprafețelor metalice care combat uzura și coroziunea, iar prezenta lucrare se concentrează pe o tehnică de acoperire care pleacă de la material metalic/ceramic sub formă de pulbere care este topit de un fascicul laser și care se solidifică într-un strat aderent, compact și uniform pe suprafața discului. În literatura de specialitate această tehnică se numește placare laser (engl. "laser cladding"). Procesul de acoperire este capabil să ofere discurilor de frână o protecție eficientă împotriva uzurii și coroziunii, fiind în același timp un proces rapid și economic.

Există numeroase studii despre metoda de placare laser a unor substraturi din fontă cenușie utilizând tehnica LMD (engl. Laser melting deposition) plecând de la material metalic sub formă de pulbere, însă acestea se limitează la teste fizico-chimice realizate în condiții de laborator, fără a valida rezultatele obținute în mediul de funcționare specific. În această lucrare am variat parametrii pentru a produce depuneri metalice dense și a rezolva din impedimentele care pot interveni în timpul depunerii prin metoda LMD: distribuție neuniformă a elementelor componente în materialul depus și incompatibilitate cu substratul, crăpături, prezența porilor în structura materialului. Această tehnică permite acoperirea într-o singură etapă, a unui strat de material metalic cu dimensiuni cuprinse între 0.3-2 mm grosime, fără defecte, cu aderență ridicată între substrat și depunere, dar și cu aport minim de căldură în substrat. În literatură există totuși studii, care au arătat că tehnologia de depunere laser prin topire aplicată pe materiale tip fontă cenușie are anumite restricții. S-a studiat rezistența la uzură a depunerii de materiale pe baza de NiCrBSi [5], utilizând surse laser de mare putere în emisie continuă.

3. Dinamica procesului de frânare

În timpul procesului de frânare, datorită decelerațiilor, puntea față a automobilului este încărcată cu o greutate mai mare decât cea a punții spate. Pentru a preveni frânarea excesivă a punții spate, ce poate provoca blocarea roților acesteia, supapa de reglare a presiunii reglează presiunea de frânare a punții spate în funcție de încărcarea automobilului.

În timpul frânării materialele utilizate la fabricarea sistemelor de frânare alcătuiesc un cuplu de frecare care trebuie să asigure transformarea energiei cinetice a sistemului în energie termică prin intermediul suprafețelor de frecare. Modelarea temperaturii tranzitorii pe disc este de fapt utilizată pentru a identifica factorul de proiectare geometrică a discului pentru modelarea, în cadrul discului, a unui sistem de ventilație. Analiza termo-structurală este apoi utilizată cu cuplaj pentru a determina deformarea admisibilă și distribuția presiunii de contact în plăcuțe.

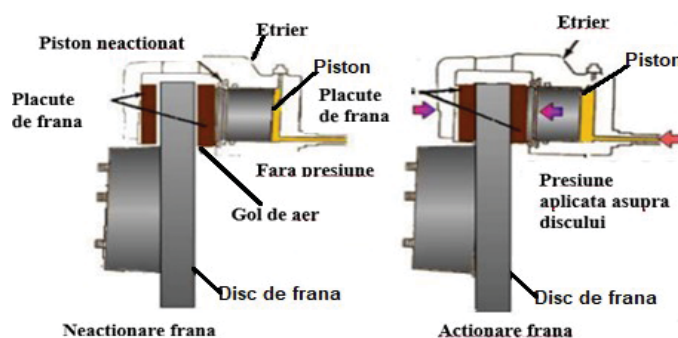


Fig. 3. Funcționarea sistemului de frânare

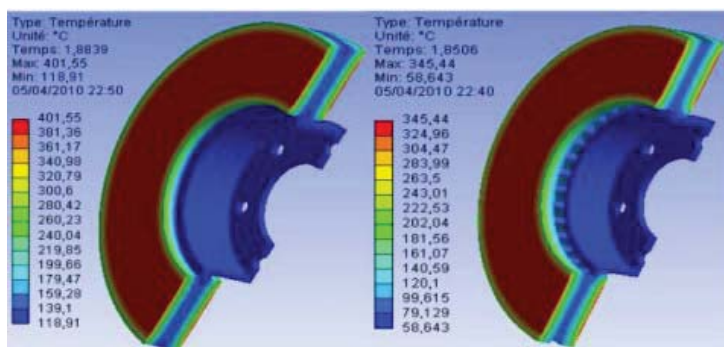


Fig. 4. Distribuția termică a unui disc plin (stanga) și a unui disc ventilat (dreapta)[6]

În figura 5 este prezentată evoluția presiunilor de contact de-a lungul pozițiilor unghiulare ale plăcuței de frână. Valoarea maximă a presiunii de contact este situată la marginea de față și la nivelul marginii inferioare a plăcuței.

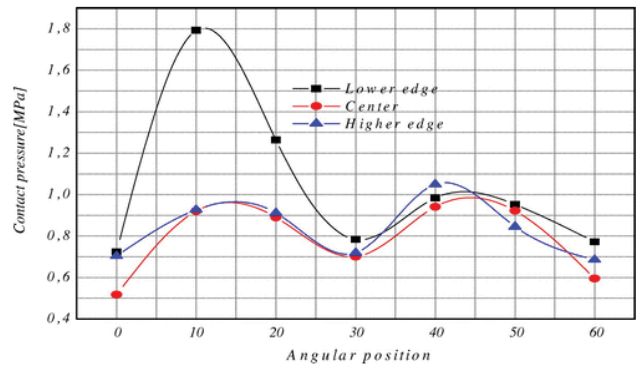


Fig. 5. Variația presiunii în funcție de poziționarea plăcuței pe discul de frână [7]

4. Aspecte privind dinamica frânării autovehiculelor singulare

În acest capitol se analizează răspunsul vehiculului la forțele produse de către sistemul de frânare. Este prezentat modul de stabilire a optimului forțelor la frânarea pe o cale orizontală. Sunt definite forțele de frânare reale și comparate cu cele optime și este discutat conceptul de utilizare a aderenței.

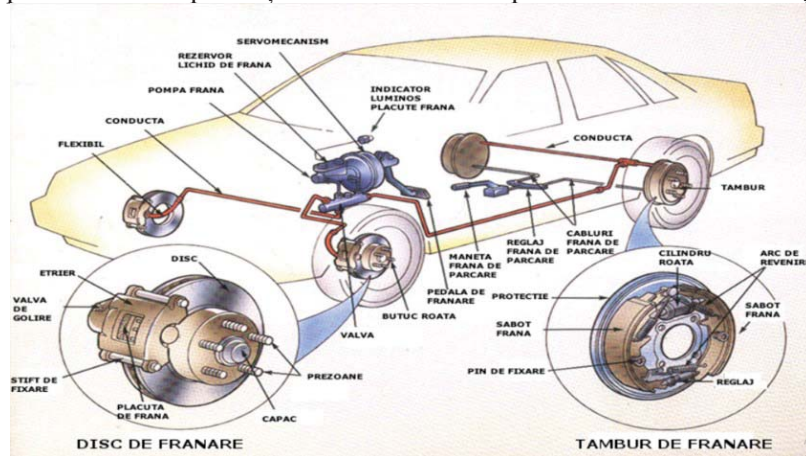


Fig. 6. Componentele sistemului de frânare

4.1. Încărcările statice ale punților

Forțele ce acționează asupra unui vehicul nedecelerat, fie staționar sau deplasându-se la o viteză constantă la nivelul drumului, sunt prezentate în fig. 7.

Datorită distribuției greutății față/spate la un autoturism, punțile față și spate pot avea diferențe semnificative ale greutăților repartizate. Distribuția încărcării pe punte în varianta statică este definită de raportul dintre încărcarea pe puntea spate și greutatea totală a vehiculului, definită cu ajutorul ecuațiilor (1) și (2).

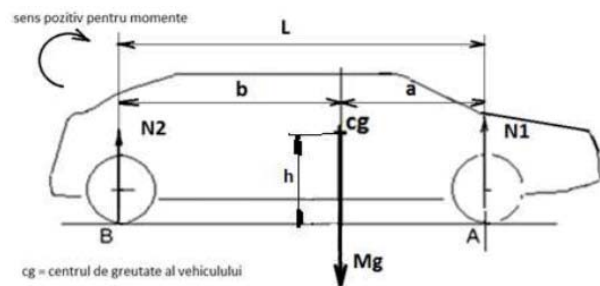


Fig. 7. Încărcarea statică a punților

$$G = M * g \quad (1)$$

$$\frac{N_2}{M * g} \quad (2)$$

unde: N_2 = încărcarea pe puntea spate, static, [N]

G = greutatea vehiculului (M = masa vehiculului, kg, g = accelerația gravitațională, m/s²), [N]

Încărcarea relativă pe puntea față, static, este dată de:

$$1 - \frac{N_2}{M * g} = \frac{N_1}{M * g} \quad (3)$$

unde: N_1 = încărcarea pe puntea față, static, [N]

4.2. Încărcările dinamice ale punților

Când frânele sunt acționate, cuplul dezvoltat de către acestea, reacționează pe circumferința pneului unde este în contact cu solul. În cazul blocării frânei, mărimea forțelor de frecare este o funcție directă a cuplului produs de către frâna roții.

Forțele ce acționează asupra unui vehicul cu două punți decelerând, pe o cale orizontală sunt ilustrate în figura 8.

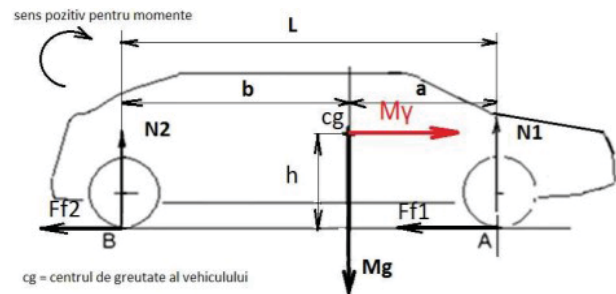


Fig. 8. Încărcări dinamice ale punților

$$F_{f1} + F_{f2} = F_{ftotala} = M * y \quad (4)$$

$$y = \frac{F_{ftotala}}{M} \quad (5)$$

$$N_1 + N_2 = M * g \quad (6)$$

unde: y = decelerație [m/s²]

5. Metode de acoperire a suprafețelor funcționale a discurilor de frână.

De-a lungul anilor, au fost încercate diferite tehnologii de placare pentru a combate problemele de uzură și coroziune a materialelor metalice, iar unele dintre acestea ar putea fi folosite și în domeniul discurilor de frână. Există două metode de placare a suprafețelor, acoperiri prin conversia elementelor componente ale suprafețetei și acoperiri prin depunere de material. În figura 9 sunt reprezentate diferite tehnici de placare care sunt în proces de cercetare pentru aplicația de acoperire a discurilor de frână. Posibilele tehnici sunt grupate în două mari categorii: (i) Procese de pulverizare non-termică și (ii) procese de pulverizare termică. Tehnicile ce utilizează ca principiu procese de pulverizare non-termică se referă la placări în care materiale metalice sub forma de pulbere sunt livrate prin diverse metode la o „flacără” de temperatură ridicată și încălzite până când ajung în fază lichidă, iar apoi depuse pe suprafața substratului. A doua categorie, procese termice de pulverizare, este reprezentată de tehnici electrochimice de tratare a suprafeței.

În această lucrare se va prezenta o tehnică de placare a suprafețelor de fricțiune a discurilor de frână realizate din fontă cenușie pentru îmbunătățirea proprietăților mecanice ale acestora.

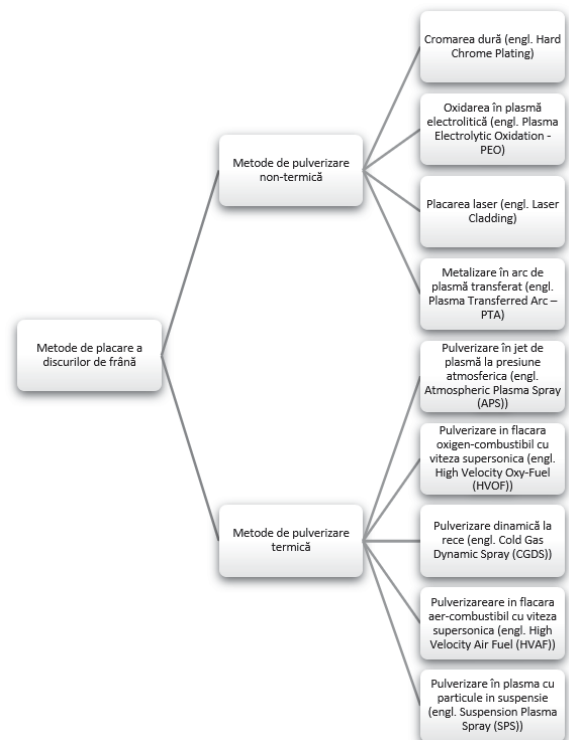


Fig. 9. Clasificarea metodelor de placare a discurilor de frână [8]

Tehnica prezentată se numește placare laser prin metoda „Depunere Laser prin Topire” (engl. Laser Melting Deposition – LMD), care este o metodă de adaos de material metalic pe un substrat prin topirea suprafeței acestuia și introducerea în zona topită a unui nou material sub formă de pulbere, fir sau bandă metalică [9]. Metoda poate fi utilizată pentru a repara defecte ale pieselor cu grade ridicate de uzură, pentru a ajusta forma unor componente, a suda piese între ele sau pentru a acoperi funcțional suprafețe pentru a dobândi proprietăți mecanice superioare.

Scopul cercetărilor experimentale îl constituie identificarea influenței parametrilor de proces principali, precum tipul și debitul de pulbere, puterea laserului și viteza de deplasare, dar și ai celor secundari, cum este valoarea debitului de gaz care asistă procesul, în vederea asigurării calității depunerii. Se urmărește determinarea unui set de parametri prin intermediul cărora se obține o depunere uniformă și o interfață fără defecte între substrat și materialul de adaos. În figura 10 este prezentat un protocol de realizare a plăcii laser a discurilor de frână prin metoda LMD.

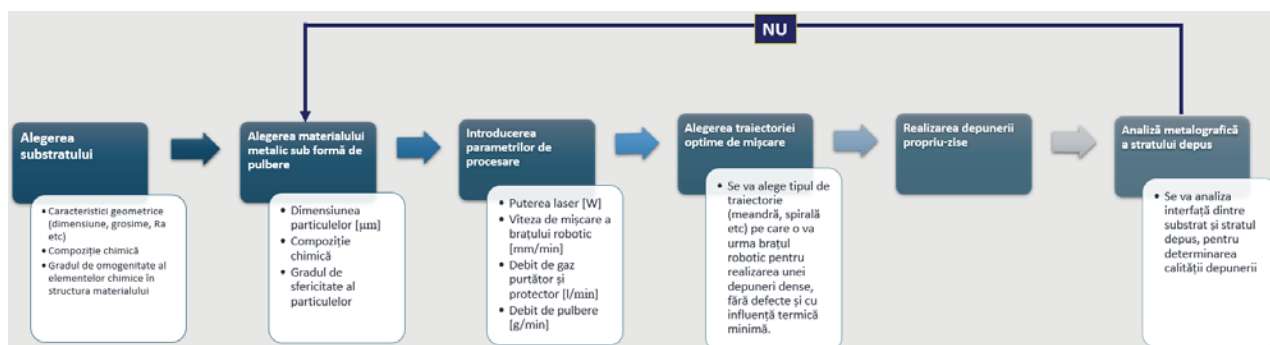


Fig. 10. Protocol de realizare a depunerii de material metalic sub formă de pulbere pe substrat din fontă cenușie

6. Montajul experimental

Sistemul integrat LMD utilizat pentru experimentele de depunere de pulbere metalică este compus dintr-o sursă laser Yb:YAG TruDisk 3001 (Trumpf, Germania) cu emisie în modul continuu și lungimea de undă de 1030 nm (Fig. 11, 1).

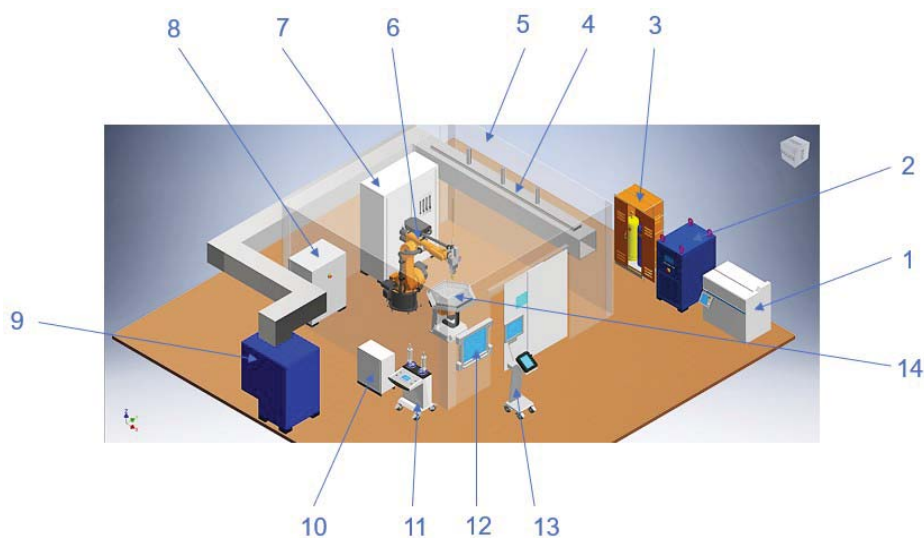


Fig. 11. Schema instalației de placare laser a discurilor de frână 1. sursă laser cu funcționare în mod continuu, 2. Sistem auxiliar de circulare a agentului de răcire, 3. Gaze de proces (He+Ar), 4. Tubulatură de extracție a pulberii reziduale, 5. cabină de protecție, 6. Braț robotic, 7. Compartiment pentru realizarea conexiunilor și reglarea debitului de gaz, 8. sistem hardware utilizat pentru comandarea brațului robotic și a poziționatorului, 9. sistem de evacuare și extracție a pulberilor, 10. Panou de siguranță, 11. Distribuitor de material metalic sub formă de pulbere, 12. Ecran de observare a procesului, 13. panou de control cu suport propriu, 14. poziționator cu două axe

Fasciculul laser este transportat prin fibra optică la un sistem robotic TruLaser Robot 5020 (Trumpf, Germania), constând dintr-un robot Kr30HA (Kuka, Germania) cu 6 axe de mișcare (Fig. 11, 6) și optică de procesare care dispune de o duză de livrare a pulberii cu 3 canale cu diametrul de $\varnothing 1,4$ mm (Trumpf, Germania). Dimensiunea spotului fasciculului laser focalizat pe proba a fost de $\varnothing 2,5$ mm. Procesul de distribuire a pulberii este asistat de un mix de gaz (Ar și He) și aceasta este transportată prin furtunuri cu diametru de $\varnothing 4$ mm la brațul robotului prin intermediul unui sistem de alimentare cu platane (Fig. 11, 11). Cele 3 fascicule de pulbere au fost calibrate astfel încât fasciculul laser și particulele metalice să se întâlnească pe substrat în același punct. Distanța dintre substrat și duza de injectare a pulberii este de 17 mm și este menținută constantă pe tot parcursul experimentelor.

7. Rezultate experimentale

A. Metoda de analiză cu ultrasunete

În principiu, controlul nedistructiv cu ultrasunete constă în introducerea unui fascicul de ultrasunete într-un material și analiza perturbațiilor propagării fascicolului în materialul vizat. Datorită caracteristicilor elastice diferite, dintre materialul de bază și un defect anume (fisură, segregatie, suflură, etc.), la interfața dintre acestea va avea loc un fenomen de reflexie a ultrasunetelor, ceea ce va permite punerea în evidență, localizarea și măsurarea defectului.

Atunci când un traductor funcționează în modul „transmitere”, un semnal electric alternativ induce vibrații de frecvență înaltă în traductor, vibrații care sunt transmise ca unde ultrasonore materialului testat. Funcționarea traductorului în modul recepție presupune recepționarea vibrațiilor primite dinspre materialul analizat (ultrasunete reflectate de defecte sau de pereții probei) și transformarea acestor vibrații în semnal electric, ce poate fi mai apoi afișat și analizat.

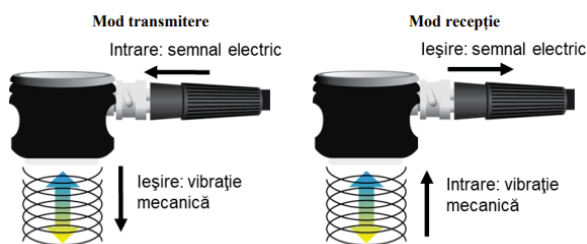


Fig. 12. Funcționarea traductorilor de ultrasunete în mod transmitere și mod recepție

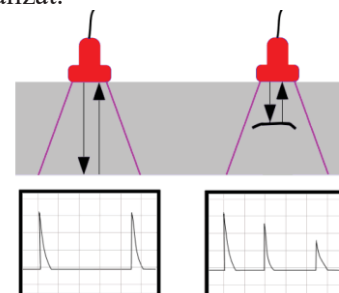


Fig. 13. Imaginea prezentată de receptor într-un material fără defecte (stânga), cu defecte (dreapta) [10]

B. Metoda de analiză folosind raze X

Radiațiile X sau gama au proprietatea de a putea penetra substanțe, motiv pentru care sunt denumite radiații penetrante. Controlul nedistructiv cu radiații penetrante (raze X sau raze gama) constă în obținerea unei imagini a structurii macroscopice a materialului. Această imagine se obține prin înregistrarea pe un film radiografic (similar cu filmul fotografic) a radiațiilor ce penetrează proba. Astfel, pe film apare imaginea internă a materialului examinat, imagine care se formează pe baza atenuării diferite a radiațiilor penetrante de către neomogenitățile macroscopice prezente în material sau de variații ale grosimii acestuia. Schița de principiu a examinării cu radiații penetrante este prezentată în figura 10.

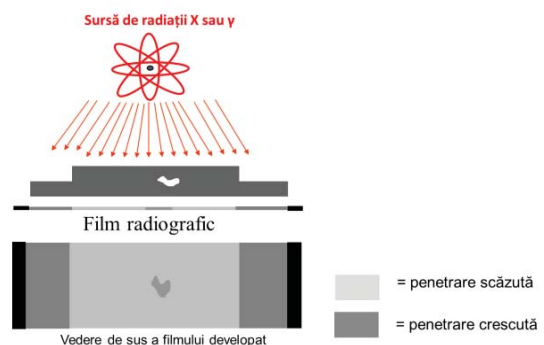


Fig. 14. Schița de principiu a examinării cu radiații penetrante a unei probe care prezintă variații de grosime și goluri[11]

Între sursa de radiații, care emite un fascicul de radiații de formă conică, și filmul radiografic se intercalează materialul supus examinării. O parte din radiația emisă de sursă va fi absorbită de probă iar o altă parte va trece prin probă impresionând filmul radiografic. Materialele cu densitate mare sau cu grosime mare vor absorbi o cantitate mai mare de radiații. Gradul de înnegrire a filmului radiografic variază în funcție de cantitatea de radiație care penetrează obiectul examinat.

8. Discuții și Concluzii

Discurile de frână reprezintă unul dintre componentele de baza din construcția sistemului de frânare, motiv pentru care acestea au evoluat semnificativ în ultimii ani din punct de vedere al formei geometrice și al compoziției chimice.

În această etapă s-a determinat varianta de montaj experimental pentru efectuarea procesului de placare laser a suprafețelor unui disc de frână, pentru a putea obține depuneri dense și aderente la substrat.

S-a realizat un protocol de lucru pentru a permite optimizarea parametrilor implicați, în vederea obținerii unor depuneri dense, fără porozitate sau crăpături, cu elementele chimice componente distribuite uniform în volumul materialului, plecând de la materiale metalice sub formă de pulbere. Partea de proiectare a traiectoriei urmată de fasciculul laser va avea o importanță majoră în procesul de placare laser, pentru a limita introducerea de fisuri în structura substratului după depunere cauzate de stresul rezidual care apare din cauza dilatărilor și contracțiilor termice rapide

Straturile de material ce se vor depune prin metoda de placare laser indicată în lucrare pe substratul de fontă cenușie, vor fi analizate din punct de vedere tribologic (rezistența la uzura și coroziune, dinamica coeficientului de frecare) pentru a vedea dacă se respectă condițiile de funcționare optime din timpul procesului de frânare.

9. Bibliografie

- [1]. Driver preference, and other technical requirements of the application or chassis (2016) <https://www.brembo.com/en/company/news/brembo-brake-discs-type-performance> - accesat la data de 29.04.2020
- [2]. Rashid, A. (2014), Overview of disc brakes and related phenomena—A review. *Int. J. Veh. Noise Vib.*, 10, 257–301.
- [3]. Hjortenkrans, D.S.T.; Bergbäck, B.G.; Häggerud, A.V. (2007) Metal emissions from brake linings and tires: Case studies of Stockholm, Sweden 1995/1998 and 2005. *Environ. Sci. Technol.*, 41, 5224–5230.
- [4]. Maluf, O. & Angeloni, M. & Milan, M. & Spinelli, Dirceu & Wladimir, Waldek & Filho, Bose. (2004). Development of materials for automotive disc brakes. *Pesquisa Tech. Minerva*. 2,
- [5] Fernández, E.; Cadenas, M.; González, R.; Navas, C.; Fernández, R.; Damborenea, J. (2005) Wear behaviour of laser clad NiCrBSi coating. *Wear*, 259, 870–875.
- [6]. Venkatramanan R, Kumaragurubaran SB, Vishnu Kumar C, Sivakumar S, Saravanan B (2015) Design and Analysis of Disc Brake Rotor, *International Journal of Applied Engineering Research* ISSN 0973-4562 Volume 10, Number 19
- [7]. <http://www.solutiicnd.ro/blog/controlul-nedistructiv-al-fisurilor-cu-pulbere-magnetic%C4%83-mt/> - accesat la data de 28.04.2020
- [8]. Aranke, Omkar & Algenaid, Wael & Awe, Samuel & Joshi, S.V. (2019). Coatings for Automotive Gray Cast Iron Brake Discs: A Review. *Coatings*. 9. 27. 10.3390/coatings9090552.
- [9]. M. Brandt (Ed.) (2017) *Laser Additive Manufacturing Materials, Design, Technologies, and Applications*, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Pages 21-53
- [10]. http://www.wermac.org/others/ndt_ut.html - accesat la data de 28.04.2020
- [11]. https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRD.html - accesat la data de 29.04.2020