



Universitatea Națională de Știință și Tehnologie **POLITEHNICA**
București

Facultatea de Știința și Ingineria Materialelor
Departamentul de Ingineria și Managementul Obținerii Materialelor Metalice

TEZĂ DE DOCTORAT

**COMPOZITE CU MATRICE DIN ALIAJE DE ALUMINIU
RANFORSATE IN-SITU CU DIBORURI DE VANADIU**

**ALUMINIUM ALLOY MATRIX COMPOSITES
REINFORCED IN-SITU WITH VANADIUM DIBORIDES**

Autor

Ing. Cătălin OGICA

Conducător de doctorat

Prof. dr. ing. Mihai BUZATU

București, 2024

Cuprins

CAPITOLUL 1. COMPOZITE CU MATRICE METALICĂ (CLASIFICARE)	3
1.1. Generalități	3
1.2. Matrici de aluminiu.....	3
1.3. Materiale de armare (ranforsare)	4
CAPITOLUL 2. Tehnici de obținere / elaborare folosite la fabricarea/obținerea compozitelor cu matrice metalică	6
2.1. Procedee de obținere	6
2.2. Domenii de utilizare a materialelor compozite	8
2.3. Reciclarea	9
CAPITOLUL 3. Elaborarea materialelor compozite AA6063/VB ₂ prin reacții in situ.....	10
CAPITOLUL 4. Proprietăți fizico-mecanice ale compozitelor AA6063/VB ₂	20
4.1. Duritatea.....	20
4.2. Rezistența la tracțiune	21
4.3. Rezistența la compresiune	22
4.4. Analiza DSC-TGA.....	23
4.5. Test tribologic de abraziune	24
Concluzii	26
Bibliografie	27

CAPITOLUL 1. COMPOZITE CU MATRICE METALICĂ (CLASIFICARE)

1.1. Generalități

Un sistem compozit cu matrice metalică este, în general, desemnat pur și simplu prin denumirea de aliaj metalic a matricei și prin tipul de material, fracția de volum și forma fazei de ranforsare ceramică [1]. De exemplu, 6061Al/ 30v/o SiCp desemnează un aliaj de aluminiu 6061 armat discontinuu cu o fază de ranforsare formată din particule de carbură de siliciu reprezentând 30 % din volum [1]. Un CMM (MMC) armat continuu poate fi desemnat prin SiC_f, de exemplu [1].

Aceste denumiri nu descriu pe deplin sistemul compozit, deoarece nu includ informații privind procesul de ranforsare de bază (ranforsarea metalurgică a lingourilor sau a pulberilor), tratamentele termice aplicate ulterior sau orientările în spațiu ale fibrelor.

MMC diferă de alte materiale compozite din mai multe puncte de vedere. Unele dintre aceste distincții generale sunt următoarele [1]:

1. Matricea metalică de bază a unui MMC este fie un metal pur, fie un aliaj metalic, spre deosebire de un polimer sau o ceramică.
2. MMC-urile prezintă o ductilitate și o duritate mai mare decât aliajele cu matrice metalică neranforsată, ceramica sau CMC-urile.
3. Rolul fazei de ranforsare în MMC este de a crește rezistența mecanică. În general, ranforsarea MMC-urilor are rolul de a asigura o mai bună toleranță la deteriorare.
4. MMC-urile au o temperatură de utilizare mai mare decât polimerii și PMC-urile, dar mai mică decât ceramica și CMC-urile.
5. MMC slab până la moderat armate pot fi formate prin procese asociate în mod normal cu metale nearmate.

Metalele sunt materiale extrem de versatile, un material metalic poate prezenta o gamă largă de proprietăți ușor de controlat prin selectarea adecvată a compoziției aliajului și a metodelor de prelucrare termomecanică [1]. Utilizarea pe scară largă a aliajelor metalice în inginerie reflectă nu numai rezistența și tenacitatea acestora, ci și ușurința relativă și costul redus de fabricare a componentelor tehnice printr-o gamă largă de procese de fabricație.

1.2. Matrici de aluminiu

Cele mai utilizate matrici sunt aliaje pe bază de aluminiu, atât deformabile cât și de turnătorie [2].

Matricile din aluminiu pot fi prelucrate plastic și turnate prin orice procedeu clasic, astfel încât materialele compozite cu matrice de aluminiu pot fi obținute prin metode de turnare sau deformare (forjare, laminare, extruziune) asemănătoare cu cele utilizate pentru aliaje [3].

Aluminiul și aliajele binare pe bază de aluminiu sunt, în general, mai puțin utilizate ca matrici [4]. Se preferă matrici cu conținut cât mai scăzut al elementelor minore de aliere, ca de exemplu Mn și Cr, deoarece acestea formează compuși intermetalici în timpul procesării, care pot influența negativ caracteristicile mecanice [4].

Alegerea matricei trebuie să țină seama nu numai de proprietățile dorite ale materialului compozit, dar și de modul de procesare [5]. Astfel, cu toate că aliajele-matrică din seria 7xxx manifestă proprietăți mecanice mai bune (rezistență și rigiditate) pentru aplicații aerospațiale decât aliajele din seria 2xxx, ultimele se utilizează cel mai adesea [5]. Aceasta se datorează faptului că aliajele din seria 7xxx se degradează ușor la interfața cu materialele de armare (ranforsare), conducând la scăderea caracteristicilor mecanice ale acestor compozite [5].

Aliajele din seriile 2xxx, 6xxx și 7xxx sunt cele mai utilizate ca matrici pentru MMC; aceste aliaje pot fi durificate prin precipitare [5].

1.3. Materiale de armare (ranforsare)

Materialele de armare din MMC sunt fibre discrete sau adaosuri de a doua fază la o matrice metalică care au ca rezultat o îmbunătățire netă a unor proprietăți, de obicei o creștere a rezistenței mecanice și/sau rigidității [6].

Cel mai adesea, materialele de ranforsare pentru MMC sunt ceramice (oxizi, carburi, nitruri etc.), care se caracterizează prin rezistență mecanică și rigiditate ridicate atât la temperatura ambiantă, cât și la temperaturi ridicate [7]. Exemple de ale celor mai comune faze de ranforsare utilizate în compozitele cu matrice metalică sunt SiC, Al₂O₃, TiB₂, B₄C și grafitul. Fazele de ranforsare metalice sunt folosite mai rar [8].

Materialele de armare pot fi împărțite în două grupe majore: (a) particule sau whiskers-uri; și (b) fibre [9]. Ranforsările din fibre pot fi împărțite în continuare în fibre continue și discontinue. Fibrele sporesc rezistența mecanică în direcția orientării lor [9]. Un dezavantaj al MMC-urilor armate cu fibre continue reprezintă rezistența mecanică scăzută în direcția perpendiculară pe direcția de orientare a fibrelor [10]. MMC-urile ranforsate discontinuu, pe de altă parte, prezintă mai multe caracteristici izotrope [10]. Două sau mai multe tipuri de faze de ranforsare pot fi prezente în unele sisteme MMC pentru a conferi proprietăți specifice [10].

Fibre lungi (continue)

Materialele de armare de tip fibre lungi sunt în general ceramice (cu excepția sârmelor), de regulă carbon, bor, oxizi, carburi și nitruri [11]. Acestea se utilizează deoarece asigură valori înalte ale rezistenței mecanice și rigidității, atât la temperatura obișnuită cât și la temperaturi înalte [11].

Pe direcția de solicitare, fibrele au rezistența mecanică mare, dar pe direcția perpendiculară a orientării fibrelor rezistența scade mult [11].

Fibrele multifilament (Fig. 1.4) sunt constituite din C, SiC și Al₂O₃, în timp ce fibrele monofilament sunt fabricate din bor [11].

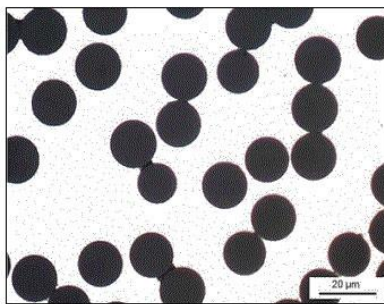


Figura 1.1. Micrografia unui compozit cu matrice de Al, armat cu 40% fibre Altex (85% Al₂O₃) [11]

Fibrele continue cu diametru mic (5-30 μm) sunt descrise adesea ca multifilamente. Aceste multifilamente sunt destul de flexibile pentru a fi împletite sub formă de cabluri [11]. Dintre aceste materiale se remarcă SiC, C și diferite sisteme de oxizi [11].

Fibre scurte (discontinue) și whiskers-uri

Materialele de armare de tip fibre scurte (discontinue) pot fi orientate (aliniat) sau distribuite aleatoriu în matricile metalice (Fig.1.5) [12].

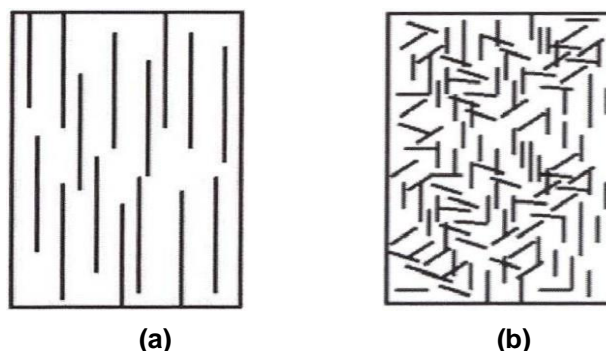


Figura 1.2. Orientarea fibrelor discontinue scurte în matrici metalice: (a) fibre aliniat; (b) fibre orientate aleatoriu [12].

Fibrele scurte aliniat au lungimea mai mare decât lungimea critică (l_c) [12]:

$$l_c = d \cdot S_f / S_m \quad (1.1) [43]$$

unde: d este diametrul fibrei, S_f și S_m sunt rezistențele la rupere la tracțiune ale fibrelor respectiv a matricei [12].

În aceste condiții rezistența mecanică a MMC armate cu fibre scurte aliniat este mare. Fibrele scurte (cu diametru mai mare ca $1 \mu\text{m}$) au un raport de aspect de peste 5, dar acesta poate ajunge chiar peste 100 [13].

Cele mai utilizate fibre scurte sunt cele fabricate din alumino-silicați; denumirea comercială cea mai cunoscută este Saffil (Fig. 1.6.) [12]. Aceste fibre au o microstructură policristalină. Proprietățile mecanice ale MMC armate cu aceste fibre sunt superioare compozitelor armate cu particule [12].

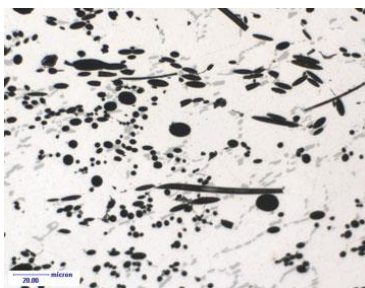


Figura 1.3. Compozit AlSi10/15%vol. fibre de SAFFIL, în stare turnată [12].

Proprietățile mecanice superioare ale MMC se obțin dacă structura cu grăunți fini a fibrelor scurte este înlocuită cu un monocristal [12]. Monocristalele de fibre scurte sunt cunoscute sub denumirea de whiskers [12]. Materialele de ranforsare sunt monocristale alungite cu raport de aspect mai mare ca 10 (de obicei câteva sute) și diametrul mai mic de $1 \mu\text{m}$ [12].

Particule ceramice

Particulele ceramice sunt cele mai utilizate materiale de armare (ranforsare) în special datorită costului scăzut al acestora [14].

Primele compozite MMC s-au fabricat din matrici de aliaje de aluminiu și particule de grafit, încorporat în proporție de $<10\%$ vol [15]. În prezent se produc MMC cu un procent volumic ridicat de diferite particule ceramice de armare (oxizi, nitruri, carburi ș.a.) [15].

CAPITOLUL 2. Tehnici de obținere / elaborare folosite la fabricarea/obținerea compozitelor cu matrice metalică

Alegerea procesului primar de fabricație pentru elaborarea oricărui compozit cu matrice metalică este dictată de mai mulți factori, dintre care cei mai importanți sunt [16]:

1. Păstrarea rezistenței fazei de ranforsare
2. Minimizarea deteriorării fazei de ranforsare
3. Promovarea umectării și a legăturii dintre matrice și armătură
4. Flexibilitate care permite susținerea, spațierea și orientarea corespunzătoare a armăturilor în cadrul matricei. [17].

2.1. Procedee de obținere

Infiltrarea metalului lichid

Preformele sunt infiltrate cu metal lichid utilizând gravitația, vidul sau presiunea ridicată (Fig 2.1).

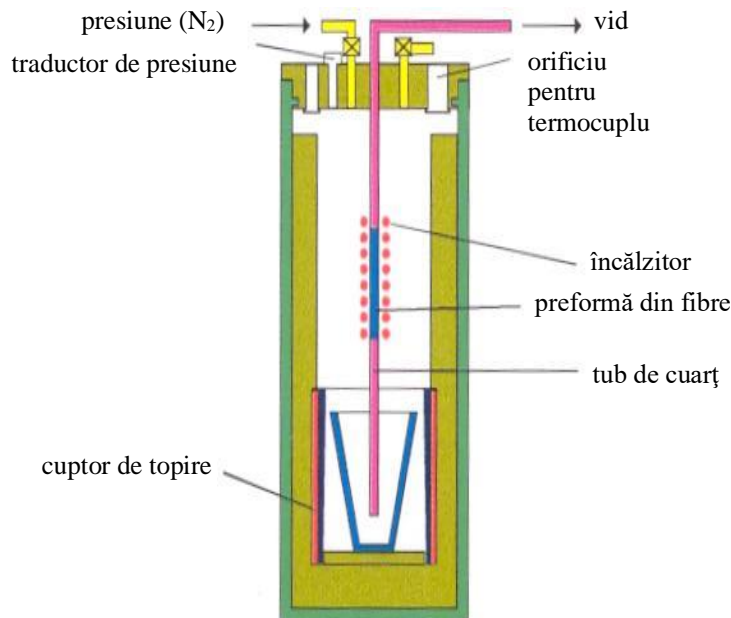


Figura 2.1. Tehnica de infiltrare a preformei din fibre continue.

Prelucrare în stare lichidă

Cea mai simplă tehnică de dispersie a particulelor ceramice în matricea lichidă este metoda VORTEX care constă în agitarea intensă a topiturii cu particulele solide (Fig. 2.6).

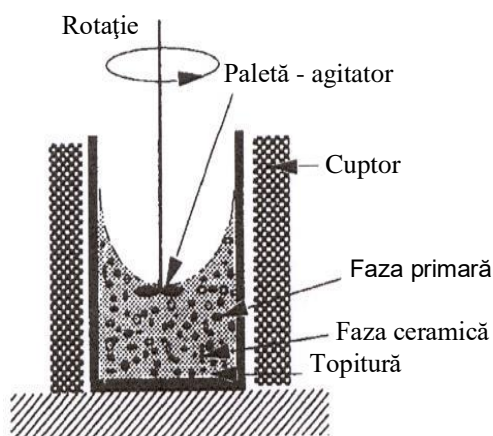


Figura 2.2. Agitarea mecanică a particulelor ceramice în amestecul solid + lichid de aliaj.

Încorporarea particulelor ceramice în matricea lichidă prin tehnica de agitare are loc în câteva etape. Particulele adăugate în vortex, la suprafața topiturii, sunt umectate gradual, având o perioadă de incubație până când sunt încorporate în topitură. Particulele parțial umectate penetrează gradual prin stratul de gaz dintre particule sau clusteri. Particulele ceramice total umectate sunt uniform dispersate în matricea lichidă.

Turnarea materialelor compozite (MMC) se poate realiza gravitațional, în forme din amestecuri de formare sau în cochile metalice și turnare centrifugală.

Procedee Casting (Forjare în stare lichidă)

Turnarea „squeeze casting” este o tehnică utilizată la fabricarea compozitelor în fază lichidă ce utilizează preforme fabricate din material de ranforsare. Aceasta constă în infiltrarea sub presiune unidirecțională (presiunea 70 – 150 MPa). Piesele finale nu conțin porozități și au o microstructură cu grăunți mici echiaxiali. Viteza de infiltrare depinde de presiunea aplicată, capilaritate, distanța dintre particulele dispersate, viscozitatea metalului lichid, permeabilitatea formei, temperaturile matriței, preformei și a topiturii.

Fluxul tehnologic de infiltrare este prezentat în Fig. 2.8.

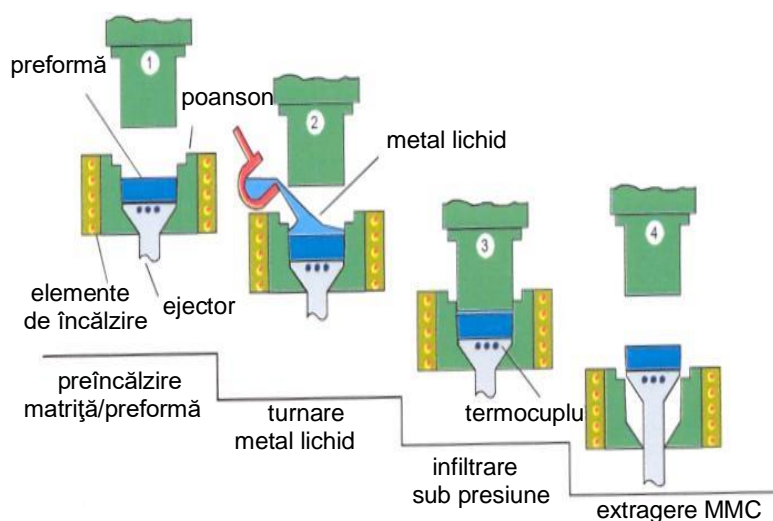


Figura 2.3. Fluxul tehnologic al procedului de infiltrare Squeeze Casting.

Procedee de producere in-situ

Procedeele in-situ de obținere a MMC nu necesită materiale de ranforsare inițiale [18]. În aceste procedee materialul de ranforsare se formează din reacții in-situ în matricea metalică, într-o singură fază [18]. Un alt avantaj este că interfețele între materialul de ranforsare și matrice sunt foarte curate, permițând o mai bună umectare și îmbinare între matrice și materialul de ranforsare (nu se adsoarbe gaz, nu se produce oxidarea, nu se produc reacții la interfață) [18]. De asemenea, costurile și pericolele sunt reduse, fiind eliminate operațiile de manipulare a particulelor fine de material de ranforsare [18].

Principalele procedee sunt: injecție de gaze sau săruri în matricea metalică, infiltrarea reactivă a matricei lichide într-o preformă poroasă, solidificarea unidirecțională a aliajelor eutectice [18].

2.2. Domenii de utilizare a materialelor compozite

Datorită combinațiilor de proprietăți excelente ca rezistența mecanică și rigiditate înalte, stabilitate termică ridicată, coeficient de dilatare termică scăzut și rezistență mare la uzură precum și datorită reducerii continue a costurilor, compozitele MMC se impun tot mai mult în diferite domenii ca: industria de transporturi, industria aerospațială, industria electronică și producția materialelor sportive (de exemplu, biciclete) [19] [20] [21] [22].

Aplicații în industria de transporturi

Un număr mare de componente pentru automobile și alte vehicule ca: pistoane, cămăși de cilindri, biele, discuri și rotoare de frânare, etriere, axe cardanice, sunt fabricate din materiale compozite cu matrice metalică, în special pe bază de aluminiu. Principalele materiale compozite fac parte din sistemele Al-SiC, Al-Al₂O₃, Mg-SiC, Mg-Al₂O₃, materialele de armare fiind particule ceramice sau fibre scurte [23] [24].

În Fig. 2.12 se prezintă un piston pentru motor Diesel fabricat prin procedeul squeeze-casting din compozit Al/Al₂O₃(fibre scurte), iar în Fig. 2.13 rotoare de frânare pentru trenuri de mare viteză în transportul subteran (metrou) și pe calea ferată precum și discuri de frână pentru autoturisme. Rotoarele de frânare sunt fabricate din compozite AlSi7Mg/20% vol. SiC; masa acestora este de numai 76 kg în comparație cu masa rotoarelor clasice care cântăresc 120 kg [25].



Figura 2.4. Piston din compozit cu matrice de aluminiu armată cu fibre scurte, pentru motoare Diesel [12].

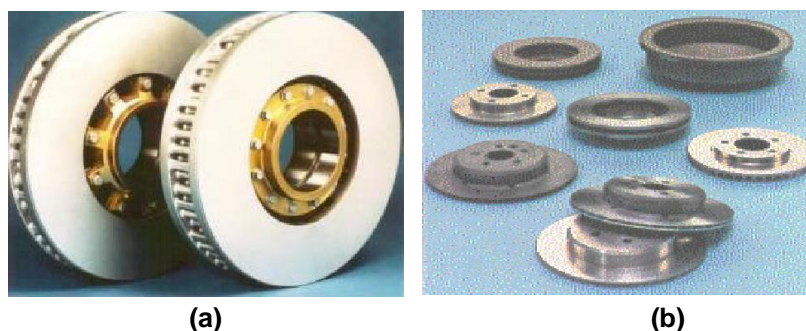


Figura 2.5. Rotoare de frânare pentru trenuri de mare viteză (a) și sisteme de frânare pentru automobile (b) [12].

Aplicații în industria electronică

Progresele efectuate în microelectronică au determinat dezvoltarea miniaturizării dispozitivelor în care compozitele cu matrice de aluminiu armate cu particule ceramice au un rol din ce în ce mai important [26]. Aceasta se datorează coeficientului de dilatare termică redus, conductivității termice mari, densității mici și costului scăzut [26].

În Fig. 2.14 este prezentat un modul multicip fabricat prin infiltrare sub presiune din compozit Al/65-75% vol. SiC [27].

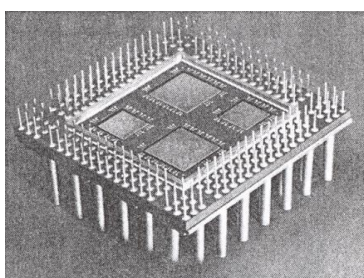


Figura 2.6. Modul multicip electronic fabricat din compozit Al/SiC_p [27]

2.3. Reciclarea

Exemple importante de produse MMC comercializate în prezent sunt pistoanele pentru motoare diesel [28], pistoanele pentru motoare [29] și blocurile de cilindri pentru automobile [30] [31]. Volumul părții compozite a acestor produse este foarte mic [32]. De exemplu, în cazul pistoanelor pentru motoarele diesel, doar partea care înconjoară segmentul de piston este realizată din compozit. Faza de ranforsare a acestei piese este constituită din fibre scurte de alumina/silice (cu diametrul de aproximativ 3 mm), iar fracția de volum a fibrelor este de 7-8 %. Partea compozită a blocurilor cilindrice pentru automobile este suprafața interioară a cilindrului; are o grosime de 3 mm și conține aproximativ 20 % vol. fibre. Fibrele utilizate pentru blocul cilindrilor sunt fibre scurte de alumina (diametru de aproximativ 3 mm) și fibre de carbon (diametru de aproximativ 7 mm) [33].

Când deșeurile de produse compozite sunt topite, piesa compozită se scufundă în fundul creuzetului, păstrându-și forma inițială, deoarece fibrele de ranforsare au de obicei o densitate specifică mai mare decât metalul matricei și fiecare fibră nu se deplasează separat în topitură [34].

Cu toate acestea, tehnologiile de separare a particulelor de armare de metalul matricei vor fi importante pentru recuperarea metalului matricei [31].

CAPITOLUL 3. Elaborarea materialelor compozite AA6063/VB₂ prin reacții in situ

În domeniul cercetării academice, s-au documentat multiple studii referitoare la producerea de compozite cu matrice din aliajele de aluminiu din seriile AA7075, A356, AA2024, AA5052, AA2014 și AA6061, care au fost ranforsate prin dispersia de particule de diborură de zirconiu. Aceste compozite au fost sintetizate prin intermediul reacțiilor aluminotermice la variate temperaturi (1000K, 1023K, 1123K, 1143K, 1158K, 1163K și 1173K). Procesul a implicat utilizarea diferitelor concentrații de săruri KBF₄ pentru introducerea borului și AlV10 pentru aportul de vanadiu.

În cadrul acestui studiu, cu scopul de a cerceta îmbunătățirea microstructurilor compozitelor cu matrice metalică AA6063/VB₂, particulele de ranforsare VB₂ au fost obținute prin metoda de sinteză in-situ utilizând aliajul topit AA6063 cu pre-aliaj AlV10 și sare KBF₄.

O serie de compozite au fost fabricate cu succes folosind metoda in-situ prin reacția aluminotermică:



Calculul încărcăturii

În vederea obținerii de bare pentru testarea la tracțiune și a probelor pentru analiza microstructurii, topiturile de compozit au fost turnate în matricele pre-încălzite în formă de bare, având $\phi = 12$ mm și $h = 90$ mm, la diferite concentrații de VB₂ (1%, 2%, 3%, 4%, 5% și 10%).

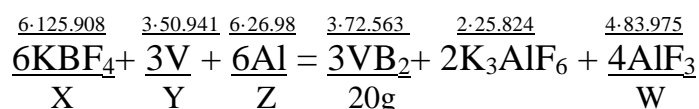
Pe baza capacității creuzetului, s-a stabilit că ar trebui să se utilizeze 300 g de aliaj de aluminiu pentru o bună prelucrare in situ a compozitelor.

Tabelul 3.1. Profilul compoziției chimice fără impurități, conform standardului

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Marca 6063	0,2-0,6	0,35	0,10	0,10	0,45-0,9	0,10	0,10	0,10
Nominal	0,49	0,33	0,02	0,02	0,72	0,06	0,03	0,04

Calculule stoichiometrice necesare pentru obținerea compozitelor Al/VB₂ sunt:

Calcul pentru necesar VB₂ la 200g, concentrație 10%

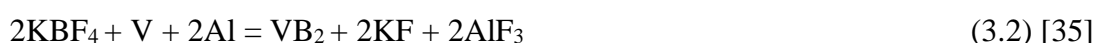


Cantități materiale folosite:

140 g aliaj 6063 + 56 g, 140 g AlV10, 69,2 g KBF₄

Formațiunile de energie liberă Gibbs pentru borurile de aluminiu și de vanadiu au fost testate cu ajutorul HSC Chemistry la temperaturi cuprinse între 500°C și 1000°C. Figura 3.1 prezintă curbele de stabilitate ale diferitelor reacții posibile [35].

Prin analiza termodinamică a reacțiilor care au loc în topitură, am constatat că reacția (3.1) a fost cea mai probabilă reacție care a avut loc în timpul dezvoltării compozitului.



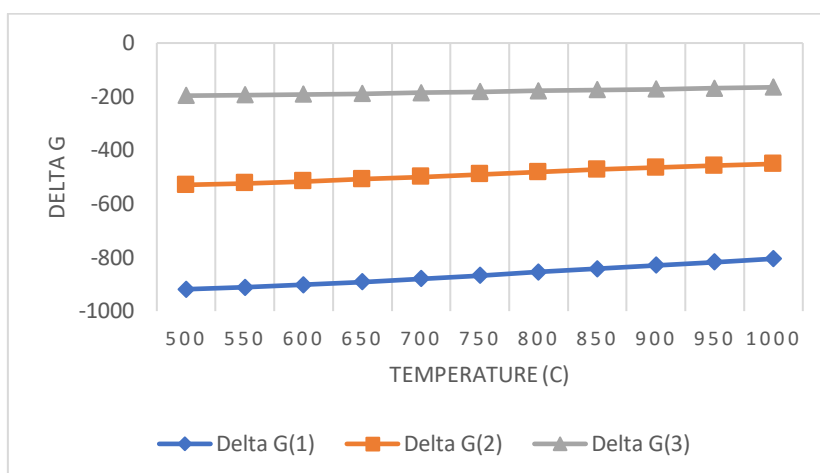
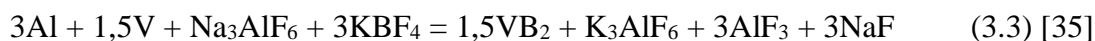


Figura 3.1. Variația entalpiei libere standard în intervalul de temperatură 500 – 1000 °C al reacțiilor 3.1 ÷ 3.3 [35]

Probele metalografice au fost prelucrate cu ajutorul frezei DELTA Abrasimet, al mașinii de înglobare SIMPLIMET 1000 și al mașinii de șlefuit/șlefuit Beta/1 Single. Probele au fost apoi analizate cu ajutorul microscopului optic Olympus UC30 la diferite dimensiuni (Fig. 3.4, Fig. 3.7, Fig. 3.10, Fig. 3.13, Fig. 3.16, Fig. 3.19).

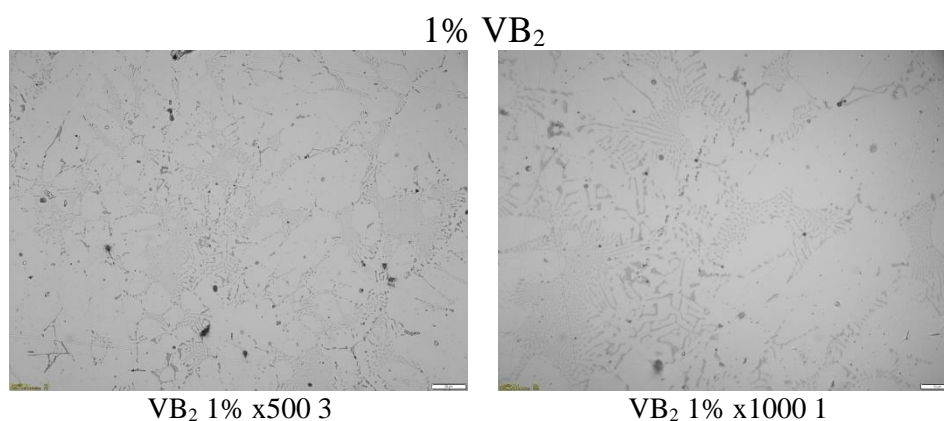


Figura 3.4 Analiza prin microscopie optică a compozitelor cu o concentrație de 1% particule de ranforsare [35]

Analiza de fază:

Analiza de fază a fost realizată prin intermediul softului DIFFRAC.EVA release 2019 și al bazei de date *ICDD PDF4+ 2020*.

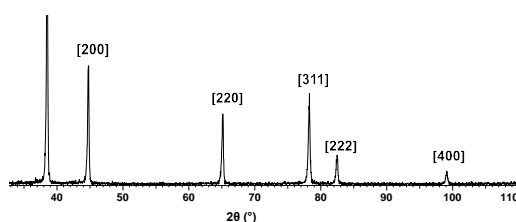


Figura 3.6. Prezentarea grafică a analizei calitative de fază prin DRX pentru Proba 1 [35]

Nume Compus	Referință PDF	Formula chimică	Sistem de cristalizare	Grup Spațial
Ss type A1	04-017-1423	Ss Type A1- $Al_{1-x}M_x$ (prototip Cu)	Cubic (Cub cu fete centrate)	Fm-3m (225)

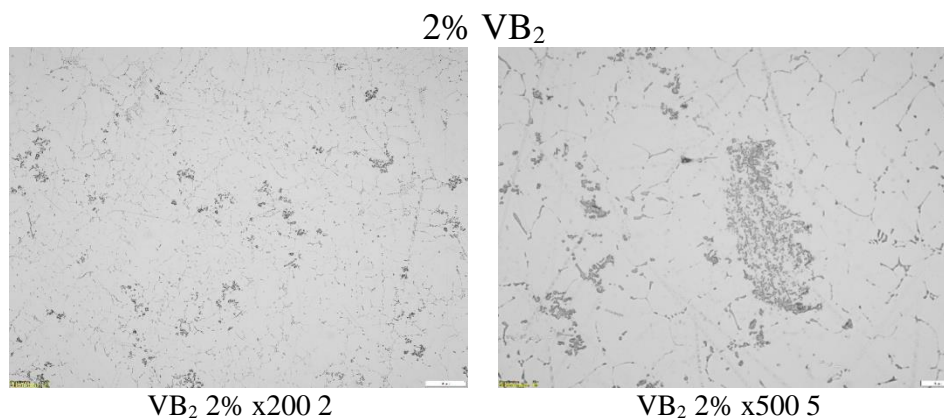


Figura 3.7 Analiza prin microscopie optică a compozitelor cu o concentrație de 2% particule de ranforsare

Analiza de fază:

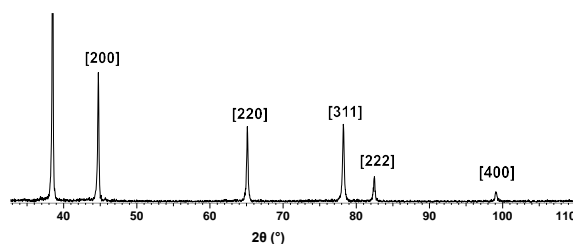


Figura 3.9 Prezentarea grafică a analizei calitative de fază prin DRX pentru Proba 2

Nume Compus	Referință PDF	Formula chimică	Sistem de cristalizare	Grup Spațial
Ss type A1	04-017-1423	Ss Type A1- $Al_{1-x}M_x$ (prototip Cu)	Cubic (Cub cu fete centrate)	Fm-3m (225)

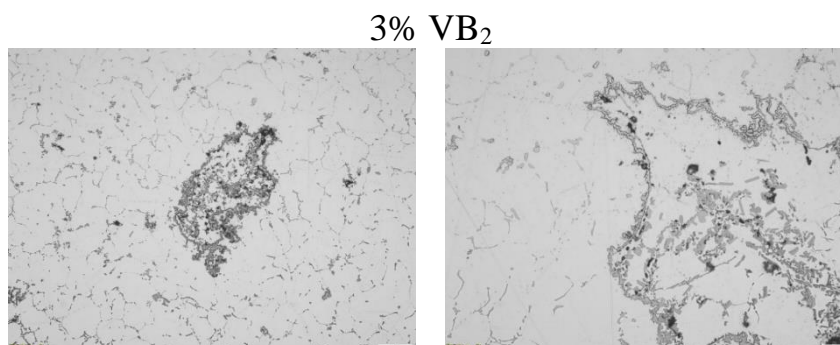


Figura 3.10 Analiza prin microscopie optică a compozitelor cu o concentrație de 3% particule de ranforsare

Analiza de fază:

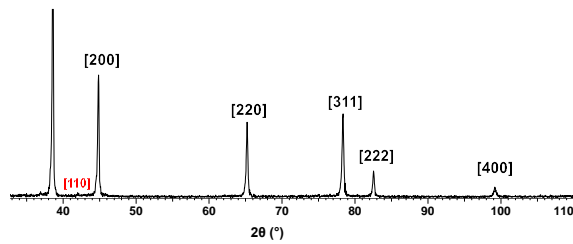


Figura 3.12 Prezentarea grafică a analizei calitative de fază prin DRX pentru Proba 3

Nume Compus	Referință PDF	Formula chimică	Sistem de cristalizare	Grup Spațial
Ss type A1	04-017-1423	Ss Type A1- $Al_{1-x}M_x$ (prototip Cu)	Cubic (Cub cu fete centrate)	Fm-3m (225)
AlV_2	01-077-6859	AlV_2	Cubic (Cub cu volum centrat)	Im-3m (229)

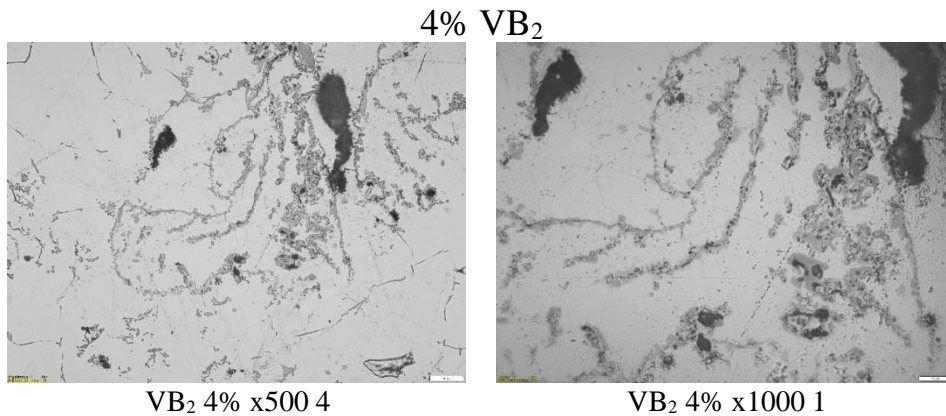


Figura 3.13 Analiza prin microscopie optică a compozitelor cu o concentrație de 4% particule de ranforsare

Analiza de fază:

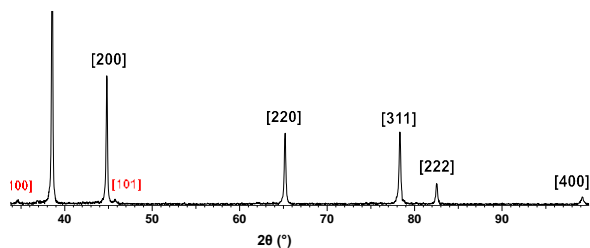


Figura 3.15 Prezentarea grafică a analizei calitative de fază prin DRX pentru Proba 4

Nume Compus	Referință PDF	Formula chimică	Sistem de cristalizare	Grup Spațial
Ss type A1	04-017-1423	Ss Type A1- $Al_{1-x}M_x$ (prototip Cu)	Cubic (Cub cu fete centrate)	Fm-3m (225)
VB₂	00-038-1463	VB ₂	Hexagonal	P6/mmm (191)

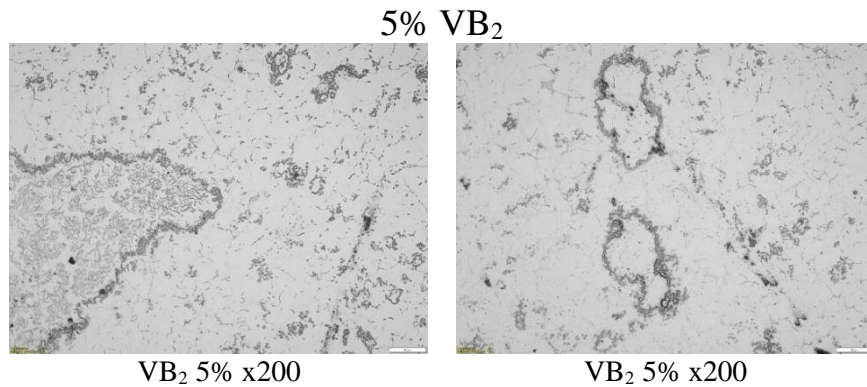


Figura 3.16 Analiza prin microscopie optică a compozitelor cu o concentrație de 5% particule de ranforsare

Analiza de fază:

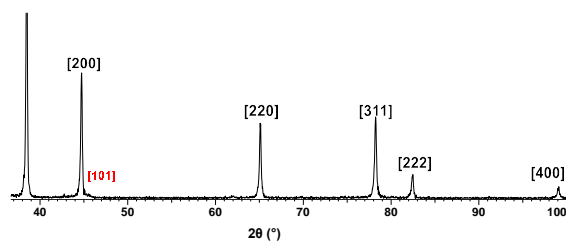


Figura 3.18 Prezentarea grafică a analizei calitative de fază prin DRX pentru Proba 5

Nume Compus	Referință PDF	Formula chimică	Sistem de cristalizare	Grup Spațial
Ss type A1	04-017-1423	Ss Type A1- $Al_{1-x}M_x$ (prototip Cu)	Cubic (Cub cu fete centrate)	Fm-3m (225)
VB₂	00-038-1463	VB ₂	Hexagonal	P6/mmm (191)

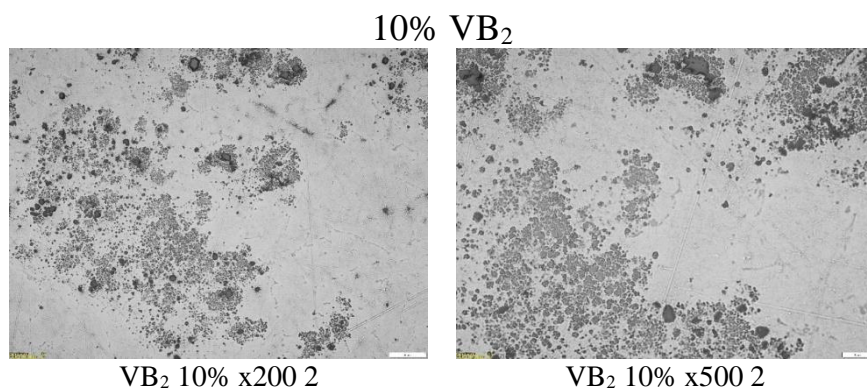


Figura 3.19 Analiza prin microscopie optică a compozitelor cu o concentrație de 10% particule de ranforsare

Analiza de fază:

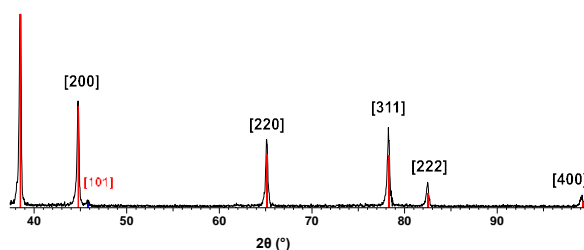
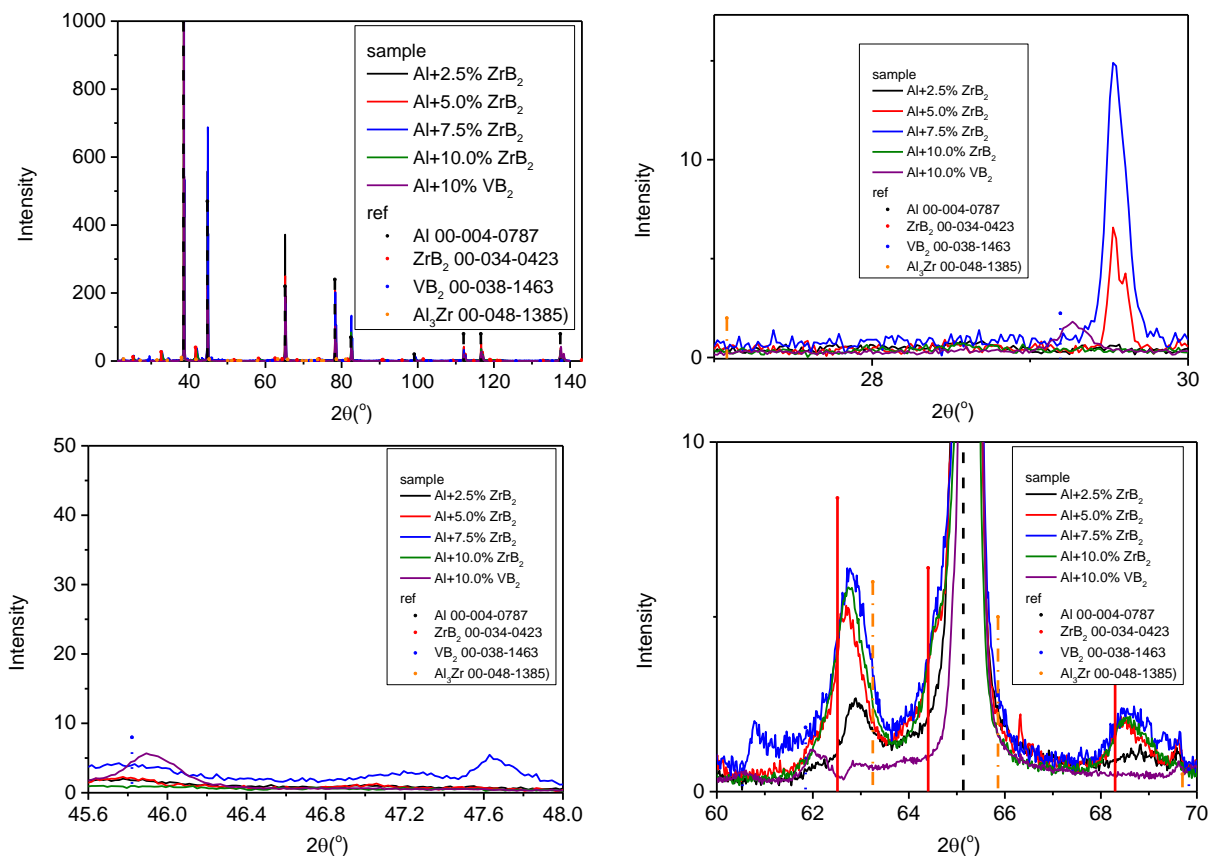


Figura 3.21 Prezentarea grafică a analizei calitative de fază prin DRX pentru Proba 6

Nume Compus	Referință PDF	Formula chimică	Sistem de cristalizare	Grup Spațial
Ss type A1	04-017-1423	Ss Type A1- $Al_{1-x}M_x$ (prototip Cu)	Cubic (Cub cu fete centrate)	Fm-3m (225)
VB₂	00-038-1463	VB ₂	Hexagonal	P6/mmm (191)

În studiul efectuat, s-a constatat prezența compușilor VB₂ și Al în toate probele de materiale compozite. Difractometrul D8 ADVANCE reprezintă o platformă unică din familia difractometrelor D8, fiind conceput în mod ideal pentru o varietate de aplicații de difracție cu raze X și dispersie, inclusiv difracție cu raze X (XRD), analiză a funcției de distribuție a perechilor (analiză PDF), dispersie de raze X cu unghi larg și mic (SAXS, WAXS) (Figura 3.22).



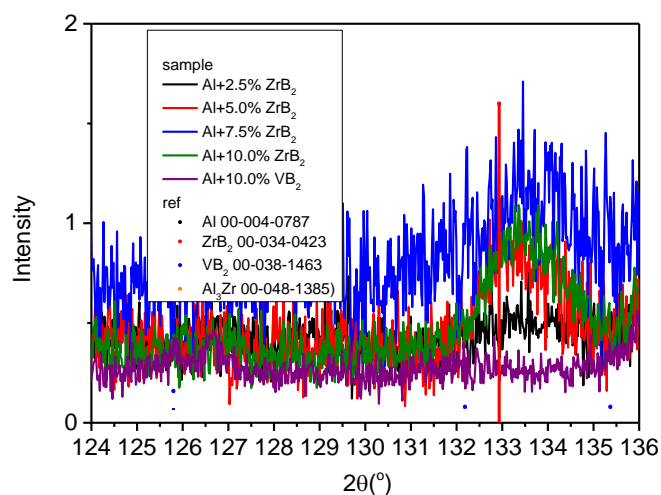
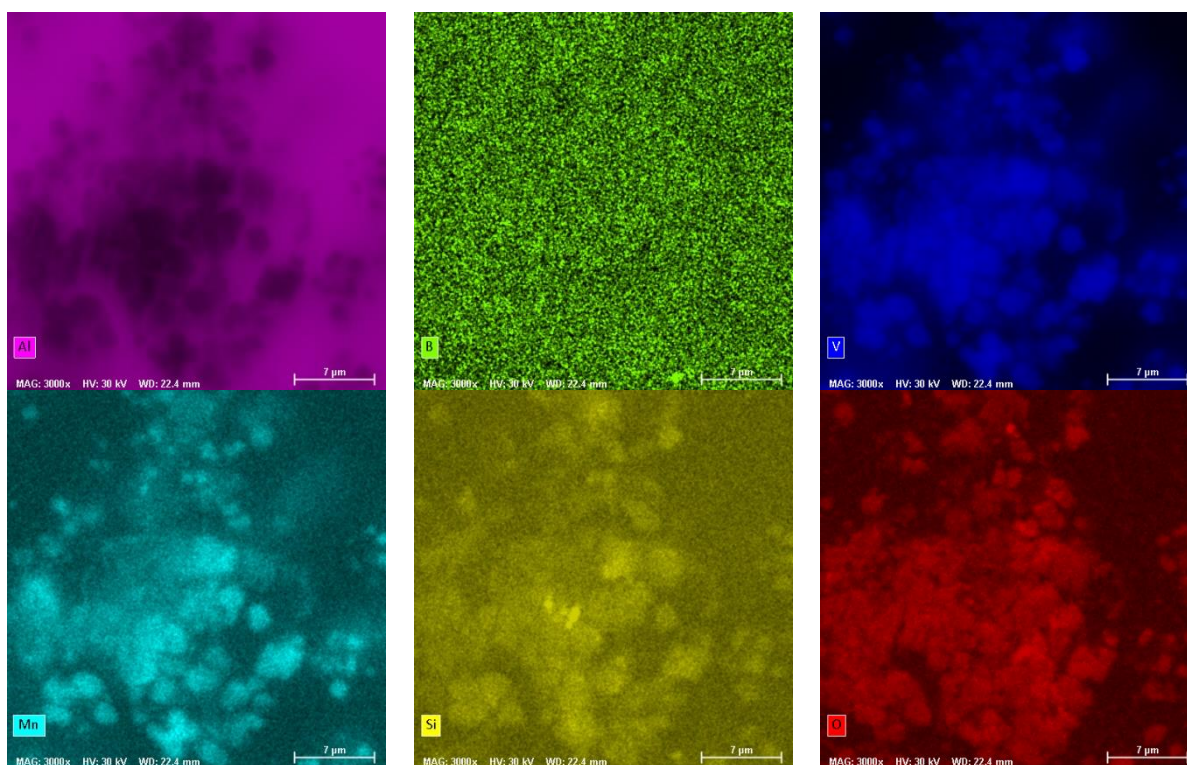
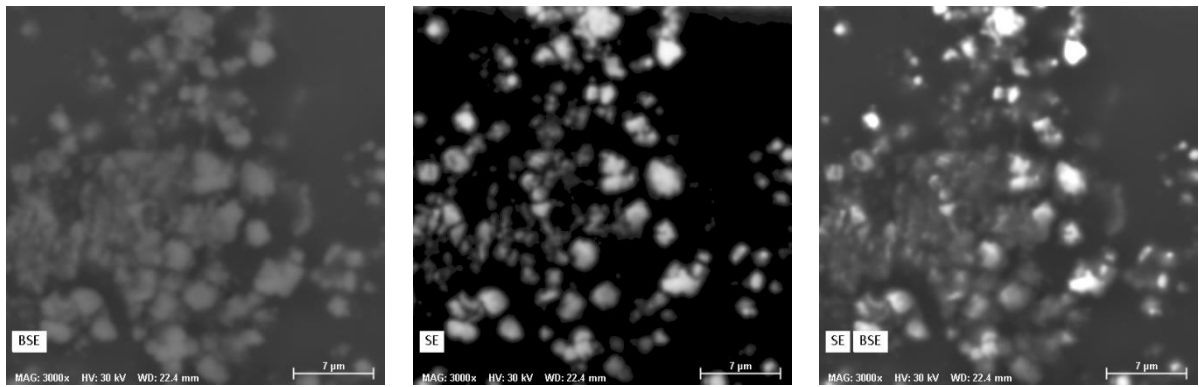


Figura 3.22 Analiza SEM a compozitelor AA6063/VB₂ cu peak-uri VB₂ [36]

Cu ajutorul EDS Mapping (Mapping de energie dispersivă a razelor X) la un compozit cu AA6063 ranforsat cu VB₂, se poate observa distribuția spațială a elementelor chimice prezente în compozit. Această tehnică de analiză permite cartografierea compoziției chimice în diferite zone ale compozitului (Fig. 3.23).

Se pot identifica pozițiile și distribuțiile particulelor de VB₂ în matricea de aluminiu AA6063. Acest lucru poate oferi informații despre cum sunt distribuite particulele de VB₂ în matrice și cum interacționează cu matricea de aluminiu.





Map

Element	At. No.	Line s.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Aluminium	13	K-Serie	377374117	164.40	86.93	90.38	8.22	5.00
Magnesium	12	K-Serie	4731943	2.07	1.10	1.26	0.12	5.76
Silicon	14	K-Serie	68327	0.03	0.02	0.02	0.00	4.48
Iron	26	K-Serie	681168	0.31	0.16	0.08	0.01	2.52
Titanium	22	K-Serie	828254	0.29	0.15	0.09	0.01	2.74
Zinc	30	K-Serie	4340	0.00	0.00	0.00	0.00	2.95
Copper	29	K-Serie	14937	0.01	0.00	0.00	0.00	2.61
Vanadium	23	K-Serie	48686473	16.94	8.96	4.93	0.45	2.66
Boron	5	K-Serie	0	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00
Chromium	24	K-Serie	202456	0.08	0.04	0.02	0.00	2.62
Zirconium	40	L-Serie	533538	0.49	0.26	0.08	0.02	3.93
Oxygen	8	K-Serie	558180	3.18	1.68	2.95	0.33	10.54
Palladium	46	L-Serie	2683583	1.33	0.70	0.18	0.04	3.24
			Sum	189.13	100.00	100.00		

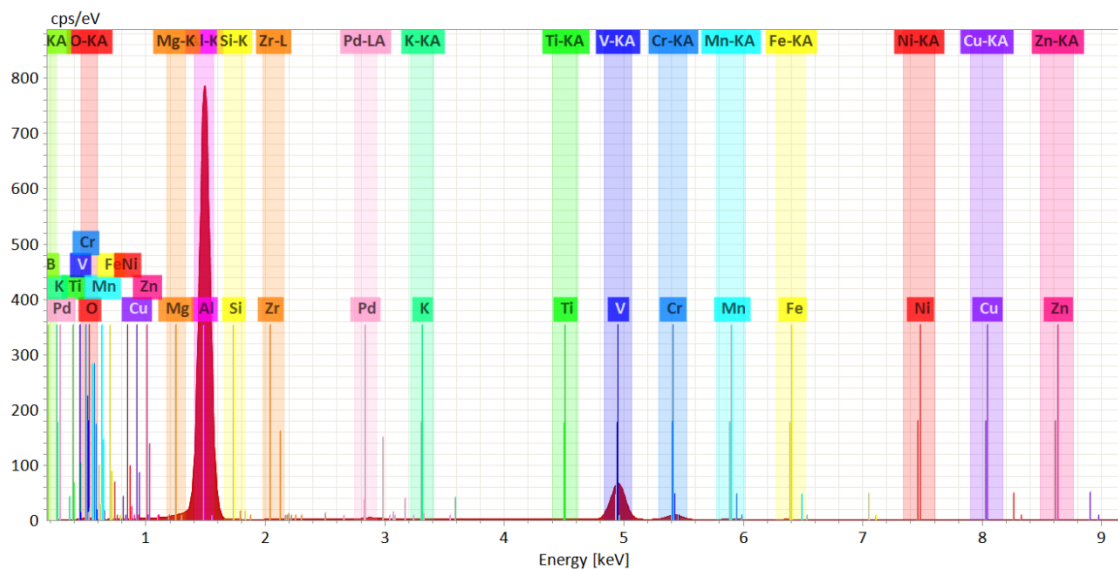
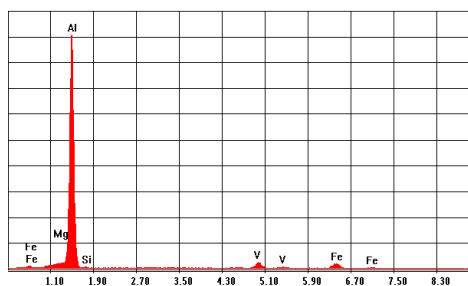
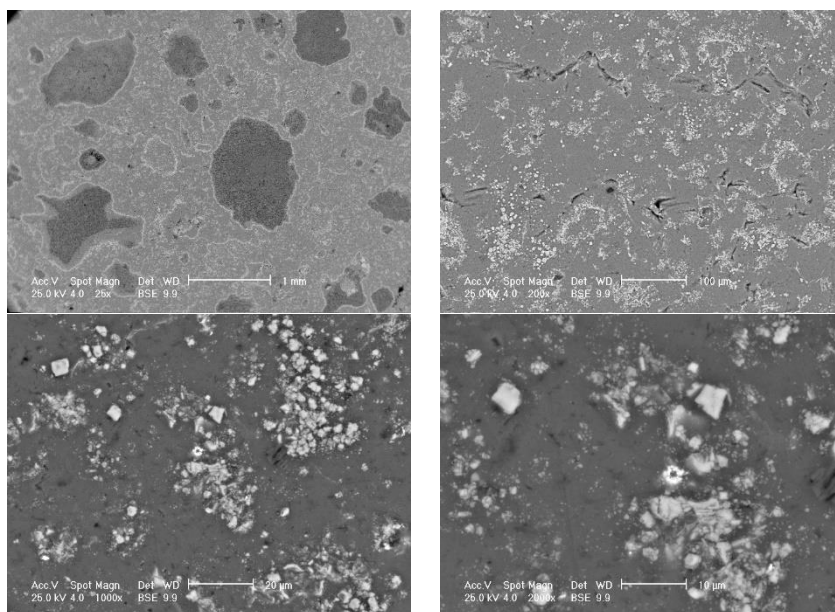


Figura 3.23 Analiză EDS MAPPING VB₂ [35]

Figura 3.24 ilustrează analiza cu microscopul electronic de scanare (SEM) a compozitului cu o concentrație înaltă de VB₂, precum și analiza compozițională (EDS) a particulelor conținând vanadiu (V). În cazul creșterii concentrației la 10% a particulelor de VB₂, s-a observat tendința acestora de a forma aglomerări în anumite zone [35].



Element	Wt %	At %
MgK	2.33	2.73
AlK	86.7	91.36
SiK	0.22	0.22
V K	4.58	2.56
FeK	6.17	3.14
Total	100	100

Analiza EDS (Particule poliedrice) VB₂

Figura 3.24 Analiza prin microscopie electronică și analiza EDS particulelor de VB₂ [35]

În cadrul analizelor efectuate, am consultat resursele de date disponibile în cadrul difractometrului D8 ADVANCE, mai precis fișa 00-038-1463 pentru VB₂. Această fișă furnizează informații detaliate despre caracteristicile cristalografice ale VB₂, inclusiv sistemele cristalografice în care se cristalizează, parametrii celulei elementare, distanțele interatomice, densitățile, masele molare și altele, referitoare la substanțele pure (Fig. 3.25).

Status Primary Quality Mark: Star Environment: Ambient Temp: 298.2 K Chemical Formula: V B2
 Empirical Formula: B2 V Weight %: 629.80 V70.20 Atomic %: B66.67 V33.33
 Compound Name: Boron Vanadium CAS Number: 12007-37-3 Entry Date: 09/01/1988

Radiation: CuK α 1 (1.5406 Å) Filter: Graph Mono Internal Standard: Si d-Spacing: Diffractometer
 Cutoff: 17.70 Å Intensity: Diffractometer - Peak

Crystal System: Hexagonal SPGR: P6/mmm (191)
 Author's Cell [a: 2.99761(9) Å c: 3.05620(12) Å Volume: 23.78 Å³ Z: 1.00 MolVol: 23.78 c/a: 1.020]
 Calculated Density: 5.066 g/cm³ Color: Dark gray SS/FOM: F(20) = 137.9(0.0073, 20)

Space Group: P6/mmm (191) Molecular Weight: 72.56 g/mol
 Crystal Data [XtiCell a: 2.998 Å XtiCell b: 2.998 Å XtiCell c: 3.056 Å XtiCell α : 90.00° XtiCell β : 90.00°
 XtiCell γ : 120.00° XtiCell Vol: 23.78 Å³ XtiCell Z: 1.00 c/a: 1.019 a/b: 1.000 c/b: 1.019]
 Reduced Cell [RedCell a: 2.998 Å RedCell b: 2.998 Å RedCell c: 3.056 Å RedCell α : 90.00°
 RedCell β : 90.00° RedCell γ : 120.00° RedCell Vol: 23.78 Å³]

Atomic parameters are cross-referenced from PDF entry 04-007-4807

Space Group Symmetry Operators:

Seq	Operator	Seq	Operator	Seq	Operator	Seq	Operator	Seq	Operator	Seq	Operator
1	x,y,z	5	-x+y,-x,z	9	-x,-x+y,z	13	-x,-y,z	17	x,-y,x,z	21	x,x+y,z
2	-x,-y,-z	6	x-y,x,-z	10	x,x-y,-z	14	x,y,-z	18	-x+y,-x,-z	22	-x,-x+y,-z
3	-y,x,-z	7	y,x,z	11	x,y,-y,z	15	y,-x+y,z	19	-y,-x,z	23	-x+y,y,z
4	y,-x+y,-z	8	-y,-x,-z	12	-x+y,-y,-z	16	20	y,x,-z	24	-x-y,-y,-z	

Atom Coordinates:

Atom	Num	Wyckoff	Symmetry	x	y	z	SOF	IDP	AET
V	1	1a	6/mmm	0.0	0.0	0.0	1.0		20-a
B	2	2d	-6m2	0.33333	0.66666	0.5	1.0		30b

Crystal (Symmetry Allowed): Centrosymmetric

Subfiles: Common Phase, Inorganic, Metal & Alloy, NBS Pattern Pearson Symbol: hP3.00

Prototype Structure [Formula Order]: Al B2 Prototype Structure [Alpha Order]: Al B2

LPF Prototype Structure [Formula Order]: Al B2,hP3,191 LPF Prototype Structure [Alpha Order]: Al B2,hP3,191

ANX: NO2

00-008-0118 (Deleted), ✓ 04-001-2358 (Primary), ✓ 04-001-2991 (Alternate), ✓ 04-002-0030 (Alternate), ✓ 04-002-0797 (Alternate), ✓ 04-002-8872 (Alternate), ✓ 04-003-2543 (Alternate), ✓ 04-003-6282 (Alternate), ✓ 04-004-5886 (Alternate), ✓ 04-006-2024 (Alternate), ✓ 04-007-4807 (Alternate)

References:

Type	DOI	Reference
Primary Reference		Wong-Ng, W., McMurdie, H., Paretzkin, B., Hubbard, C., Dragoo, A., NBS (USA). ICDD Grant-in-Aid (1986).
Crystal Structure		Crystal Structure Source: LPF
Structure		1. Rudy, E., Benesovsky, F., Todd, L. Z. Metallurg. 54, 345 (1963).
Unit Cell		Wong-Ng, W., McMurdie, H., Paretzkin, B., Hubbard, C., Dragoo, A. Powder Diff. 2, 115 (1987).

Additional Patterns: To replace 00-008-0118 (Paretzkin, Private Communication). ANX: NO2. Sample Source or Locality: The sample was obtained from Alfa Products, Thickol/Ventron Division, Danvers, Massachusetts, USA, with a nominal purity of 99%. Structures: The structure was determined by Rudy et al. (1). Temperature of Data Collection: The mean temperature of data collection was 298.2 K. Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

d-Spacings (2 θ) - V B2 - 00-038-1463 (Stick, Fixed Slit Intensity) - Cu K α 1 1.54056 Å

2 θ (°)	d (Å)	I	h	k	l	*	2 θ (°)	d (Å)	I	h	k	l	*
29.19127	3.056720	28	0	0	1		98.25279	1.018680	1	0	0	3	
34.53009	2.693350	71	1	0	0		102.25943	0.989180	3	2	0	2	
45.82088	1.978670	100	1	0	1		103.45740	0.981140	3	2	1	0	
60.53451	1.528230	8	0	0	2		108.64712	0.948243	4	1	0	3	
61.84841	1.488880	23	1	1	0		111.07780	0.934227	8	2	1	1	
69.83386	1.345730	8	1	1	1		125.79644	0.855290	2	3	0	0	
71.60209	1.316780	11	1	0	2		132.18374	0.842576	1	1	1	3	
72.81091	1.297870	6	2	0	0		135.36893	0.826339	1	3	0	1	
80.29028	1.194740	11	2	0	1		137.78956	0.825665	3	2	1	2	
92.07823	1.070110	9	1	1	2		147.96902	0.801384	2	2	0	3	

Figura 3.25. Fișă 00-038-1463 pentru VB₂

Izolarea particulelor de VB₂ din compozitele materialelor s-a realizat prin solubilizarea lor într-o soluție de acid clorhidric (HCl) cu o concentrație de 35%, urmată de procedeele de filtrare și deshidratare corespunzătoare [36].

Analiza SEM a pulberilor de realizată cu ajutorul instalației SEM (VEGA II LMU) (Fig. 3.26). SEM-ul este un sistem complet controlat de PC, dotat cu un catod încălzit convențional cu wolfram, având o rezoluție maximă de 5 nm @ 30 kV [36].

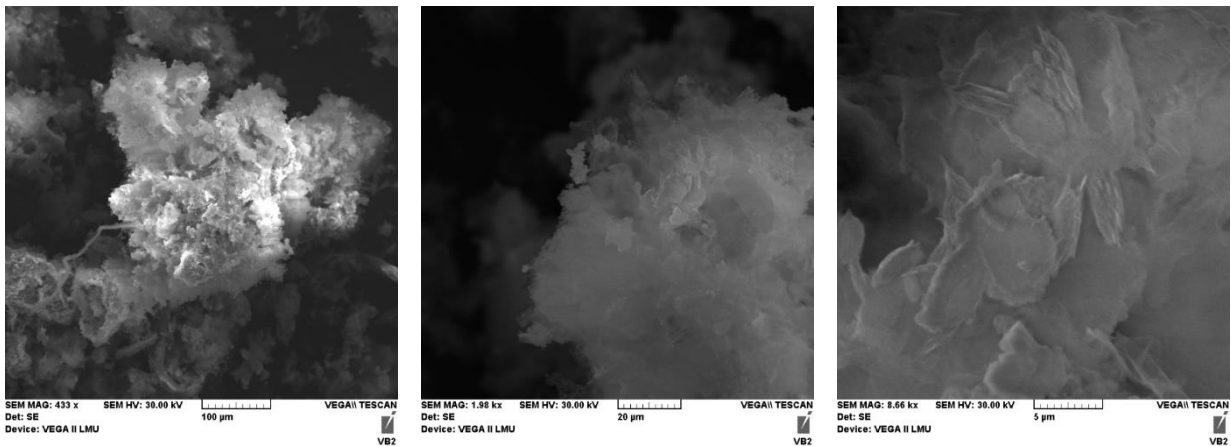


Figura 3.26 Imagini SEM a pulberilor de VB₂ extrase din materialele compozite elaborate [36]

CAPITOLUL 4. Proprietăți fizico-mecanice ale compozitelor AA6063/VB₂

Proprietățile mecanice urmărite și determinate pentru compozitele elaborate au fost: duritatea, rezistența mecanică la rupere, la tracțiune, rezistența mecanică la compresiune .

Proprietăți importante ale elementelor de ranforsare obținute in situ sunt prezentate în Tabelul 4.1 [36].

Tabelul 4.1. Proprietățile fizice ale diborurii de vanadiu [36]

Nume IUPAC	Formula chimică teoretică, [CASRN]	Sistem cristalografic, parametri de rețea.	Conductivitate termică (k.Wm ⁻¹ K ⁻¹) ¹⁾	Capacitate termică specifică (c _p .J kg ⁻¹ K ⁻¹)	Coeficientul de dilatare termică liniară (α, 10 ⁻⁶ K ⁻¹)
Diborură de vanadiu	VB ₂ [12007-37-3] 72.564	Hexagonal a = 0,2998 nm c = 0,3057 nm hP3, P6/mmm, AlB ₂ type (Z = 1)	42,3	647,43	7,6-8,3

4.1. Duritatea

Duritatea a fost determinată folosind un microdurimetru produs de Leco M-400-G, an de fabricație 2004 folosit pentru măsurarea durității Vickers și două durimetre INNOVATEST Model: FALCON 500 , an de fabricație 2015 și BUEHLER – WILSON, Model: REICHERTER UH 250, an de fabricație 2015.

$$HV_{med} = 2491,375$$

Principiul de funcționare a microdurimetrului Leco constă în aplicarea unei sarcini (P) pe o durată determinată de timp (de ex. 100gf / 30 sec), de o piramidă de diamant, pentru realizarea unei cavități de mărime (d). Mărimea cavității rezultate este măsurată cu ajutorul unui microscop optic calibrat, iar duritatea este evaluată ca fiind tensiunea medie aplicată (Fig. 4.1).

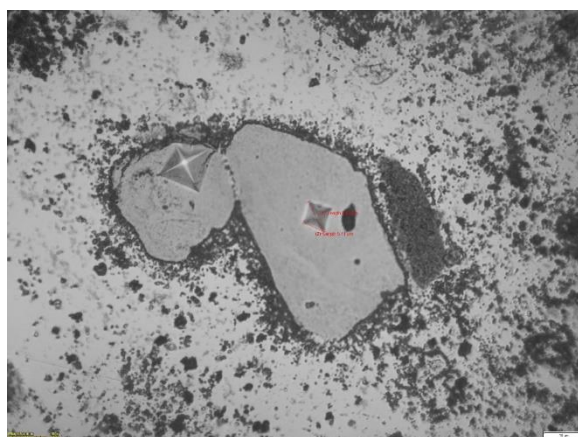


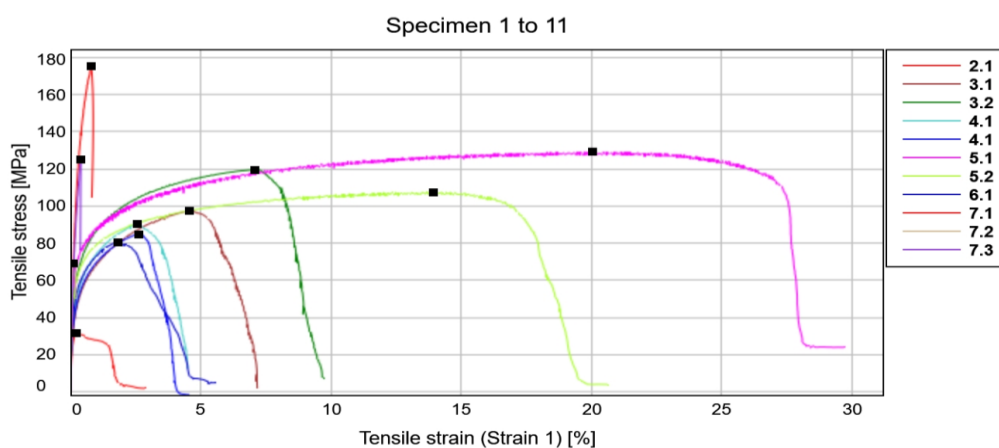
Figura 4.1 Determinarea dimensiunii cavităților lăstate în urma testelor pentru determinarea microdurității Vickers prin măsurare cu ajutorul microscopiei optice

• **VB₂**. Pelicule semiconductoare rezistente la uzură, cu densitatea 5,070 g/cm³, temperatura de topire între 2450 ÷ 2747°C și duritatea Vickers cu valori între 1750 și 4234 HV determinată pe particule obținute in-situ în compozitul AA6063/VB₂, cu microdurimetru Leco M-400-G, cu media HV_{med} = 2491.

4.2. Rezistența la tracțiune

Din epruvetele obținute au fost prelevate probe pentru caracterizarea din punct de vedere compozițional și caracterizarea proprietăților fizico-mecanice.

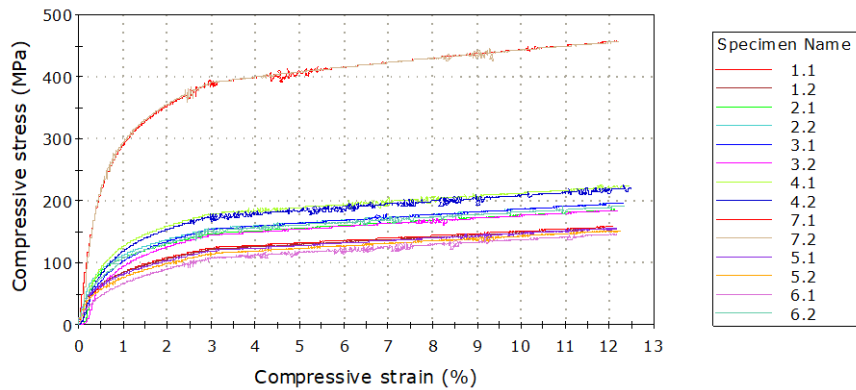
Datele pentru rezistența la tracțiune și elongație au fost preluate din rezultatele obținute cu ajutorul aparatului Instron Universal Testing Machine 8872 la temperatura camerei folosind probe cilindrice cu lungime de 15 mm și 5 mm diametru. În medie, au fost utilizate trei probe pentru fiecare test.



	Maximum Tensile stress [MPa]	Tensile strain (Strain 1) at Maximum Tensile stress [%]	Modulus (Segment 0.01 % - 0.02 %) [MPa]
1	31.39	0.25	44568.11
2	97.32	4.59	60130.13
3	119.46	7.11	70318.33
4	90.28	2.57	66660.06
5	84.87	2.62	65418.37
6	128.99	20.04	71281.04
7	107.51	13.92	67180.61
8	80.58	1.80	66622.26
9	175.56	0.81	79176.06
10	68.81	0.12	79484.16
11	124.69	0.40	76683.45

Figura 4.7 Rezistența la tracțiune pentru toate probele de compozit AA6063/VB₂

4.3. Rezistența la compresiune



	Specimen label	Diameter (mm)	Anvil height (mm)	Modulus (Segment 0.1 % - 0.15 %) (MPa)
1	1.1	9.80000	15.10000	30617.17499
2	1.2	9.81000	14.00000	18194.80939
3	2.1	10.02000	15.11000	8700.41001
4	2.2	10.00000	15.05000	48821.12209
5	3.1	9.85000	15.03000	14251.73272
6	3.2	9.82000	15.20000	3472.24019
7	4.1	9.93000	15.20000	28332.52053
8	4.2	9.83000	15.10000	22483.93191
9	7.1	10.01000	14.90000	53292.16628
10	7.2	10.14000	15.17000	85591.78304
11	5.1	10.00000	14.98000	16851.39659
12	5.2	9.99000	15.08000	14304.94640
13	6.1	9.80000	15.20000	9009.85610
14	6.2	9.84000	15.20000	21494.25000

	Modulus (Segment 0.05 % - 0.15 %) (MPa)	Modulus (Segment 0.17 % - 0.27 %) (MPa)
1	28976.17925	13469.24064
2	19942.22697	9606.30191
3	4648.00278	47345.81666
4	39769.84488	15616.19999
5	12433.57746	21642.79971
6	2424.22845	18380.52876
7	28451.17130	22012.60604
8	17419.98954	23934.82594
9	59093.19946	45348.64477
10	57608.13377	54728.30928
11	21118.77748	8462.30480
12	17702.33701	7866.49249
13	9391.04219	7653.03388
14	22768.00432	12321.55325

Figura 4.14 Rezistența la compresiune pentru toate probele de compozit AA6063/VB₂

4.4. Analiza DSC-TGA

Analiza DSC-TGA a compozitelor cu diferite concentrații de elemente de ranforsare

Se poate constata porțiunea dreaptă între 0 și cca 100MPa pe toate curbele $\sigma = f(\epsilon\%)$ la compresiune, după care probele trec în domeniul plastic. Ruperea se produce la valori mari ale deformării compozitelor, mărindu-se odată cu creșterea conținutului de VB₂.

Analiza DSC aduce informații asupra temperaturii de transformare peritectică de la 660,452°C, din diagrama binară Al-V.

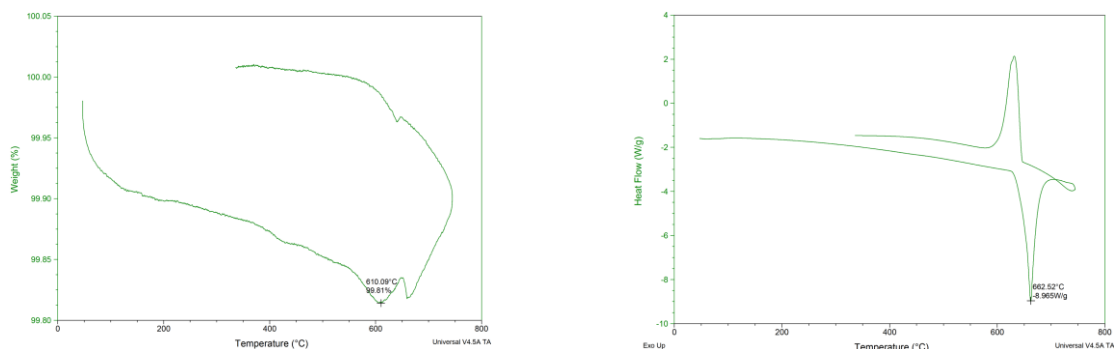


Figura 4.15 Analiza DSC (stânga) și TGA (dreapta) a compozitului AA6063 / 1% VB₂

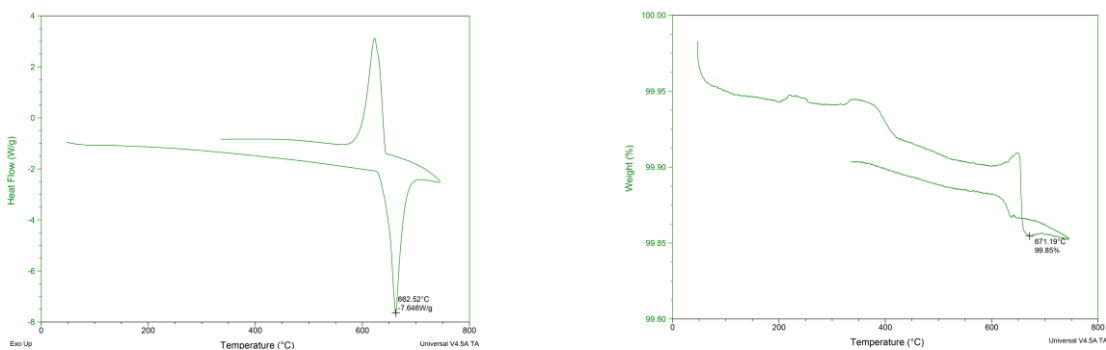


Figura 4.16 Analiza DSC (stânga) și TGA (dreapta) a compozitului AA6063 / 2% VB₂

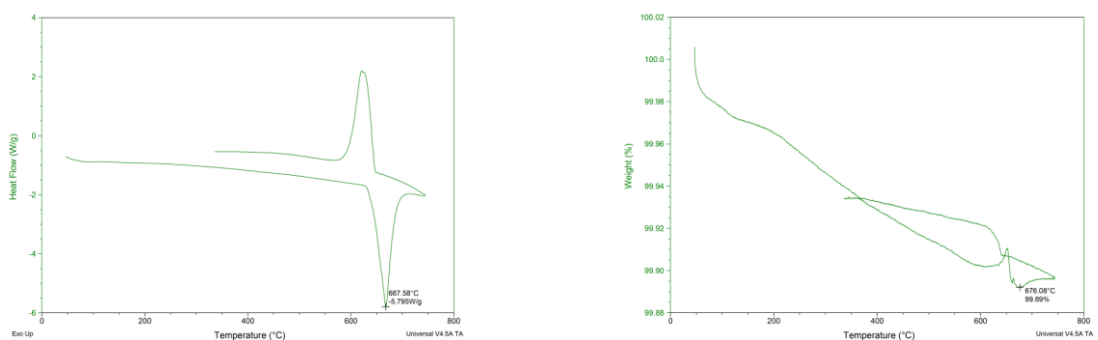


Figura 4.17 Analiza DSC (stânga) și TGA (dreapta) a compozitului AA6063 / 3% VB₂

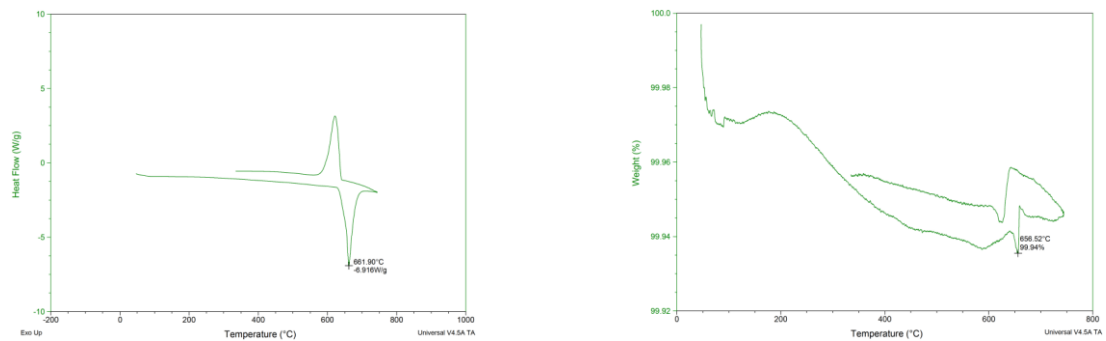


Figura 4.18 Analiza DSC (stânga) și TGA (dreapta) a compozitului AA6063 / 4% VB₂

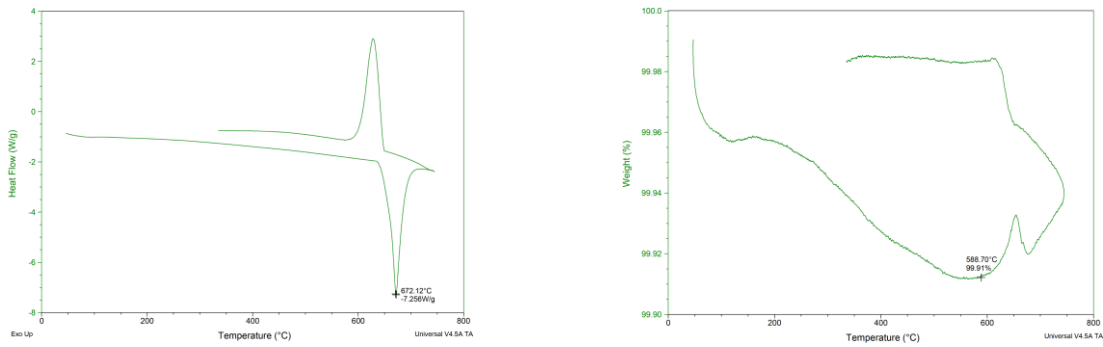


Figura 4.19 Analiza DSC (stânga) și TGA (dreapta) a compozitului AA6063 / 5% VB₂

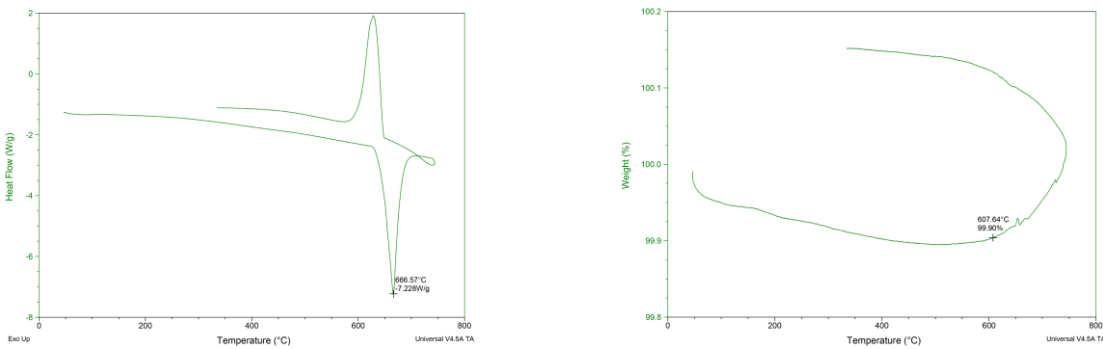


Figura 4.20 Analiza DSC (stânga) și TGA (dreapta) a compozitului AA6063 / 10% VB₂

4.5. Test tribologic de abraziune

Probele rezultate au fost supuse unui test de uzură abrazivă utilizând instalația CSEM CALOWEAR. Diametrele urmelor reziduale rezultate în urma testului de uzură abrazivă au fost determinate prin microscopie optică folosind același echipament Olympus UC30.

Principiul de măsurare al echipamentului se bazează pe o sferă rotativă din oțel pentru rulmenți, având un diametru de $d = 25$ mm, care aplică o anumită sarcină (F_N) asupra suprafeței testate.

APARATURA	CSEM CALOWEAR
PASTA ABRAZIVA	SiC
PARAMETRII TESTULUI	<ul style="list-style-type: none"> • DIAMETRUL BILEI: $d=24.5$ [mm] • MATERIAL BILĂ: oțel special pentru rulmenți • FORȚA DE APĂSARE PE BILĂ: F_N[N] • NUMĂRUL DE ROTAȚII ALE ARBORELUI DE ANTRENARE: n • TIMP: t[s]

$$k = \frac{V}{F_N L_f} ; \quad V = \frac{\pi b^4}{32d}$$

unde:

- k = coeficient de uzare, $\left[\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}}\right]$
- V = volum de uzare, $[\text{mm}^3]$,
- b = diametrul lăsat de bilă, $[\mu\text{m}]$
- d = diametrul bilei, $[\text{mm}]$

Tabelul 4.3 Datele prelucrate în urma testului la uzură abrazivă pentru compozitul cu 1% VB₂

Nr.crt	F _N [N]	F _N Bila [N]	n [rot]	t [s]	Diametru vertical [μm]	Diametru orizontal [μm]	Arie aproximativă [μm ²]
1	0,355	0,538	4837	900	1460,58	1416,74	1684732
2	0,358	0,593	4837	900	1227,65	1363,30	1505392,55

Tabelul 4.4 Datele prelucrate în urma testului la uzură abrazivă pentru compozitul cu 2% VB₂

Nr.crt	F _N [N]	F _N Bila [N]	n [rot]	t [s]	Diametru vertical [μm]	Diametru orizontal [μm]	Arie aproximativă [μm ²]
1	0,415	0,600	4837	900	1963,43	2082,63	3228928,31
2	0,410	0,607	4837	900	1374,26	1318,08	1372479,1

Tabelul 4.5 Datele prelucrate în urma testului la uzură abrazivă pentru compozitul cu 3% VB₂

Nr.crt	F _N [N]	F _N Bila [N]	n [rot]	t [s]	Diametru vertical [μm]	Diametru orizontal [μm]	Arie aproximativă [μm ²]
1	0,377	0,490	4837	900	1403,30	1519,50	1478802,65
2	0,378	0,526	4837	900	1320,82	1204,36	1234357,31

Tabelul 4.6 Datele prelucrate în urma testului la uzură abrazivă pentru compozitul cu 4% VB₂

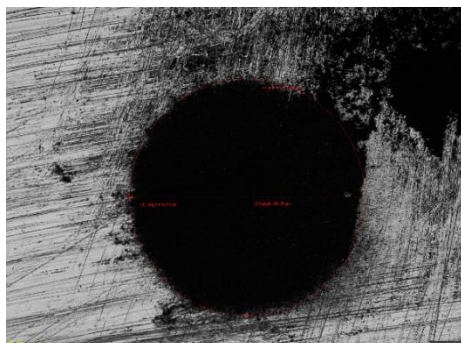
Nr.crt	F _N [N]	F _N Bila [N]	n [rot]	t [s]	Diametru vertical [μm]	Diametru orizontal [μm]	Arie aproximativă [μm ²]
1	0,373	0,557	4837	900	1090,64	1089,27	962898,62
2	0,358	0,593	4837	900	1253,69	1156,41	1019322,70

Tabelul 4.7 Datele prelucrate în urma testului la uzură abrazivă pentru compozitul cu 5% VB₂

Nr.crt	F _N [N]	F _N Bila [N]	n [rot]	t [s]	Diametru vertical [μm]	Diametru orizontal [μm]	Arie aproximativă [μm ²]
1	0,368	0,530	4837	900	1189,29	1192,03	1053431,85
2	0,366	0,545	4837	900	1303	1283,83	1133691,50

Tabelul 4.8 Datele prelucrate în urma testului la uzură abrazivă pentru compozitul cu 10% VB₂

Nr.crt	F _N [N]	F _N Bila [N]	n [rot]	t [s]	Diametru vertical [μm]	Diametru orizontal [μm]	Arie aproximativă [μm ²]
1	0,408	0,595	4837	900	1509,91	1546,90	1900232,30
2	0,352	0,557	4837	900	1142,71	1131,74	1035079,35



VB₂ 1% x50



VB₂ 2% x50

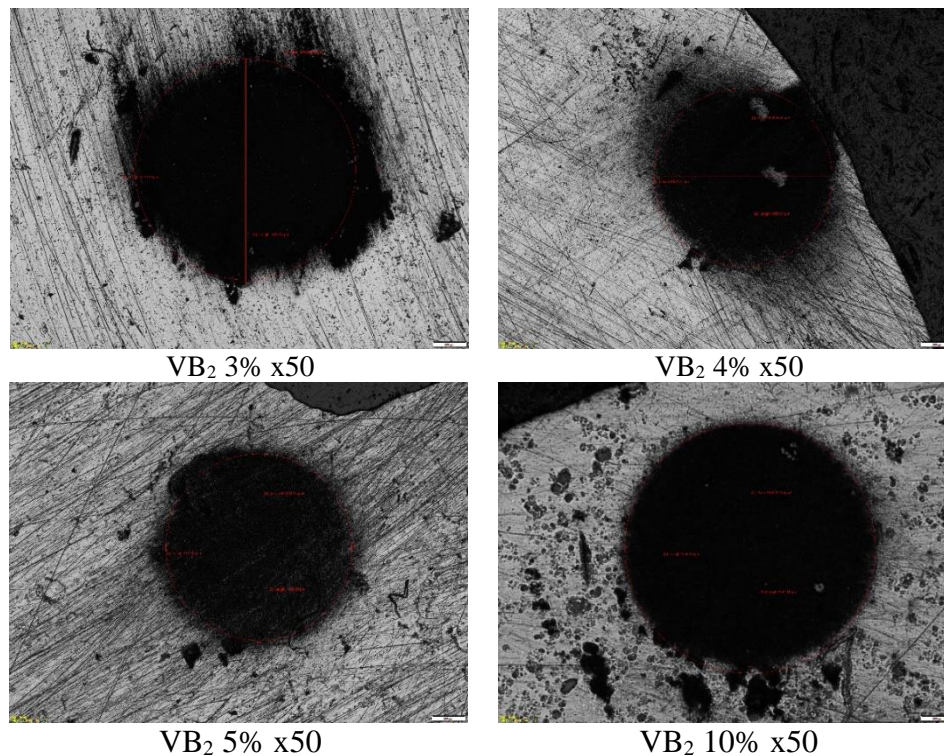


Figura 4.21 Analiza prin microscopie optică a urmelor lăstate în urma testului la uzură abrazivă

Concluzii

Lucrarea de față a condus la realizarea unor noi materiale cu proprietăți speciale obținute in-situ și pot fi luate în considerare următoarele rezultate :

- Amplu studiu documentar cu privire la materialele compozite - clasificarea acestora în funcție de matricea de bază și de elementele de ranforsare.
- Studiu documentar privind structura și proprietățile materialelor compozite în comparație cu structura și proprietățile materialelor metalice clasice.
- Studiul termodinamicii fenomenelor care au loc în sistemul AA6063 – AlV10 - KBF_4 - Na_3AlF_6 în cursul reacției aluminotermice, la diferite concentrații.
- Caracterizarea microstructurală a materialelor compozite AA6063/ VB_2 , prin microscopie optică și electronică (SEM, TEM și HRTEM).
- Caracterizarea compozitelor obținute in-situ prin difracție de raze X (XRD) și spectroscopie cu dispersie energetică (EDS) pentru diferite faze formate.
- Analiza TEM a compusului VB_2 pentru examinarea structurii, compoziției și proprietăților în detaliu.
- Microduritatea Vickers în diferite zone ale materialelor compozite ranforsate cu particule ceramice de VB_2 .
- Rezistența la tracțiune a materialelor compozite ranforsate cu particule ceramice de VB_2 .
- Rezistența la compresiune a materialelor compozite ranforsate cu particule ceramice de VB_2 .
- Analiza DSC-TGA a compozitelor cu diferite concentrații de elemente de ranforsare.
- Test tribologic de abraziune a compozitelor cu diferite concentrații de elemente de ranforsare.

Bibliografie

- [1] COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK, Volume 4 of 6 ed., Wichita State University: SAE International, 2013.
- [2] P. K. Krishnan, J. V. Christy, R. Arunachalam, A.-H. I. Mourad, R. Muraliraja, M. Al-Maharbi, V. Murali și M. M. Chandra, „Production of aluminum alloy-based metal matrix composites using scrap aluminum alloy and waste materials: Influence on microstructure and mechanical properties,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 784, pp. 1047-1061, 2019.
- [3] J. M. Mistry și P. P. Gohil, „Research review of diversified reinforcement on aluminum metal matrix composites: fabrication processes and mechanical characterization,” *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 25, p. 633–647, 2018.
- [4] S. K. Sharma, K. K. Saxena, V. Malik, K. A. Mohammed, C. Prakash, D. Buddhi și S. Dixit, „Significance of Alloying Elements on the Mechanical Characteristics of Mg-Based Materials for Biomedical Applications,” *Crystals*, vol. 12, 2022.
- [5] A. Gloria, R. Montanari, M. Richetta și A. Varone, „Alloys for Aeronautic Applications: State of the Art and Perspectives,” *Metals*, vol. 9, nr. 662, pp. 1 - 26, 2019.
- [6] COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK, Wichita: SAE International, 2013.
- [7] W. Hu, Z. Huang, Y. Wang, X. Li, H. Zhai, Y. Zhou și L. Chen, „Layered ternary MAX phases and their MX particulate derivative reinforced metal matrix composite:A review,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 856, p. 157313, 2021.
- [8] N. Tamilselvam și S. Vijayakumar, „Reinforcements, Manufacturing Techniques, and Respective Property Changes of Al₂O₃/SiC Based Composites: A Review,” *Silicon*, vol. 14, p. 3129–3146, 2022.
- [9] G. Eckold, „Metal and Ceramic Matrix Composites,” în *Design and Manufacture of Composite Structures*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 1994, pp. 305-327.
- [10] J. M. H. Ramirez, R. P. Bustamante, C. A. I. Merino și A. M. A. Morquecho, *Unconventional Techniques for the Production of Light Alloys and Composites*, Springer Cham, 2020.
- [11] P. Moldovan, „Materiale de armare (ranforsare),” în *Compozite cu matrice metalică*, București, Printech, 2008, pp. 8-10.
- [12] P. Moldovan, „Fibre scurte (discontinue) și whiskers-uri,” în *Compozite cu matrice metalică*, București, PRINTECH, 2008, pp. 15-16.
- [13] S. Seetharaman și M. Gupta, „Fundamentals of Metal Matrix Composites,” în *Encyclopedia of Materials: Composites*, D. Brabazon, Ed., Oxford, Elsevier, 2021, pp. 11-29.
- [14] M. C. Tanzi, S. Farè și G. Candiani, „Chapter 1 - Organization, Structure, and Properties of Materials,” în *Foundations of Biomaterials Engineering*, M. C. Tanzi, S. Farè și G. Candiani, Ed., Academic Press, 2019, pp. 3-103.
- [15] Z. Liu, G. Zu, H. Luo, Y. Liu și G. Yao, „Influence of Mg Addition on Graphite Particle Distribution in the Al Alloy Matrix Composites,” *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 26, pp. 244-250, 2010.
- [16] M. Andre, U. A. Inam, R. T. Mousavian, D. Yan și B. Dermot, „Advanced production routes for metal matrix composites,” *Engineering Reports*, vol. 3, nr. 5, 2020.
- [17] „COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK,” în *VOLUME 4. METAL MATRIX COMPOSITES*, Wichita, SAE International, 2013.
- [18] P. Moldovan, „Tehnici de producere in-situ,” în *Compozite cu matrice metalică*, București, Printech, 2008, p. 124.
- [19] P. Vishwakarma, R. Sekhar și T. Singh, „Finite element analysis of force variation with cutting speed in orthogonal turning of aluminum AA6351 alloy,” *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 10, p. 10055–10064, 2015.
- [20] V. Jatti, R. Sekhar și R. Patil, „Study of ball nose end milling of LM6 Al alloy: Surface roughness optimisation using genetic algorithm,” *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 5, p. 2859–2865, 2013.

- [21] V. Jatti și R. Sekhar, „Surface Roughness Study on LM6 Al-Alloy: A Taguchi Approach,” în *In Proceedings of the International Conference on Advanced Research in Engineering and Technology (ICARET 2013)*, Gunt, India, 2013.
- [22] H. Xu și H. Huang, „Plasma remelting and injection method for fabricating metal matrix composite coatings reinforced with tungsten carbide,” *Ceramics International*, vol. 48, nr. 2, pp. 2645-2659, 2021.
- [23] Y. Li, K. Ramesh și E. Chin, „The compressive viscoplastic response of an A359/SiCp metal–matrix composite and of the A359 aluminum alloy matrix,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 37, p. 7547–7562, 2000.
- [24] Y. Li, K. Ramesh și E. Chin, „The mechanical response of an A359/SiCp MMC and the A359 aluminum matrix to dynamic shearing deformations,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 382, p. 162–170, 2004.
- [25] P. Sivaprakasam, E. Abebe, R. Cep și M. Elangovan, „Thermo-Mechanical Behavior of Aluminum Matrix Nano-Composite Automobile Disc Brake Rotor Using Finite Element Method,” *Materials*, vol. 15, nr. 6072, 2022.
- [26] N. Ashrafi, A. H. Mohamed Ariff, D.-W. Jung, M. Sarraf, J. Foroughi, S. Sulaiman și T. S. Hong, „Magnetic, Electrical, and Physical Properties Evolution in Fe₃O₄ Nanofiller Reinforced Aluminium Matrix Composite Produced by Powder Metallurgy Method,” *Materials*, vol. 15, 2022.
- [27] P. Moldovan, „Microstructura MMC,” în *Compozite cu matrice metalică*, București, Printech, 2008, pp. 68-69.
- [28] T. Donomoto, N. Miura, K. Funatani și N. Miyake, „Ceramic fiber reinforced piston for high performance diesel engines,” *SAE Paper No. 830252*, 1983.
- [29] T. Yamauchi, „Development of SiC whiskers reinforced piston,” *SAE Paper No. 911284*, 1991.
- [30] T. Hayashi, H. Ushio și M. Ebisawa, „The properties of hybrid fiber reinforced metal and its application for engine block,” *SAE Paper No. 890559*, 1989.
- [31] Y. Nishida, *Introduction to Metal Matrix Composites Fabrication and Recycling*, Springer Tokyo: CORONA PUBLISHING CO., LTD. KINZOKUKI FUKUGOZAIRYO NYUMON, 2001.
- [32] F. Murata, „Research and development of technology to promote recycling of aluminum materials,” *J. Jpn. Inst. Light Met.*, vol. 46, p. 551–556, 1996.
- [33] C. Carlos, O. Sergio și J. Pestana, „Effect of fiber length on the mechanical properties of high dosage carbon reinforced,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 5, pp. 539-546, 2017.
- [34] F. Nturanabo, L. Masu și J. B. Kirabira, *Novel Applications of Aluminium Metal Matrix Composites*, London: IntechOpen, 2019.
- [35] M. Butu, C. Ogica, D. F. Marcu, C. D. Stancel, F. Niculescu și V. D. Dragut, *OBTAINING OF AA6063/VB2 COMPOSITES PRODUCED BY ALUMINOTHERMIC REACTION*, vol. 83, 2021, p. 209–220.
- [36] M. Butu, P. Moldovan, L. Rosu, C. Stancel, C. Ogica, L. Butu și M. Marinescu, „RESEARCH STUDIES ON OBTAINING METASTABLE INTERMETALLIC STRUCTURES IN 6xxx/BORIDES COMPOSITES,” *UNIVERSITY POLITEHNICA OF BUCHAREST SCIENTIFIC BULLETIN SERIES B-CHEMISTRY AND MATERIALS SCIENCE*, vol. 82, p. 185–198, 2020.
- [37] J. R. J. Quenisset și R. N. , „Wetting improvement of carbon or silicon carbide by aluminium alloys based on a K₂ZrF₆ surface treatment: application to composite material casting,” *J. Mater. Sci.*, vol. 24, p. 2697–2703, 1989.
- [38] M. Hansen, *Constitution of binary alloy*, New York: Metallurgy and Metallurgical Engineering Series, McGraw-Hill Book Company Inc., 1958.
- [39] O. Barabaș și I. Kovali, *Structura cristalină a metalelor și aliajelor*, Kiev, 1989.
- [40] O. Carlson, „The Al-B (Aluminum-Boron) System,” *University Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, vol. 11, nr. 6, 1990.
- [41] H. Okamoto, „Al-B (Aluminum-Boron),” *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, vol. 27, nr. 2, 2006.

- [42] M. Lee, B. Terry și P. Grieveson, „Interfacial phenomena in the reactions of Al-B, Al-Ti-B and Al-Zr-B alloys with KF-AlF₃ and NaF-AlF₃ melts,” *Metallurgical Transactions B*, vol. 24B, 1993.
- [43] Y. Birol, „Improved halide salt process to produce Al-B master alloys,” *Materials Science and Technology*, vol. 27, nr. 12, 2011.
- [44] ASM Handbook, Binary Alloy Phase Diagrams, Volume 1, 1986.
- [45] P. Villars, Pearson's Handbook of Crystallographic Data for Intermetallic Phases, 2nd Edition, ASM International, 1991.
- [46] J. Daams, P. Villars și J. v. Vucht, Atlas of crystal structure for intermetallic phases, ASM International, 1991.
- [47] J. Daams, P. Villars și J. v. Vucht, Atlas of crystal structure types, ASM International, 1991.
- [48] D. Mirkovic, J. Gröbner, R. Schmid-Fetzer, O. Fabrichnaya și H. Lukas, „Experimental study and thermodynamic re-assessment of the Al-B system,” *Journal of Alloys and Compounds*, nr. 384, 2004.
- [49] A. Khaliq, M. Rhamdhani, J. Mitchell, C. Davidson, G. Brooks și J. Grandfield, „Analysis of Transition Metal (V, Zr) Borides Formation in Aluminium Melt,” <https://www.researchgate.net/publication/258278390>.
- [50] H. Duschanek și P. Rogl, „The Al-B (Aluminum-Boron) System, Phase Diagram Evaluations: Section II,” *Journal of Phase Equilibria*, vol. 15, nr. 5, 1994.
- [51] J. Fjellstedt, A. Jarfors și L. Svendsen, „Experimental analysis of the intermediary phases AlB₂, AlB₁₂ and TiB₂ in the Al-B and Al-Ti-B systems,” *Journal of Alloys and Compounds*, nr. 283, 1999.
- [52] M. Lee, B. Terry și P. Grieveson, „Interfacial phenomena in the reactions of Al-B, Al-Ti-B and Al-Zr-B alloys with KF-AlF₃ and NaF-AlF₃ melts,” *Metallurgical Transactions B*, vol. 24B, 1993.
- [53] ASM Handbook, Alloy Phase Diagrams, Volum 3, 1992.
- [54] A. Kostov și D. Zivkovic, „Thermodynamic analysis of alloys Ti-Al, Ti-V, Al-V and Ti-Al-V,” *Journal of Alloys and Compounds*, nr. 460, 2008.
- [55] W. Gong, Y. Du, B. Huang, R. Schmid-Fetzer, C. Zhang și H. Xu, „Thermodynamic reassessment of the Al-V System,” *Carl Hanser Verlag, München Z. Metallkd.*, nr. 95, 2004.
- [56] B. Huber și K. Richter, „Observation of the new binary low temperatures compound Al-V,” *Journal of Alloys and Compounds*, nr. 493, 2010.
- [57] J. Murray, „Al-V (Aluminum-Vanadium),” *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, vol. 10, nr. 4, 1989.
- [58] H. Okamoto, „Al-V (Aluminum-Vanadium),” *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, vol. 33, nr. 6, 2012.
- [59] M. Cevdet, „Physical and mechanical properties of cast under vacuum aluminum alloy 2024 containing lithium additions,” *Materials Research Bulletin*, vol. 35, pp. 1479-1494, 2000.
- [60] Z. Hao, P. Rometsch, C. Lingfei și E. Yuri, „The influence of Mg/Si ratio and Cu content on the stretch formability of 6xxx aluminium alloys,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 651, 2015.
- [61] M. Richard, A. Plotkowski, S. Amit, D. Ryan și B. Sudarsanam, „Towards high-temperature applications of aluminium alloys enabled by additive manufacturing,” *International Materials Reviews*, vol. 67, pp. 1-48, 2021.
- [62] V. Zolotarevsky, N. Belov și M. Glazoff, Casting Aluminium Alloys, Elsevier Science, 2007.
- [63] H. Philips, Annotated Equilibrium Phase Diagrams of Some Aluminum Alloy Systems, London: Inst. Met. Monograph 25, 1959.
- [64] L. Mondol'fo, Aluminum Alloys – Structure and Properties, Boston: Butterworth, 1976.
- [65] A. Slipenyuk, V. Kuprin, M. Yu, J. Spowart și D. Miracle, „The effect of matrix to reinforcement particle size ratio (PSR) on the microstructure and mechanical properties of a P/M processed AlCuMn/SiCp MMC,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 381, pp. 165-170, 2004.

- [66] P. Oladijo, S. Awe, E. Akinlabi, R. Phiri, C. Lebudi și R. Phuti, „Encyclopedia of Materials: Composites,” în *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier, 2021, pp. 360-374.
- [67] I. Beckman, C. Lozano, E. Freeman și G. F. Riveros, „Selection for Reinforced Additive Manufacturing,” *Polymers*, vol. 13, nr. 14, 2021.
- [68] D. Wilson, „Fiber Strength,” în *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00557-X>, Elsevier, 2001, pp. 3138-3142.
- [69] N. Yoshinori, I. Norihisa și K. Yukio, „Recycling of aluminum matrix composites,” *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 30, pp. 839-844, 1999.
- [70] D. Borjan, Ž. Knez și M. Knez, „Recycling of Carbon Fiber-Reinforced Composites-Difficulties and Future Perspectives,” *Materials*, vol. 14, nr. 4191, 2021.
- [71] T. Inoue, H. Inayoshi, H. Kanematsu, Y. Kunieda, S. Hayashi și T. Oki, „The recovery of aluminum from aluminum matrix composites by a molten salt process,” *J. Jpn. Inst. Light Met.*, vol. 46, pp. 183-188, 1996.
- [72] M. Malaki, A. Fadaei Tehrani, B. Niroumand și M. Gupta, „Wettability in Metal Matrix Composites,” *Metals*, vol. 11, nr. 1034, 2021.
- [73] A. Mortensen și J. Llorca, „Metal Matrix Composites,” *Annual Review of Materials Research*, vol. 40, pp. 243-270, 2010.
- [74] A. Rao și H. Cölfen, „Morphology control and molecular templates in biomineralization,” în *Biomineralization and Biomaterials*, Woodhead Publishing, 2016, pp. 51-93.
- [75] N. M. Nurazzi, M. Asyraf, S. Athiyah, S. Shazleen, S. Rafiqah, M. Harussani, S. Kamarudin, M. Razman, M. Rahmah, E. Zainudin, R. Ilyas, H. Aisyah, M. Norrahim, N. Abdullah, S. Sapuan și A. Khalina, „A Review on Mechanical Performance of Hybrid Natural Fiber Polymer Composites for Structural Applications,” *Polymers*, vol. 13, nr. 2170, 2021.
- [76] K. Chawla, „Interfaces in metal matrix composites,” *Composite Interfaces*, vol. 4, nr. 5, pp. 287-298, 1997.
- [77] F. Kandil, J. Lord și A. Fry, A review of residual stress measurement methods-a guide to technical selection, Teddington, Middlesex, UK: NPL Materials Centre, 2001.
- [78] J. Zhang și H. Zeng, „Intermolecular and Surface Interactions in Engineering Processes,” *Engineering*, vol. 7, nr. 1, pp. 63-83, 2021.
- [79] R. Everett, METAL MATRIX COMPOSITES: PROCESSING AND INTERFACES, Academic Press, 1991.
- [80] W. Li, X. Yang, S. Wang, J. Xiao și Q. Hou, „Comprehensive Analysis on the Performance and,” *Metals*, vol. 10, nr. 377, 2020.
- [81] R. Sekhar, D. Sharma și P. Shah, „State of the Art in Metal Matrix Composites Research: A Bibliometric Analysis,” *Appl. Syst. Innov.*, vol. 4, nr. 86, 2021.
- [82] P. Xiao, Y. Gao, C. Yang, Y. Li, X. Huang, Q. Liu, S. Zhao, F. Xu și M. Gupta, „Strengthening and toughening mechanisms of Mg matrix composites reinforced with specific spatial arrangement of in-situ TiB₂ nanoparticles,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 198, 2020.
- [83] S. Tjong și Z. Ma, „Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites,” *Mater Sci Eng R Rep*, vol. 3, pp. 49-113, 2000.
- [84] P. Wang, C. Gammer, F. Brenne, T. Niendorf, J. Eckert și S. Scudino, „A heat treatable TiB₂/Al-3.5Cu-1.5Mg-1Si composite fabricated by selective laser melting: microstructure, heat treatment and mechanical properties,” *Compos B Eng*, vol. 147, pp. 162-168, 2018.
- [85] W. Yu, S. Sing, C. Chua, C. Kuo și X. Tian, „Particle-reinforced metal matrix nanocomposites fabricated by selective laser melting: a state of the art review,” *Prog Mater Sci*, vol. 104, pp. 330-379, 2019.
- [86] M. El-Gallab și M. Sklad, „Machining of Al/SiC particulate metal-matrix composites: Part I: Tool performance,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 83, nr. 1-3, pp. 151-158, 1998.
- [87] Z. Zhang, L. Zhang și Y. Mai, „Particle effects on friction and wear of aluminium matrix composites,” *J Mater Sci*, vol. 30, p. 5999-6004, 1995.

- [88] Y. Su, Q. Ouyang, W. Zhang, Z. Li, Q. Guo, G. Fan și D. Zhang, „Composite structure modeling and mechanical behavior of particle reinforced metal matrix composites,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 597, pp. 359-369, 2014.
- [89] J. Davis, „Aluminum and Aluminum Alloys,” în *Alloying: Understanding the Basics*, ASM International, 2001.
- [90] C. Zhang, Y.-P. Zeng, D. Yao, J. Yin, K. Zuo, Y. Xia și H. Liang, „The improved mechanical properties of Al matrix composites reinforced with oriented β -Si₃N₄ whisker,” *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 35, pp. 1345-1353, 2019.
- [91] D. W. Richerson, „6.28 - Industrial Applications of Ceramic Matrix Composites,” în *Comprehensive Composite Materials*, A. Kelly și C. Zweben, Ed., Oxford, Pergamon, 2000, pp. 549-570.
- [92] Y. Liu, T. Zhao, W. Ju și S. Shi, „Materials discovery and design using machine learning,” *Journal of Materiomics*, vol. 3, pp. 159-177, 2017.
- [93] F. C. Campbell, „Chapter 1 - Introduction to Composite Materials and Processes: Unique Materials that Require Unique Processes,” în *Manufacturing Processes for Advanced Composites*, F. C. Campbell, Ed., Amsterdam, Elsevier Science, 2004, pp. 1-37.
- [94] A. Mussatto, I. U. I. Ahad, R. T. Mousavian, Y. Delaure și D. Brabazon, „Advanced production routes for metal matrix composites,” *Engineering Reports*, vol. 3, p. e12330, 2021.
- [95] J. E. Blendell și W. Rheinheimer, „Solid-State Sintering,” în *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*, M. Pomeroy, Ed., Oxford, Elsevier, 2021, pp. 249-257.
- [96] S. T. Mileiko, „Chapter XI - Hot Pressing,” în *Metal and Ceramic Based Composites*, vol. 12, S. T. Mileiko, Ed., Elsevier, 1997, pp. 475-515.
- [97] Y. G. Yushkov, E. M. Oks, A. V. Tyunkov și D. B. Zolotukhin, „Electron-Beam Synthesis of Dielectric Coatings Using Forevacuum Plasma Electron Sources (Review),” *Coatings*, vol. 12, 2022.
- [98] P. Garg, A. Jamwal, D. Kumar, K. K. Sadasivuni, C. M. Hussain și P. Gupta, „Advance research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, pp. 4924-4939, 2019.
- [99] L. Liming, Z. Meili, P. Longxiu și W. Lin, „Studying of micro-bonding in diffusion welding joint for composite,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 315, pp. 103-107, 2001.
- [100] R. Chen, D. Zheng, T. Ma, H. Ding, Y. Su, J. Guo și H. Fu, „Effects and mechanism of ultrasonic irradiation on solidification microstructure and mechanical properties of binary TiAl alloys,” *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 38, pp. 120-133, 2017.
- [101] J. G. Speight, „Chapter 10 - Combustion of Hydrocarbons,” în *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes*, J. G. Speight, Ed., Boston, Gulf Professional Publishing, 2011, pp. 355-393.
- [102] S. C. Tjong și Z. Y. Ma, „Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites,” *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 29, pp. 49-113, 2000.
- [103] M. Malaki, A. Fadaei Tehrani, B. Niroumand și M. Gupta, „Wettability in Metal Matrix Composites,” *Metals*, vol. 11, 2021.
- [104] P. Moldovan, „Infiltrare reactivă,” în *Compozite cu matrice metalică*, București, Printech, 2008, pp. 126-127.
- [105] P. Moldovan, „Metode cu reactanți lichizi, solizi sau gazoși,” în *Compozite cu matrice metalică*, București, Printech, 2008, pp. 125-126.
- [106] M. Buțu și C. Stăncel, „Diagrame multicomponente,” în *Compozite cu matrice metalică obținute prin reacții in situ*, București, Politehnica Press, 2021, pp. 68-69.