

Primena novih tehnologija u cilju poboljšanja eksploatacionih svojstava klipova sus motora od aluminijumskih legura

U ovom radu prezentovana je primena novih tehnologija u cilju poboljšanja eksploatacionih svojstava klipova SUS motora izrađenih od aluminijumskih legura. Savremeni razvoj SUS motora, posebno u slučaju sportskih automobila, nameće potrebu za postizanjem maksimalne snage, što pak ekstremno povećava opterećenje pojedinih delova klipa. Pokazalo se da tvrdoća i otpornost na habanje, inače svojstveni legurama aluminijuma, na ovako visokim temperaturama i ekstremnim eksploatacionim uslovima, nisu zadovoljavajuće. Ideja je da se najopterećeniji delovi klipa zaštite kompozitima sa aluminijumskom matricom, što što bi predstavljalo rešenje ovog problema. Cilj ovog rada je da izvrši pregled postignutih rezultata istraživanja u ovoj oblasti.

Ključne reči: aluminijumske klipne legure, kompozitni materijali

1. UVOD

Kontinualnim razvojem SUS motora, povećava se snaga, a samim tim i opterećenja koje trpe delovi. Jedan od najopterećenijih delova motora je cilindarski sklop, tj. klip kao element sklopa. Klip je u svom radu izložen uticaju agresivne gasne i tečne sredine, povišenim temperaturama, termošokovima i mehaničkim opterećenjima. Neodgovarajući kvalitet materijala klipa, može dovesti do razaranja i havarije motora. Zato, kvalitet aluminijumske klipne legure, mora da odgovara strogim zahtevima koje propisuju proizvođači motora [1–3].

Aluminijumske klipne legure predstavljaju posebnu grupu na bazi Al-Si-Ni-Cu legure koje se koriste u automobilskoj industriji zbog dobre kombinacije livačkih i mehaničkih svojstava, jer moraju imati visoku čvrstoću kod povišenih temperatura (napr: do 350 °C) i istovremeno biti otporne na nagle temperaturne promene [1–3]. Zbog toga se kod projektovanja ovih legura moraju uzeti u obzir mehanička i toplotna naprezanja, kao i agresivnost sredine u kojoj se primenjuju. Svojstva materijala određuju karakteristike i metode izrade, kao i konstrukciju odlivaka klipa.

Livačka, metalurška i mehanička svojstva aluminijumskih klipnih legura zavise od mnogih faktora, kao što su hemijski sastav, brzina hlađenja, parametri procesa livenja i termičke obrade [1–3].

Postoji više tipova aluminijumskih klipnih legura, sa različitim sadržajem glavnog i legirajućih elemenata. Uobičajeni odnos legirajućih elemenata je: 11–23 mas% Si, 0.5–3 mas % Ni, 0.5–5.5 mas % Cu, 0.6–1.3 mas % Mg, do 1.0 mas% Fe i do 1 mas % Mn [1–3].

Adrese autora: ¹Lola Institut, Kneza Višeslava 70a, Beograd, ²Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, Karnegijeva 4

Rad primljen: 25.11.2012.

Nove konstrukcije klipova uključuju nove tehnologije čiji je cilj da zadrže lake materijale i istovremeno prilagode i ojačaju klipove da izdrže povećana lokalna opterećenja, koja su rezultat radnih uslova i koja bi bila prevelika za konvencionalne konstrukcije klipova. Recimo, klipovi izrađeni od legure magnezijuma imaju znatno manju masu ($\gamma_{Mg}=1.8 \text{ g/cm}^3$, $\gamma_{Al}=2.7 \text{ g/cm}^3$) [23]. Kao nedostatak, imaju malu čvrstoću na povišenim temperaturama, slabu opornost na puzanje i malu otpornost na habanje, tj. mikrozavarivanje. Međutim, karakteristike magnezijuma mogu biti znatno poboljšane recimo ugljeničnim vlaknima koje karakteriše mala masa i relativno niska cena.

U poslednje vreme, u posebnim slučajevima primenjuju se kompozitni materijali. Na naročito, opterećenim mestima u klipu vrši se zalivanje keramičkih vlakana od aluminijum oksida (Al_2O_3) ili tzv. Whisker-vlakna (jednokristalna vlakna velike čvrstoće i istegljivosti), čime se povećava čvrstoća osnovne Al-Si legure. Takođe, je razvijena tehnika izrade kod koje se porozni metalni umetak visoke čvrstoće umetne u kalup, a zatim se pod visokim pritiskom uliva Al-Si legura, koja potpuno ispuni i zalije ovaj umetak. Očvršćavanje se odvija pod visokim pritiskom [1–3].

Postoje razne tehnike za formiranje kompozita na metalnoj matrici Al-Si legura, a među njima su livenje utiskivanjem (squeeze casting), livenje u poluočvrstlom stanju (compcasting), metoda livenja u elektromagnetnom polju, vrtložna metoda, metoda metalurgije praha ili metoda mlazom plazme.

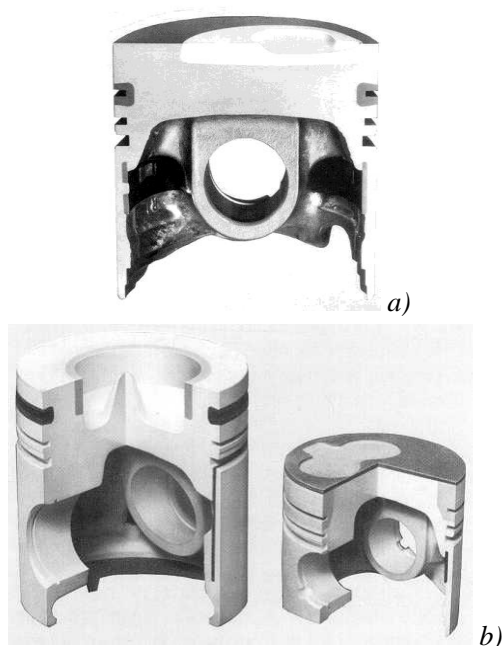
2. TEHNOLOGIJE POBOLJŠANJA EKSPLOATAACIONIH SVOJSTAVA

Izdržljivost aluminijumskih klipova na temperaturama iznad 350°C postaje kritična, međutim, može se izvršiti dodatno ojačanje. Ukoliko se materijal klipa

mora zaštititi od visokih temperatura ili gde treba smanjiti toplotni tok, u klip se mogu zaliti termički otporni materijali. Za klipove od aluminijumske legure moguće je zalivanje delova aluminijum-titanata (slika 1a). Položaj umetka u aluminijumskoj okolini je osiguran malom elastičnošću keramičkog materijala uprkos različitim koeficijentima toplotne dilatacije [1–5].

Pored ojačanja čela klipa, za visoko opterećene motore ojačava se prvi žleb (slika 1b) i otvor osovinice. Tokom procesa livenja pod pritiskom u osnovni materijal klipa se utiskuju kratka keramička vlakna debljine nekoliko mikrona, prvenstveno na čelu klipa, ivici komore i zoni klipnih prstenova. Takođe, nosač prstena može se zameniti ojačanim vlaknima kod srednje opterećenih motora. Međutim, moraju se primeniti dodatne mere ojačanja bokova prvog žljeba [1–3].

Spoj između osovinice i klipa izvodi se tako da u radnom stanju postoji minimalan zazor (od nekoliko μm), kako bi klip bio slobodan. U tom slučaju osovinica je primorana da se kreće. Rezultat rotacije osovinice u otvoru oslonca dovodi do pregrevanja, usled čega dolazi do slabljenja uljnog filma.



Slika 1 - Klip sa: a) umetkom od upresovanog Al-titana, b) ojačanim vlaknima Al-oksida [1]

Upotreba keramičkih materijala za ojačavanje čela i prvog žljeba klipa, pokazala se kao veoma dobra i opravdana. Keramički materijali predstavljaju hemijske smeše različitih materijala (Al , MgO , O_2 , N_2 , Si , Zr ,...), a najčešće se koriste: oksidi aluminijuma (Al_2O_3), cirkonijuma (ZrO_2), aluminijum-titanat, silicijum nitrat i silicijum karbid [1–3].

Keramičke materijale karakteriše otpornost na visokim temperaturama (preko 1000°C) i mala plastičnost, pa se mašinska obrada svodi na minimum. Međutim, mala toplotna provodljivost daje im primenu za termičko ojačanje čela klipa, a velika razlika u koeficijentima toplotne dilatacije dva materijala kompenzuje se malim modulom elastičnosti. Ojačavanje klipne legure keramikom vrši se sinterovanjem [1-3].

2.1. Klasične metode nanošenja kompozita na klip

Kada svojstva pojedinih materijala ne ispunjavaju željene zahteve, koriste se kompozitni materijali koji predstavljaju kombinaciju više materijala. U početnom stadijumu razvoja kompozitnih materijala koristila se plastika, ali zbog visokih temperatura motora SUS prešlo se na metalnu osnovu. Proces ojačavanja izvodi se pod visokim pritiskom. Pri tome se koristi livenje pod pritiskom (oko 100 MPa). Vlaknasti materijal za ojačavanje postavi se u kalup, zatim se uz dobru kontrolu pritiska kalup popunjava livom, a vlaknasto telo zalije rastopom. Pritom se formira atomska veza između vlakana i materijala.

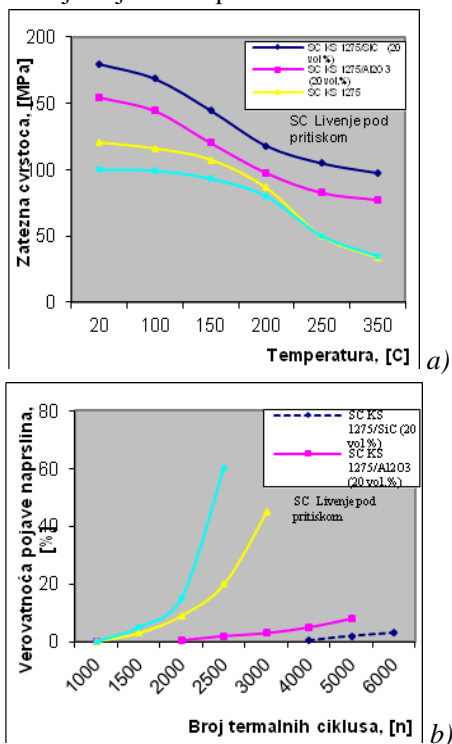
U tabeli 1, prikazana su svojstva klipnih legura ojačanih sa $20\text{ vol } \% Al_2O_3$. Pored Al_2O_3 koriste se i silicijum karbi d (SiC) i silicijum nitrat [1–9]. Svojstva materijala zavise od orijentacije vlakana. Al_2O_3 je anizotropan, dok SiC pokazuje izotropne osobine. Iz prikazanih podataka, vidi se da kompozitni materijal pokazuje povećanu čvrstoću i modul elastičnosti, nisku toplotnu provodljivost, mali koeficijent toplotnog širenja i malo veću specifičnu masu.

Tabela 1 - Osobine klipnih legura ojačanih vlaknima [1-3]

Svojstva klipnih legura		KS 1275	KS 1275 + Al_2O_3	KS 1275 + SiC
Zatezna čvrstoća	R_m , [MPa]	195÷245	328	413
Gran. proporcion.	$R_p0.2$, [Mpa]	185÷225	289	346
Izduženje do pucanja	A_5 , [%]	0.5÷1.5	0.35	0.4
Tvrdoća	HV 10	90÷125	150÷155	177
Modul elastičnosti	E , [GPa]	78	98	127
Koef. topl. dilat.	α , [W/mK]	20.5	15	16
Topl. provodljivost	Λ , [W/mK]	155	100	125
Specifična masa	ρ , [g/cm ³]	2.70	2.80	2.77
Poasonov koef.	ν	0.30	0.27	-

Na slici 2a, data je otpornost na zamor klipne legure KS 1275 sa i bez keramičkih vlakana u zavisnosti od temperature, kao jedno od najvažnijih svoj-

stava materijala. Druga važna karakteristika materijala je otpornost na termo šok, koja se povećava finijom mikrostrukturom uz pomoć ojačanja materijala. Na slici 2b dat je uporedni pregled verovatnoće pojave naprslina za određeni broj termo ciklusa. Ojačanjem keramičkim vlaknima, smanjuje se otpornost na habanje žljeba za oko 2/3, ali se ipak ne postižu vrednosti koje daje nosač prstena.



Slika 2 - Zavisnost zamora klipne legure od temperature i otpornost na termo šok [1]

G. Requena, H.P. Degischer, ispitivali su ojačanje aluminijumske klipne legure AlSi12CuNiMg vlaknima Al_2O_3 (sa 10, 15 i 20%) na temperaturi od 300°C. Deo tih deo rezultata prikazan je u tabeli 2 [1–3, 6].

Pored navedenih rezultata ispitivali su i povećanje tvrdoće i mehanizam ojačavanja. Na slici 3 prikazana je mikrostruktura klipne legure AlSi12CuNiMg ojačana sa 15 vol % Al_2O_3 .

Tabela 3 - Tvrdoća površine uzorka tretiranog mlazom plazme[10]

Stanje		Mereni mesto		
		1	2	3
Liveno	Pre tretmana	HV _{0,2} = 90.6	HV _{0,2} = 85.7	HV _{0,2} = 106
	Posle tretmana	HV _{0,2} = 244	HV _{0,2} = 157	HV _{0,2} = 883
Termički obrađeno	Pre tretmana	HV _{0,2} = 90.6	HV _{0,2} = 148	HV _{0,2} = 138
	Posle tretmana	HV _{0,2} = 341	HV _{0,2} = 362	HV _{0,2} = 765

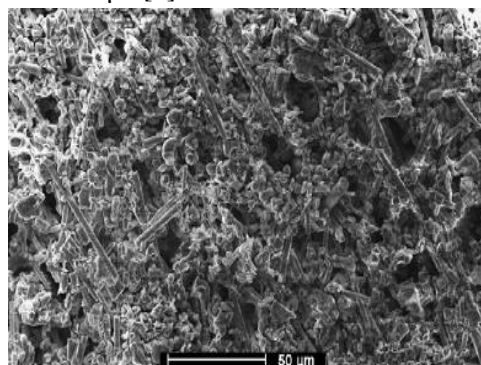
Na slici 4 prikazana je mikrostruktura uzorka odlivaka klipa i termički obrađenog uzorka, gde se može uočiti prisustvo kristala silicijuma, eutektikuma

Tabela 2 - Pobljšanje mehaničkih karakteristika[6]

Materijal	$\sigma_{0,2}$ (MPa)	σ_m (MPa)	A_u (%)
AlSi12CuMgNi	102±4	113±5	4.5±1.1
AlSi12CuMgNi/ Al_2O_3 /10s	135±6	145±3	1.1±0.2
AlSi12CuMgNi/ Al_2O_3 /15s	132±8	132±4	1.4±0.8
AlSi12CuMgNi/ Al_2O_3 /20s	160±3	165±9	0.6±0.2

Pored navedenih rezultata ispitivali su i povećanje tvrdoće i mehanizam ojačavanja. Na slici 3 prikazana je mikrostruktura klipne legure AlSi12CuNiMg ojačana sa 15 vol % Al_2O_3 .

Izdvojena hibridna struktura nastala je posle raspadanja $\alpha-Al$. Kratka vlakna Al_2O_3 sprečavaju raspad, što rezultira stvaranju mreže $Si-Al_2O_3$ sa porama manjim od 20 μm [6].



Slika 3 - Mikrostruktura AlSi12CuMgNi/ Al_2O_3 /15s [6]

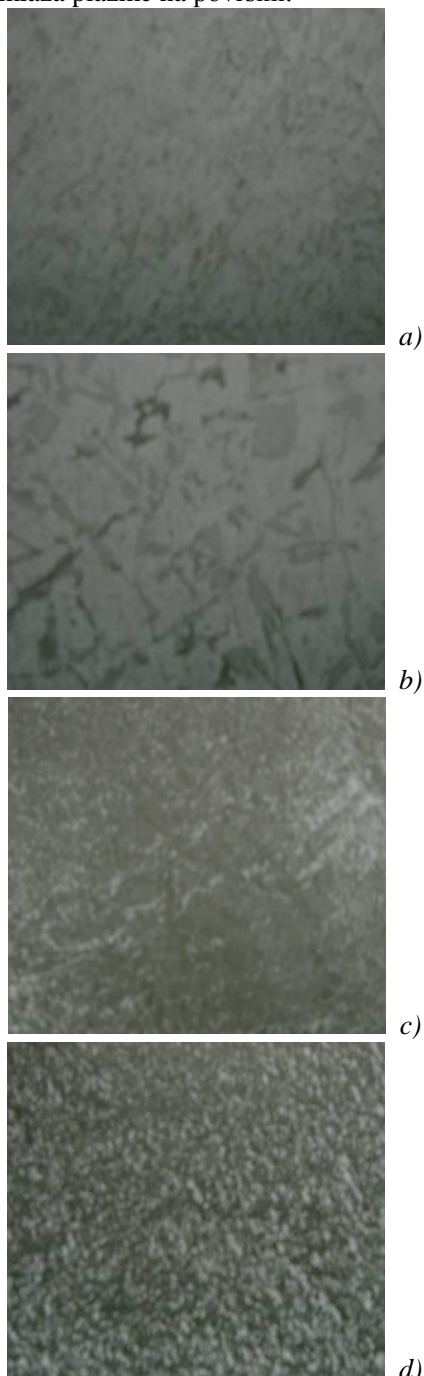
2.2. Modifikacija površine klipa mlazom plazme

U cilju poboljšanja eksploatacionih svojstva klipova od AlSi-legure tretiraju se željene površine kompresionim mlazom plazme. Površine tretirane mlazom plazme znatno povećavaju vrednosti tvrdoće (dostiže 765–883 HV, tabela 3). Razlog povećanja tvrdoće je stvaranje intermetalnih faza. Recimo na klipovima od AlSi12CuNiMg ispitivanjem je uočeno znatno povećanje udela faza AlN, Al_3Mg i (Al), što doprinosi povećanju tvrdoće površinskog sloja [1–3, 10–11].

i intermetalne faze koje gradi aluminijum sa prisutnim legirajućim elementima i primesama. Ovi uzorci su zatim tretirani mlazom plazme pri pritisku

radnog gasa azota od 5 mbar i brzini plazme od 40 km/s, na rastojanju od 3.5–5 cm od vrha katode i tretirani serijom od 5 pucnjeva.

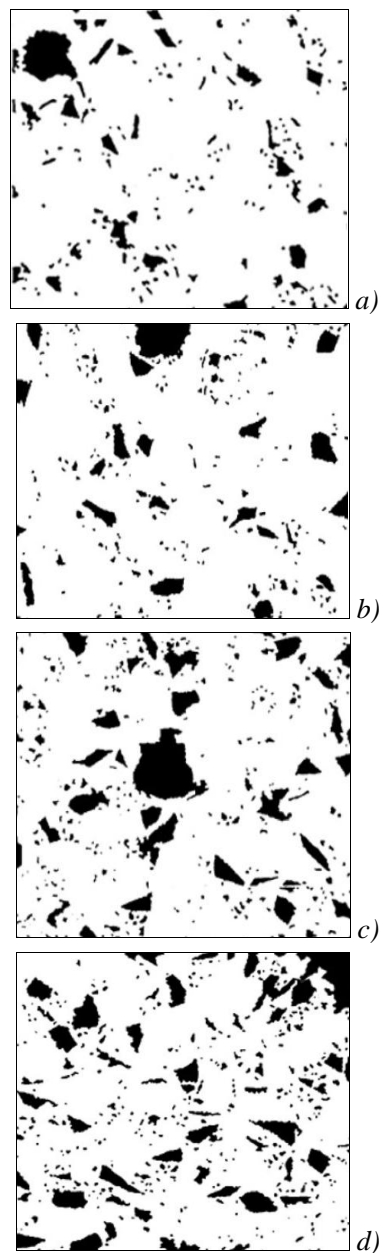
Pri manjem rastojanju između mete elektrodnog sistema povećava se gustina energije mlaza plazme, a samim tim i energija koju asporbuje površina mete. Na slici 4b i c prikazan je tipičan izgled tretirane površine uzoraka klipa (odlivka i termički tretiranog uzorka). U oba slučaja zapaženo je karakteristično dejstvo mlaza plazme na površini.



Slika 4 - Izgled površine klipa pre i posle tretmana mlazom plazme, AlSi12CuNiMg[10]

Kod uzorka u livenom stanju rastopljeni materijal i centar dejstva mlaza plazme raspoređuje se po okolnoj površini u talasastoj formi (slika 4c), dok je kod termički obrađenog uzorka prisustvo talasaste forme manje, ali je izražena kapljčasta forma (slika 4d). Uzrok ove pojave je najverovatnije veća tvrdoća površine uzoraka koji su termički obrađeni [10–11].

U poslednje vreme vrše se ispitivanja primene aditiva na klipovima za visokopterećene motore (napr: $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, SiC, B_4C , Si_3N_4 i TiB_2) [1–3,10–11], koji se nanose mlazom plazme. To omogućava dobijanje kompozita metal-keramika visoke tvrdoće na površini klipa, ali svaki zahvat na klipu povećava njegovu cenu.



Slika 5 – Izgled mikrostrukture klipa tretiranog plazmom: a). Al-Si+5%B₄C; b). Al-Si+10%B₄C; c). Al-Si+20%B₄C i d). Al-Si+25%B₄C)[4]

Pokretačka snaga razvoja kompozita sa metalnom matricom za klipove motora sa unutrašnjim sagorevanjem, je znatno poboljšanje fizičko-mehaničkih karakteristika na povišenim temperaturama, kao i otpornost na habanje i koeficijenta toplotnog širenja upotrebom keramičkih materijala. Na slici 5 prezentovana je mikrostruktura klipne legure za različite sadržaje aditiva B_4C . Međutim, nije ovde presudan samo

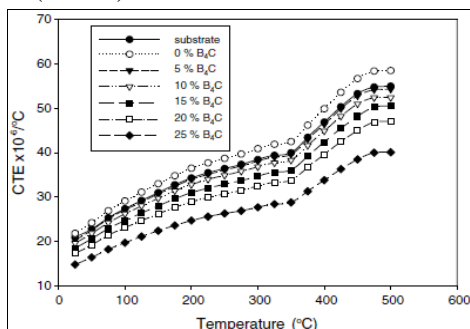
sadržaj aditiva, već i debljina sloja, jer povećanjem debljine dobija se negativan efekat (smanjuje se jačina vezivanja aditiva i povećavaju se zaostali naponi).

Druga grupa autora *V. Turkel, E. Celik, C. Tekmen, F. Yilmaz* ispitivala je uticaj sadržaja aditiva SiC nanešenog mlazom plazme na površinu klipa [12]. Hemijski sastav ispitivane klipne legure je u tabeli 4

Tabela 4 - Hemijski sastav ispitivane klipne legure [12]

Legura	Sastav, mas%									
	Si	Cu	Mg	Ni	Zn	Mn	Fe	Pb	Ti	Al
AlSi12CuMg	12	1.16	1.21	0.90	0.17	0.12	0.48	0.006	0.05	ostatak

Nanošenjem aditiva B_4C na površini klipa mlazom plazme dolazi do poboljšanja koeficijenta toplotnog širenja, tj. povećanjem sadržaja B_4C smanjuje se koeficijent termičkog širenja za istu vrednost temperature (slika 6).



Slika 6 - Vrednosti koeficijenta toplotnog širenja (CTE) u zavisnosti od temperature za različite sadržaje kompozita (0%, 5%, 10%, 15%, 20% i 25%) [12]

Slike 7a i 7b prikazuju karakteristične mikrostrukture klipne legure za različite sadržaje SiC (20 wt% i 30 wt%). Vidi se da je raspored SiC čestice u mikrostrukturi neravnomeran i da je veća gustina inkorporiranih čestica pri većem sadržaju aditiva. I ako čestice AlSi i SiC nisu iste veličine i gustine, SiC-AlSi kompozitni prah je uspešno nanešen mlazom plazme. Razlike u morfologiji čestica mogu se videti na slici 7c.

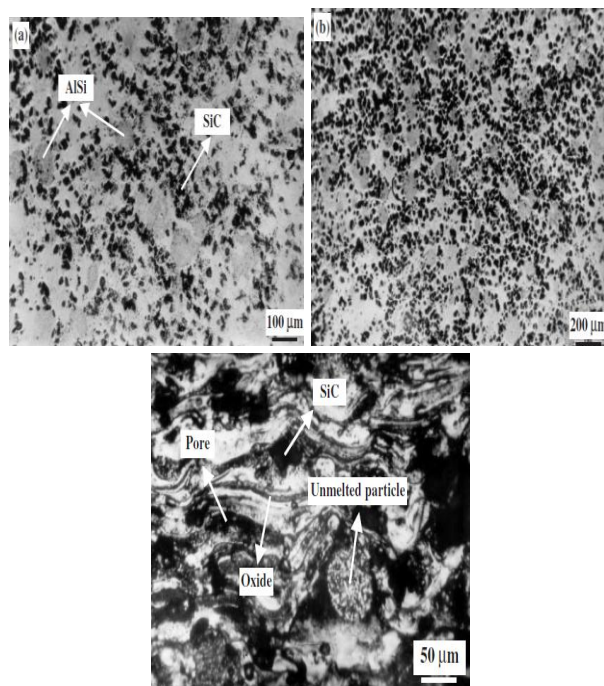
Tabela 5 - Hemijski sastav ispitivane klipne legure [12]

	Sastav, mas%				
	AlSi osnova	AlSi premaz	10 wt% SiC-AlSi	20 wt% SiC-AlSi	30 wt% SiC-AlSi
Tvrdoća, (HV)	84	92	102	163	167

3. ZAKLJUČAK

Na osnovu analize objavljenih literaturnih podataka, dugogodišnjih eksperimentalnih ispitivanja i dobijenih rezultata iz ove oblasti, ostvaren je značajan doprinos u oblasti fundamentalnih znanja o primeni

kompozitnih materija na klipovima od aluminijumskih legura. Pokazalo se da su njihova krutost, modul, čvrstoća na istezanje, i otpornost na habanje na visokim temperaturama znatno veći nego kod monolitnih legura bez ojačanja. Njihove izotropne karakteristike ih takođe čine pogodnim za širu primenu.



Slika 7 - Mikrostruktura klipa, a. 20 mas% i b. 30 mas% AlSi-SiC i c. prikaz morfologije [12]

U zavisnosti od sadržaja aditiva nanešenog mlazom plazme na površinu klipne legure zavisi vrednost tvrdoće (tabela 5). Povećanjem sadržaja povećava se vrednost tvrdoće.

4. LITERATURA

- [1] S. Manasijević; *Klipovi za motore SUS*, Monografija ISBN 978-86-912177-0-9, štampa: Zavod za grafičko inženjerstvo Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, izdavač: LOLA Institut Beograd, 2009.
- [2] S. Manasijević; *Modelovanje procesa očvršćavanja klipnih legura sa unapred zadatim svojstvima*, Doktorska disertacija, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd 2011.
- [3] S. Manasijević; *Aluminijumske klipne legure*, Monografija ISBN 978-86-912177-1-6, štampa: Razvojno-istraživački centar grafičkog inženjerstva TMF, izdavač: LOLA Institut Beograd, 2012.
- [4] O. Sarikaya, S. Anik, S. Aslanlar, S. C. Okumus, E. Celik; *Al-Si/B₄C composite coatings on Al-Si substrate by plasma spray technique*, Materials and Design 28 (2007) 2443–2449.
- [5] D. G. Zhao, X. F. Liu, Y. C. Pan, Y. X. Liu, X. F. Bian; *Microstructure and mechanical behavior of AlSiCuMgNi piston alloys reinforced with TiB₂ particles*, DOI: 10.1007/s10853-006-6247-y, J MATER SCI 41 (2006) 4227–4232.
- [6] G. Requena, H. P. Degischer; *Creep behaviour of unreinforced and short fibre reinforced AlSi12CuMgNi piston alloy*, Materials Science and Engineering A 420 (2006) 265–275.
- [7] R. Guerrero, S.A. Sanchez, J. Narciso, E. Louis, F. Rodriguez-Reinoso; *Pressure infiltration of Al-12 wt.% Si-X (X = Cu, Ti, Mg) alloys into graphite particle performs*, Acta Materialia 54 (2006) 1821–1831.
- [8] A. Garcia-Romeo, A. M. Irisirari, M. Angalada, C. Garcia-Cordovilla; *Study of the porosity produced in an aluminum alloy matrix composite due to T6 heat treatment*, Metallurgical and materials transactions A, 35 (2004) 2503.
- [9] J. M. Molina, R. Prieto, J. Narciso, E. Lous; *The effect of porosity on the thermal conductivity of Al-12 wt% Si/SiC composites*, Scripta Materialia, doi: 10.1016/j.scriptamat.2008.12.015, available online at www.sciencedirect.com, 2008.
- [10] Z. Pavlović-Aćimović, M. Kuraica, I. Dojčinović, S. Tripković, J. Purić; *Površinska obrada odlivaka aluminijum-silicijum legura*, Monografija ISBN 86-7401-228-0, Tehnološko-metalurški fakultet, 2005.
- [11] I. Radisavljević, Z. Pavlović-Aćimović, K. Raić; *Modifikacija površine odlivaka legura aluminijuma mlazom plazme*, Metalurgija, UDC: 669.715.05.6-4=861, Savez inženjera tehničara Srbije, 2006.
- [12] V. Turkel, E. Celik, C. Tekmen, F. Yilmaz; *SiC-AlSi Composite Coatings on Piston Alloys for Diesel Engine Motors*, Journal of COMPOSITE MATERIALS, 38-16 (2004).

ABSTRACT

APPLICATION OF NEW TECHNOLOGIES TO IMPROVE THE EXPLOITATION PROPERTIES OF COMBUSTION ENGINE PISTONS OF ALUMINIUM ALLOYS

This paper presents the application of new technologies in order to improve the exploitation properties of pistons for combustion engines made of aluminum alloy. Modern development of internal combustion engines, especially in the case of sports cars, imposed by the need to achieve maximum power, which in turn extremely increases the load on the individual parts of the piston. It has been shown that the hardness and wear resistance, otherwise inherent in aluminum alloys, for such high temperatures and extreme service conditions are not satisfactory. The idea is to protect the most burdened parts piston with aluminum matrix composites, which would be a solution to this problem. The aim of this paper is to review the research results achieved in this area.

Key words: aluminum piston alloys, composite materials

Paper received: 25.11.2012.

Scientific paper