

**PRIMENA METODE HOLOGRAFSKE INTERFEROMETRIJE U
ISPITIVANJU MODELA IZRAĐENOG OD Al-Zn-Mg-Cu LEGURE**

**APPLICATION OF HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY
TECHNIQUE FOR INVESTIGATION OF THE MODEL DESIGNED
OF Al-Zn-Mg-Cu ALLOY**

RADOVAN RADOVANOVIĆ^{1,a}, ANĐELKA MILOSAVLJEVIĆ^{2,b},
ANDREJA MILOVANOVIĆ^{1,c}, RADICA PROKIĆ-CVETKOVIĆ^{2,d},
SANJA PETRONIĆ^{2,e}

¹ Institut GOŠA, Beograd, ² Mašinski fakultet, Beograd,
^a rradovan@ptt.yu, ^b amilosavljevic@mas.bg.ac.yu, ^c zavodz@verat.net
^d rprokic@mas.bg.ac.yu ^e sanjapetronic@yahoo.com

Primljeno: 13. 10. 2005.

IZVOD

U ovom radu ispitivani model komore za rad u uslovima visokih pritisaka izrađen je od višekomponentne legure aluminijuma tipa Al-Zn-Mg-Cu, koja pripada legurama visoke čvrstoće, postignute mogućnošću rastvaranja legirajućih elemenata u osnovnoj površinski centriranoj rešetki aluminijuma. Primenom različitih termomehaničkih obrada ustanovljen je optimalan režim - Q + 20 % + 30 min./190 °C, koji je praćen najboljim mehaničkim karakteristikama legure od koje je izrađena komora. Eksperimentalno dobijeni holografski zapisi - hologrami dešifrovani su analizom apsolutnog redosleda interferencijskih pruga, sa ciljem da analiza deformacija metodom holografske interferometrije bude doprinos u određivanju naponsko-deformacionog stanja konstrukcija pri različitim radnim režimima.

Cljučne reči: disperzno ojačane legure aluminijuma, termomehaničke obrade, komora visokog pritiska, hologram, interferencijske pruge, prslina.

ABSTRACT

In this paper an investigated high-pressure chamber model is designed of the multi-component alloy type Al-Zn-Mg-Cu, that belongs to high-strength alloys, obtained by possibility of dissolution of alloying elements in the face centered cubic aluminum lattice. The optimal process - Q + 20 % + 30 min / 190 °C is established by applying various thermo-mechanical treatments, and it is followed by the best mechanical characteristics of alloy used for the chamber designing. Holographic records - holograms, experimentally obtained, are decoded by analyzing the absolute order of interferometric fringes, with the aim that deformation analysis by holographic interferometry make a contribution to determination of stress-strain construction conditions for various working regimes.

Key words: dispersion-strengthened aluminum alloy, thermo-mechanical treatments, high-pressure chamber, hologram, interferometric lines, cracks

UVOD

Da bi bili zadovoljeni sve strožiji zahtevi u pogledu kontrole kvaliteta osnovnih materijala, koji se koriste za izradu delova i sklopova u mašinstvu i drugim oblastima tehnike, kao i eksploataciona pouzdanost delova i sklopova veoma složenih, odgovornih i skupih konstrukcija, ukazala se potreba za primenom pogodnih metoda ispitivanja kvaliteta, naponskih stanja i deformacija. Potpuno kvalitativno i kvantitativno rešavanje ovih istraživačkih problema obezbeđuju savremene optičke metode.

Projektovanje savremenih konstrukcija zahteva proračun i analizu naponsko-deformacionog stanja preko odgovarajućih modela, koje je moguće ostvariti primenom optičkih metoda ispitivanja. U skladu sa tim optičke metode nalaze primenu u nekoliko pravaca, diferenciranih prema parametrima i karakteristikama ispitivanja, kao što su: rasejanje svetlosti, zamrzavanje, optički osetljiv premaz, moare itd.

U ovom radu dat je poseban osvrt na holografsku interferometriju, jer se metoda holografске interferometrije pokazala veoma efikasnom, kao nedestruktivna, beskontaktna, nekontaminirajuća, pogodna za sve dimenzije, oblike, materijale i radne uslove.

ISPITIVANJE MODELA IZRAĐENOG OD LEGURE Al-Zn-Mg-Cu

Na osnovu razmatranja novijih podataka iz literature koji se odnose na nove materijale i savremene tehnologije, [1, 2, 3] sa ciljem da se definišu materijali sa najboljim karakteristikama, a primene tehnike ispitivanja koje će omogućiti dug radni vek i sigurnost konstrukcija, izvedena su ispitivanja na višekomponentnim legurama aluminijuma tipa Al-Zn-Mg-Cu, korišćenjem savremenih optičkih metoda u praćenju mehaničkih i strukturnih promena u materijalu.

Višekomponentne legure aluminijuma tipa Al-Zn-Mg-Cu pripadaju legurama visoke čvrstoće, koja je postignuta mogućnošću rastvaranja legirajućih elemenata u osnovnoj površinski centriranoj rešetki aluminijuma i mogućnošću da rastvorljivost legirajućih elemenata raste sa porastom temperature, a da kao posledica nastaje ojačavanje taloženjem. Međutim, kako se ove legure upotrebljavaju prvenstveno u aerokosmotehnici, gde su konstrukcioni i funkcionalni zahtevi sve strožiji, od savremenih legura se zahtevaju: bolja žilavost loma, otpornost na zamor i otpornost prema koroziji [4, 8, 9].

Ispitivanje je izvršeno na holografskom sistemu UIG-2M, uz primenu lasera tipa LGN-222 (slika 1). Elementi ispitivanja modela, izrađenog od višekomponentne legure Al-Zn-Mg-Cu, su dobijanje holografskih zapisa, vektora apsolutnog redosleda interferentnih pruga i komponenata vektora pomeraja [5, 6].



Slika 1 - Holografski sistem UIG-2M
Figure 1 - Holographic system UIG-2M

Hemijski sastav ove višekomponentne legure aluminijuma Al-Zn-Mg-Cu dat je u Tabeli 1.

Tabela 1 - Hemijski sastav legure Al-Zn-Mg-Cu

Mas. %	Al	Zn	Mg	Cu	Cr	Mn	Zr	Primese
Al-Zn-Mg-Cu	88,02	7,20	2,15	1,46	0,60	0,28	0,12	Fe – 0,12 Si – 0,05

Za određivanje svojstava otpornosti i deformacije, pri jednoosnom zatezanju, korišćene su standardne epruvete, a na osnovu dobijenih vrednosti izračunati su zatezna čvrstoća R_M (N/mm²) i izduženje A (%). Maksimalna sila je očitavana sa digitalnog brojača. Konvencionalni napon tečenja $R_{p0,2}$ (N/mm²) dobijen je na osnovu određene vrednosti sile $F_{p0,2}$ (N), početne površine preseka S_0 (mm²) i prvobitne merne dužine epruvete L_0 (mm). Ispitivanje je vršeno na elektronskoj kitalici sa ekstenzometrom. Mehaničke osobine ove višekomponentne legure date su u Tabeli 2 i predstavljaju srednju vrednost pet merenja. Rezultati ispitivanja na zatezanje dobijeni su za uslove termomehničke obrade: kaljenje sa temperature progrevanja 530 °C u vremenu 60 minuta i naglo hlađenje u vodi, a potom hladna plastična deformacija sa stepenom redukcije 20 %; posle deformacije izvedeno je veštačko starenje u vremenu od 30 minuta za temperaturu 190 °C.

Tabela 2 - Mehaničke osobine legure Al-Zn-Mg-Cu posle termomehničkih obrada

Q + W + T ₂	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_M (MPa)	A(%)	HB
Q + 20 % + 30 min. / 190 °C	645	670	8,7	200

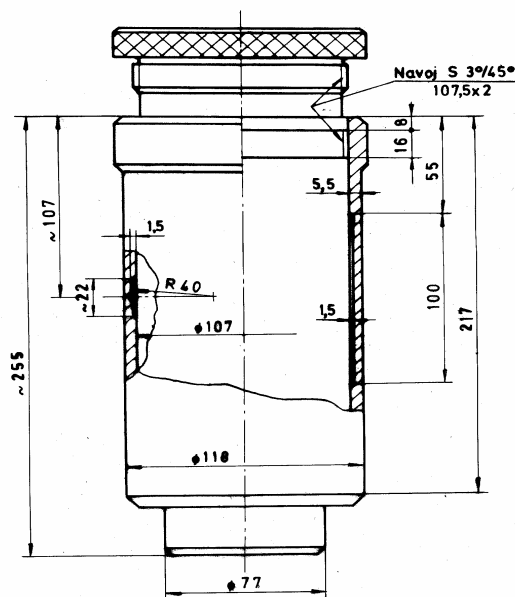
Na slici 2 dat je presek modela koji se ispituje, a izrađen je od legure Al-Zn-Mg-Cu. Model predstavlja komoru visokog pritiska (komora raketnog motora ili druge namene).

Na model, koji je preko glave podeonog aparata, učvršćen za postolje uređaja za snimanje, naneta je u odgovarajućem koordinatnom sistemu mreža 5×5 mm, pomoću koje se vrši posmatranje tačaka čiju deformaciju, odnosno pomeraje treba odrediti (slika 3).

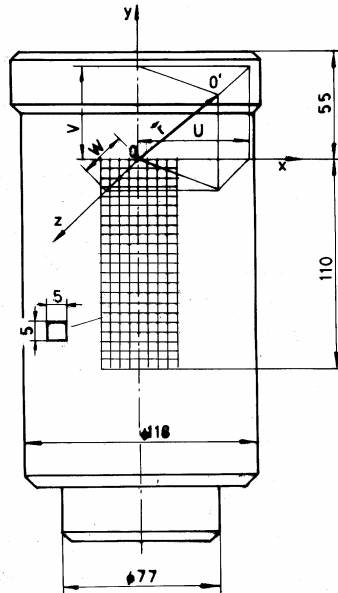
Koordinate holograma (x_i, y_i, z_i) u odnosu na usvojeni koordinatni sistem date su u Tabeli 3. Ispitivanja pod pritiskom za različita stanja modela vršena su prema Tabeli 4.

Prva ekspozicija vršena je pri dozvoljenom pritisku, odnosno opterećenju, a druga ekspozicija u odsustvu unutrašnjeg pritiska. Uobičajeno je da se opterećenje postepeno povećava između prve i druge ekspozicije, ali je ovde primenjen obrnuti postupak, bez negativnog uticaja na dobijene rezultate [7].

Posle snimanja, razvijanja i sušenja holografskih ploča, vršena je analiza holograma. Njihovo dešifrovanje vršeno je metodom zasnovanom na analizi apsolutnog redosleda interferencijskih pruga. Za potrebe analize se pre dobijanja holograma na modelu postavljaju dve elastične trake, pri čemu se jedan kraj lepi za model, a drugi pričvršćuje za stativ, utvrđen na postolju holografskog uređaja. Ove elastične trake omogućuju da se na mestu gde je traka nepokretna, odnosno mestu pričvršćenja za stativ, odredi nulta interferencijska pruga.



Slika 2 - Presek modela – komore
Figure 2 - Chamber model cross-section



Slika 3 - Koordinatni sistem ispitivanja Oxyz

Figure3 - Coordinating system of investigation Oxyz

Tabela 3 - Koordinate holograma

Hologram	Koordinata (mm)		
H_i	x_i	y_i	z_i
H_1	-151,20	75,60	362,50
H_2	75,60	-151,20	362,50
H_3	181,00	181,00	156,00
H_4	0,00	0,00	455,00

Tabela 4 - Pritisaci ispitivanja i stanje modela

Pritisak p(MPa)	Stanje modela
0,5	bez defekta
1,0	bez defekta
0,5	dužina prsline l = 100 mm
1,0	dužina prsline l = 100 mm
1,0	dužina prsline l = 22 mm
1,5	dužina prsline l = 22 mm

Pri određivanju vektora pomeraja tačaka posmatrane površine proizvoljnog oblika kada njihovi pravci nisu poznati, način dešifrovanja interferencijskih pruga na osnovu njihovog apsolutnog redosleda jedan je od najefikasnijih. Nepoznati vektor pomeraja (X) određuje se iz rešenja sistema jednačina:

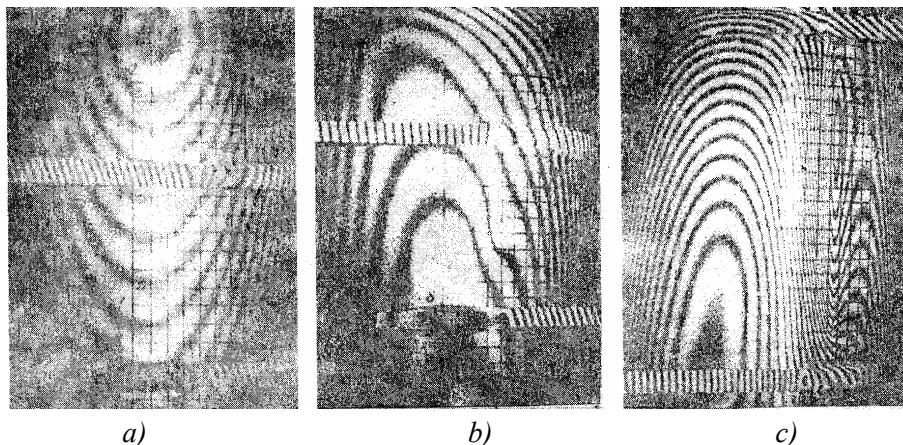
$$AX = \lambda K \quad (1)$$

gde je A – matrica osetljivosti (3×3), čiji su elementi jednaki projekcijama razlika jediničnih vektora posmatranja i osvetljenja na koordinatne ose x_i ($i=1, 2, 3$), a K (K_1, K_2, K_3) – vektor apsolutnog redosleda interferencijskih pruga.

Na slici 4 dati su interferogrami dobijeni pri pritisku 1,0 MPa i to za deo površine modela bez defekta (a), za deo površine sa prslinom dužine 22 mm (b) i za deo površine sa prslinom dužine 100 mm (c).

Na navedenim slikama jasno se uočava razlika u pogledu formiranja izo-linija između površine bez defekta, površine sa prslinom dužine 22 mm i površine sa prslinom dužine 100 mm.

Na navedenim slikama jasno se vidi da na mestima gde postoje koncentratore napona izo-linije naglo menjaju svoj oblik i gustinu u zavisnosti od veličine defekta.



Slika 4 - Interferogrami površine modela bez defekta (a), sa prslinom dužine $l=22$ mm (b), sa prslinom $l=100$ mm (c); pravac posmatranja H_1 ; Pritisak $p=1,0$ Mpa
Figure 4 - Interferograms of a defect-free model surface: a) with the crack $l=22$ mm long; b) with the crack $l=100$ mm; c) direction of observation H_1 ; pressure $p=1.0$ MPa

Linearnom interpolacijom određeni su koeficijenti redosleda interferencijskih pruga K_1, K_2, K_3 i K_4 , za model sa prslinom $l=100$ mm i pri unutrašnjem pritisku komore – modela $p = 1,0$ MPa.

Metod dešifrovanja holograma na osnovu apsolutnog redosleda interferencijskih pruga zasnovan je na vezi vektora pomeraja (u, v, w) u posmatranoj tački površine predmeta i apsolutnog redosleda interferentnih pruga u toj tački. Ta veza, napisana u već poznatom matričnom obliku

$$[A] \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

a razvijena, čini sistem jednačina

$$\begin{aligned} a_{11}u + a_{12}v + a_{13}w &= \lambda K_1 \\ a_{21}u + a_{22}v + a_{23}w &= \lambda K_2 \\ a_{31}u + a_{32}v + a_{33}w &= \lambda K_3 \end{aligned} \quad (3)$$

Elementi matrice $\{a_{ij}\}$ imaju oblik:

$$\begin{aligned} a_{i1} &= \frac{x - x_0}{\left[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 \right]^{1/2}} + \frac{x - x_i}{\left[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 \right]^{1/2}} \\ a_{i2} &= \frac{y - y_0}{\left[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 \right]^{1/2}} + \frac{y - y_i}{\left[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 \right]^{1/2}} \\ a_{i3} &= \frac{z - z_0}{\left[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 \right]^{1/2}} + \frac{z - z_i}{\left[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 \right]^{1/2}} \end{aligned} \quad (4)$$

$i = 1, 2, 3$

gde su:

x, y, z – koordinate tačke koja se ispituje,

x_0, y_0, z_0 – koordinate laserskog izvora svetlosti,

x_i, y_i, z_i – koordinate centra i -tog holograma,

K_i – koeficijenti apsolutnog redosleda interferencijskih pruga u i -toj tački holograma,

$\lambda = 633,2$ nm – talasna dužina svetlosti lasera korišćenog pri ispitivanju.

Koordinate holograma H_i date su u Tabeli 3. Koordinate laserskog izvora svetlosti su:

$$x_0 = 0, y_0 = 0, z_0 = 830 \text{ mm}.$$

Za proizvoljno odabranu tačku, sa koordinatama $x = 0, y = 10$ mm i $z = 0$, koeficijenti apsolutnog redosleda interferencijskih pruga iznose: $K_1 = 11,25$; $K_2 = 4,60$; $K_3 = 27,0$.

Proizvodi vrednosti koeficijenata apsolutnog redosleda interferencijskih pruga i vrednosti talasne dužine svetlosti lasera korišćenog pri ispitivanju, iznose:

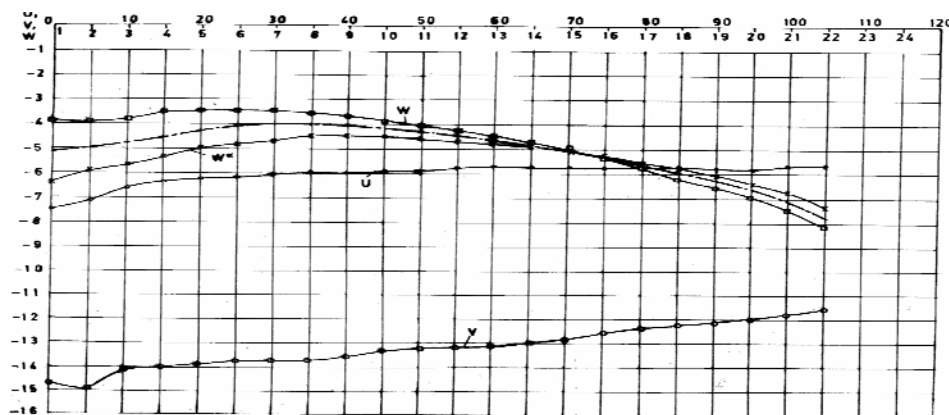
$$\begin{aligned} \lambda \cdot K_1 &= 0,712 \cdot 10^{-2} \\ \lambda \cdot K_2 &= 0,291 \cdot 10^{-2} \\ \lambda \cdot K_3 &= 0,171 \cdot 10^{-1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Uvođenjem vrednosti odgovarajućih koordinata za odabranu tačku u jednačine (3) dobijamo koeficijente matrice $\{a_{ij}\}$, a njihovim unošenjem u (4) nastaje sistem jednačina:

$$\begin{aligned} 0,380u - 0,153v - 1,910w &= 0,712 \cdot 10^{-2} \\ -0,187u + 0,411v - 1,898w &= 0,291 \cdot 10^{-2} \\ -0,615u - 0,570v - 1,531w &= 0,171 \cdot 10^{-1} \end{aligned} \quad (6)$$

čijim se rešavanjem dobijaju komponente vektora pomeraja: $u = -0,590 \cdot 10^{-2}$ mm, $v = -0,133 \cdot 10^{-1}$ mm, $w = -0,384 \cdot 10^{-2}$ mm.

Prema ovoj metodologiji dobijeni su: uporedni dijagram komponenta vektora pomeraja (u , v , w), za presek $x = 0$, unutrašnji pritisak $p = 1,0$ MPa i dužinu prsline $l = 100$ mm (slika 5). Na istoj slici predstavljen je dijagram komponente w^* holograma H_4 , kao i srednja vrednost pomeraja. Smatramo da je u ovom slučaju postojanje komponente vektora pomeraja u posledica gumenog creva, preko koga je obezbeđivan pritisak za ispitivanje.



Slika 5 - Komponente vektora pomeraja u , v , w i $w^*(H_4)$ za presek $x = 0$
 Figure 5 - Components of a displacement vector u , w , $w^*(H_4)$ for the cross-section $x=0$

ZAKLJUČCI

Razmatranjem teorijskih postavki i podataka iz literature, a pre svega analizom eksperimentalnih rezultata, dobijenih na osnovu ispitivanja višekomponentne legure aluminijuma Al-Zn-Mg-Cu, a uz primenu savremene optičke metode – holografske interferometrije, dolazimo do sledećih zaključaka:

- Poređenjem dobijenih vrednosti mehaničkih karakteristika ustanovljeno je optimalno stanje legure Al-Zn-Mg-Cu: Q + 20 % + 30 min./190 °C.

- Ispitivanje modela komore, izrađenog od legure Al-Zn-Mg-Cu, metodom holografske interferometrije daje kvalitativno i kvantitativno jasnu bazu za deformaciono-naponsku analizu konstrukcionih delova. Primenom holografske interferometrije omogućeno je dobijanje informacija po celom ispitivanom polju.
- Obradom rezultata merenja dobijen je relevantan spektar podataka, koji ukazuje na poklapanje i konvergenciju računskih i eksperimentalnih podataka.
- Metode holografske interferometrije u analizi deformacija i napona doprinose osavremenjavanju i aktualizaciji klasičnih metoda, kao što su tenzometrija, fotoelastičnost, mreže i druge.
- Konačno, holografska interferometrija je univerzalna metoda digitalnog ocenjivanja, koja pruža značajne merne rezultate u dijagnostici materijala i daje informacionu sliku velike specifične težine. Zbog toga bi bilo korisno da bude više zastupljena u procesima ispitivanja bez razaranja i kontrole kvaliteta.

LITERATURA

- [1] A. Milosavljevic, M. Sreckovic, V. Milenkovic, B. Ilic-Paul, P. Citakovic, S. Ristic, Aluminium – International Journal for Industry, Research and Application, Vol. 73, N°6, pp. 434-438, June 1997.
- [2] S. Bojanić, M. Srećković, A. Milosavljević, V. Rajković, S. Ristić, Phys. Low-Dim. Struct., pp. 85-94, Vol. 4/5, 1996.
- [3] R. Radovanović, M. Kutin, A. Milosavljević, M. Srećković, S. Polić-Radovanović, Procesna tehnika, br. 3, str. 49, 2002.
- [4] R. Radovanović, Magistarska teza, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1999.
- [5] L. A. Borinjak, S. I. Gerasimov, V. A. Zilkin, Praktičeskie sposobi zapisi i razšifrovki golografičeskikh interferogramm, obespečivajuščie neobhodimuju točnost opredelenija komponent tenzora deformacij, Avtometrija, No. 1, 1982.
- [6] Schumann, W., Zurcher, J. P., Cuhe, D., Holography and deformation analysis, Berlin, Heidelberg, New York, Tokio: Springer – Verlag, 1985.
- [7] A. Milovanović, R. Radovanović, M. Srećković, S. Polić Radovanović, Interferometry control in testing rocket motors and vessels under pressure, Proceedings of Int. Conference on LASERS 2001, 2002.

- [8] R. Gospavić, M. Srećković, A. Milosavljević, R. Radovanović, A. Kovačević, A. Bugarinović, S. Babić, Laser-material interaction, Proceedings of 2nd DAAAM International Conference on Advanced Technologies for Developing Countries – ATDC’03, Tuzla, BiH, 2003.
- [9] A. Milosavljević, K. Kovačević, M. Miladinov, R. Radovanović, I. Nešić, O. Đorđević, S. Lekić, Laser beam effects on multi-component aluminium alloys, International Conference Welding & Joining 2000 - New Materials & New Perspectives, Conference Abstracts and Proceedings, Tel Aviv, Israel, 18-20 july, 2000.
- [10] R. Radovanović, A. Milosavljević, M. Kutin, A. Milovanović, S. Polić-Radovanović, S. Petronić, Z. Radaković, Application of contemporary optical techniques for quality inspection of structural parts produced of multi-component aluminium alloys, International Conference Welding and Joining 2005 – Frontiers of Materials Joining, Conference Abstracts and Proceedings, Tel Aviv, Israel, January 25-28, 2005.
- [11] R. Radovanović, A. Milosavljević, M. Srećković, A. Milovanović, M. Kutin, Z. Radaković, Testing a structural member with or without cracks produced of multi-component aluminium alloys by applying contemporary optical techniques, International Conference Welding and Joining 2005 - Frontiers of Materials Joining, Conference Abstracts and Proceedings, Tel Aviv, Israel, January 25-28, 2005.