

## KARAKTERISASI SIFAT LELAH SIKLUS RENDAH UNIAXIAL PADA PADUAN ALUMINIUM EKSTRUSI

**H. Agus Suhartono**

*UPT LUK - BPPTeknologi*

*Kawasan Puspiptek, Serpong 15314, Tangerang*

*e-mail: hagussuhartono@yahoo.co.id*

### ABSTRAK

**KARAKTERISASI SIFAT LELAH SIKLUS RENDAH UNIAXIAL PADA PADUAN ALUMINIUM EKSTRUSI.** Perhitungan prediksi umur penggunaan bahan dengan metode regangan lokal untuk komponen dari aluminium ekstrusi membutuhkan data perilaku siklus bahan. Pengujian lelah siklus rendah dengan kontrol regangan dilakukan untuk mengetahui data perilaku siklus paduan aluminium ekstrusi  $AlMg_{0,4}Si_{1,2}$  dan  $AlMgSi_1$ . Konstanta-konstanta dinamis material dievaluasi pada penelitian ini.  $AlMgSi_1$  memiliki ketahanan lelah yang lebih tinggi pada daerah elastis, tetapi dengan derajat regangan yang tinggi sehingga timbul regangan plastis, kekuatan lelah siklus rendah  $AlMgSi_1$  menjadi lebih rendah dibandingkan  $AlMg_{0,4}Si_{1,2}$ .

**Kata kunci:** Lelah siklus rendah, Paduan aluminium ekstrusi

### Abstract

**CHARACTERIZATION OF UNIAXIAL LOW CYCLE FATIGUE BEHAVIOR OF EXTRUDED ALUMINUM ALLOY.** Calculation of age prediction using a material with a local strain method for components of aluminum extrusion materials cycle requires behavioral data. Low cycle fatigue testing with strain control data is performed to determine the cyclical behavior of aluminum alloy extrusion  $AlMg_{0,4}Si_{1,2}$  and  $AlMgSi_1$ . The dynamic constants of materials were evaluated in this study.  $AlMgSi_1$  shows a better resistance of low cycle fatigue, as long as the plastic strain doesn't exist. The presence of plastic strain reduces starkly the life time of the  $AlMgSi_1$  alloy that the low cycle fatigue strength is inferior to  $AlMg_{0,4}Si_{1,2}$ .

**Key words:** Low cycle fatigue, Extruded aluminum alloys

### PENDAHULUAN

Pengujian statik digunakan untuk menguji faktor keamanan terhadap perubahan bentuk dan patahan suatu komponen. Namun dalam penggunaan, umumnya komponen suatu konstruksi mengalami beban dinamis, sehingga pengujian lelah sangat diperlukan. Dalam hal ini ada 2 jenis pengujian, terdiri dari pengujian komponen dengan umur tak terbatas, yaitu komponen harus dapat bertahan pada berapapun siklus beban yang diberikan tanpa patah, dan pengujian komponen umur terbatas dengan persyaratan komponen tersebut dapat bertahan untuk jangka waktu yang terbatas, selama umur penggunaan.

Pengujian dinamis umur terbatas ini sangat diperlukan terutama untuk konstruksi kendaraan, kereta, mesin-mesin dan pesawat udara. Pengujian-pengujian dinamik dengan amplitudo konstan akan menghasilkan diagram *Wöhler*, yang memberikan informasi bahwa perpatahan bisa terjadi apabila bahan diberi beban berulang yang lebih kecil dari pada tegangan patah statis ( $\sigma_v$ ). Semakin kecil amplitudo maka semakin besar

jumlah siklus pembebanan yang dapat diterima bahan. Di bawah batas lelah ( $S_{ad}$ ) tidak akan terjadi perpatahan atau siklus pembebanan yang dapat diterima bahan tidak terhingga.

Hasil uji dinamis amplitudo konstan dapat dibagi menjadi tiga bagian berdasarkan intensitas pembebanannya. Yaitu daerah kekuatan siklus rendah (sampai sekitar  $5 \times 10^4$  siklus tegangan), kekuatan siklus terhingga (dari  $5 \times 10^4$  sampai  $2 \times 10^6$ ) dan daerah siklus tak hingga ( $> 2 \times 10^6$ ). Di daerah kekuatan siklus rendah tersebut (*low cycle fatigue*), kekuatan material ditentukan dengan menguji spesimen dengan menggunakan pengujian kontrol regangan. Pengujian dengan kontrol regangan ini dilakukan untuk mendapatkan diagram tegangan-regangan dan diagram *Wöhler* regangan yang berguna untuk perhitungan umur berdasarkan konsep tegangan setempat.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah memahami kelakuan mekanik paduan Aluminium selama pengujian lelah siklus rendah. Hal ini dilakukan untuk menentukan

paduan Aluminium yang memiliki ketahanan yang paling tinggi terhadap pembebanan lelah siklus rendah.

Siklus elastis-plastis akan menghasilkan diagram histeresis  $\sigma$ - $\epsilon$ . Pengujian dengan kontrol regangan ini dilakukan dengan alasan bahwa pembebanan pada dasar takik pada suatu komponen pada prinsipnya adalah kontrol regangan. Pengujian ini lebih presisi dibandingkan dengan pengujian kontrol tegangan. Pada pengujian dengan beberapa benda uji dengan amplitudo  $\epsilon_{at}$  yang berbeda, maka akan didapatkan diagram tegangan-regangan dinamis dan diagram *Wöhler* regangan. Pengujian fatik dengan kontrol regangan telah dilakukan untuk memprediksi umur komponen dan material [1,2].

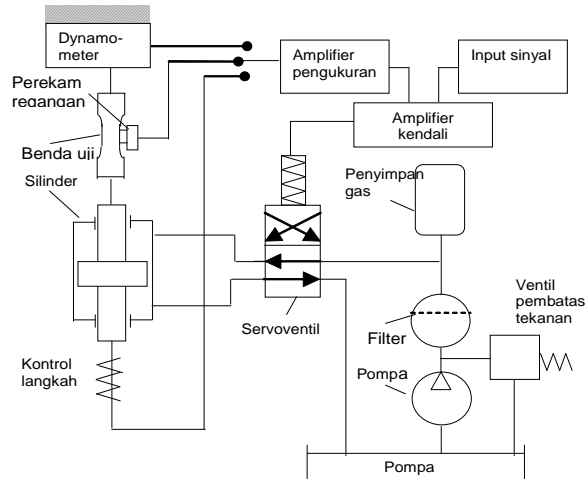
Telah diketahui bahwa regangan plastik merupakan parameter yang mengendalikan perubahan mikroskopis pada logam selama proses lelah, maka kontrol regangan lebih penting dibandingkan kontrol tegangan. Untuk tujuan perbandingan di atas maka harus didapatkan data-data sifat material berikut, yaitu kurvahisteresis, kurva tegangan-regangan dinamis, amplitudo regangan terhadap siklus hingga retak[3].

Pada paduan aluminium hasil ekstrusi yaitu  $AlMg_{0,4}Si_{1,2}$  dan  $AlMgSi_1$  dilakukan pengujian lelah siklus rendah. Dari hasil pengujian didapat konstanta siklis material. Berdasarkan nilai-nilai tersebut maka kekuatan bahan dibandingkan. Pengujian dilakukan dengan pembebanan aksial. Kontrol pembebanan dilakukan dengan kontrol regangan pada daerah pembebanan lelah siklus rendah. Penelitian ini dilakukan untuk memprediksi umur berdasarkan mekanisme kerusakan pada beban berulang.

## Metode Percobaan

Bahan yang diuji adalah dua jenis paduan Aluminium hasil ekstrusi yaitu  $AlMg_{0,4}Si_{1,2}$  (Aluminium dengan kandungan Mg 0,4 % dan Si 1,2 %) dan  $AlMgSi_1$ . Kandungan unsur dalam paduan tersebut menyebabkan perubahan sifat bahan. Penambahan Magnesium menambah kekuatan paduan, tetapi efek penguatan hanya terjadi setelah dilakukan perlakuan panas. Penambahan Magnesium pada paduan Al-Si sampai kadar tertentu akan menghasilkan efek penghalusan butir, peningkatan kekuatan, keuletan, dan kekerasan [4,5]. Kandungan Silikon pada paduan Al-Si berpengaruh terhadap kekuatan mekanik. Silikon berukuran kasar umumnya mengurangi umur fatik karena merupakan tempat inisiasi retak mikro. Kandungan silikon yang tinggi meningkatkan ketahanan aus, dan kekerasan paduan Al-Si [6]

Mesin yang digunakan untuk pengujian adalah mesin servohidrolik yang secara sketsa ditunjukkan pada Gambar 1. Untuk pemberian sinyal masukan pada sistem kontrol digunakan komputer yang memberikan sinyal regangan dan frekuensi. Sinyal masukan tersebut kemudian diperkuat dengan amplifiier dan masuk ke dalam *servoventil*. Sinyal tersebut diterjemahkan pada silinder



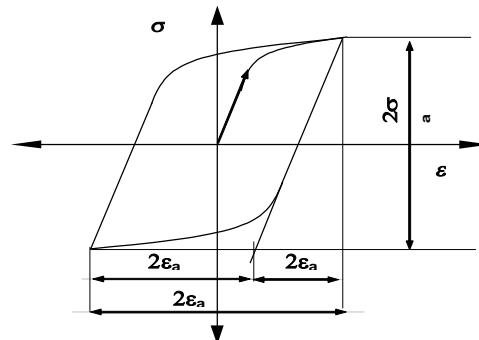
Gambar 1. Sketsa sistem mesin pengujian lelah siklus rendah

bersama dengan frekuensinya. Gerakan silinder tersebut diukur oleh pemberi langkah. Alat ukur yang lain adalah Dinamometer (*Kraftmessdose*) yang berada di atas alat pencekam. Besaran terpenting untuk sinyal masukan dan nilai sebenarnya pada lingkaran kontrol tersebut adalah regangan yang terukur pada perekam regangan, yang dikuatkan dengan amplifiier dan dibandingkan dengan nilai masukan dalam amplifiier pengontrol. Penyimpan data dan monitor yang dihubungkan dengan amplifiier pengukur tidak diberikan pada gambar.

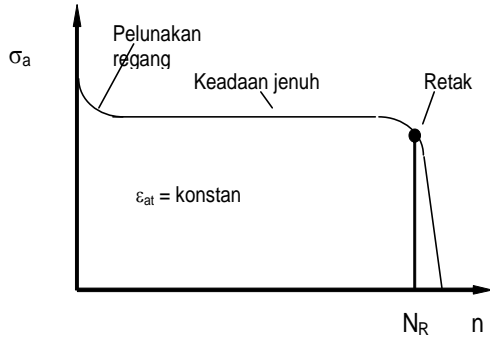
Penyimpanan data dan penggambaran kembali dilakukan dengan menggunakan personal komputer dan program Dia/Dago yang dikontrol dengan sinyal masukan yang diberikan. Dengan program tersebut hasil pengukuran dapat diolah dan dikeluarkan dalam diagram amplitudo-waktu, atau kurva histeresis antara tegangan dan regangan.

Pada umumnya data mengenai kekuatan dinamis material konstruksi adalah hasil pengujian lelah dengan pembebanan sinus dan amplitudo konstan. Hal ini disebabkan pengujian dengan cara ini lebih hemat energi dan waktu bila dibandingkan dengan pengujian dengan pembebanan dinamis dengan spektrum pembebanan.

Besaran dari kurva histeresis tersebut adalah lebar total amplitudo regangan  $2 \epsilon_a$  dan total amplitudo



Gambar 2. Pembagian diagram kurva histeresis menjadi bagian elastis dan plastis [3]



Gambar 3. Penentuan tegangan jenuh

tegangan  $2 \sigma_a$ , dimana regangan total terbagi menjadi bagian elastis dan bagian plastis [3,7], seperti yang ditampilkan pada Gambar 2. Pada pengujian lelah dengan kontrol regangan total amplitudo dibuat konstan dan besaran yang berubah adalah tegangan.

Untuk menghitung pengujian lelah siklus rendah diambil keadaan jenuh dari  $\sigma_a$  dan jumlah siklus hingga retak. Pada umumnya jumlah siklus hingga retak ditentukan dari penurunan tegangan 5% dari tegangan jenuh seperti diperlihatkan pada Gambar 3. Pada pengujian yang diberhentikan sebelum terjadinya penurunan tegangan 5% menunjukkan adanya retakan. Dengan dasar ini maka selanjutnya penurunan amplitudo tegangan dianggap sebagai saat terbentuknya retak [3,7].

## HASIL DAN PEMBAHASAN

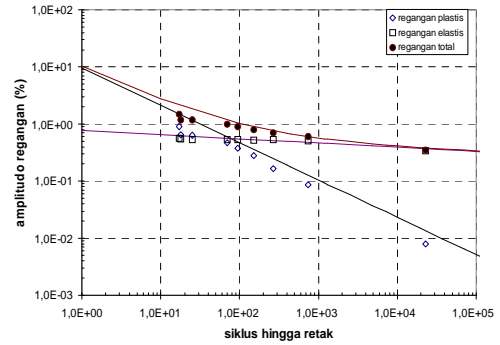
Sifat mekanis bahan diberikan pada Tabel 1. Nilai-nilai tersebut didapat dari hasil pengujian tarik dan Standar DIN 59606.

Hasil pengujian lelah siklus rendah diberikan dalam bentuk diagram tegangan-regangan dan *Woehlerlinie* regangan pada Gambar 4 dan Gambar 5.

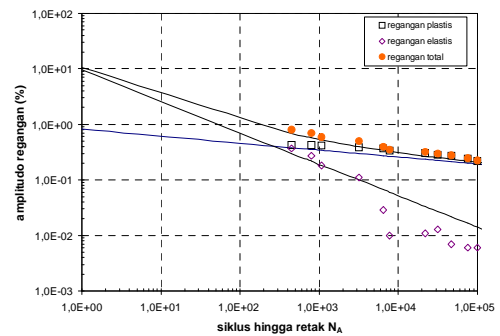
Besaran-besaran siklus diambil dari histeresis tegangan regangan yang telah stabil. Pada pengujian digunakan kurva histeresis pada jumlah siklus setengah dari umur. Persamaan yang menggambarkan perilaku siklus bahan ditentukan terdiri atas regangan elastis dan regangan plastis. Sehingga regangan total harus dibagi menjadi satu bagian regangan elastis dan satu bagian regangan plastis. Dari pengujian lelah kontrol regangan didapatkan hasil berupa: Amplitudo tegangan jenuh, amplitudo regangan jenuh dan siklus hingga retak. Bagian regangan elastis dapat diturunkan dari amplitudo tegangan  $\sigma_a$  dan Modulus Young E. Bagian regangan plastis  $\epsilon_{ap}$  didapat dari pengurangan regangan total  $\epsilon_{at}$  oleh regangan elastis  $\epsilon_{ae}$ .

Tabel 1. Sifat mekanis paduan aluminium

Sifat mekanik	AlMg <sub>0,4</sub> Si <sub>1,2</sub>	AlMgSi <sub>1</sub>
Modulus E	74000 MPa	74500 MPa
Kuat Tarik	231,5 MPa	437 MPa
Batas luluh	125,5 MPa	420 MPa



Gambar 4. Kurva lelah siklus rendah (*Woehlerlinie*) dari paduan AlMgSi<sub>1</sub>



Gambar 5. Kurva lelah siklus rendah (*Woehlerlinie*) dari paduan Aluminium AlMg<sub>0,4</sub>Si<sub>1,2</sub>

Dengan asumsi hubungan linear antara jumlah siklus  $N_A$  dan regangan elastis  $\epsilon_{ae}$  dan regangan plastis  $\epsilon_{ap}$  yang diplot pada skala doble logaritma, dapat ditarik suatu regresi sesuai Persamaan (1):

$$\log x = f(\log y) \dots\dots\dots (1)$$

Dengan x variabel bebas ( $\epsilon_{ae}$  atau  $\epsilon_{ap}$ ) dan y adalah variabel bebas ( $N_A$ ).

Persamaan regresi seperti Persamaan (2):

$$\log y = a_0 + a_1 \log x \dots\dots\dots (2)$$

Sehingga konstanta  $a_1$  dan  $a_0$  dapat ditentukan.

Untuk penggambaran menurut persamaan *Manson Coffin* [5] Persamaan (2) tersebut dapat diubah menjadi Persamaan (3):

$$NA = a_0 \epsilon_{ae} a_1 \implies \epsilon_{ae} = \sigma_f' / E (N_A)^b \dots\dots (3)$$

$$f' = 10 - \log a_0 / a_1 E / 1000 \dots\dots\dots (4)$$

$$b = 1/a_1 \dots\dots\dots (5)$$

Kurva *Woehler* tegangan sering digambarkan bukan terhadap siklus hingga retak  $N_A$ , tetapi terhadap dua kali siklus hingga retak  $2N_f$ . Sehingga koefisien  $\sigma_f'$  berubah menjadi Persamaan (6).

$$\sigma_{ae} = \sigma_f'(N_A) / E (N_A)^b = \sigma_f'(2N_f) / E (2N_f)^b \dots\dots (6)$$

$$\implies \sigma_f'(2N_f) = \sigma_f'(N_A) 0,5^b \dots\dots\dots (7)$$

Demikian juga regangan plastis menurut persamaan *Manson Coffin* harus diubah menjadi :

$$N_A = a_0 \varepsilon_{ap}^{a1} \implies \varepsilon_{ap} = \varepsilon_f' \times (N_A)^c \dots\dots\dots (8)$$

$$\sigma_f' = 10^{-\log a_0/a_1} \times E/1000 \dots\dots\dots (9)$$

$$c = 1/a_1 \dots\dots\dots (10)$$

Persamaan *Manson Coffin* dapat dituliskan dengan penambahan regangan elastis dan regangan plastis, seperti Persamaan (11)

$$\implies \varepsilon_{at} = \sigma_f'/E \times (N_A)^b + \varepsilon_f' \times (N_A)^c \dots\dots (11)$$

Kurva tegangan regangan dinamis dapat dituliskan menurut persamaan *Ramberg Osgood*.

$$\varepsilon_{at} = (\sigma_a/E) + (\sigma_a/K')^{1/n'} \dots\dots\dots (12)$$

Konstanta  $K'$  dan  $n'$  dapat dihitung dari konstanta  $\sigma_f'$ ,  $b$ ,  $\varepsilon_f'$  dan  $c$ .

$$n' = b/c \dots\dots\dots (13)$$

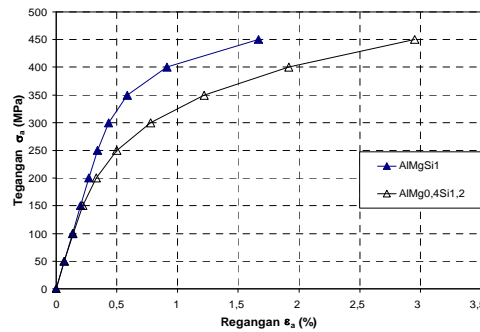
$$K' = \sigma_f' / \varepsilon_f'^{(b/c)} \dots\dots\dots (14)$$

Hasil perhitungan konstanta berdasarkan persamaan (4, 5, 7, 10, 12, 13, 14) di atas diberikan pada Tabel 2.

Perbandingan dari kurva regangan hasil pengujian pada Gambar 4 dan Gambar 5 menunjukkan bahwa apabila timbul regangan plastis pada amplitudo regangan yang sama, paduan  $AlMg_{0,4}Si_{1,2}$  memiliki umur 1,5 kali hingga 2 kali lebih panjang dibanding  $AlMgSi_1$ . Penurunan tingkat amplitudo regangan total hingga 0,35 % mengakibatkan regangan plastis pada  $AlMgSi_1$  hampir mendekati nol. Pada tingkat amplitudo regangan ini paduan  $AlMgSi_1$  memiliki umur lelah dari 4 kali lebih panjang dibanding paduan  $AlMg_{0,4}Si_{1,2}$ . Dari fenomena ini diketahui bahwa paduan  $AlMg_{0,4}Si_{1,2}$  memiliki keunggulan sifat mekanis bila diberikan beban yang mengakibatkan regangan plastis. Sedangkan bila pembebanan tidak mengakibatkan terjadi regangan plastis paduan  $AlMgSi_1$  memiliki umur

Tabel 2. Konstanta dinamis bahan

Konstanta dinamis	Paduan $AlMg_{0,4}Si_{1,2}$	Paduan $AlMgSi_1$
$\sigma_f'$	605 MPa	577,6 MPa
$b$	-0,1249	-0,074
$\varepsilon_f'$	0,0904	0,0967
$c$	-0,5677	-0,655
$\sigma_f'(2N_f)$	660 MPa	608 MPa
$\varepsilon_f'(2N_f)$	0,1339	0,152
$K'$	1027 MPa	752,1 MPa
$n'$	0,2199	0,113



Gambar 6. Perbandingan kurva tegangan-regangan  $AlMgSi_1$  dan  $AlMg_{0,4}Si_{1,2}$

yang lebih panjang. Timbulnya regangan plastis sangat mempengaruhi umur lelah paduan  $AlMgSi_1$ .

Dari hasil pengujian lelah kontrol regangan ini juga dapat diprediksi bahwa material  $AlMgSi_1$  memiliki kepekaan takik yang lebih tinggi dibandingkan dengan paduan  $AlMg_{0,4}Si_{1,2}$ . Hal tersebut terjadi karena pembebanan pada daerah takikan akan mengakibatkan terjadinya regangan plastis akibat pengaruh konsentrasi tegangan, terutama pada daerah takik dengan konsentrasi tegangan yang tinggi, dan pembebanan yang tinggi, sehingga pada perencanaan suatu komponen dengan menggunakan paduan  $AlMgSi_1$  harus dihindarkan terjadinya takik yang tajam. Demikian juga bila dalam operasi terjadi benturan atau retak awal maka harus segera dihaluskan dengan cara permesinan atau pengamplasan dan pemolesan untuk menghindari terjadinya kegagalan dini pada komponen tersebut.

Bila dibandingkan keadaan regangan plastis dan elastis tampak bahwa gradien regangan plastis lebih banyak berbeda dibandingkan dengan bagian regangan elastis. Sehingga menghasilkan perbedaan pada kurva *Woehler* di daerah siklus rendah. Di daerah siklus tinggi kurva *Woehler* regangan elastis saling mendekat karena gradien kedua bahan mirip, kurva *Woehler* dapat ditentukan dari bagian regangan elastis.

Pada Gambar 6 ditunjukkan diagram siklus tegangan regangan dari kedua material. Kurva tegangan regangan di daerah elastis masih berhimpit dan mulai terjadi perbedaan pada saat regangan memasuki daerah plastis. Paduan  $AlMgSi_1$  memiliki kekuatan dinamis yang lebih tinggi, tetapi memiliki keuletan yang jauh lebih rendah dibanding  $AlMg_{0,4}Si_{1,2}$ .

## KESIMPULAN

Hasil pengujian lelah siklus rendah pada paduan aluminium  $AlMgSi_1$  dan  $AlMg_{0,4}Si_{1,2}$  menunjukkan bahwa paduan  $AlMgSi_1$  memiliki kekuatan yang lebih tinggi, dibanding paduan  $AlMg_{0,4}Si_{1,2}$ . Tetapi dilihat dari kurva lelah regangan diketahui bahwa paduan  $AlMgSi_1$  sangat sensitif terhadap regangan plastis. Regangan plastis sangat berpengaruh terhadap umur lelah, sehingga paduan Aluminium ini tidak sesuai untuk komponen yang

mengalami beban plastis pada saat penggunaannya dan tidak direkomendasikan untuk pembuatan komponen yang memiliki konsentrasi tegangan yang tinggi. Sedangkan untuk penggunaan yang membutuhkan kekuatan tinggi tanpa menimbulkan regangan plastis maka paduan AlMgSi<sub>1</sub> dapat direkomendasikan.

Paduan AlMg<sub>0,4</sub>Si<sub>1,2</sub> memiliki sifat keuletan yang tinggi walaupun kekuatannya lebih rendah dibanding paduan AlMgSi<sub>1</sub> yang mengakibatkan bahan ini memiliki keunggulan pada daerah lelah siklus rendah.

## DAFTAR ACUAN

- [1]. J. OKRAJNI, G. JUNAK, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* , **26** (2008) 147-150
- [2]. J. C. PEREIRA, L. A. M. TORRES, E. DAROSA, H. BINDEWALD, A Low Cycle Fatigue Analysis on a Steam Turbine Bladed Disk-Case Study, *12<sup>th</sup> IFToMM World Congress*, Besançon, (2007)
- [3]. L. P. BORREGO, L. M. ABREU, J. M. COSTA, J. M. FERREIRA, *Anales de Mecanica de la Fractura*, **20** (2003) 179-184
- [4]. M. HAQUE, A. A. KHAN, *Advanced Materials Research*, **23** (2007) 291-294
- [5]. E. GIRAUD, M. SUÉRY, M. CORET, *Materials Science Forum*, **690** (2011) 73-76
- [6]. H. YE, *Journal of Materials Engineering and Performance*, **12** (2003) 288-297
- [7]. M. GREGER, L. KANDER, R. KOCHICH, *Archives of Materials Science and Engineering*, **31** (2008) 41-44