

Свейшозар Блечић и Кемал Делијић\*

РАЗВОЈ ЛЕГУРЕ AA8011 ЗА ЗАМЈЕНУ ЛЕГУРА  
AA1100 И AA3003 У ПРОИЗВОДЊИ АМБАЛАЖНИХ  
МАТЕРИЈАЛА

DEVELOPMENT OF AA8011 ALLOY FOR SUBSTITUTION  
OF AA1100 AND AA3003 FOR FABRICATION OF  
PACKAGING

ИЗВОД

Развој легуре AA8011 представља резултат истраживања са циљем замјене техничког алуминијума (AA1100) и Al-легура са манганом (AA3003), због компаративних предности везаних за процес производње и механичке и структурне особине у коначним производима. У раду су дати резултати истраживања способности за деформацију танких трака легуре AA8011. Посебна пажња је посвећена анизотропији показатеља пластичности, уз напомену да су постигнуте високе вриједности фактора пластичне анизотропије ( $r$ ). Испитиван је утицај степена деформације једноосним затезањем на факторе пластичне анизотропије. Такође су конструисани дијаграми граничних деформација за танке траке дебљине 0,5 и 0,22 mm.

ABSTRACT

The alloy of AA8011 is a result of investigation with intention to substitute of AA1100 and AA3003 alloys because of its priorities in fabrication and better mechanical and structural properties of final products. This paper shows the results of investigation of forming properties of thin

---

\* Металуршки факултет, Подгорица

sheets of AA8011 alloy. Especially, we analyzed the anisotropy of the plasticity, with note that relatively high level of the strain anisotropy ratio ( $r$ ) has been obtained. The uniaxial strain ratio influence on the strain anisotropy ratio was analyzed. The forming limit diagrams for thin sheets of 0,5 and 0,22 mm thickness were constructed.

## УВОД

Истраживања у области производње танких трака и фолија усмјеравају се ка развоју легура универзалне намјене у области њихове примјене као коначних производа. Као резултат ових истраживања развијена је легура AA 8011 (систем Al-Fe-Si са додацима појединих елемената) која се карактерише високим степеном универзалности у примјени и добија значајну улогу у области амбалажних материјала (1, 2)

У односу на технички алуминијум, легура AA8011 има веће вриједности механичких карактеристика, и мању анизотропију показатеља пластичности, што омогућава обраду дубоким извлачењем, нарочито трака малих дебљина намијењених за конзерве, кутије, затвараче за флаше и сл. (3)

Један од разлога за развој ове легуре је и замјена већег броја легура, нарочито легура алуминијума са манганом (AA3003), јер оне показују ограничења у постизању одговарајуће величине зрна и механичких особина. Легуре са манганом проузрокују и тешкоће у виду оштећења и „загађења” легирајућим елементима пећи за ливење и одржавање температуре, што утиче на повећање шкарта. (1).

Осим тога, легура AA8011 се може добитри континуираним ливењем („СС” - поступак), што је, због краћег времена процеса добијања траке одговарајуће дебљине и нижих производних трошкова, чини много погоднијом од Al-легура са манганом, које се производе класичним „ДС” поступком. Због бољих резултата у постигнутом квалитету при ваљању, може се очекивати већи извадак метала при раду са легуром AA8011. (4,5,6)

Легура AA8011 налази примјену у производњи: амбалажних материјала (контејнери за храну и поклопци за њих, конзерве „монодоза”, посуда за прашкасте и кремасте производе, конзерве за месо и рибу и сл.); скоро свих врста затварача и поклопаца; конструкционих елемената за измјењиваче топлоте: савитљивих цијеви за транспорт зрнастих прашкастих материјала при паковању

и сл; филтера и мрежа за пару, уље и друге флуиде; украсне конструкције у грађевинарству.

Овај рад представља дио истраживања која су реализована у циљу освајања производње танких трака и фолија легура AA8011.

### ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТА

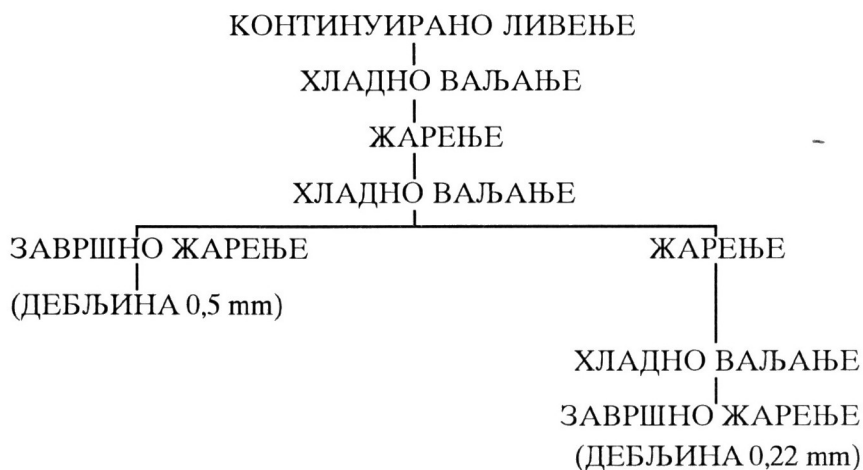
Истраживање је извршено на танким тракама дебљина: 0,5 и 0,22 mm у деформисаном и меко жареном стању, чији је хемијски састав наведен у Табели 1.

*Табела 1. - Хемијски састав истраживане легуре*

*Tabela 1. - The chemical composition of investigated alloy.*

Element	Količina, %
Al	98,5
Si	0,52
Fe	0,74
Cu	0,062
Mn	0,077
Mg	0,001
Cr	0,002
Zn	0,051
Ti	0,03

Танке траке су добијене по сљедећем термомеханичком режиму:



Механичка испитивања су извршена тестовима једноосног и двоосног затезања узорака. Узорковање је вршено у три правца у односу на правац ваљања ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $90^\circ$ ).

Мјерени су следећи показатељи отпора деформацији и пластичности: затезна чврстоћа ( $R_m$ ); граница течења ( $R_{p_{0,2}}$ ); укупно релативно издужење ( $A$ ); фактор деформационог ојачавања ( $n$ ); фактори пластичне анизотропије ( $r, r, \Delta r$ ); деформације дужине ( $\varepsilon_1$ ) ширине ( $\varepsilon_b$ ) и дебљине ( $\varepsilon_h$ ) на мјесту лома и ван њега: главне деформације у равни танке траке при испитивању дубоким извлачењем по „ERICSEN”-у  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  висина и распоред симетричних неравнина по ободу чашице при испитивању дубоким извлачењем по ”SWIFT”-У.

Показатељи пластичности су одређивани методом визио-пластичности. На стандардним епруветама за испитивање једноосним затезањем нашоена је координатна мрежа, електролитичким путем, у облику кругова пречника 5 mm за дебљину 0,5 mm, односно пречника 2 mm за дебљину 0,22 mm.

Након деформације мјерени су пречници добијених елипси, а затим рачунате одговарајуће деформације:

$$\text{деформација дужине} \quad \varepsilon_1 = \ln(d_1/d_0) \quad (1)$$

$$\text{деформација ширине} \quad \varepsilon_b = \ln(d_2/d_0) \quad (2)$$

$$\text{деформација дебљине} \quad \varepsilon_h = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (3)$$

гдје су  $d_0$  - пречник круга прије деформације;

$d_1, d_2$ , - већи и мањи пречник добијене елипсе.

Фактор пластичне анизотропије ( $r$ ) је одређиван по формули /7/;

$$r = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_h} \quad (4)$$

Вриједности фактора  $r$  су одређиване експериментално за правце  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $90^\circ$ . За остале правце (углове) његове вриједности израчунаване су по формули /10/.

$$r(\theta) = \frac{1 + \{2r_{45}((1/r_{90}) + (1/r_0)) - 4\} \sin^2\theta \cdot \cos^2\theta}{((\sin^2\theta)/r_{90}) + ((\cos^2\theta)/r_0)}$$

Резултати добијени на овај начин одступају од експерименталних само за  $\pm 5\%$ .



Средњи фактор пластичне анизотропије (фактор нормалне анизотропије) рачунат је по формули /7/.

$$r = (r_0 + 2r_{45} + r_{90})/4 \quad (6)$$

Фактор раванске пластичне анизотропије рачунат је по формули /7/

$$\Delta r = (r_0 - 2r_{45} + r_{90})/2 \quad (7)$$

Вишестепеним затезањем и мјерењем димензија мреже, омогућено је праћење зависности фактора  $r$  од степена деформације једноосним затезањем.

При анализи утицаја степена деформације на стварни напон ( $K_f$ ) усвојена је експоненцијална зависност облика:

$$K_f = K \varepsilon_1^n \quad (8)$$

гдје су:  $K_f$  - стварни напон,

$\varepsilon_1$  - стварна деформација дужине,

$K$  - коефицијент чврстоће,

$n$  - фактор деформационог ојачавања.

Фактор  $n$  је одређиван као средња вриједност за сав интервал деформације једноосним затезањем.

На узорке који су испитивани са циљем конструкције дијаграма граничних деформација, наношена је мрежа пречника 2mm и након деформације мјерени већи и мањи пречници добијених елипси, односно рачунате одговарајуће деформације:

$$\varepsilon_1 = \ln(d_1/d_0) \quad \varepsilon_2 = \ln(d_2/d_0) \quad (9)$$

гдје су:  $d_0$  - пречник круга прије деформације,

$d_1, d_2$  - већи и мањи пречник елипсе.

Испитивања су извршена уз употребу стандардних алата за испитивање дубоким извлачењем по "ERICSEN" - у (сферни утискивач пречника 20 mm, матрица пречника 40 mm). У циљу обезбјеђења различитих међусобних односа деформација у равни траке, вршено је варирање ширине узорака.

Узорци су деформисани до појаве прве видљиве пукотине, при чему су мјерења извршена на: елипсама кроз које пролази пукотина, елипсама које пукотина додирује тангенцијално и елипсама које се налазе у непосредној близини зоне локализоване пластичне

деформације. Криве граничних деформација конструисане су тако да се сваки дијаграм састоји из три области: доње, у којој ни једна од комбинација деформација не доводи до појаве пукотине; средње, у којој се пукотина јавља при различитим вриједностима  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  горње у којој се сигурно јавља пукотина.

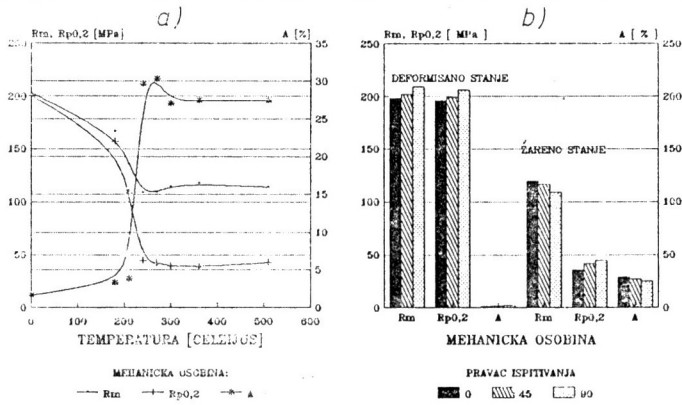
Праћење анизотропије је вршено узимањем узорака у правцу ваљања и под угловима  $45^\circ$   $90^\circ$  у односу на правац ваљања.

Сва наведена испитивања су вршена на танким тракама у меко жареном стању. У циљу утврђивања оптималног термичког режима за постизање стања са завршеном примарном рекристализацијом извршено је испитивање утицаја температуре жарења на механичке особине претходно деформисаних танких трака. Због обезбјеђења комплетне слике о особинама материјала извршено је испитивање анизотропије стандардних механичких особина за деформисано и меко жарено стање.

#### *РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА И ЊИХОВА АНАЛИЗА*

Танка трака дебљине 0,5 mm у деформисаном стању се карактерише порастом вриједности механичких особина (затезне чврстоће  $R_m$ , границе течења  $R_{p0,2}$  и укупног релативног издужења  $A$ ) са порастом угла испитивања у њеној равни, од  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , Слика 1.б. Са порастом температуре жарења (Слика 1.а) мијењају се механичке особине, при чему се примарна рекристализација завршава при температури  $240^\circ\text{C}/1^{\text{h}}$ . Са даљим порастом температуре, механичке особине се задржавају на приближно истим нивоима. Даља испитивања пластичности и отпора деформацији вршена су на узорцима у меком стању ожареним по режиму  $240^\circ\text{C}/1^{\text{h}}$ . У меко жареном стању, ова трака се карактерише падом затезне чврстоће и укупног релативног издужења и порастом границе течења са порастом угла испитивања у равни од  $0^\circ$  до  $90^\circ$ .

Фактор деформационог ојачавања ( $n$ ) опада са порастом угла испитивања, при чему за правце  $0,45$  и  $90^\circ$  износи 0,3179, 0,2741 и 0,2451 респективно (слике 2,14), уз напомену да су ово средње вриједности за сав испитивани интервал деформације једноосним затезањем. На исти начин се мијења и коефицијент чврстоће ( $K$ ), при чему за правце  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  износи 257,212; 228,697 и 204,772, МПа респективно.

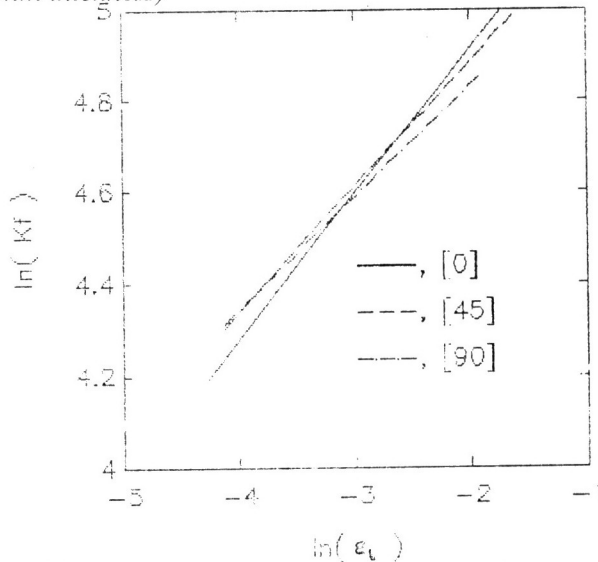


Слика 1. а) Зависности механичких особина од температуре жарења за плочу израку дебљине 0,5 mm (вријеме жарења 1 сати)

б) Анизотропија механичких особина у деформисаном и жареном стању

Fig. 1. - a) Relation between the temperature of annealing and the mechanical properties

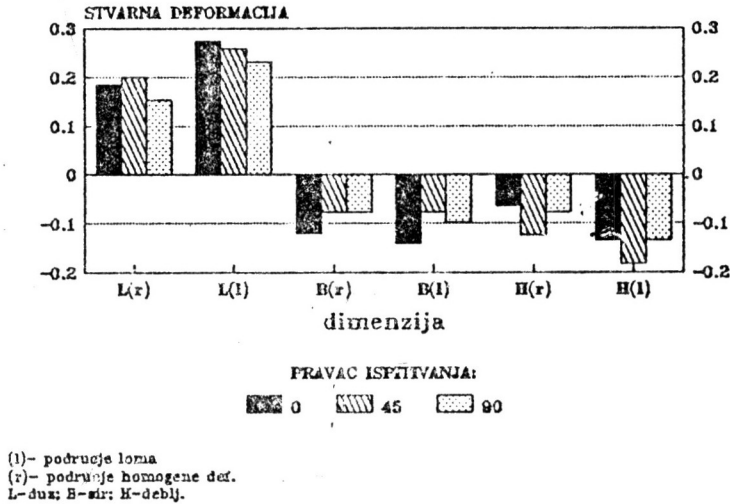
б) Anisotropy of the mechanical properties (hardened and annealed state), (sheet of 0,5 mm thickness)



Слика 2. - Зависности стварног напона од стварне деформације едноосним затезањем и правца испитивања

Fig. 2. - Relation between  $\ln(Kf_{exp})$  and  $\ln(\epsilon)$  in three directions of investigation (sheet of 0,5 mm thickness)

Испитивањем деформација у правцу дужине, ширине и дебљине на епруветама од траке дебљине 0,5 mm (Слика 3) подвргнутим једноосном затезању до лома запажа се слjedeће:



Слика 3. - Зависноћ деформација дужине, ширине и дебљине од правца испитивања на мјесту лома и ван њега

Fig 3. - Relation between  $\epsilon_l$ ,  $\epsilon_b$ ,  $\epsilon_h$  and direction of investigation on the necking and out of necking. (Sheet of 0,5 mm thickness)

- деформација дужине опада са повећањем угла испитивања од 0° до 90°, при чему су, без обзира на правац испитивања, вриједности на мјесту лома веће за око 60% у односу на подручја ван локализације пластичне деформације;

- деформација ширине најмања је за правац 45°, а највећа за правац 0°, при чему се исти односи задржавају и на мјесту лома. Деформација ширине је, без обзира на правац испитивања, на мјесту лома већа за 30%;

- деформација дебљине је за подручје хомогене пластичне деформације највеће за правац 45°. На мјесту лома, деформација дебљине је највећа за правац 0° а најмања за правац 45°, при чему су вриједности веће за око 80% у односу на мјеста ван подручја лома.

Упоредјујући међусобно деформације дужине, ширине и дебљине, узимајући у обзир закон о сталности запремине при пластичној деформацији, може се за подручје максимално остварене хомогене пластичне деформације, рећи слjedeће:

- деформација дужине у условима једноосног затезања, за правац ваљања, све у већем степену остварује на рачун смањења ширине него дебљине. Удјели деформација ширине и дебљине у деформацији дужине износе 54% и 46% респективно;

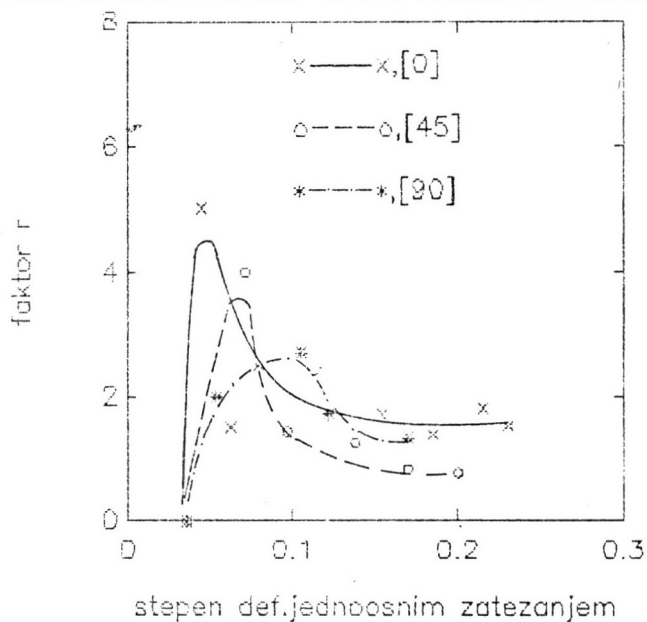
- деформација дужине у условима једноосног затезања, за правац 45° се у већем степену остварује на рачун смањења дебљине него ширине. Удјели деформација ширине и дебљине у деформацији дужине износе 42% и 58% респективно;

- деформација дужине у условима једноосног затезања, за правац 90° се у већем степену остварује на рачун смањења ширине него дебљине. Удјели деформација ширине и дебљине у деформацији дужине износе 60% и 40% респективно.

Зависност фактора пластичне анизотропије ( $r$ ) од степена деформације једноосним затезањем и правца испитивања представљена је на Слици 4. У почетном дијелу деформације, фактор  $r$  расте за сва три правца, при чему достиже максимум а затим опада. За степене деформације  $\epsilon_1 > 0,12$  фактор  $r$  је највећи за правац 0°, а најмањи за правац 45°, при чему је вриједност за правац 90° блиска вриједности за правац 0°. У овом интервалу деформација, фактор  $r$  мало зависи од степена деформације затезањем. Узимајући у обзир да су за правце 0° и 90° вриједности  $r > 1$ , може се рећи да су примарни системи клизања, за ова два правца у равни танке траке, повољније усмјерени за клизање по њеној ширини него по дебљини. За правац 45°, до  $\epsilon_1 < 0,15$ , фактор  $r > 1$  док је за  $\epsilon_1 > 0,15$  фактор  $r < 1$ , што значи да су примарни системи при већим степенима деформације нешто повољније оријентисани за клизање по дебљини него по ширини танке траке. Зависност фактора пластичне анизотропије у равни танке траке дебљине 0,5 mm од угла у односу на правац ваљања по једначини 5 представљена је на Слици 5.

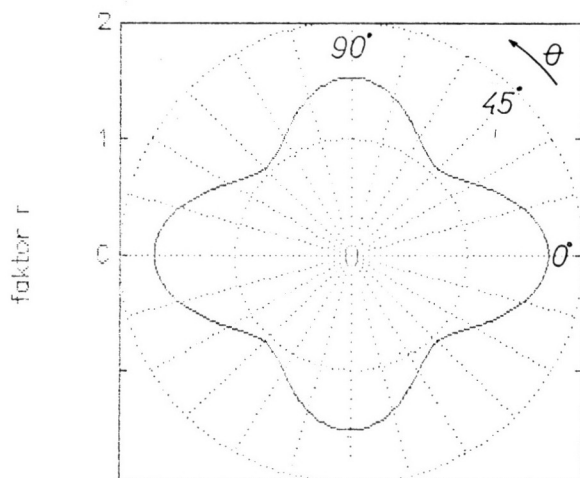
Средњи фактор пластичне анизотропије ( $r$ ) у равни танке траке дебљине 0,5 mm опада са порастом степена деформације једноосним затезањем при чему се креће у интервалу  $r = 2,3 - 1,3$  (Слика 13). Пад је нешто интензивнији за подручје деформације до  $\epsilon_1 = 0,1$ .

Фактор раванске пластичне анизотропије ( $\Delta r$ ) такође опада са порастом степена деформације једноосним затезањем, при чему је просјечна вриједност за интервал деформације  $\epsilon_1 > 0,1$  једнака  $\Delta r = 0,5$ . Позитивна вриједност  $\Delta r$  указује да се при дубоком извлачењу може очекивати формирање симетричних неравнина по ободу чашице у правцима 0° и 90°. Овај став је доказ дубоким извлачењем чашице уз формирање симетричних неравнина по њеном ободу у правцима 0° и 90° при чему је висина износила 0,66 mm.



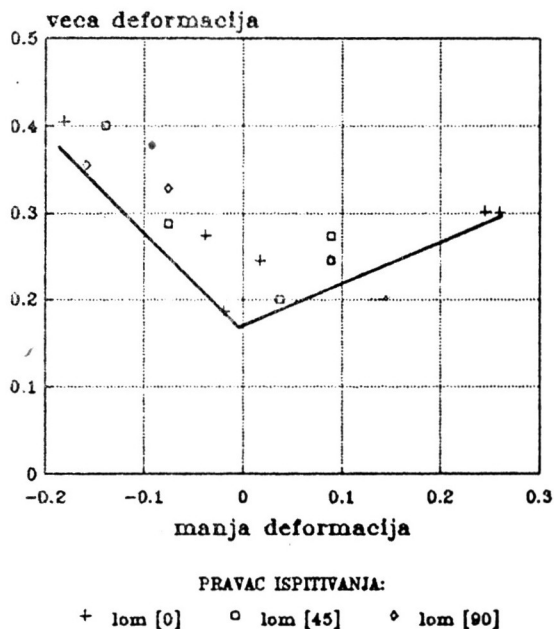
Слика 4. - Зависности фактора иласичне анизотропије од степена деформације једноосним затезањем и правца испитивања

Fig 4. - Relation between the strain anisotropy ratio and  $\epsilon_1$  and the direction of investigation, (sheet of 0,5 mm thickness)



Слика 5. - Зависности фактора  $r$  од угла испитивања по ј-т 5

Fig. 5. Factor  $r$  as a function of the angle of investigation by eq. 5 ( $\epsilon_1 = 0,15$ )

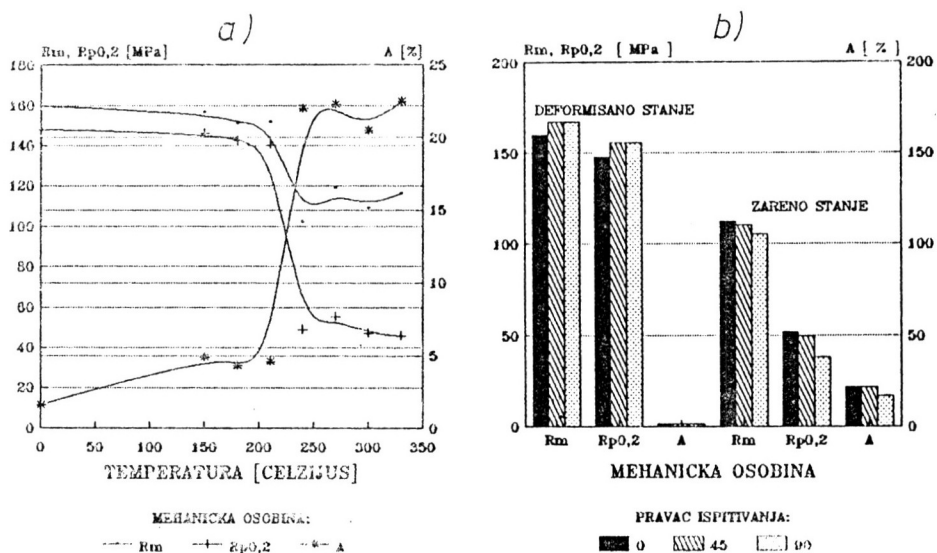


Слика 6. - Дијаграм граничних деформација за траку дебљине 0,5 mm

Fig. 6. - Forming limit diagram of thin sheet of 0,5 mm thickness

Дијаграм граничних деформација танке траке дебљине 0,5 mm представљена је на Слици 6. Уочава се праволинијска међузависност главних деформација  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  у равни танке траке и у лијевој и у десној страни дијаграма. У подручју двоосног затезања максимална комбинација главних деформација остварена је са стандардном геометријом за испитивање по „ERICSEN”-у и износи  $\varepsilon_1=0,3$  и  $\varepsilon_2=0,25$ , при чему је већа деформација усмјерена у правцу ваљања. У лијевом дијелу дијаграма, за подручје једноосног затезања, максимална комбинација главних деформација у равни танке траке износи  $\varepsilon_1=0,4$  и  $\varepsilon_2=-0,182$ , уз напомену да је измјерена на узорцима у правцу ваљања. Минимална комбинација деформација постигнута је у подручју чистог једноосног затезања ( $\varepsilon_2=0$ ), гдје је већа деформација  $\varepsilon_1=0,173$ .

Танка трака дебљине 0,22 mm у деформисаном стању се карактерише порастом вриједности механичких особина (затезне чврстоће  $R_m$ , границе течења  $R_{p0,2}$  и укупног релативног издужења  $A$ ) са порастом угла испитивања у њеној равни, од  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , Слика 7b.



Слика 7. - а) Зависности механичких особина од температуре загревања за траку траку дебљине 0,22 mm (време загревања 1 сат)

б) Анизотропија механичких особина у деформисаном и жареном стању

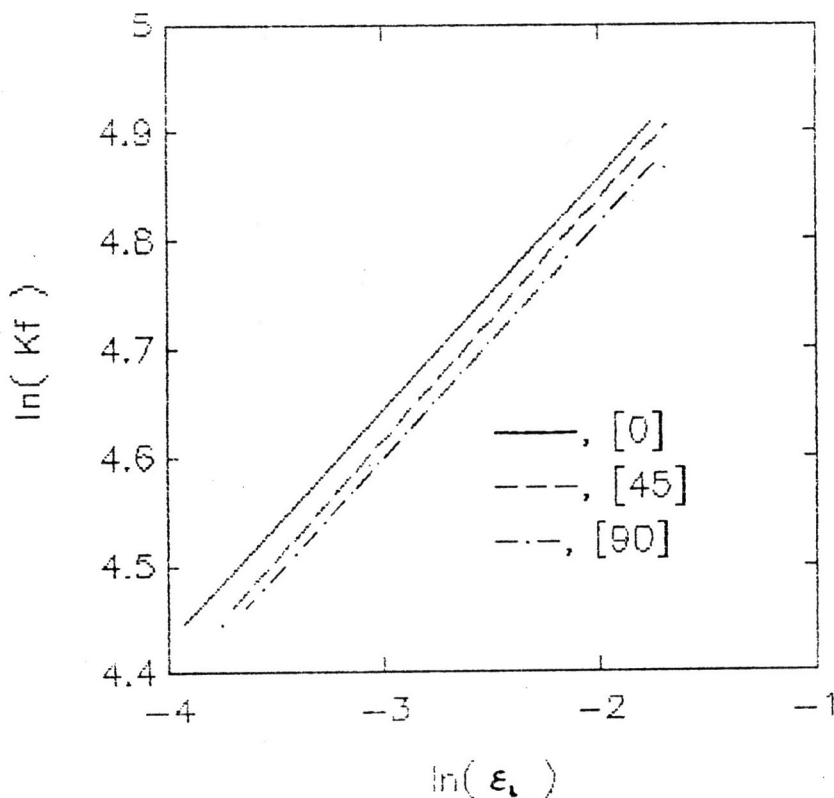
Fig. 7. - а) Relation between the temperature of annealing and the mechanical properties

б) Anisotropy of the mechanical properties (hardened and annealed state)

Са порастом температуре загревања (Слика 7а) мијењају се механичке особине, при чему се примарна рекристализација завршава при температури 240°C/1<sup>h</sup>. Са даљим порастом температуре механичке особине се задржавају на приближно истим нивоима. Даља испитивања пластичности и отпора деформацији вршена су на узорцима у меком стању ожареним по режиму 240°C/1<sup>h</sup>.

Ова трака у меко жареном стању се карактерише падом затезне чврстоће, укупног релативног издужења и границе течења са порастом угла испитивања у равни, од 0° до 90°.



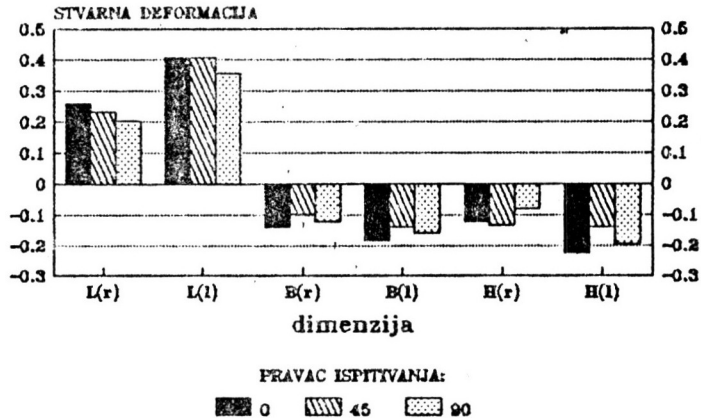


Слика 8. - Зависноћ сиварног напона од сиварне деформације једноосним затезањем и правца испитивања

Fig. 8. - Relation between  $\ln(Kf)$  and  $\ln(\epsilon_t)$  in three directions of investigation (sheet of 0,22 mm thickness)

Фактор деформационог ојачавања ( $n$ ) је приближно једнак за сва три правца, при чему износи 0.2146, 0.2216 и 0.214 респективно, Сликe 8, 14, уз напомену да су ово средње вриједности за сав испитивани интервал деформације једноосним затезањем. Коefицијент чврстоће ( $K$ ) опада са порастом угла испитивања, при чему за правце  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  износи 197.729, 196.448 и 188.5946 МПа респективно.

Резултати испитивања деформација дужине, ширине и дебљине на мјестима локализације пластичне деформације и хомогене пластичне деформације на епруветама од траке дебљине 0,22 mm подвргнутих једноосном затезању до лома представљени су на Слици 9.



(l) - područje loma  
(r) - područje homogene def.  
L - duž; B - šir; H - deblj.

Слика 9. - Зависности деформација дужине, ширине и дебљине од правца испитивања на мјесту лоба и ван њега

Fig.9. -Relation between  $\epsilon_l$ ,  $\epsilon_b$ ,  $\epsilon_h$  and direction of investigation on the necking and out of necking. (thin sheet of 0,5 mm thickness)

Деформација дужине за подручје хомогене пластичне деформације највећа је за правац  $45^\circ$ . На мјесту локализације пластичне деформације, деформација дужине опада са порастом угла од  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , при чему су, без обзира на правац испитивања, вриједности на мјесту лоба веће за око 50% у односу на мјеста ван овог подручја.

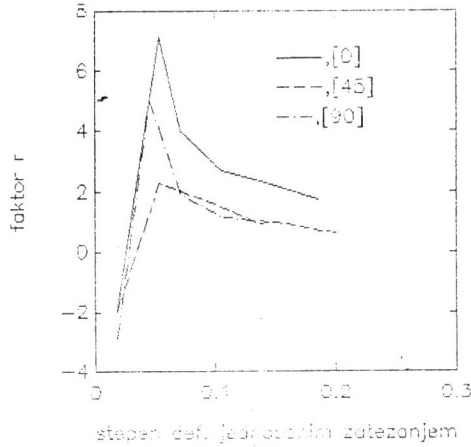
Деформација ширине у подручју хомогене пластичне деформације највећа је за правац  $0^\circ$ , док је за остала два правца на приближно истом нивоу. На мјесту лоба деформација ширине за правац  $45^\circ$  је иста као у подручју хомогене пластичне деформације. За остала два правца деформације ширине су веће за око 15-20% у односу на подручје хомогене пластичне деформације.

Деформација дебљине је за оба подручја деформације највећа за правац  $45^\circ$ . На мјесту лоба су вриједности веће за око 50-100% у односу на мјеста ван подручја лоба зависно од правца испитивања.

Упоредјујући међусобно деформације дужине, ширине и дебљине, узимајући у обзир закон о сталности запремине при пластичној деформацији може се, за подручје максимално остварене хомогене пластичне деформације, рећи следеће:

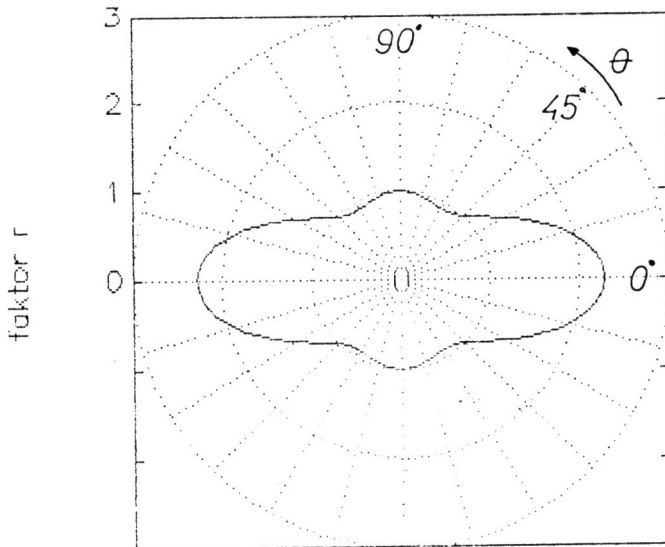
- деформација дужине у условима једноосног затезања за правац ваљања се у већем степену остварује на рачун смањења ширине него

дебљине. Удјели деформација ширине и дебљине у деформацији дужине износе 65% и 35% респективно;



Слика 10. - Зависноћ фактора еластичне енизотропије од степена деформације једноосним затезањем и правца испитивања

Fig. 10. - Relation between the strain anisotropy ratio  $r$  and  $\epsilon_1$  and the direction of investigation (sheet of 0,5 mm thickness)



Слика 11. - Зависноћа фактора  $r$  од угла испитивања по ј-м 5

Fig. 11. - Factor  $r$  as a function of the angle of investigation by eq. 5 ( $\epsilon_1=0,15$ )

- деформација дужине у условима једноосног затезања за правац  $45^\circ$  се у већем степену остварује на рачун смањена дебљине него ширине. Удјели деформација ширине и дебљине у деформацији дужине износе 38% и 62% респективно;

- деформација дужине у условима једноосног затезања за правац  $90^\circ$  се подједнако остварује на рачун смањења ширине и дебљине. Удјели деформација ширине и дебљине у деформацији дужине износе 50% и 50% респективно.

Зависност фактора пластичне анизотропије ( $r$ ) од степена деформације једноосним затезањем и правца испитивања представљена је на Слици 10. У почетном дијелу деформације, фактор  $r$  расте за сва три правца, при чему достиже максимум а затим опада. За степене деформације  $\varepsilon_1 > 0,05$  фактор  $r$  је највећи за правац  $0^\circ$ , а најмањи за правац  $90^\circ$ , при чему је вриједност за правац  $45^\circ$  блиска вриједности за правац  $90^\circ$ .

Узимајући у обзир да су за правце  $0^\circ$  и  $90^\circ$  вриједности  $r \geq 1$ , може се рећи да су примарни системи клизања, за ова два правца у равни танке траке, повољније усмјерени за клизање по њеној ширини него по дебљини. За правац  $45^\circ$ , до  $\varepsilon_1 < 0,1$ , фактор  $r > 1$  док је за  $\varepsilon_1 > 0,1$  фактор  $r \cong 1$  што значи да су примарни системи, при већим степенима деформације нешто повољније оријентисани за клизање по дебљини него по ширини танке траке.

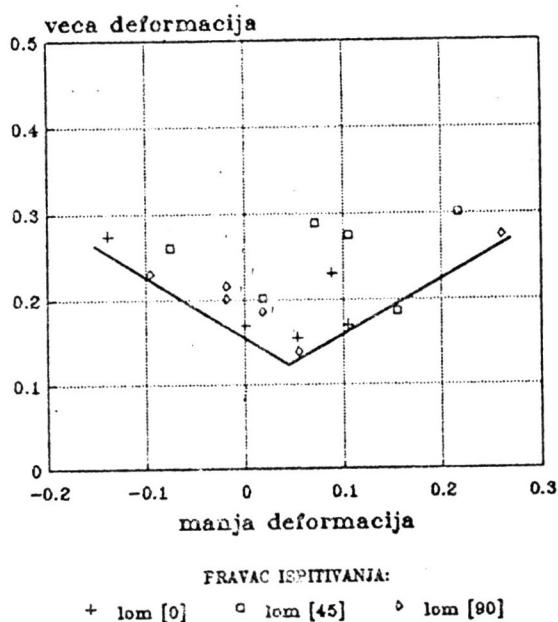
Зависност фактора пластичне анизотропије у равни танке траке дебљине 0,22 mm од угла у односу на правац ваљања по једначини 5 представљена је на Слици 11.

Средњи фактор пластичне анизотропије ( $r$ ) у равни танке траке дебљине 0,22 mm опада са порастом степена деформације једноосним затезањем а креће се у интервалу  $r=3,3-1,3$  (Слика 13).

Фактор раванске пластичне анизотропије ( $\Delta r$ ) такође опада са порастом степена деформације једноосним затезањем, при чему је просјечна вриједност за интервал деформације  $\varepsilon_1 > 0,1$  једнака  $\Delta r = 0,7$ . Позитивна вриједност  $\Delta r$  указује да се при дубоком извлачењу може очекивати формирање симетричних неравнина по ободу чашице у правцима  $0^\circ$  и  $90^\circ$  које су нешто веће у односу на траку дебљине 0,5mm ( $\Delta r_{0,22} > \Delta r_{0,5}$ ). Овај став је доказан дубоким извлачењем, чашице уз формирање симетричних неравнина по њеном ободу у правцима  $0^\circ$  и  $90^\circ$ , при чему им је висина износила 2 mm.

Дијаграм граничних деформација танке траке дебљине 0,5mm представљен је на Слици 12. Уочава се праволинијска међузависност главних деформација  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  у равни танке траке и у лијевој у десној страни дијаграма. У подручју двоосног затезања максимална комбинација главних деформација остварена је са стандардном

геометријом за испитивање по „ERICSEN”-у и износи  $\epsilon_1=0,28$  и  $\epsilon_2=0,26$  при чему је већа деформација усмјерена у правцу  $90^\circ$ . У лијевом дијелу дијаграма, за подручје једноосног затезања, максимална комбинација главних деформација у равни танке траке износи  $\epsilon_1=0,28$  и  $\epsilon_2=-0,14$ , уз напомену да је измјерена на узорцима у правцу ваљања. Минимална комбинација деформација постигнута је у подручју близу чистог једноосног затезања ( $\epsilon_2=0$ ) гдје је већа деформација  $\epsilon_1=0,127$  а  $\epsilon_2=0,044$ .

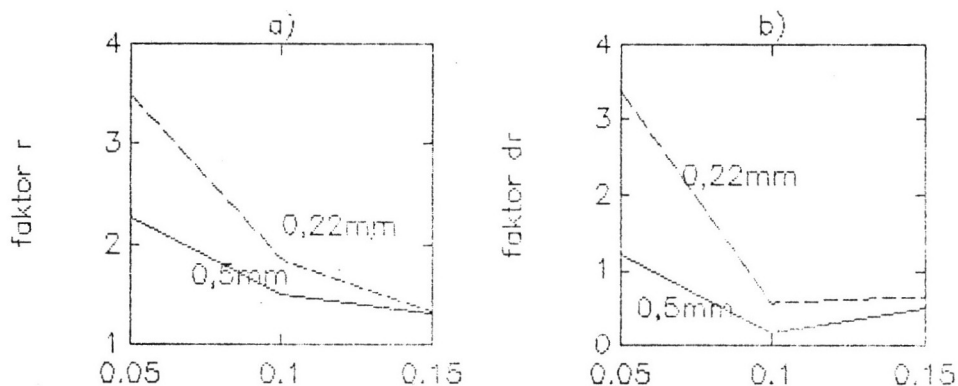


Слика 12. - Дијаграм граничних деформација за танку траку дебљине 0,22 mm

Fig. 12. - Forming limit diagram (thin sheet of 0,22 mm thickness)

Укупно посматрано, у поређењу са легурама сличне намјене, испитивана легура показује висок степен способности за деформацију у меко жареном стању.

Средњи фактор пластичне анизотропије, као један од главних показатеља способности за обраду дубоким извлачењем, за сав испитивани интервал деформације једноосним затезањем већи је од јединице, Слика 13.а. Важно је указати на чињеницу да фактор  $r$  зависи од примјењеног степена деформације, при чему опада са порастом  $\epsilon_1$  али уз задржавање вриједности веће од 1,3.

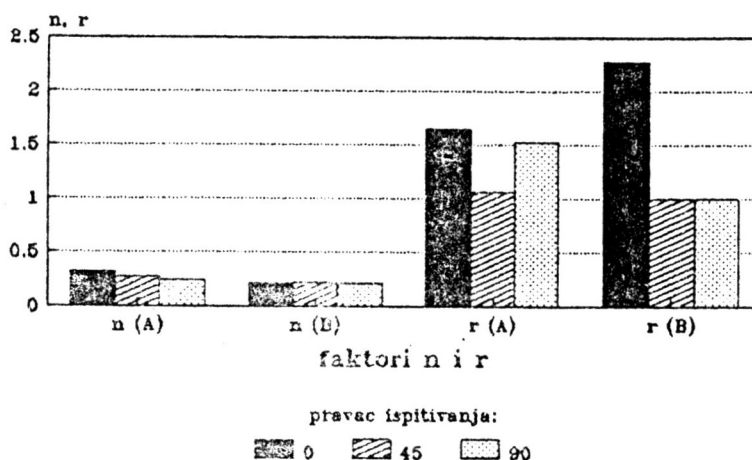


Слика 13. - Зависности фактора  $\bar{r}$  (a) и  $\Delta r$  (б) од степена деформације једносним затезањем

Fig. 13. - Factor  $r$  (a) and  $\Delta r$  (b) as a function of  $\varepsilon_1$

Вриједности фактора пластичне анизотропије (1,3-3,3) довољно говоре о квалитету легуре када се упореде са мишљењем (8,9) да Al-легуре са вриједношћу  $r=0,6-0,8$  посједују добру способност за обликовање дубоким извлачењем.

Селективна анализа вриједности фактора  $r$  (за исти степен деформације од  $\varepsilon_1=0,15$ ) у равни обје траке, Слика 14, указује на различиту оријентацију кристалне структуре и, наравно, њену зависност од претходног термомеханичког режима. Упоредна анализа ових вриједности са вриједностима раванске пластичне анизотропије ( $\Delta r=f(\varepsilon_1)$ , на Слици 13б.) указује на формирање нешто већих симетричних неравнина при дубоком извлачењу чашице од траке дебљине 0,22mm.



(A)-traka debljine 0,5mm  
 (B)-traka debljine 0,22mm  
 faktor  $r$  za  $\epsilon_l=0.15$

Слика 14. - Зависности фактора  $n$  и  $r$  од правца испитивања и претходног термомеханичког режима

Fig. 14. - Factor  $n$  and  $r$  as a function of the angle of investigation and the previous thermomechanical treatment

На сличан начин се може говорити и о фактору деформационог ојачавања. Присутне су различите вриједности фактора  $n$  у равни танких трака, при чему законитости промјене зависе од претходног термомеханичког режима, Слика 14. Вриједности фактора  $n$  се крећу од 0,21 до 0,31, зависно од дебљине и правца испитивања, што опет, узимајући у обзир став да се фактор  $n$  за Al и његове легуре креће у интервалу од 0,05 до 0,3<sup>(10)</sup>, довољно афирмативно говори о испитиваној легури.

## ЗАКЉУЧАК

На основу изведених истраживања могу се систематизовати следећи закључци:

У деформисаном стању, без обзира на претходни степен хладне деформације, оријентација структуре је таква да обезбјеђује пораст стандардних механичких особина ( $R_m$ ,  $R_{p_{0,2}}$  и  $A$ ) са порастом угла у равни танке траке од  $0^\circ$  и  $90^\circ$ ;

У жареном стању,  $R_m$ ,  $R_{p_{0,2}}$  и  $A$  опадају са порастом угла у равни танке траке од  $0^\circ$  до  $90^\circ$  (уз изузетак  $R_{p_{0,2}}$  за дебљину 0,5 mm). Упоређујући нивое постигнутих вриједности ( $R_m = 104-110$  МПа;  $R_{p_{0,2}} = 45-48$  МПа;  $A = 20-30\%$ ) са вриједностима за технички алуминијум ( $R_m \geq 64$  МПа);  $R_{p_{0,2}} = 2,5$  МПа;  $A = 5-35\%$ ) и легуру АА3003 ( $R_m = 100-140$  МПа;  $R_{p_{0,2}} = 35$  МПа;  $A = 10-25\%$ ) уочава се: већи ниво показатеља отпора деформацији за скоро 60% и исте вриједности показатеља пластичности у односу на технички алуминијум; исте вриједности показатеља отпора деформацији и 50-90% (зависно од дебљине) већи показатељи пластичности у односу на легуру АА3003;

Фактор деформационог ојачавања ( $n$ ) у меко жареном стању за дебљину 0,5 mm благо опада са порастом угла од  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , док је за дебљину 0,22 mm на приближно истом нивоу за сва три правца испитивања. Вриједности фактора  $n$  су зависно од дебљине и правца испитивања у интервалу  $n = 0,21-0,31$ ;

Фактори пластичне анизотропије ( $r, \bar{r}, \Delta r$ ) зависе, поред термомеханичког режима, од степена деформације једноосним затезањем, при чему углавном опадају са порастом  $\epsilon_1$ . За траку дебљине 0,5 mm фактор  $r$  је најмањи за правац  $45^\circ$ , док су вриједности за остала два правца на приближно истом нивоу. За траку дебљине 0,22 mm фактор  $r$  је највећи за правац  $0^\circ$ , док су вриједности за остала два правца на приближно истом нивоу. Средњи фактор пластичне анизотропије ( $\bar{r}$ ) као један од главних показатеља способности за обраду дубоким извлачењем је за сав испитивани интервал деформације већи од јединице. Упоређење постигнутих вриједности ( $r-1,3-3,3$ ) са ставом да А1-легури са вриједношћу  $r=0,6-0,8$  поседују добру способност за обраду дубоким извлачењем довољно говори о квалитету легуре АА8011;

Дубоким извлачењем чашица од обје дебљине формирају се симетричне неравнине у правцима  $0^\circ$  и  $90^\circ$  при чему су за траку дебљине 0,22 mm нешто веће, што је у складу са вриједностима за  $\Delta r$ .

Постоји праволинијска међузависност главних деформација у равни танких трака и у лијевом и у десном дијелу дијаграма граничних



деформација. Крива која одваја подручје хомогене деформације од подручја појаве лома се налази на већем ниову за танку траку дебљине 0,5 mm што је, уосталом, забиљежено и за остале показатеље пластичности и отпора деформацији. Минималне комбинације остварених деформација налазе се у подручју чистог једноосног затезања ( $\varepsilon_2=0$ ).

## ЛИТЕРАТУРА

1. G o m e z H. et. al. (1988) „Development of Alloy 8011 fo Substitution of othe Alloy 300DDQ in the Fabrication of Semirigid Containers<sup>2</sup>, The Metallurgical Society Inc., USA; pg. 341-347.
2. H e d y n a G., (1989) „Utilization of Alloy 8011 for the Fabrication of Fin Stock“, The Metallurgical Society Inc, USA p.g. 735-737.
3. F e r r a t J.M. (1989) Aluminium in Rigid, Smirigid and Flexible Packaging“, Mateiaux et Techniques, Mai-Juin p. 259-268.
4. G r i f f i n P. (1989) „Manufacture of Light Gauge Aluminium Foils“, Alu Ind. v.8, oct/nov. pg. 21-23.
5. Z i n n a N. (1987) „I laminatia di alluminio e delle leghe leggere. Caratteristiche ed impieghi“, Lamiera 11/1987, p.100-111.
6. H u f n a g e i W. (1988) „Aluminium-Taschenbuch“, Aaluminium Zentrale. Dusseldorf.
7. D r i p k e M. et. al (1979): Senkrechte Anisotropie r un Verfestigung sexponent n., Bander Bleche Rohre 7-1979, p 286-291.
8. F a l k e n s t e i n H.P. (1980) „Formability of Aluminium Alloys for Deep and Stretch Forming Parts“, Memoires Scientifiques Revue Metallurgie, 77, 3, pg. 383-389.
9. F a l k e n s t e i n g H.P. „Proizvodnja lima i trake od aluminijuma“, VAW Vereinigte Aluminium-Werke AG, Bonn, Deutschland.
10. C o n s t a n t i n V. (1972) „Verfahren Ermittlung der Anisotropie-Konzzahlen fur die Beurteilung des Tiefziehverhaltens Kohlenstoffarmer Feinbleche“, Materialpruf. 14/1972. No 6, VDI-Verlags.

*Svetozar Blečić and Kemal Delijić \**

DEVELOPMENT OF AA8011 ALLOY FOR SUBSTITUTION OF  
AA1100 AND AA3003 FOR FABRICATION OF PACKAGING

S u m m a r y

The alloy of AA8011 is a result of investigation with intention to substitute of AA1100 and better mechanical and structural properties of final products.

This paper shows the results of investigation of forming properties of thin sheets of AA8011 alloy. The uniaxial tensile tests were carried out to identify uniform elongation, work hardening exponent, strain rate anisotropy and deformation on the necking. The influence of uniaxial strain ratio on strain anisotropy ratio has been investigated, with note that relatively high level of the strain anisotropy ratio was obtained (1.3.-3.3). The stretch forming and deep drawing tests were also used with analyzing of the deformation in plane of sheets and earring behavior. The forming limit diagrams for thin sheets of 0,5 and 0,22 mm thickness were constructed.

Furthermore the dependence of the tensile strength, yield stress, strain anisotropy ratio, work hardening exponent and forming limits of the direction of investigation are discussed.