

MECHANICKÉ VLASTNOSTI PERSPEKTÍVNYCH ZLIATIN MG

MECHANICAL PROPERTIES OF ADVANCED MG ALLOYS

Článok popisuje mechanické vlastnosti Mg zliatin, ktoré boli určené pri izbovej teplote a tečení. Deformačné mechanizmy sú diskutované

1. Úvod

Automobilový priemysel prejavuje rastúci záujem o horčíkové zliatiny ako o konštrukčný materiál, ktorý zníži hmotnosť automobilu a zníži spotrebu pohonných hmôt, a tým aj emisií. Uplatnenie nájdú aj v leteckom priemysle a v komunikáciách. Očakáva sa, že tieto zliatiny budú hrať významnú úlohu, pretože majú nízku hustotu a vysoké tlmenie zvuku. Na druhej strane ich nevýhodou je, že majú nízku pevnosť a menšiu odolnosť proti tečeniu. Odolnosť proti tečeniu možno zlepšiť zmenením mikroštruktúry, vyššou čistotou zložiek zliatiny a legovaním niektorými prvkami napr. vápnikom a prvkami vzácnych zemín [1]. Pri zlepšovaní mechanických vlastností je dôležité pochopiť mechanizmy určujúce medzu sklzu a deformačné spevnenie. Spevnenie tuhého roztoku, precipitačné a disperzné spevnenie ovplyvňujú medzu sklzu. Jej hodnota závisí od veľkosti zrna a môže byť vyjadrená známym Hallovým-Petchovým vzťahom. Je všeobecne známe, že existuje vzťah medzi mikroštruktúrou a medzou sklzu. V tomto článku chceme informovať o mechanických vlastnostiach perspektívnych horčíkových zliatin a uviesť základné mechanizmy, ktoré ovplyvňujú ich pevnosť. Najčastejšie používané zliatiny vychádzajú zo systémov Mg-Al a Mg-Zn.

2. Mechanické vlastnosti

Zliatiny typu Mg-Al-Zn (séria AZ), Mg-Al-Mn (séria AM), Mg-Al-Si (séria AS), Mg-Al-RE (séria AE, kde RE znamená prvok vzácnej zeminy, najčastejšie Nd), Mg-Zn-Cu (séria ZC) a Mg-Zn-RE (séria ZE) sa používajú veľmi často a ich mechanické vlastnosti boli skúmané pri rôznych teplotách. Deformačné mechanizmy zatiaľ nie sú úplne známe.

2.1 Pevnosť v ťahu

Mechanické vlastnosti horčíkových zliatin sú ovplyvnené hlavne legujúcimi prvkami. Hodnoty pre dohovorenu medzu sklzu

This paper describes the tensile strength of Mg alloys determined at room temperature and creep. The deformation mechanisms are discussed.

1. Introduction

The automotive industry has shown a growing interest in magnesium alloys as a structural material that may manufacture cars, reduce fuel consumption, and exhaust emissions. Fields of application are also in the aviation and communication industry. Magnesium alloys are promising materials because of their low density and high damping. It is expected that they will play a significant role. On the other hand, magnesium alloys exhibit low strength and low resistance to corrosion. Microstructure refinement, a higher purity of alloy components and some additional solute atoms are some possibilities to improve the corrosion resistance. It has been demonstrated that the additions of rare earth elements and calcium have resulted in an improvement in the corrosion resistance of Mg alloys [1]. In order to improve the mechanical properties it is important to understand the deformation mechanisms of yielding and work hardening. The yield stress is influenced by solid solution hardening, precipitation and/or dispersion strengthening. The yield stress increases also with decreasing grain size. A finer grain size may contribute significantly to the strength. The grain size dependency of the yield stress and tensile strength can be expressed by using the Hall - Petch relationship. It is well known that there is a close relation between the yield stress and the microstructure. The most common alloy systems have been developed in the Mg-Al and Mg-Zn systems. The aim of this paper is to provide information on tensile properties of some advanced Mg alloys and to present the fundamental mechanisms affecting the strength of the alloys.

2. Tensile properties

Mg-Al-Zn (series AZ), Mg-Al-Mn (series AM), Mg-Al-Si (series AS) and Mg-Al-RE (series AE, RE means rare earth element, usually Nd) are used very often and their mechanical properties were investigated at various temperatures.

* Prof. RNDr. Pavel Lukáč, DrSc., D.h.c., Prof. RNDr. Zuzanka Trojanová, DrSc., Prof. Ing. Peter Palček, CSc.
Department of Metal Physics, Charles University, Ke Karlovu 5, 121 16 Praha 2, ČR
Department of Materials Engineering, University of Žilina, Veľký diel, 010 26 Žilina, SR

(R_p 0,2 definovanú ako napätie, pri ktorom trvalá deformácia dosiahne 0,2 %), konvenčnú medzu pevnosti (R_m) a ťažnosť sú uvedené v tab. 1 pre izbovú teplotu. Súčasne je v nej uvedené aj nominálne chemické zloženie v hm.%. Zliatina AZ91 sa v mnohých prípadoch pripravuje z veľmi čistých komponentov. Z toho dôvodu potom AZ91 obsahuje veľmi malé množstvo Fe a Ni, a tým sa zvyšuje odolnosť voči korózii. Medza sklzu a medza pevnosti zliatiny AZ91 klesajú s rastúcou teplotou. Až do teploty okolo 100 °C pokles je mierny, ale nad 100 až 130 °C je tento pokles veľmi výrazný. Ťažnosť sa s rastúcou teplotou zvyšuje. Zatiaľ čo pri izbovej teplote je 7 %, pri 100 °C je 13 % a pri 150 °C je až 23 % [2]. Podobné teplotné závislosti medze sklzu, medze pevnosti a ťažnosti sa pozorujú aj pre zliatiny AE42. Je vhodné však poznamenať, že pre teploty nad 100 °C deformácia zodpovedajúca medzi pevnosti zliatiny AE42 sa s rastúcou teplotou zvyšuje, ale v zliatine AZ91 s rastúcou teplotou klesá. Deformačné krivky zliatiny AE42 sa vyznačujú značným deformačným spevnením, pokiaľ sú deformované pri teplotách do 150 °C [2]. V zliatine AZ91 sa pozoruje intenzívne dynamické zotavenie už pri deformovaní vzorky pri teplotách nad 100 °C. Tento efekt je vidieť aj na obr. 1 pre vzorky deformované jednoosovým tlakom.

Rozdielne deformačné správanie oboch zliatin sa môže vysvetliť vplyvom mikroštruktúry a dislokačnej subštruktúry na spevňujúce procesy. Precipitáty (β - $Mg_{17}Al_{12}$) sú umiestené vo forme lamiel predovšetkým na hraniciach zŕn. Pri teplote okolo 413 °C sa celá alebo časť fázy $Mg_{17}Al_{12}$ rozpustí. S rastúcou teplotou nastáva jej postupné rozpúšťanie už od izbovej teploty.

2.1 Tensile strength

The mechanical properties of magnesium alloys vary significantly with alloying elements. The yield stress (YS, defined as the stress required for a plastic strain of 0.2 %), the ultimate tensile strength (UTS) and the % elongation at fracture (A) for some Mg alloys estimated at room temperature are presented in Tab. 1. In the same table, the nominal composition of alloys is given in wt %. In many cases the AZ91 series is prepared from very pure components containing very small contents of Fe and Ni solutes. It then exhibits a higher corrosion resistance. The yield stress and tensile strength of the alloys introduced in Tab. 1 decrease with increasing temperature. Up to about 100 °C the decrease in the tensile properties is slow, and above 100 to 130 °C, the yield stress and the tensile strength decrease rapidly with temperature. Elongation to fracture increases with increasing temperature.

While elongation to fracture at room temperature is 7 %, it reaches 13 % at 100 °C and 23 % at 150 °C [2]. Similar temperature dependencies of the yield stress, tensile strength and elongation to the fracture are also observed for the AE42 alloy. However, it is noteworthy that the strain (elongation) at which the ultimate tensile strength is reached increases with increasing temperature for the AE42 alloy, whereas that for AZ91 decreases with a temperature above 100 °C.

The flow stress - strain curves of AE42 alloy show a significant work (strain) hardening at temperatures up to 150 °C [2], whereas dynamic recovery is observed for specimens of AZ91 deformed at

Základné mechanické vlastnosti niektorých Mg zliatin pri izbovej teplote
Tensile properties of some Mg alloys at room temperature

Tab. 1.
Tab. 1

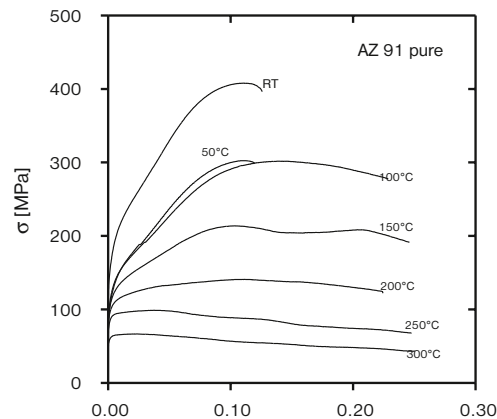
Zliatina	Al	Zn	Mn	Si	RE	Cu	R_p 0,2 [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
	Al	Zn	Mn	Si	RE	Cu	YS/MPa	UTS/MPa	A/%
AZ91	9.2	0.7	0.2				150	250	7
AM20	2.0	0.01	0.5	0.01			90	215	19
AM50	4.8	0.01	0.3	0.01			120	230	15
AM60	5.8	0.01	0.3	0.01			130	250	14
AS21	2.0	0.20	0.2	1.0			125	225	15
AS41	4.5	0.20	0.2	1.0			130	250	15
AE42	3.8		0.2		2.5		130	230	12
ZC63		6.0	0.2			2.7	125	210	4.0
ZE41		4.2			1.2		104	205	3.5

Teplotné závislosti medze pevnosti pre AM60, AS41 a AE42 sú veľmi podobné. Hodnoty medze pevnosti týchto zliatin sú nižšie ako má zliatina AZ91. Teplotné závislosti medze sklzu pre zliatiny AZ91, AM20, AM60, AS41 a AE42 sú podobné; pritom hodnota medze sklzu zliatiny AZ91 je najvyššia. Z experimentálnych výsledkov vyplýva, že ťažnosť sa zvyšuje s rastúcou teplotou. Zliatina AZ91 má vysokú pevnosť a vysokú odolnosť proti korózii, ale má malú ťažnosť. Zliatiny serie AM majú strednú pevnosť, ale dobrú plasticitu a relatívne vysokú ťažnosť. Zliatiny série AS a AE môžu byť odporúčané pre aplikáciu pri vyšších teplotách.

temperatures above 100 °C, as can be seen in Fig. 1. The specimens of AZ91 were deformed in compression tests at various temperatures. Different deformation behaviours of both alloys may be accounted for by the influence of the microstructure and dislocation substructure on the hardening processes. The main precipitates are β - $Mg_{17}Al_{12}$ particles situated mainly at grain boundaries. Annealing at temperatures around 413 °C will cause all or part of the $Mg_{17}Al_{12}$ phase to dissolve. The temperature variations of the tensile strength for AM60, AS41 and AE42 are very similar. The values of the tensile strength of these alloys are

Precipitáty $Mg_{17}Al_{12}$ prítomné v zliatine AZ91 spôsobujú krehkosť tohoto materiálu. Precipitáty sú prekážkami pre pohyb dislokácií, voľná dráha dislokácií je malá, a z toho dôvodu je aj ťažnosť nízka. V zliatinách série AM je obsah atómov Al nízky, a preto aj objemový podiel častíc $Mg_{17}Al_{12}$ je v týchto zliatinách nižší než v AZ91. To potom znamená, že hustota

prekážok pre pohyb dislokácií je nižšia, a preto je medza sklzu aj medza pevnosti zliatin série AM nižšia ako v zliatine AZ91; ťažnosť je zasa vyššia. Je známe, že Mn s Al tvoria intermetallikum, ktoré eliminuje voľné Fe atómy, a tým sa zlepšuje odolnosť proti korózii. V poslednej dobe sa začínajú používať horčíkové zliatiny, ktoré obsahujú prvky vzácnych zemín a tiež atómy Zr. Tieto zliatiny majú vysoké hodnoty medze sklzu a medze pevnosti. Hodnoty pevnosti namerané pri izbovej teplote pre niektoré zliatiny sú uvedené v tab. 2. Tieto zliatiny majú vysoké hodnoty medze sklzu a medze pevnosti až do teplôt 250 °C a vysokú odolnosť proti tečeniu (creepu).



Obr. 1. Závislosť napätia od deformácie v tlaku
Figure 1: Stress strain curves in compression.

lower than those for AZ91 alloy. The temperature dependencies of the yield stress for AZ91, AM20, AM60, AS41 and AE42 alloys are similar, but the value of the yield stress of the AZ91 is the highest one. The experiment results show that the values of elongation to fracture increase with increasing temperature. Alloy AZ91 exhibits high strength and high corrosion resistance but only low elongation. The AM series show moderate strength but good plasticity; the values of elongation to fracture are relatively high. Alloys of AS and AE series may be recommended for high temperature applications. As mentioned above, the $Mg_{17}Al_{12}$ precipitates are present in alloy AZ91. These precipitates that cause that material is brittle. Precipitates are obstacles for dislocation motion. That means the free path of

the dislocations is low. Therefore, the total strain to fracture is also low. In alloys of AM series, the content of Al atoms is low and the volume fraction of $Mg_{17}Al_{12}$ particles in these alloys is much lower than in the AZ91 alloy. This means that the density of obstacles for the dislocation motion is lower. This causes the yield stresses and tensile strengths of AM series alloys to be lower and the elongation to fracture to be higher than in the AZ91 alloy. It is known that Mn with Al forms an intermetallic compound that eliminate free Fe atoms and hence, corrosion resistance of magnesium alloys is improved. Recently, magnesium alloys containing rare earth metals have been used. These alloys also contain Zr atoms and have high values of the yield stress and tensile strength as can be seen from Tab. 2 where the values are introduced.

Mechanické vlastnosti niektorých zliatin Mg pri izbovej teplote
Tensile properties of some Mg alloys at room temperature

Tab. 2.
Tab. 2

Zliatina	Zr	Zn	RE	Ag	Y	R_p 0,2 [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
	Al	Zn	Re	Ag	Y	YS/MPa	UTS/MPa	A/%
EZ33	0.6	2.7	3.3			110	160	2
QE22	0.7		2.1	2.5		195	260	3
WE43	0.7		3.4		4.0	165	250	2
WE54	0.7		3.0		5.2	170	250	2

2.2 Tečenie (creep)

Rýchlosť ustáleného tečenia môže byť vyjadrená nasledujúcou rovnicou:

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

kde A je konštanta, σ je vonkajšie (pôsobiace) napätie, n je napäťový exponent, R je plynová konštanta, Q je aktivačná energia tečenia a T je absolútna teplota. Rýchlosť tečenia závisí od mikroštruktúry, hlavne od veľkosti zrna. Z výsledkov, ktoré publikovali Aune a Westengen [2,3] môžeme usúdiť, že rýchlosť tečenia zliatin AZ91, AS21 a AS41 pri 100 °C a napätí 50 MPa je veľmi

These alloys exhibit high values of the yield stress as well as tensile strength up to 250 °C and a high creep resistance.

2.2 Creep behaviour

It has been found that the steady state creep rate of magnesium alloys may be expressed by the following equation

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

where A is a constant, σ is the applied stress, n is the stress exponent, R is the gas constant, Q is the activation energy of creep

nízka, prakticky pre všetky tri zliatiny rovnaká okolo $1.2 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$. Rýchlosti tečenia pre tie isté zliatiny pri teplote $150 \text{ }^\circ\text{C}$ a napätí 50 MPa sú však už veľmi rôzne. Najnižšie rýchlosti pri $150 \text{ }^\circ\text{C}$ boli namerané pre zliatiny AS21 a AE42, ktoré sú vhodné pre použitie pri vyšších teplotách, pretože majú vysokú odolnosť proti tečeniu. Ako uviedli Aune a Westengen [3] zliatiny AS41 a AE42 testované pri $200 \text{ }^\circ\text{C}$ a napätí 30 MPa majú väčšiu odolnosť proti tečeniu ako zliatiny AZ91 a AE41. Najlepšie vlastnosti pri tečení zo všetkých hore uvedených zliatin má AE42. Aj z tohoto stručného prehľadu je jasný vplyv Nd. Napäťový exponent v niektorých prípadoch nemá konštantnú hodnotu, inokedy má zas vysokú hodnotu a aktivačná energia tečenia má hodnotu blízku energie samodifúzie. Takéto správanie je možné vysvetliť tak, že sa použije predpoklad o existencii prahového napätia σ_0 . Potom do rovnice pre tečenia sa miesto vonkajšieho napätia zavedie výraz $\sigma - \sigma_0$. Rovnicu pre ustálené tečenie je potom možné vyjadriť v tvare, ktorý navrhli Sherby a kol. [4].

3. Diskusia

Ak chceme pripraviť materiál s požadovanými mechanickými vlastnosťami, je veľmi dôležité poznať tie mechanizmy, ktoré určujú medzu sklzu a deformačné spevnenie. Podľa von Misesovho kritéria [5] musí byť činných minimálne 5 nezávislých sklzových systémov, aby sa polykryštál deformoval. V monokryštáloch horčíka, ktorý má hexagonálnu štruktúru, sa deformačia uskutočňuje v bazálnom systéme. Počet nezávislých sklzových systémov tohto druhu je menší ako požadovaných 5. Z toho dôvodu je nutné, aby boli aktivované iné (kryštalograficky iné) sklzové systémy, alebo aby deformačný mód bolo dvojčatenie. Pyramidálny sklzový systém druhého druhu je jeden z dôležitých nebazálnych sklzových systémov. Je vhodné uviesť, že kritické sklzové napätie pre pyramidálny sklzový systém má anomálnu závislosť od teploty [6,7]. Kritické sklzové napätie prudko klesá v intervale deformačných teplôt od 77 do 270 K a potom toto napätie rastie s rastúcou teplotou v intervale od 270 do 375 K . Pre deformačné teploty nad 375 K kritické sklzové napätie znovu klesá s klesajúcou teplotou. Kritické sklzové napätie pre bazálny sklzový systém závisí od koncentrácie rozpustenej zložky c. Pre substitučný tuhý roztok platí rovnica:

$$\tau = ZG\varepsilon_L^{4/3}c^{2/3} + \tau_0, \quad (2)$$

kde Z je konštanta, G je modul pružnosti v šmyku, ε_L je parameter, ktorý závisí od rozdielu atómových polomerov atómu matrice a atómu rozpustenej zložky a od väzby medzi týmito atómami, a τ_0 je kritické sklzové napätie pre čistý horčík [8]. Koncentračná závislosť kritického sklzového napätia pre prizmatický sklzový systém (nebazálny sklzový systém) sa nedá popísať rovnicou (2); táto závislosť je zložitejšia a pre niektoré tuhé roztoky môže byť rôzna v rôznych teplotných intervaloch. V niektorých koncentračných oboroch kritické sklzové napätie pre prizmatický sklz klesá s rastúcou koncentráciou rozpustenej zložky.

Dvojčatenie je významným deformačným módom v hexagonálnych kovoch. Chun a kol. [9] zistili, že deformačné dvojčatenie

and T is the absolute temperature. The creep rate depends on the microstructure, especially on grain size. From the results published by Aune and Westengen [2,3] we can conclude that the creep rate of AZ91, AS21 and AS41 alloys crept at $100 \text{ }^\circ\text{C}$ under 50 MPa is very low, about $1.2 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$, and practically the same for all three alloys. The creep rates for the same alloys crept at $150 \text{ }^\circ\text{C}$ also at 50 MPa are very different. The lowest creep rates at $150 \text{ }^\circ\text{C}$ were observed for AS21 and AE42 alloys that are suitable for high temperature applications because of their high creep resistance. Aune and Westengen [3] have reported that AS41 and AE42 alloys tested at $200 \text{ }^\circ\text{C}$ under 30 MPa show improved creep resistance compared to AZ91 and AE41. Alloy AE42 shows the best creep properties of all these alloys. The influence of RE is obvious. In some cases the stress exponent has a high value s and the creep activation energies have values that are higher than the energy for the self-diffusion of magnesium. It may be possible to explain this behaviour if the concept of a threshold stress σ_0 is introduced. Then, the applied stress should be replaced by $\sigma - \sigma_0$ and the equation for the steady state creep rate should be expressed as proposed by Sherby et al. [4].

3. Discussion

In order to prepare materials with the needed mechanical properties it is very important to know the mechanisms determining yielding (the yield stress) and strain hardening. According to R. von Mises [5] more than 5 independent slip systems must be operated for polycrystals to deform. In magnesium with the hexagonal crystal structure deformation occurs in basal slip system. The number of these independent slip systems is lower than the requirement. It is necessary that another slip system is activated or deformation occurs by twinning. If an additional slip system is activated then deformation becomes easier. The secondary pyramidal slip system as one of the non-basal slip systems is important. It should be noted that the critical resolved shear stress for the pyramidal slip system exhibits an anomalous dependence on temperature [6,7]. The critical resolved shear stress decreases strongly when the testing temperature increases from 77 to 270 K and then it increases with increasing temperature between 270 and 375 K . For testing temperatures higher than 375 K , the critical resolved shear stress decreases again with increasing temperature. The critical resolved shear stress for basal slip in Mg increases with increasing solute concentration c according to the equation

$$\tau = ZG\varepsilon_L^{4/3}c^{2/3} + \tau_0, \quad (2)$$

where Z is a constant, G is the shear modulus, ε_L is the parameter that depends on the radius difference between host and solute atoms and on the binding among atoms, and τ_0 is the critical resolved shear stress for pure Mg [8]. The concentration dependence of the critical resolved stress for prismatic slip (non-basal slip system) is complex and is different for various temperatures. In some concentration range the critical resolved shear stress for prismatic slip decreases with addition of solute atoms.

v zliatine Mg-5.1hm% Zn môže byť potlačené, keď sú v zliatine prítomné precipitáty.

Pri deformácii hexagonálnych polykryštálov očakávame aktivitu nielen bazálneho sklzového systému, ale aj nebazálneho sklzového systému. Aktivita ktoréhokoľvek nebazálneho systému je oveľa ľahšia pri vyšších teplotách. Hodnoty medze sklzu aj medze pevnosti budú potom ovplyvnené činnosťou nebazálnych sklzových systémov. Je jasné, že v zliatinách začiatok deformácie je ovplyvnený atómami rozpustenej zložky. Je zrejme, že koncentračná a teplotná závislosť medze sklzu by mohla byť ovplyvnená zložitou závislosťou činnosti nebazálneho sklzového systému od teploty a koncentrácie atómov rozpustenej zložky. Hranice zŕn (a textúra) a precipitáty budú mať silný vplyv na deformačný mechanizmus polykryštálov ako funkcia teploty. Deformačné napätie klesá s klesajúcou teplotou, keď zrno je veľké a textúra je vhodná pre dvojčatenie.

4. Záver

Zmeny v mikroštruktúre horčíkových zliatin, ktoré vzniknú pri príprave a tepelnom spracovaní, podstatne ovplyvňujú mechanické vlastnosti týchto materiálov. Pevnosť horčíkových zliatin môže byť zvýšená spevnením tuhého roztoku, precipitačným a disperzným spevnením a tiež veľkosťou zrna. Legujúce prvky môžu rôznym spôsobom ovplyvniť kritické sklzové napätie pre bazálny aj nebazálny sklzový systém. Toto má silný vplyv na spevnenie. Nie je možné odvodiť jednoduché pravidlo, ktoré by popisovalo vplyv koncentrácie atómov rozpustených zložiek na medzu sklzu. Zatiaľ nie je jasné, ako určiť podiel viacerých spevňujúcich mechanizmov, ktoré prebiehajú súčasne.

Podakovanie - Za finančnú podporu ďakujeme Grantovej agentúre Českej republiky (grant č. 106/99/1717). P. L. a Z. T. ďakujú tiež DFG, Nemecko.

Literatúra

- [1] NUSSBAUM, G. N.- SAINFORT, P.- REGAZZONI, G.- GJESTLAND, H.: Scripta Metall. 23, 1989, s. 1079.
- [2] AUNE, T. Kr.- WESTENGEN, H.: SAE Technical Paper 950424, Detroit 1995.
- [3] AUNE, T. Kr.- WESTENGEN, H.: Magnesium Alloys and Their Applications. Red.: Mordike, B.L., Hehmann, F. DGM Informationsgesellschaft, Oberursel 1992, s. 221.
- [4] SHERBY, O. D.- KLUNDT, R. H.- MILLER, A. K.: Metall. Trans. 8A, 1977, 843.
- [5] MISES von, R.: Z. Angew. Math. Mech. 8, 1928, 161.
- [6] STOHR, J. F.- POIRIER, J.: Phil. Mag. 25, 1972, 1313.
- [7] OBARA, T.- YOSHINAGA, H.- MOROZUMI, S.: Acta Metall. 21, 1973, 845.
- [8] LUKÁČ, P.: Phys. Stat. Solidi (a) 131, 1992, 377.
- [9] CHUN, J. S.- BYRNE, J. G.- BORNEMANN, A.: Phil. Mag. 20, 1969, 291.

Recenzenti: L. Kunz, P. Skočovský

Twinning is a significant mode of deformation in hexagonal metals. Chun et al. [9] showed that deformation twinning can be suppressed in Mg-5.1wt % Zn alloy by the presence of precipitates.

In polycrystals we expect not only the activity basal slip system but also non-basal slip system. The activity of any non-basal slip system is easier at a higher temperature. The value of the yield stress and hardening may be affected by the activity of non-basal slip systems. In alloys, the yield is influenced by solute atoms. However, the concentration and temperature dependence of the yield stress could be influenced by complex variations of non-basal slip with concentration of solutes and temperature. In polycrystals, grain size (and texture) as well as precipitates, strongly influence the deformation mechanism as a function of temperature. The flow stress decreases with decreasing temperature when grain size is large and the texture is suitable for twinning.

4. Conclusion

Changes in the microstructure of magnesium alloys due to processing as well as heat treatment influence significantly the mechanical properties of these materials. The strength of alloys can be improved with a suitable combination of solid solution hardening, precipitation and dispersion strengthening, and grain size. However, solute atoms may affect the critical resolved shear stress of basal slip in different manner than the critical stress for a non-basal slip system. This is a very strong effect in the strengthening. It is impossible to deduce simple rules describing the influence of solutes and temperature on the yield stress. Up to now it is not clear how to treat the effects of several strengthening mechanisms operating simultaneously.

Acknowledgments - Financial support of the Grant Agency of the Czech Republic under Grant 106/99/1717 is acknowledged. P.L. and Z.T. thank also DFG, Germany

References

- [1] NUSSBAUM, G. N.- SAINFORT, P.- REGAZZONI, G.- GJESTLAND, H.: Scripta Metall. 23, 1989, s. 1079.
- [2] AUNE, T. Kr.- WESTENGEN, H.: SAE Technical Paper 950424, Detroit 1995.
- [3] AUNE, T. Kr.- WESTENGEN, H.: Magnesium Alloys and Their Applications. Red.: Mordike, B.L., Hehmann, F. DGM Informationsgesellschaft, Oberursel 1992, s. 221.
- [4] SHERBY, O. D.- KLUNDT, R. H.- MILLER, A. K.: Metall. Trans. 8A, 1977, 843.
- [5] MISES von, R.: Z. Angew. Math. Mech. 8, 1928, 161.
- [6] STOHR, J. F.- POIRIER, J.: Phil. Mag. 25, 1972, 1313.
- [7] OBARA, T.- YOSHINAGA, H.- MOROZUMI, S.: Acta Metall. 21, 1973, 845.
- [8] LUKÁČ, P.: Phys. Stat. Solidi (a) 131, 1992, 377.
- [9] CHUN, J. S.- BYRNE, J. G.- BORNEMANN, A.: Phil. Mag. 20, 1969, 291.

Reviewed by: L. Kunz, P. Skočovský