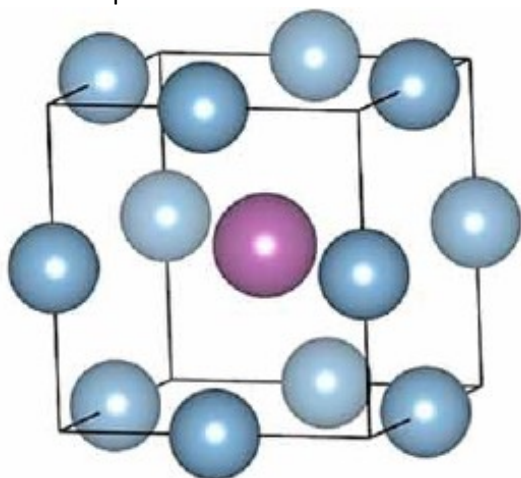


# Výzkum vlastností lehkých vytvrditelných slitin na bázi Al-Sc-Zr a Al-Er-Zr

## 1. Úvod do problematiky

Hliníkové slitiny obsahující malé množství ( 0.4 – 0.8 wt.%) skandia (Sc) vykazují výborné mechanické vlastnosti při pokojové teplotě i při zvýšených teplotách [1,2]. Je to způsobeno koherentními částicemi fáze  $Al_3Sc$  s kubickou  $L1_2$  strukturou, které způsobují výrazné precipitační zpevnění a mají vynikající teplotní stabilitu [3,4].

Ternární příměsi v systému Al-Sc umožňují dále zlepšit mechanické vlastnosti zvýšením pevnosti matrice (např. Mg [5]) nebo částečným nahrazením Sc v  $Al_3Sc$  precipitátech, jako např. Zr [6]. Difúze Zr v Al matrici je podstatně pomalejší než difúze atomů Sc [7]. Přidání Zr proto zlepšuje teplotní stabilitu slitin a posouvá rekrystalizaci do vyšších teplot. Atomy Zr vedou ke snížení mřížkové konstanty Al matrice a vytvářejí určitou přechodovou vrstvu mezi precipitáty  $Al_3Sc$  a matricí [8,9], která snižuje elastické napětí na rozhraní precipitátu a matrice [10]. To ale snižuje elastickou interakci s dislokacemi při skluzu a vede to k nižší odolnosti slitin vůči tečení [11,12].



**Obr. 1** Struktura  $Al_3Sc$  fáze. Modré atomy jsou Al, fialový atom je Sc.

Ideální ternární příměs k systému Al-Sc by měla mít relativně vysokou rozpustnost v Al matrici, nízkou difuzivitu a měla by na rozdíl od Zr zvyšovat mřížový parametr. Těmto požadavkům vyhovují některé prvky vzácných zemin, které mají větší atomový poloměr než Sc a vykazují dostatečnou rozpustnost v Al matrici klesající s teplotou, což umožňuje dosáhnout precipitačního vytvrzení. Údaje o difúzi vzácných zemin v Al matrici nejsou k dispozici, ale lze

očekávat, že bude pomalejší než atomů Sc [7]. Jako velmi slibná ternární příměs k Al-Sc slitinám splňující výše uvedené požadavky se jeví Er. Bylo již prokázáno, že přidání 0.3 at.% Er ke slitině Al-0.3 at.% Sc vede k určitému zvýšení pevnosti v tahu [13]. Ale zatím chybí informace o vlivu Er na precipitační vytvrzení a na formování částic fáze  $Al_3Sc$ . Pokud by docházelo k alespoň částečnému nahrazování atomů Sc v částicích  $Al_3Sc$  atomy Er, umožnilo by přidání Er snížit obsah extrémně drahého Sc a tím významně snížit cenu slitin při zachování vynikajících mechanických vlastností.

## 2. Cíl projektu

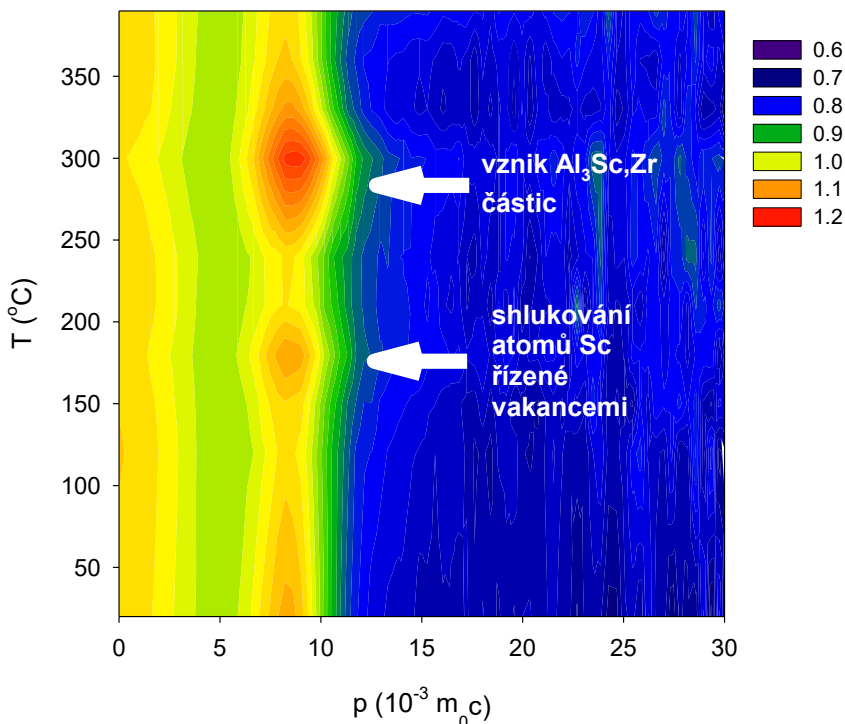
V rámci tohoto studentského projektu bude prozkoumáno precipitační vytvrzení tří perspektivních slitin na bázi Al-Sc(Er)-Zr. Chemické složení zkoumaných slitin je uvedeno v tabulce I. Hlavním účelem tohoto výzkumu je zjistit jaký vliv má nahrazení skandia erbiem na mechanické vlastnosti a precipitační vytvrzení slitin.

**Tabulka I** Chemické složení studovaných slitin. Koncentrace jednotlivých příměsí jsou uvedené v hmotnostních procentech.

slitina	Sc	Er	Zr	Mn	Al

### 3. Postup řešení časový plán

Projekt bude realizován na katedře fyziky nízkých teplot v laboratoři pozitronové anihilační spektroskopie. Slitiny Al-Sc-Zr, Al-Er-Zr, Al-Er-Mn-Zr se složením uvedeným v tabulce I již byly odlity a jsou k dispozici pro výzkum plánovaný v tomto projektu. Precipitační vytvrzení bude studováno pomocí měření mikrotvrlosti na zařízení Duramin 5 (Struers). Precipitační procesy vyžadují difúzi atomů příměsí, která je řízena bodovými poruchami krystalické mřížky - vakancemi. Výzkum precipitačního vytvrzení bude doplněn charakterizací mikrostruktury pomocí pozitronové anihilační spektroskopie (PAS) [14,15], která umožňuje studium vakancí a jejich interakce s atomy příměsí na atomární úrovni. Měření dob života pozitronů umožňuje charakterizovat typ poruch krystalické mřížky a zjistit jejich koncentraci. Koincidenční měření Dopplerovského měření anihilačního píku přináší informaci o lokálním chemickém okolí poruch. Tato metoda umožňuje identifikovat typ atomů vytvářejících precipitáty. atomy, které charakterizovat Měření dob života pozitronů bude prováděno na digitálním spektrometru [16] s časovým rozlišením 145 ps, koincidenční měření Dopplerovského rozšíření bude realizováno na spektrometru [17] vybaveném dvěma HPGe detektory s energetickým rozlišením 0.9 keV na energii 511 keV.



**Obr. 2** Precipitační procesy ve slitině Al-1.4Mn-0.25Sc-0.05Zr charakterizované pomocí koincidenčního měření Dopplerovského rozšíření anihilačního píku [18]. Z výsledků je zřetelně vidět shlukování atomů Sc v teplotním intervalu 150-200°C následované vznikem částic fáze Al<sub>3</sub>Sc,Zr při vyšších teplotách v intervalu 250-350°C.

Řešení projektu bude probíhat v následujících krocích:

1. Příprava vzorků slitin Al-Sc-Zr, Al-Er-Zr, Al-Er-Mn-Zr pro měření mikrotvrlosti a PAS.
2. Homogenizace vzorků slitin Al-Sc-Zr, Al-Er-Zr, Al-Er-Mn-Zr. Nalezení vhodného režimu rozpouštěcího žíhání. Vzorky slitin budou izotermicky žíhány na různých teplotách v rozmezí 500-600°C a bude sledován vývoj mikrotvrlosti. Na základě tohoto měření bude nalezen režim rozpouštěcího žíhání (teplota, čas) vedoucí rozpuštění příměsí v Al matici.
3. Charakterizace mikrostruktury slitin po rozpouštěcím žíhání. Pomocí PAS bude provedena charakterizace vakancí zakalených ve slitinách po rozpouštěcím žíhání a jejich interakce s atomy příměsí.
4. Výzkum precipitačního vytvrzení při izochronní žíhání slitin. Bude sledován vývoj mikrotvrlosti v homogenizovaných slitinách podrobených izochronnímu žíhání. Vybrané stavy slitin budou prozkoumány pomocí PAS. Pro každou slitinu bude nalezena teplota, při které dochází k maximálnímu precipitačnímu vytvrzení vlivem částic fáze Al<sub>3</sub>(Sc,Er,Zr). Bude porovnáno precipitační vytvrzení ve slitinách obsahujících Sc a Er.
5. Vyhodnocení výsledků o vlivu Er na precipitační zpevnění ve slitinách na bázi Al-Sc(Er)-Zr.

#### 4. Očekávané výstupy projektu

Navrhovaný projekt přinese cenné výsledky pro vývoj lehkých hliníkových vytvrditelných slitin. Konkrétně porovnáním precipitačního vytvrzení slitin obsahujících Sc a Er ověří možnost použití Er jako perspektivní příměsi v Al-Sc-Zr slitinách a možnost úplné nebo částečné substituce skandia erbiem. Výsledky získané v tomto projektu budou publikovány ve významném mezinárodním odborném časopise.

#### 5. Literatura

- [1] L.S. Toropova, *Advanced Aluminum Alloys Containing Scandium: Structure and Properties*, Taylor&Francis, Amsterdam, 1998.
- [2] J. Royset, N. Ryum, *Int. Mater. Rev.* 50 (2005) 19.
- [3] E.A. Marquis, D.N. Seidman, *Acta Mater.* 49 (2001) 1909.
- [4] S. Iwamura, Y. Miura, *Acta Mater.* 52 (2004) 591.
- [5] E.A. Marquis, D.N. Seidman, D.C. Dunand, *Acta Mater.* 51 (2003) 4751.
- [6] C.B. Fuller, J.L. Murray, D.N. Seidman, *Acta Mater.* 53 (2005) 5401.
- [7] S.I. Fujikawa, *Defect Diffus. Forum* 143 (1997) 115.
- [8] M. Vlach, I. Stulíková, B. Smola, T. Kekule, H. Kudrnová, S. Daniš, R. Gemma, V. Očenášek, J. Málek, D. Tanprayoon, V. Neubert, *Mater. Charact.* 86 (2013) 59.
- [9] M. Vlach, J. Čížek, O. Melikhova, I. Stulíková, B. Smola, T. Kekule, H. Kudrnová, R. Gemma, V. Neubert, *Metal. Mater. Trans. A* 46 (2015) 1556.
- [10] Y. Harada, D.C. Dunand, *Mater. Sci. Eng. A* 329 (2002) 686.
- [11] M.E. van Dalen, D.C. Dunand, D.N. Seidman, *Acta Mater.* 53 (2005) 4225.
- [12] E.A. Marquis, D.C. Dunand, *Scripta Mater.* 47 (2002) 503.
- [13] R.R. Sawtell, J.J.W. Morris, *Exploratory Alloy Development in the System Al-Sc-X*, in: Y.-W. Kim, W.M. Griffith (Eds.), *Dispersion Strengthened Aluminum Alloys*, TMS, Warrendale, PA, 1988, pp. 409–420.
- [14] P. Hautojärvi, P. Hautojärvi (Ed.), *Positrons in Solids*, Springer-Verlag, Berlin, 1979, pp. 1–24.
- [15] J. Čížek, *Mater. Sci. Technology* 34 (2018) 577.
- [16] F. Bečvář, J. Čížek, I. Procházka, J. Janotová, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 539 (2005) 372.
- [17] J. Čížek, M. Vlček, I. Procházka, *Nucl. Inst. Methods Phys. Res. A* 623 (2010) 982.
- [18] M. Vlach, J. Čížek, O. Melikhova, I. Stulíková, B. Smola, T. Kekule, H. Kudrnová, R. Gemma, V. Neubert, *Metal. Mater. Trans. A* 46 (2015) 1556.