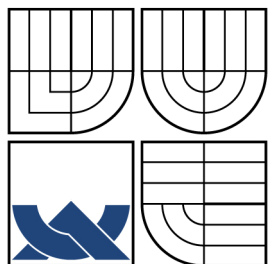


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**LETECKÝ ÚSTAV**

**FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING**

**NOVÉ SLITINY HLINÍKU V KONSTRUKCI LETADEL**  
**NEW ALUMINIUM ALLOYS IN AIRCRAFT STRUCTURES**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE**  
**AUTHOR**

**JAN PRZECZEK**

**VEDOUČÍ PRÁCE**  
**SUPERVISOR**

**doc. Ing. JOSEF KLEMENT, CSc.**

**BRNO 2008**

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá nově vyvinutými tvářenými slitinami hliníku určenými pro aplikace v leteckém průmyslu. Úkolem práce je porovnat v současnosti používané letecké hliníkové slitiny s klasickými a naznačit směr vývoje v této oblasti. Porovnání je zaměřeno především na vylepšení mechanických popřípadě technologických vlastností slitin.

## **Anotation**

This bachelor work was disposed and deals with summary of newly used aluminium alloys, which are designed for forming in aerospace industry. The task of that work is compare used today aircraft aluminium alloys with conventional alloys and indicate direction of progress in this field. The comparison is particularly target to improvement of mechanical or eventually technological properties of these alloys.

## **Klíčová slova**

letectví, hliníkové slitiny, vývoj, mechanické vlastnosti  
aviation, aluminium alloys, development, mechanical properties

## **Bibliografická citace mé práce**

PRZECZEK, J. *Nové slitiny hliníku v konstrukci letadel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 46 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Josef Klement, CSc.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že tato bakalářská práce je mým dílem, které jsem vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce pana doc. Ing. Josefa Klementa, CSc.. Veškerá literatura a další zdroje, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použitých zdrojů.

Brno, 2008

.....

## **Poděkování**

Za účinnou podporu a obětavou pomoc, cenné připomínky a rady při zpracování bakalářské práce tímto děkuji vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Josefu Klementovi, CSc..  
Dále bych rád poděkoval svým rodičům za aktivní podporu při studiu na vysoké škole.

## Obsah

1	Úvod.....	7
1.1	Směry vývoje tvářených Al slitin v letectví.....	7
2	Slitiny soustavy Al – Cu – Mg.....	9
2.1	Stručný popis slitin soustavy Al – Cu – Mg.....	9
2.2	Vývoj v oblasti slitin soustavy Al – Cu – Mg.....	9
2.3	Vybrané slitiny soustavy Al – Cu – Mg.....	11
3	Slitiny soustavy Al – Cu – Li.....	16
3.1	Stručný popis slitin soustavy Al – Cu – Li.....	16
3.2	Vývoj v oblasti slitin soustavy Al – Cu – Li.....	17
3.3	Vybrané slitiny soustavy Al – Cu – Li.....	19
4	Slitiny soustavy Al – Mg – Si.....	25
4.1	Stručný popis slitin soustavy Al – Mg – Si.....	25
4.2	Vývoj v oblasti slitin soustavy Al – Mg – Si.....	25
4.3	Vybrané slitiny soustavy Al – Mg – Si.....	25
5	Slitiny soustavy Al – Zn – Mg.....	29
5.1	Stručný popis slitin soustavy Al – Zn – Mg.....	29
5.2	Vývoj v oblasti slitin soustavy Al – Zn – Mg.....	29
5.3	Vybrané slitiny soustavy Al – Zn – Mg.....	29
6	Slitiny Al – Sc.....	40
6.1	Vliv skandia na vlastnosti.....	41
6.1.1	Vliv na mechanické vlastnosti.....	41
6.1.2	Vliv na superplasticitu.....	41
6.1.3	Vliv na svařitelnost.....	42
6.2	Použití slitin hliníku se skandiem v leteckém průmyslu.....	43
	Závěr.....	44
	Seznam použitých zdrojů.....	45
	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	46

# 1 Úvod

Tato bakalářská práce se zaměřuje výhradně na tepelně vytvrditelné hliníkové slitiny, tudíž jsou zde zmiňovány vybrané slitiny ze skupin 2xxx, 6xxx, 7xxx a případně 8xxx, přičemž největší důraz je kladen na slitiny hliníku s lithiem a hliníku se skandiem, které lze podle obsahů Li a Sc do těchto skupin zařadit. Tyto slitiny se používají pro tzv. primární konstrukce letadel, tzn. pro nosné konstrukce, které jsou výrazně mechanicky nebo tepelně zatížené.

## 1.1 Směr vývoje tvářených Al slitin v letectví

Současný letecký průmysl má na své dodavatele materiálu v podstatě dva základní požadavky. Na jedné straně to jsou nová materiálová řešení, která vedou k velkým finančním úsporám při konstrukci současných letounů. Na straně druhé však požaduje, aby nové koncepty a materiály byly schopny čelit požadavkům, které budou kladeny v letecké dopravě po celé 21. století.

Hlavním směrem úspory výrobních nákladů je nahrazení montovaných konstrukčních celků takzvanými celistvými nebo také monolitními konstrukcemi. Montované konstrukce se skládají z velkého množství tvářených plechů a protlačovaných nebo obráběných částí, které jsou snýtovány nebo spojeny jiným způsobem (lepení apod.). Naproti tomu monolitní konstrukce nahrazují funkci všech těchto částí v jednom celku, s výhodou snížení hmotnosti a úspory výrobních nákladů, a to díky nižšímu počtu spojovacích dílů a součástí. Zjednodušené uskladňování a převoz jsou dalšími výhodami tohoto řešení. Zároveň samotná výroba takové monolitní konstrukce je cenově výhodnější a to z důvodu vysoko rychlostních frézovacích center s otáčkami až 25000 za minutu a vysokou rychlostí posuvu, které se používají pro obrábění vysoce pevných Al slitin. Hlavním úkolem pro dodavatele materiálu je to, aby zajistili, že volba materiálů nijak neomezí vlastnosti monolitních konstrukcí v porovnání s konstrukcemi montovanými.

Existuje velké množství nových materiálů jako jsou rychle ztuhlé a mechanicky legované slitiny vyráběné práškovou metalurgií (tzv. P/M slitiny), kovy a polymery vyztužené souvislými a nesouvislými vlákny a konstrukční lamináty. Většina nových materiálů má zpočátku omezený úspěch v začlenění do letecké výroby kvůli nákladům na výrobu, odborné kvalifikaci a certifikaci a možnostem modifikace existující výrobní infrastruktury. Ačkoli jsou dnes čím dál více používány především kompozity s polymerní matricí, jako např. pro směrovku u Airbusu A310 nebo horizontální stabilizátory na A340 a B777 aj., hliníkové slitiny zůstávají i nadále hlavním konstrukčním materiálem pro draky většiny dopravních letadel. Vylepšené Al slitiny měly mnohem snazší cestu prosadit se než ostatní již zmiňované moderní materiály a to především kvůli poměrně nízkým nákladům na výrobu a údržbu a díky využití již existující výrobní infrastruktury. V Tab.1 je přehled vybraných vztahů mezi mikrostrukturou a vlastnostmi Al slitin.

Jsou známy nové metalurgické postupy maximalizace mechanických vlastností Al slitin, které však doposud nebyly zavedeny do praxe. Například nečistoty jako Fe a Si vytvářejí hrubé složky v Al slitinách řady 2xxx, 7xxx a 8xxx, které vedou k nižší lomové houževnatosti a mají nepříznivý účinek jak na iniciaci únavové trhliny, tak na odolnost proti jejímu růstu. Hrubé primární fáze vznikající při překročení mezní rozpustnosti při teplotě rozpouštěcího ohřevu mají stejný nebo podobný efekt. Z toho plyne, že nízké obsahy Fe a Si, dobrá znalost fázových diagramů a přísné kontroly chemického složení vedou k produkci slitin s dobrým poměrem pevnosti, lomové houževnatosti a odolnosti proti růstu únavové trhliny. Bohužel náklady na zavádění těchto nových postupů jsou veliké a otázka ceny je proto velice často limitujícím faktorem při jejich uvedení do praxe. [6, 7]

*Tab.1 Vztahy mezi vlastnostmi a mikrostrukturou u hliníkových slitin*

<b>Mechanické vlastnosti</b>	<b>Požadované vlastnosti mikrostruktury</b>
Pevnost	Jemnozrnná s rovnoměrným rozložením malých a tvrdých částic
Tažnost a houževnatost	Jemnozrnná s čistými hranicemi zrn a bez velkých částic nebo precipitátů schopných skluzu
Odolnost proti creepu	Tepelně stálé částice uvnitř matrice a na hranicích zrn
Odolnost proti vzniku únavové trhliny	Jemnozrnná bez částic schopných skluzu a bez povrchových vad
Odolnost proti šíření únavové trhliny	Hrubozrnná s částicemi schopnými skluzu bez anodické fáze nebo zachyceného vodíku
Pitting (důlková koroze)	Bez anodické fáze
Praskání vlivem koroze pod napětím a vodíková křehkost	Tvrdá částice bez anodické fáze nebo vzájemně propojeného zachyceného vodíku



## 2 Slitiny soustavy Al – Cu – Mg

skupina 2xxx – hlavním přísadovým prvkem je měď (Cu) [1]

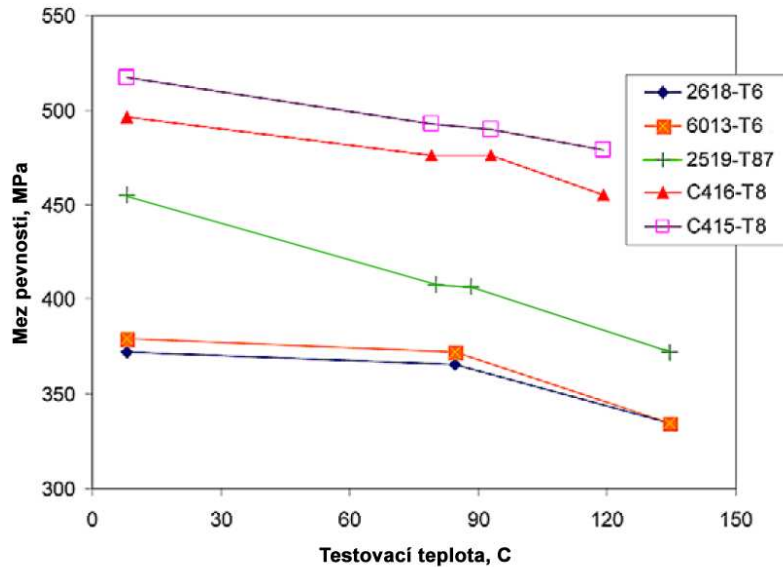
Druhá číslice je vyjádřením modifikace slitiny. Nula symbolizuje slitinu v základním stavu, hodnoty 1 až 9 potom udávají jednotlivé modifikace základní slitiny. [1]

### 2.1 Stručný popis slitin soustavy Al – Cu – Mg

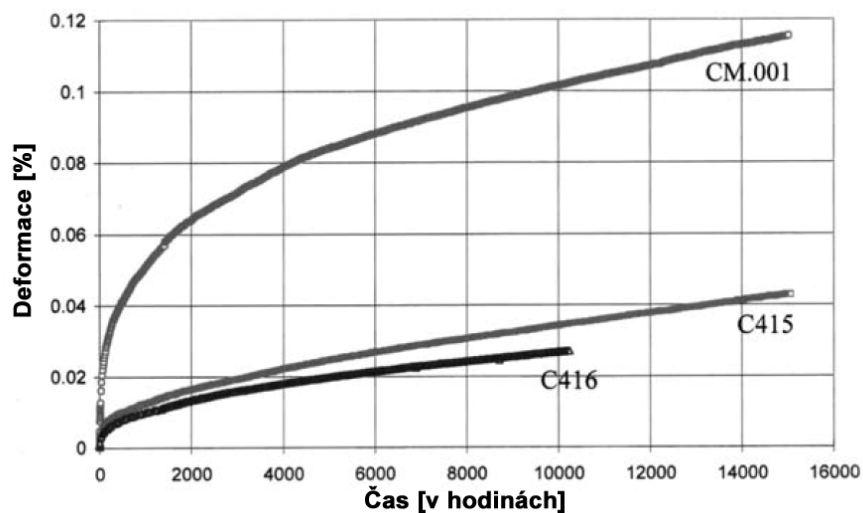
Většina slitin této soustavy se vyznačuje poměrně vysokou pevností dosahovanou tzv. vytvrzováním. Prvkem podmiňujícím účinné vytvrzení hliníkových slitin je Cu, částečně také Mg. Příklad Mn přispívá ke zjemnění zrna. Jako příměs je přítomno Fe, případně Si, který však v některých slitinách může být přísadou. Největší použití v leteckém průmyslu mají již po mnoho desetiletí duraly 2017 ( $AlCu_4Mg$ ) a 2024 ( $AlCu_4Mg_1$ ). Hutními výrobky z těchto slitin jsou plechy, profily, trubky a dráty. Dural 2017 se zpracovává na volně a zápusťkově kované výkovky. [2]

### 2.2 Vývoj v oblasti slitin soustavy Al – Cu – Mg

Studie NASA ukázaly, že malá přísada Ag a Zr do slitiny 2519 může zvýšit mez pevnosti u vystárnuté slitiny až o 10%. Příklad Ag a Zr podněcuje precipitaci dvou typů precipitátů. Díky počítačovým simulacím se dá určit výsledný optimální poměr mezi těmito precipitáty, což vede ke zvýšení pevnosti, v porovnání se slitinami majícími stejné nebo podobné objemové podíly, avšak pouze jednoho typu precipitátu. V programech NASA bylo zkoumáno velké množství slitin založených na slitině 2519, ale s odchylkami v množství Cu, Mg a Mn a s 0,5% obsahem Ag a 0,13% obsahem Zr. Dvě z těchto slitin se zdají být zvláště zajímavé s ohledem na jejich mechanické vlastnosti. Byly označeny jako C415 a C416. Mez kluzu (viz Obr.1) a odolnost proti creepu (viz Obr.2) jsou výrazně lepší než u slitin 2519-T87 a 2618-T61 (C001). [6]



Obr.1 Závislost meze kluzu na teplotě u vybraných slitin



Obr.2 Závislost creepové deformace na čase při teplotě 107°C a napětí 207 MPa

Po dlouhou dobu byl mezi předními leteckými výrobci zájem o produkci druhé generace nadzvukových letadel, která by byla nasazována především na dlouhých mezikontinentálních linkách. Ačkoliv v současné době není aktivní žádný program vývoje takového letounu, budoucí požadavky na leteckou dopravu mohou obnovit výrobní aktivity. Volba rychlosti takového letounu bude rozhodujícím faktorem při výběru materiálu trupu a lze předpokládat, že se bude pohybovat v rozsahu 1,6 až 2,4 M. Hliníkové slitiny by mohly být vhodné až do rychlosti kolem Mach 2, zatímco dražší titanové slitiny a polymerní kompozity by bylo možno použít i pro vyšší rychlosti. Slitina 2618 (CM001) byla kdysi vybrána jako primární

konstrukční materiál pro stavbu letounu Concorde dosahujícího rychlosti Mach 2. Varianta slitiny, která byla použita, je speciálně zpracovaný plátovaný plech. Byla vybrána z širšího spektra slitin, jakými byly slitiny 2024-T8, 7075-T6 nebo 2014 a to kvůli své statické a únavové pevnosti a zvláště kvůli creepové pevnosti. Současné studie ukazují, že za účelem vyhovění jak ekonomickým požadavkům tak i doletu nadzvukových letounů, by bylo třeba snížit hmotnost rámu přibližně o 30–33% v porovnání s hmotností rámu užitého na Concorde a přitom ještě zvětšit vnitřní prostor, aby se zvýšilo pohodlí cestujících. [6]

### 2.3 Vybrané slitiny soustavy Al – Cu – Mg

Slitiny byly vybrány z katalogů výrobců ALCAN a ALCOA. [3, 4]

Chemické složení a mechanické vlastnosti těchto slitin jsou uvedeny v závěru kapitoly (viz Tab.2, Tab.3). Jako porovnávací (referenční) slitina této soustavy se většinou volí slitina 2024.

#### **Slitina 2024 (Alcan)**

Tepelné zpracování: **T3, T351X**

Polotovary: tažené trubky, protlačované tyče

Popis: dobrá odolnost proti poškození, střední pevnost

Aplikace: slitina je užívána pro výrobu tyčí, kovaných a obráběných částí, leteckých sedadel a jiných konstrukčních aplikací. Produkty vykazují velmi dobré mechanické vlastnosti a jsou obzvláště vhodné pro extrémně náročné tvářecí operace nebo tam, kde je vyžadován dobrý poměr mezi únavovou odolností a pevností.

#### **Slitina 2024 (Alcoa)**

Tepelné zpracování: **0, T3, T351, T4, T81, T851**

Polotovary: plechy, desky

Popis: tato slitina má relativně dobrou únavovou odolnost, zvláště pokud se jedná o produkty ve formě tlustých desek. I v dnešní době je stále tato slitina volena pro mnoho leteckých konstrukčních aplikací.

Aplikace: desky jsou používány u konstrukcí trupu, tažných prvků křídel, výztužných žebírek namáhaných na ohyb a u konstrukcí, u nichž je požadována tuhost, dobré únavové vlastnosti a pevnost. Plechy, které jsou často plátované, jsou hojně užívány u dopravních a vojenských letadel na potahy trupů a křídel a lze se s nimi setkat také u součástí motorů, kde může teplota vzrůstat až ke 121 °C.

#### **Slitina 2026 (Alcoa) [4]**

Tepelné zpracování: **T3511, T8511**

Polotovary: tenké protlačované součásti

**Popis:** slitina byla vyvinuta vylepšením vlastností slitin 2024 a 2224 pro konstrukční součásti v leteckém průmyslu, u kterých jsou hlavními kritérii vysoká odolnost proti porušení, dobrá únavová odolnost a vysoký stupeň obrobiteľnosti.

**Aplikace:** vylepšená odolnost proti šíření únavové trhliny a vysoká lomová houževnatost dovolují prodloužit intervaly mezi kontrolami součástí z této slitiny. Kromě vylepšených únavových vlastností mají protlačované součásti z této slitiny vyšší pevnost oproti slitinám 2024-T3511 a 2224-T3511 a taktéž výrobní náklady jsou v porovnání s těmito slitinami nižší a to především díky vylepšené obrobiteľnosti, způsobené tenčí povrchovou vrstvou, která bývá rekrystalizovaná, hrubozrnná a tím pádem špatně obrobiteľná.

### **Slitina 2027 (Alcan)**

**Tepelné zpracování: T351, T3511**

**Polotovary:** desky, tenké a tlusté protlačované součásti

**Popis:** jedná se o patentovanou slitinu poskytující vyšší pevnost a houževnatost oproti v současnosti běžné slitině 2024. Příklad Zr napomáhá udržování vysoce vláknité struktury vedoucí k vynikajícímu poměru pevnost/houževnatost. Korozní odolnost zůstává na stejné úrovni jako u slitiny 2024.

**Aplikace:** desky z této slitiny se užívají pro části vyžadující vysokou pevnost a houževnatost, jako např. spodní krycí panely trupu. Protlačované součásti jsou zvláště vhodné pro části, u kterých je rozhodující odolnost proti porušení a pevnost, mohou být tvářeny za studena ve stavu T3511 a jsou užívány na různé výztuže, které musí být odolné proti porušení, jako konstrukce křídel nebo jiné kriticky namáhané části.

### **Slitina 2124 (Alcoa)**

**Tepelné zpracování: T851**

**Polotovary:** desky

**Popis:** tato slitina byla vyvinuta zejména pro aplikace pracující za zvýšených teplot požadující zaručenou lomovou houževnatost a vylepšené příčné vlastnosti u desek s tloušťkou větší jak 24,5mm. Dále tato slitina vykazuje dobré zachování pevnosti a odolnost proti creepu za zvýšených teplot až do 177 °C .

Slitina vykazuje obdobné únavové vlastnosti jako 2024-T851, přičemž lomová houževnatost je ve většině testovaných směrů podobná, na rozdíl od 2024-T851.

**Aplikace:** slitina se užívá pro součástí pracující za středně zvýšených teplot v rozmezí od 121 do 177 °C , které vyžadují lepší tažnost než mají desky ze slitiny 2024-T851 a zaručenou lomovou houževnatost.

### Slitina 2324 (Alcoa)

Tepelné zpracování: **T39**

Polotovary: desky, plechy

Popis: tato slitina je v podstatě verzí slitiny 2024-T351 avšak s vyšší pevností a s řízeným chemickým složením o vysoké čistotě. Byla vyvinuta pro použití na součástech s velkým tahovým zatížením nebo které mohou být náchylné k únavě nebo porušení. Tepelné zpracování T39 vyvinuté díky speciálním výrobním postupům zvyšuje jak pevnost tak lomovou houževnatost oproti slitině 2024. Mechanické vlastnosti jsou garantovány ve směru příčném a podélném.

Aplikace: u konstrukcí, kde je požadována vyšší pevnost, houževnatost a dobrá odolnost proti šíření únavové trhlin, může být tato slitina považována jako náhrada za slitinu 2024-T351. U nových dopravních letadel je užívána pro potahy spodní strany křídel a jejich vnitřních komponentů.

Tab.2 Chemické složení slitin soustavy Al – Cu – Mg

Slitina (výr.)	Obsahy chemických prvků												
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Li	Ti	Zr	Ag	Ostatní	
												každý	všechny
[%]													
<b>2024</b> (Alcan)	0,50	0,50	3,8- 4,9	0,3- 0,9	1,2- 1,8	0,10	0,25	-	0,15 0,20 <sup>1)</sup>	-	-	-	-
<b>2024</b> (Alcoa)	0,50	0,50	3,8- 4,9	0,3- 0,9	1,2- 1,8	0,10	0,25	-	0,15 0,20 <sup>1)</sup>	-	-	0,05	0,15
<b>2026</b> (Alcoa)	0,05	0,07	3,6- 4,3	0,3- 0,8	1,0- 1,6	-	0,10	-	0,06	0,05- 0,25	-	0,05	0,15
<b>2027</b> (Alcan)	0,12	0,15	3,9- 4,9	0,5- 1,2	1,0- 1,5	0,05	0,20	-	- 0,25 <sup>1)</sup>	-	-	-	-
<b>2027</b> (Alcoa)	0,12	0,15	3,9- 4,9	0,5- 1,2	1,0- 1,5	-	0,20	-	0,08	0,05- 0,15	-	-	-
<b>2124</b> (Alcoa)	0,20	0,30	3,8- 4,9	0,3- 0,9	1,2- 1,8	0,10	0,25	-	0,15	-	-	0,05	0,15
<b>2324</b> (Alcoa)	0,10	0,12	3,8- 4,4	0,3- 0,9	1,2- 1,8	0,10	0,25	-	0,15	-	-	0,05	0,15

Obsahy prvků jsou maximální možné, pokud není uveden rozsah.

#### Vysvětlivky:

<sup>1)</sup> hodnota odpovídá součtu procentuálních obsahů prvků Ti+Zr

Tab.3 Mechanické vlastnosti slitin soustavy Al – Cu – Mg

Slitina (výr.)	Tepel. zprac.	polo- tovar	směr	Tloušťka [mm]	Mechanické vlastnosti					
					$R_m$	$R_{p0,2}$	A	$K_{IC}$	E	$\rho$
					MPa	MPa	%	$MPa \cdot \sqrt{m}$	GPa	$g \cdot cm^{-3}$
2024 (Alcan)	T3	tažené trubky	L	≤5	440	290	8	-	73	2,77
				5-20	420	270	8	-		
	T3511			≥20	420	290	6	-		
		protl. tyče		d<20	Dostupné na požádání u výrobce					
	T3			20<d<100	480	355	10	-		
	T351 T3511			100<d<160	470	345	10	-		
				d>160	Dostupné na požádání u výrobce					
2024 (Alcoa)	0	plechy tyče	LT	0,25-12,44	220	96	12	-	-	-
	T3	rovný plech		0,203-6,62	434 441	289	10 15	-	-	-
	T351	desky 1)		6,35-101,6	441 393	289 282	12 4	-	-	-
	T4	svitek plechu		0,254-3,16	427	276	12 15	-	-	-
	T81	rovný plech		0,254-6,32	462	400	5	-	-	-
	T851	desky 1)		6,35-38,07 1.1)	462 455	400 393	5	-	-	-
Alclad 2024 (Alcoa)	0	plechy tyče	LT	0,20-44,45	207 220	96	10 12	-	-	-
	T3	rovný plech		0,203-6,32	400 427	269 276	10 15	-	-	-
	T351	desky 2)		6,35-101,6	427 393	276 282	12 4	-	-	-
	T4	svitek plechu		0,254-3,25	400 420	248 262	12 15	-	-	-
	T81	rovný plech		0,254-6,32	427 448	372 386	5	-	-	-
	T851	desky		6,35-25,40	448 455	386 400	5	-	-	-
2026 (Alcan)	T3511	desky	L	12-38	496	365	11	-	-	2,77
2026 (Alcoa)	T3511	protla- čky	L	25,4	496	365 324 <sup>4)</sup>	11	-	-	2,77
			LT		455	317 317 <sup>4)</sup>	-	-		

Slitina (výr.)	Tepel. zprac.	polo- tovar	směr	Tloušťka [mm]	Mechanické vlastnosti							
					$R_m$	$R_{p0,2}$	A	$K_{IC}$	E	$\rho$		
					MPa	MPa	%	$MPa \cdot \sqrt{m}$	GPa	$g \cdot cm^{-3}$		
2027 (Alcan)	T351	desky	L	25 <sup>3)</sup>	469	359	12	107 <sup>7)</sup>	-	2,79		
				50 <sup>3)</sup>	455	345	12	(L-T)				
	T3511	tenké protl.		$\leq 20$ <sup>3)</sup>	495	365	11	-				
	T3511	tlusté protl.		12-55 <sup>3)</sup>	517	393	12	44				
			LT		510	430 440 <sup>4)</sup>						
2124 (Alcoa)	T851	desky	LT	25,43-50,80	455	393	5	-	-	-		
				127,03 152,40	435	370	4					
			L-T									31,9 <sup>5)</sup>
												26,4 <sup>6)</sup>
			T-L									26,4 <sup>5)</sup>
												22 <sup>6)</sup>
			S-L									26,4 <sup>5)</sup>
												19,8 <sup>6)</sup>
2324 (Alcoa)	T39	desky	LT	19,05-33,02	475	370	8	38,5- 40	-	-		

#### Vysvětlivky:

- 1) s rostoucí tloušťkou klesá mez pevnosti a mez kluzu
- 1.1) není dostupná ve větších tloušťkách
- 2) s rostoucí tloušťkou klesá mez pevnosti
- 3) dodáváno v tloušťkách 12-55mm
- 4) hodnoty meze kluzu v tlaku
- 5) typická hodnota
- 6) garantovaná minimální hodnota pro tloušťku od 38,1 do 127,0 mm
- 7) nejedná se o hodnotu  $K_{IC}$  (deformační lomová houževnatost), ale  $K_{app}$  (napěťová lomová houževnatost)

### 3 Slitiny soustavy Al – Cu – Li

skupina 2xxx – hlavním přísadovým prvkem je měď (Cu)

skupina 8xxx – hlavním přísadovým prvkem je lithium (Li)  $\Rightarrow$  soustava Al – Li – Cu

#### 3.1 Stručný popis slitin soustavy Al – Cu – Li

Hlavní přínos slitin hliníku s lithiem spočívá především v jejich nízké měrné hmotnosti a vyšším modulu pružnosti v tahu. Každé hmotnostní procento lithia snižuje hustotu hliníku přibližně o 3% a zvyšuje modul pružnosti asi o 5-6%. Lze tedy říci, že čím větší množství Li jako legujícího prvku použijeme, tím bude slitina lehčí. Především letecký a kosmický průmysl požadují již od počátku slitiny s co nejnižší hustotou. Později se také začalo využívat těchto slitin pro výrobu nádrží paliva v raketovém průmyslu. Jedná se např. o nádrže na tekutý kyslík a vodík, pracujících v kryogenních podmínkách. Přednostně jsou tyto slitiny určeny pro tváření, avšak v případě potřeby mohou být použity i pro odlitky. Technologickým problémem výroby, tj. tavení, legování a lití těchto slitin, je malá hustota Li a jeho vysoká reaktivita se vzdušnými plyny. Z toho důvodu se tavení a odlévání těchto slitin provádí pod krycí struskou, v ochranné atmosféře, nebo ve vakuu. Během celé výroby je vyšší náročnost na práci s odpady a jejich oddělené zpracování, aby se nedostaly do běžných slitin, protože zhorčují jakost plynule odlévaných čepů.

Z technologického hlediska je nutno aplikovat při vytvrzování (s cílem získat maximální pevnostní vlastnosti po rozpouštěcím žhání) umělé stárnutí. Nevýhodou binárních slitin

Al – Li je jejich nízká tažnost a lomová houževnatost, což je důsledkem precipitace  $Al_3Li$  i po hranicích zrn, čímž dochází k interkrytalickému porušování. Při tepelném zpracování polotovarů je nutné počítat i se snižováním obsahu lithia v povrchových vrstvách, zejména při vyšších teplotách a delších dobách žhání. Optimalizace strukturních parametrů se realizovala přidáním legujících prvků, jejichž účelem je vznik disperzních částic (Zr) a semikoherentních případně nekoherentních precipitátů jako  $Al_2CuLi$ ,  $CuAl$  anebo  $Al_2LiMg$  přidáním Cu nebo Mg nebo obou prvků. Velice důležitou úlohu má zde Zr, který vytváří koherentní disperzní částice  $Al_3Zr$  kubického tvaru, které stabilizují substrukturu a ztěžují proces rekrystalizace.

Uvedené bylo základem pro vznik slitin obecně označovaných jako slitiny Al – X – Li.

Obsahy legujících prvků se u jednotlivých typů slitin liší podle výrobců. Pro ilustraci je v Tab.4 uvedeno průměrné chemické složení slitin ruské produkce, kde Fe a Si jsou limitovány jako nečistoty a uvedené hodnoty představují maximální přípustný obsah. [2, 9]

Tab.4 Obsah prvků u slitin ruské produkce

Označení slitiny	Cu	Li	Zr	Mg	Fe	Si
	[%]					
1420	-	2,0	0,15	5,2	0,15	0,1
1440	1,5	2,4	0,15	0,9	0,15	0,1
1450	3,3	1,9	0,10	-	0,15	0,1



Optimálních vlastností u všech slitin lze dosáhnout ve stavu vytvrzeném za tepla. Všechny slitiny jsou na parametry tepelného zpracování velmi citlivé, a proto dodržení správných podmínek je základní podmínkou optimalizace vlastností. Nutno říci, že tak jako ostatní vytvrditelné hliníkové slitiny i slitiny typu Al – X – Li jsou citlivé, a to z hlediska konečné struktury na technologické operace jejich výroby, tj. na velikost deformace za studena před umělým stárnutím, rychlost ochlazování z teploty rozpouštěcího žíhání, teplotě a času umělého stárnutí a jiných.

Právě efektu plastické deformace za studena (2 – 8 %) před umělým stárnutím se využívá u všech slitin typu Al – X – Li ke zvýšení pevnostních vlastností. Teoretické vysvětlení tohoto efektu spočívá v tom, že plastickou deformací za studena před umělým stárnutím se zvýší hustota dislokací, a tím se zvýší počet nukleačních míst pro precipitáty podílející se na zvýšení pevnostních vlastností. Ve výrobě se to aplikuje u plechů, výliseků i výkovků.

Tento vliv deformace za studena před umělým stárnutím pro slitinu 2090 je patrný z Tab.5. [9]

*Tab.5 Vliv stavu materiálu na vlastnosti výrobku*

<b>Výrobek</b>	<b>Stav</b>	<b>Rm [MPa]</b>	<b>Re [MPa]</b>	<b>A [%]</b>
Plech	T832	550	520	6
Výlisek	T86	520	470	4
Pás	T81	550	480	8

Podle hlavních požadavků se volí optimální slitina. Při volbě slitiny pro daný cíl je nutno určit dle [9], co je nejdůležitější, zda:

- vysoké pevnostní vlastnosti,
- vysoká odolnost proti korozi,
- vynikající svařitelnost,
- vynikající vlastnosti při kryogenních teplotách,
- vynikající křehko – lomové vlastnosti,
- možnost využití superplastického tváření.

Na základě zvolené priority se volí optimální slitina typu Al – X – Li, jelikož slitina která by vyhověla 100% všem uvedeným požadavkům, v současné době neexistuje. [9]

### **3.2 Vývoj v oblasti slitin soustavy Al – Cu – Li**

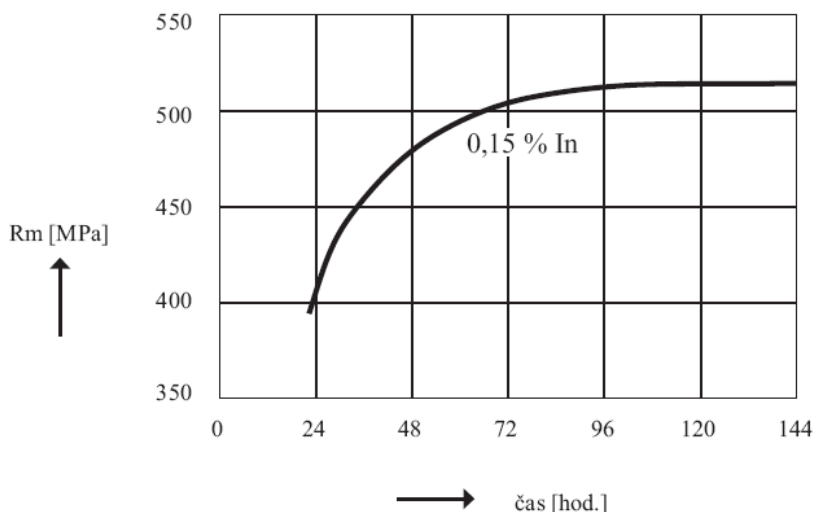
Mezi nejznámější slitiny druhé generace patří slitiny s označením dle ASTM, 2090, 2091 a 8090 (odpovídá přibližně současným EN AW-8090). Obsahují přibližně 2% lithia a potýkaly se s řadou technických problémů jakými jsou anizotropie mechanických vlastností, nízká prahová hodnota koroze pod napětím, menší tažnost a lomová houževnatost. Postupem času bylo i u těchto slitin dosaženo zlepšení. Nové slitiny, které byly vyvíjeny s menším obsahem lithia již stejnými technickými nedostatky netrpěly. Prvními z novějších slitin

Al – Li byly slitina Weldalite 049® (2094), která může dosáhnout meze kluzu až 700MPa s tažností 10% a slitina CP276. Pro ilustraci je v Tab.6 [9] uvedeno průměrné chemické složení těchto slitin. [6, 9]

Tab.6 Obsahy vybraných prvků

Označení slitiny	Cu	Li	Zr	Mg	Ag	Al
	[hmot. %]					
2090	2,7	2,20	0,12	-	-	zbytek
2091	2,1	2,00	0,10	-	-	
8090	1,3	2,45	0,12	0,95	-	
Weldalite	5,4	1,30	0,14	0,40	0,4	
CP276	2,7	2,20	0,12	0,50	-	

U slitiny 2090 byl zjištěn vliv některých prvků, např. In v malém množství (minoritní prvek) na kinetiku umělé stárnutí při 160°C, jak je vidět na Obr.3. [9]



Obr.3 Vliv india na umělé stárnutí slitiny 2090

Vylepšená verze původní slitiny 2195 mající nižší obsah Cu je nyní používána na nádrže amerických rekatoplánů. Slitina 2195 nahradila slitinu 2219 a spolu s novým konstrukčním řešením umožnila snížení hmotnosti nádrže ze 27200kg na 24000kg. To dovoluje zvýšit užitečné zatížení raketoplánu a snížit počet letů pro dobudování stanice ISS a tak ušetřit miliony dolarů. Tři další slitiny z třetí generace slitin Al – Li jsou slitiny 2096, 2097 a 2197. Obsahují menší množství Cu a mírně vyšší množství Li. Slitiny 2097 a 2197 obsahují velice malé množství Mg pro zlepšení odolnosti proti korozi pod napětím a Mn kvůli zabránění koncentrace deformace, která je spjatá s přítomností  $Al_3Li$  u slitin s vyšším obsahem lithia. Slitina 2097/2197 byla vybrána jako náhrada za slitinu 2124, která měla nedostatečnou únavovou pevnost, pro přepážky na letounech F16. Slitina 2097 má o 5% nižší hustotu než 2124 a přinejmenším třikrát lepší únavové chování a přibližně o 15% vyšší přípustné dlouhodobé únavové namáhání. Ačkoliv slitiny Al – Li jsou mnohem dražší než konvenční Al slitiny, nahrazení slitiny 2124 slitinou 2097 u podélníků na letounu F16, zdvojnásobí jejich

životnost a ušetří přes 20mil.dolarů.Slitiny Al – Li kvůli své odolnosti proti únavě také často nahrazují vstupní plechy krytů motorů, které jsou momentálně vyráběny ze slitiny 2124. Slitina 2098 byla úspěšně testována na plášti letounů F16 a prokázala šestinásobně delší životnost oproti plášťům ze slitiny 2024. Je mnoho nových Al materiálů, které jsou vyvíjeny pro užití na dopravních letadel. Vrstvené hliníkové plechy vyztužené aramidovými vlákny (ARALL) mají vysokou odolnost proti únavě a tím pádem potenciál pro výrazné hmotnostní úspory na letounech. Tento materiál má rovněž odolnost proti propálení v případě požáru a může být možnou náhradou za titan v protipožárních stěnách. Negativní stránkou jsou však velmi vysoké náklady, běžně 7-10krát vyšší než u monolitního Al plechu. [6]

### 3.3 Vybrané slitiny soustavy Al – Cu – Li

Slitiny byly vybrány z katalogů výrobců ALCAN a ALCOA. [3, 4]

Chemické složení a mechanické vlastnosti těchto slitin jsou uvedeny v závěru kapitoly (viz Tab.7, Tab.8 ). Jako porovnávací (referenční) slitina této soustavy se většinou volí slitina 2050.

#### **Slitina 2050 (Alcan)**

Tepelné zpracování: **T84**

Polotovary: desky

Popis: slitina má nižší hustotu (měrnou hmotnost), vyšší modul pružnosti a vylepšené korozní vlastnosti oproti momentálně často používaným deskám ze slitin 7010 a 7050. Při stejné popřípadě mírně vyšší pevnosti se nabízí tato slitina jako možná náhrada za tyto slitiny.

Aplikace: desky z této slitiny jsou převážně určeny na části vyžadující střední až vyšší pevnost a vysokou hodnotu houževnatosti, jako jsou spodní konstrukce nebo části středních až velkých rozměrů jako rámy, nosníky, vzpěry nebo žebra.

#### **Slitina 2090 (Alcoa)**

Tepelné zpracování: **T83**

Polotovary: plechy

Popis: slitina byla vyvinuta pro vysoce pevné letecké aplikace. Má přibližně o 8% menší hustotu a asi o 10% vyšší modul pružnosti než konvenční slitiny pro letecké aplikace. Díky těmto vlastnostem poskytuje tato slitina jedinečné možnosti jak snížit hmotnosti konstrukce.

Aplikace: dříve se slitina používala např. na náběžné a odtokové hrany křídél nebo různé konstrukce rámu. Dnes je běžně používána pro konstrukce přepážkových výztuh.

### **Slitina 2098 (Alcan)**

Tepelné zpracování: **0, T82P**

Polotovary: plechy trupu

Popis: jedná se o slitinu, která byla navržena pro letecké aplikace tak, aby poskytovala vyváženou kombinaci vysoké pevnosti, nízké hustoty, únavové odolnosti a lomové houževnatosti.

Aplikace: produkty ve formě tenkých desek nebo plechů jsou používány pro trupy vojenských letounů a mohou být použity pro další vysoce zatížené části letounu.

### **Slitina 2x98 (Alcan)**

Tepelné zpracování: **0, T82P**

Polotovary: plechy trupu

Popis: slitina byla navržena pro letecké aplikace tak, aby poskytovala vyváženou kombinaci vysoké pevnosti, nízké hustoty, únavové odolnosti a lepší lomové houževnatosti než slitina 2098. V době vydání této bakalářské práce slitina čekala na specifikaci a uvedení do norem AA (Aluminium Association) jako modifikace již zmíněné slitiny 2098.

Aplikace: produkty ve formě tenkých desek nebo plechů jsou používány pro aplikace na trupech letounů.

### **Slitina 2099 (Alcoa)**

Tepelné zpracování: **T83, T8E67**

Polotovary: protlačované součásti

Popis: tato slitina, která je někdy také označována jako C460, je používána v leteckém průmyslu pro vysoce pevné aplikace vyžadující nízkou hustotu, vysokou tuhost, výbornou odolnost proti poškození, excelentní korozní odolnost a svařitelnost. Součásti z této slitiny jsou velice dobře obrobitelné, tvářitelné a svařitelné a lze snadno upravovat jejich povrch dokončovacími operacemi.

Aplikace: protlačované součásti z této slitiny mohou nahrazovat produkty z jiných slitin skupiny 2xxx, případně 6xxx a 7xxx a to při aplikacích jako jsou staticky a dynamicky namáhané konstrukce trupu, spodní podélníky (stringery) křídel a jiné části vyžadující vysokou tuhost.

### **Slitina 2195 (Alcan)**

Tepelné zpracování: **T8R78**

Polotovary: desky

Popis: slitina nese obchodní název Weldalite. Byla vyvinuta jako vysoce pevná slitina s odolností proti porušení, je svařitelná a je brána jako alternativa ke slitině

2219-T87. Vysoké mechanické vlastnosti jsou navíc doplněny o snížení hustoty o cca 5% oproti konvenčním slitinám skupiny 2xxx. Navíc tato slitina vykazuje modul pružnosti o cca 8% větší než je běžné u klasických vysoce pevných slitin užívaných pro letecké konstrukce.

Aplikace: desky z této slitiny jsou např. používány na výrobu palivových nádrží pracujících v kryogenních podmínkách. Nízká hustota, vysoká tuhost, velmi vysoká pevnost, dobrá odolnost proti porušení a dobrá svařitelnost dělají z produktů z této slitiny velmi atraktivní volbou pro přímé nebo konstrukčně pozměněné náhrady u všech aplikací s velkým zatížením.

### **Slitina 2196 (Alcan)**

Tepelné zpracování: **T8511**

Polotovary: protlačované součásti

Popis: slitina se řadí mezi slitiny patentované řady Weldalite. Byla vyvinuta, aby poskytovala vysokou pevnost, měla nižší hustotu než slitina 7075 a výbornou korozní odolnost. Při dimenzování součástí z této slitiny nám vyšší modul pružnosti umožňuje snížit výslednou hmotnost. Spojování součástí z této slitiny může být prováděno buďto nýtováním nebo svařováním.

Aplikace: protlačované součásti jsou především užívány na konstrukce výrazně namáhané na tlak a mohou být používány pro zpevňující výztuhy trupů. Díky výborným vlastnostem v oblasti odolnosti proti porušení může být tato slitina užita také např. pro výrobu spodních podélníků křídel.

### **Slitina 2297 (Alcan)**

Tepelné zpracování: **T87**

Polotovary: desky

Popis: slitina byla vyvinuta, aby poskytovala vylepšenou odolnost proti únavě a porušení, přičemž má obdobnou pevnost a korozní odolnost jako dnes často používaná slitina 2124-T851. Odolnost proti únavě je 3-5krát větší než u konvenčních slitin užívaných v leteckém průmyslu.

Aplikace: desky z této slitiny jsou zvláště vhodné pro komponenty ohrožené únavou materiálu. Díky střední pevnosti, dobré odolnosti proti porušení a vynikajícím korozním vlastnostem je slitina vhodná pro výrobu rámců, vzpěr a přepážek. Je také užívána v aplikacích u nichž dochází k cyklickému vystavování zvýšeným teplotám až do 110°C.

Tab.7 Chemické složení slitin soustavy Al – Cu – Li

Slitina (výr.)	Obsahy chemických prvků												
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Li	Ti	Zr	Ag	Ostatní	
												každý	všechny
[%]													
<b>2050</b> (Alcan)	0,08	0,10	3,2- 3,9	0,2- 0,5	0,2- 0,6	-	-	0,7- 1,3	-	0,06- 0,14	0,2- 0,7	-	-
<b>2090</b> (Alcoa)	0,10	0,12	2,4- 3,0	0,05	0,25	0,05	0,10	1,9- 2,6	0,15	0,08- 0,15	-	0,05	0,15
<b>2098</b> (Alcan)	0,12	0,15	3,2- 3,8	0,35	0,25- 0,8	-	-	0,8- 1,3	-	0,04- 0,18	0,25- 0,8	-	-
<b>2x98</b> (Alcan)	slitina 2x98 bude předložena Aluminium Association k registraci jako modifikace slitiny 2098												
<b>2099</b> (Alcoa)	0,05	0,07	2,4- 3,0	0,1- 0,5	0,1- 0,5	-	0,4- 1,0	1,6- 2,0	0,10	0,05- 0,12	-	0,05	0,15
<b>2195</b> (Alcan)	0,12	0,15	3,7- 4,3	0,25- 0,8	0,25	-	-	0,8- 1,2	-	0,08- 0,16	0,25- 0,6	-	-
<b>2196</b> (Alcan)	0,12	0,15	2,5- 3,3	0,35	0,25- 0,8	-	-	1,4- 2,1	-	-	0,25- 0,6	-	-
<b>2297</b> (Alcan)	0,10	0,10	2,5- 3,1	0,35	0,10- 0,50	-	-	0,8- 1,3	-	0,04- 0,18	-	-	-

Obsahy prvků jsou maximální možné, pokud není uveden rozsah.

**Vysvětlivky:**

<sup>1)</sup> hodnota odpovídá součtu procentuálních obsahů prvků Ti+Zr

Tab.8 Mechanické vlastnosti slitin soustavy Al – Cu – Li

Slitina (výr.)	Tepel. zprac.	polo- tovar	směr	Tloušťka [mm]	Mechanické vlastnosti					
					$R_m$	$R_{p0,2}$	A	$K_{IC}$	E	$\rho$
					MPa	MPa	%	$MPa \cdot \sqrt{m}$	GPa	$g \cdot cm^{-3}$
2050 (Alcan)	T84	desky	L	25	540	500	-	43	76,5	2,70
				50	520	490		40		
				100				35		
2090 (Alcoa)	T83	plechy	L	3,20-10,3	531	483	3	- <sup>2)</sup>	- <sup>2)</sup>	- <sup>2)</sup>
			LT		503	455	5	43,9	79,4	2,59
			45		441	386	-	- <sup>2)</sup>	- <sup>2)</sup>	- <sup>2)</sup>
2098 (Alcan)	0	tenké plechy desky	L-T	0,635-7,7	241	172	11	-	76	2,70
	T82P				503	476	6			
2x98 (Alcan)	0	tenké plechy desky	L-T	- <sup>1)</sup>	241	172	11	-	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>
	T82P				510	470	6			
2099 (Alcoa)	T83	protla- čky	L	12,8-25,66	560	525 520 <sup>3)</sup>	9	-	78	2,63
			LT		525	485 520 <sup>3)</sup>		-		
			L	25,66-64,16	595	505 540 <sup>3)</sup>		30 (L-T)		
			LT		520	470 485 <sup>3)</sup>		27 (T-L)		
	T8E67		L	25,66-64,16	530	485 475 <sup>3)</sup>	10	66 (L-T)	78	2,63
			LT		510	430 440 <sup>3)</sup>		55 (T-L)		
2195 (Alcan)	T3R7 8	desky	LT	6,35-12,7	415	300	18	-	76	2,71
				35-50	390	275	17			
	L		6,35-12,7	615	580	9	40			
				695	640	11	45			
			35-50	555	530	9	37			
				695	640	11	40			
	LT		6,35-12,7	600	556	11	40			
				715	635	8	42			
			35-50	575	530	8	35			
				715	635	8	35			
	45		6,35-12,7	525	490	12	35			
				680	600	10	38			
35-50		560	505	9	-					
		680	600	10	-					
ST	35-50	595	500	3,5	-					
		775	600	-	-					

Slitina (výr.)	Tepel. zprac.	polo- tovar	směr	Tloušťka [mm]	Mechanické vlastnosti					
					$R_m$	$R_{p0,2}$	A	$K_{IC}$	E	$\rho$
					MPa	MPa	%	$MPa \cdot \sqrt{m}$	GPa	$g \cdot cm^{-3}$
2196 (Alcan)	T8511	protla- čky	L	1,2-6 <sup>4)</sup>	520	470	6	-	77,6	2,63
				6-25	540	490	5			
2297 (Alcan)	T87	desky	L	50	441	400	10	35,2 (L-T)	75,2 (LT) 77,9 (LT) <sup>5)</sup>	2,65
				75	427	393	9			
				100			5	34,1 (L-T)		
				125	421	386		33 (L-T)		
				150	414	379		31,9 (L-T)		

Uvedené hodnoty jsou garantované minimální.

#### Vysvětlivky:

- 1) nezjištěno, ale lze předpokládat, že hodnoty budou shodné se slitinou 2098 (Alcan)
- 2) nezjištěno, ale lze předpokládat, že hodnoty budou shodné jako pro směr LT
- 3) hodnoty meze kluzu v tlaku
- 4) protlačky dodávány až od tloušťky 1,6mm
- 5) hodnota 77,9 ve směru L-T je pro modul pružnosti v tlaku



## 4 Slitiny soustavy Al – Mg – Si

skupina 6xxx – hlavními přísadovými prvky jsou hořčík (Mg) a křemík (Si) [1]

### 4.1 Stručný popis slitin soustavy Al – Mg – Si

Přísada křemíku do báze Al – Mg umožňuje vytvrzení těchto slitin na pevnost vyšší než je tomu u binárních slitin Al – Mg. Ve srovnání s duraly je však pevnost těchto slitin, někdy označovaných jako avialy nebo pantaly, i po vytvrzení nižší. Jsou však tvárnější, odolnější proti korozi, lépe se svařují a jejich tepelné zpracování je méně náročné na přesné dodržení teplot. Součásti lze z teploty rozpouštěcího ohřevu ochlazovat na vzduchu, což odpovídá rychlosti dostatečné k získání přesyceného tuhého roztoku, který se dále vytvrzuje stárnutím, většinou přirozeným. Takto se dosahuje lepší odolnosti proti mezikrystalické korozi než po stárnutí umělém. [2]

### 4.2 Vývoj v oblasti slitin soustavy Al – Mg – Si

Slitinami skupiny 6xxx jsou dnes často nahrazovány slitiny skupiny 2xxx v různých aplikacích u námořnictva Spojených států. Hlavním problémem u slitin skupiny 2xxx užívaných na potahy trupů je to, že musí být plátovány, protože mohou být náchylné k mezikrystalické korozi a navíc nemohou být tavně svařovány. Slitiny 6xxx sice vykazují nižší pevnost, ale zato jsou svařitelné a levnější než slitiny 2xxx a především se vyznačují lepší korozní odolností, což u letounů pohybujících se v agresivním slaném prostředí vede ke zvýšení životnosti jejich součástí. Nicméně slitiny 6xxx bohaté na Cu jako například slitiny 6013-T6 a 6056-T6 jsou také náchylné k mezikrystalické korozi. Tato náchylnost souvisí se vznikem volných oblastí precipitátů po hranicích zrn, vytvořených během umělého stárnutí a ochuzených o Si a Cu, které jsou anodického charakteru (v porovnání se zrnem).

Proces svařování, kterým se nahrazuje nýtování, vede ke snížení celkové hmotnosti a rovněž k úspoře výrobních nákladů. Například svařování laserovým paprskem potlačilo vývoj některých slitin, jako jsou 6056 (Alcan) nebo 6013 (Alcoa), protože tyto slitiny mají vyšší mez kluzu v porovnání se slitinami 2024 a 2524 a díky svařitelnosti mohou být tudíž použity jako jejich možná náhrada. [6]

### 4.3 Vybrané slitiny soustavy Al – Mg – Si

Slitiny byly vybrány z katalogů výrobců ALCAN a ALCOA. [3, 4]

Chemické složení a mechanické vlastnosti těchto slitin jsou uvedeny v závěru kapitoly (viz Tab.9, Tab.10). Jako porovnávací (referenční) slitina této soustavy se většinou volí slitina 6013.

### **Slitina 6013 (Alcoa)**

Tepelné zpracování: **T651, T8**

Polotovary: tvářené produkty

Popis: produkty z této slitiny tvářené za studena jsou vhodné pro aplikace vyžadující vysokou pevnost společně s korozní odolností a dobrou eloxovatelností. Slitina se vyznačuje lepší obrobiteľností a možnostmi spojování než je tomu např. u slitiny 6061.

Aplikace: slitina je vhodná pro použití v hydraulických systémech, na tělesa ventilů atd.

### **Slitina 6020 (Alcoa)**

Tepelné zpracování: **T6, T651, T8**

Polotovary: tvářené produkty

Popis: produkty z této slitiny tvářené za studena jsou navrženy pro aplikace vyžadující vysoký stupeň obrobiteľnosti společně s vysokou korozní odolností. Slitina se dobře svařuje a má výbornou eloxovatelnost.

Aplikace: vhodné pro hydraulické systémy a elektronické součásti

### **Slitina 6056 (Alcan) [3]**

Tepelné zpracování: **T4, T4511, T6511, T78, T78511**

Polotovary: neplátované plechy, tenké protlačované součásti

Popis: jedná se o svařitelnou slitinu nabízející střední až vyšší pevnost a korozní odolnost podobnou jako má slitina 2024, avšak s nižší hustotou. Slitina ve stavu po tepelném zpracování T4 se vyznačuje vynikajícími tvářecími charakteristikami. Doporučené tepelné zpracování protlačovaných součástí je T4511. Po svařování jsou předepsána 2 tepelná zpracování: stárnutí T6511 a přestárnutí T78511 (vede ke snížení citlivosti k mezikrystalické korozi).

Aplikace: neplátované plechy jsou vhodné na spodní části trupu nebo vnitřní části, které vyžadují střední mechanické charakteristiky. Díky stárnutí (T78), které způsobuje dobrou korozní odolnost není zapotřebí plátování. Tenké protlačované součásti jsou vhodné pro vyztužující konstrukce, jako jsou svařované panely trupu, u nichž je požadována dobrá korozní odolnost.

### **Slitina 6061 (Alcan)**

Tepelné zpracování: **0, T4, T6**

Polotovary: tažené trubky

Popis: slitina se vyznačuje dobrým poměrem mezi mechanickými vlastnostmi a korozní odolností.

Aplikace: využívá se na hydraulická potrubí a některé další aplikace. Díky pevně řízenému

procesu výroby poskytují trubky z této slitiny dostatečně velkou zásobu plasticity pro tváření a stejně tak mají i dobrou svařitelnost.

### Slitina 6156 (Alcan)

Tepelné zpracování: **T4, T62**

Polotovary: plátované plechy trupu

Popis: jedná se o svařitelnou slitinu poskytující střední pevnost a vysokou odolnost proti porušení v porovnání se slitinou 2024, při nižší hustotě. Ve stavu po tepelném zpracování T4 vykazuje slitina výborné tvářecí charakteristiky.

Aplikace: plátované plechy jsou vhodné zejména pro spodní části trupu, kde je zapotřebí dostatečná pevnost a odolnost proti porušení. Ve stavu po tepelném zpracování T4 mají tyto plechy lepší houževnatost než například plechy z téže slitiny, ale ve stavu po tepelném zpracování T62 nebo plechy ze slitiny 6056-T78. Složení plátovací vrstvy bylo optimalizováno, aby poskytlo co nejúčinnější korozní odolnost.

### Slitina 6262 (Alcoa)

Tepelné zpracování: **T6, T651, T8, T9**

Polotovary: široké spektrum za studena tvářených polotovarů

Popis: slitina je jednou ze dvou snadno obrobitelných Al slitin obsahujících Pb a navíc ještě také Bi. Kombinuje takové vlastnosti jako jsou dobrá obrobitelnost, vysoká korozní odolnost a dobrá eloxovatelnost.

Aplikace: použití na hydraulická potrubí, ventily a jejich části, závěsné čepy a další.

Tab.9 Chemické složení slitin soustavy Al – Mg – Si

Slitina (výr.)	Obsahy chemických prvků												
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Li (Sn)	Ti	Zr (Bi)	Ag (Pb)	Ostatní	
	[%]											každý	všechny
<b>6013</b> (Alcoa)	0,6- 1,0	0,5	0,6- 1,1	0,2- 0,8	0,8- 1,2	0,10	0,25	-	0,10	-	-	0,05	0,15
<b>6020</b> (Alcoa)	0,4- 0,9	0,5	0,3- 0,9	0,35	0,6- 1,2	0,15	0,20	(0,9- 1,5)	0,15	-	(0,05)	0,05	0,15
<b>6056</b> (Alcan)	0,7- 1,3	0,5	0,5- 1,1	0,4- 1,0	0,6- 1,2	0,25	0,10- 0,7	-	- 0,2 <sup>1)</sup>	-	-	-	0,15
<b>6061</b> (Alcan)	0,4- 0,8	0,7	0,15- 0,40	0,15	0,8- 1,2	0,04- 0,35	0,25	-	0,15	-	-	-	-
<b>6061</b> (Alcoa)	0,4- 0,8	0,7	0,15- 0,40	0,15	0,8- 1,2	0,04- 0,35	0,25	-	0,15	-	-	0,05	0,15
<b>6156</b> (Alcan)	0,7- 1,3	0,20	0,7- 1,1	0,4- 0,7	0,6- 1,2	0,25	0,10- 0,7	-	-	-	-	-	0,15
<b>6262</b> (Alcoa)	0,4- 0,8	0,7	0,15- 0,40	0,15	0,8- 1,2	0,04- 0,14	0,25	-	0,15	(0,4- 0,7)	(0,4- 0,7)	0,05	0,15

Obsahy prvků jsou maximální možné, pokud není uveden rozsah.

### Vysvětlivky:

<sup>1)</sup> podle materiálových listů výrobce se slitina dodává s nebo bez obsahu prvků Ti+Zr

Tab.10 Mechanické vlastnosti slitin řady soustavy Al – Mg – Si

Slitina (výr.)	Tepel. zprac.	polo- tovar	směr	Tloušťka [mm]	Mechanické vlastnosti					
					$R_m$	$R_{p0,2}$	A	$K_{IC}$	E	$\rho$
					MPa	MPa	%	$MPa \cdot \sqrt{m}$	GPa	$g \cdot cm^{-3}$
6013 (Alcoa)	T651	tvář. polot.	L	12,8-102,4	390 251 <sup>5)</sup>	362 453 <sup>2)</sup>	7	-	-	2,72
	T8			3,2-19,175	418	398 453	5			
				19,175-38,1	405	390 453	8			
				38,1-83,2	398	384 453	7			
6020 (Alcoa)	T6/ T6511	protl. souč.	L	83,45-153,6	265	244	10	-	-	2,72
	T8	tvář. polot.		6,4-9,62	300	279	12			
				9,62-51,18	293	272				
				51,18-83,2	272	251				
6056 (Alcan)	T4	neplát plechy	LT	2-8	265	135	18	-	-	2,72
	T78				340	315	8			
	T4511	tenké protl. souč.	L	6,35 <sup>1)</sup>	355	245	16			
	T6511				380	360 380 <sup>2)</sup>	10			
	T7851 1				360	335 340 <sup>2)</sup>	10			
6061 (Alcan)	0	protl. trubky	L	≤20	150 <sup>3)</sup>	110 <sup>3)</sup>	14	-	68,9	2,70
	T4				205	110	14			
	T6				290	240	8			
6061 (Alcoa)	T4/ T451	dokon za stude- na	L	12,8 <sup>4)</sup> - 204,8	209	112 167 <sup>5)</sup>	18	-	-	2,72
	T6/ T651				292	244 209 <sup>5)</sup>	10			
6156 (Alcan)	T4	neplát plechy	LT	2-8	265	135	18	-	-	2,72
	T62				350	310	8			
6262 (Alcoa)	T6/ T651	tvář. polot.	L	≤204,8	293 209	244	10	-	-	2,72
	T8			19,2-83,2	313	300	12			
	T9			3,2-51,2	363	335	5			
				51,2-83,2	349	321	5			

Uvedené hodnoty mechanických vlastností jsou garantované minimální.

### Vysvětlivky:

<sup>1)</sup> nezjištěn rozsah, lze tedy předpokládat, že uvedená hodnota 6,35mm je maximální tloušťka

<sup>2)</sup> hodnoty meze kluzu v tlaku

<sup>3)</sup> jedná se o maximální garantované hodnoty

<sup>4)</sup> minimální tloušťka polotovarů po tepelné zpracování T451 a T651

## **5 Slitiny soustavy Al – Zn – Mg**

skupina 7xxx – hlavním přísadovým prvkem je zinek (Zn) [1]

### **5.1 Stručný popis slitin soustavy Al – Zn – Mg**

Potřeba slitin s vysokou odolností proti korozi, avšak pevnějších než slitiny Al – Mg, vedla ke slitinám Al – Mg s přísadou Zn, přičemž zinku je více než hořčíku. Jsou to nejpevnější hliníkové slitiny. Celkový obsah Mg + Zn v těchto slitinách bývá 5 až 7 hmot. %. Jejich sklon ke vzniku trhlin při svařování je potlačen přísadou titanu a zirkonu.[2]

### **5.2 Vývoj v oblasti slitin soustavy Al – Zn – Mg**

Oba přední světoví výrobci dopravních letadel, jak americký Boeing, tak francouzský Airbus užívají vývojově vylepšených starších materiálů, jako například u typů B777 nebo A340. Z hliníkových slitin jde například o slitinu 7150-T77 mající vyšší pevnost než slitina 7050-T76, a nebo o slitinu 7055-T77, která má vyšší mez pevnosti a obdobnou lomovou houževnatost a odolnost proti růstu únavové trhliny jako 7150-T6. Tepelné zpracování T77 užitá u slitin 7150 a 7055 a vyvinuté společností Alcoa, je založeno na třístupňovém stárnutí a vede k vyšší pevnosti s životností a únavovými vlastnostmi srovnatelnými nebo vyššími než má slitina 7150-T76. Vylepšená lomová houževnatost slitiny 7150-T77 je připisována řízenému objemovému podílu hrubých intermetalických částic a nerekrystalizované struktuře, zatímco kombinace pevnosti a korozní odolnosti se váže na velikost a prostorové uspořádání vytvrzujících precipitátů a obsah mědi v těchto precipitátech. V dnešní době jsou stále častěji, pro optimalizaci složení a správné výrobní postupy, u mnoha Al slitin využívány simulátory metalurgických procesů se zakomponovanými fázovými diagramy. Užitím těchto simulátorů byl například podpořen vývoj slitin 7449 a 7040 firmy Alcan, určených například pro horní potahy křídel nebo různé vzpěry. Relativně pomalá rychlost kalení tlustých desek je podstatná pro výběr chemického složení. Nízké množství Mg a Cu významně snížilo heterogenní precipitaci, což zajišťuje dobrou lomovou houževnatost beze ztráty pevnosti. [6]

### **5.3 Vybrané slitiny soustavy Al – Zn – Mg**

Slitiny byly vybrány z katalogů výrobců ALCAN a ALCOA. [3, 4]

Chemické složení a mechanické vlastnosti těchto slitin jsou uvedeny v závěru kapitoly (viz Tab.11, Tab.12 ). Jako porovnávací (referenční) slitiny této soustavy se většinou volí slitiny 7050, 7075 nebo 7150.

### **Slitina 7075 (Alcoa)**

Tepelné zpracování: **0, T6, T651, T76, T7651, T73, T7351**

Polotovary: široké množství polotovarů

Popis: slitina je sice o 80 až 130 MPa pevnější než nejčastěji používaná konstrukční slitina dural  $AlCu_4Mg_1$ , avšak v letectví jej nahradit nemůže. Ve srovnání s duralem je totiž citlivější ke koncentraci napětí, má sklon ke korozi pod napětím a s růstem teploty odpevňuje rychleji. Mimořádně vysokou pevnost slitiny 7075 lze proto využít jen za nepřiliš vysokých teplot. Tato slitina je dále dostupná také jako plátovaná pod názvem AlClad 7075. Plátování je buďto oboustranné s tloušťkou plátovací vrstvy 4% pro tloušťky plechů do 1,57mm a 2,5% pro tloušťky plechů nad 1,57mm nebo jednostranné, přičemž tloušťka vrstvy je podobná.

Aplikace: plechy a desky z této slitiny jsou vhodné k použití tam, kde je požadována střední houževnatost a korozní odolnost. Typická použití jsou pro plášť trupu a různé konstrukční prvky v rámci celého stroje.

### **Slitina 7040 (Alcan)**

Tepelné zpracování: **T7451, T7651**

Polotovary: desky

Popis: tato slitina poskytuje lepší poměr pevnosti a houževnatosti v porovnání se slitinami 7010 a 7050. Zvolením dobrého poměru množství prvků Mg a Cu spolu s přesnou kontrolou množství Zr a menší citlivostí při kalení než u již zmiňovaných slitin 7010 a 7050 vede k vysoké pevnosti a houževnatosti i u velmi tlustých profilů. Tepelným zpracováním T7451 (přestárnutí) je zachována pevnost jako u slitin 7010/7050, při výrazně vyšší houževnatosti. U tepelného zpracování T7651 je dokonce dosaženo jak zlepšení houževnatosti, tak i zlepšení pevnosti. Oběma tepelnými zpracováními získáme přestárnutou slitinu, čehož je dosaženo dvěma stupni klasického stárnutí.

Aplikace: slitina je vhodná pro použití na konstrukcích vyžadujících vysokou pevnost, vysokou houževnatost a dobrou korozní odolnost, jako jsou celistvé obráběné vzpěry, nosníky, žebra a jiné částí konstrukce trupu. Díky velmi nízké hodnotě zbytkového napětí poskytuje tato slitina vynikající rozměrovou stálost, čím se z ní stává cenově výhodná alternativa k válcovaným nebo kovaným produktům z jiných slitin, které po obrábění vyžadují korekce rozměrů, například rovnáním.

### **Slitina 7050 (Alcoa)**

Tepelné zpracování: **T7451, T7651, T76**

Polotovary: desky, plátované a neplátované plechy

Popis: slitina je vhodná pro aplikace vyžadující jednu z nejlepších kombinací pevnosti,

odolnosti proti korozi pod napětím a houževnatosti. Charakteristiky korozní odolnosti a houževnatosti jsou lepší než u slitiny 7075. Jelikož je slitina méně náchylná při kalení, jak je tomu běžné u většiny leteckých Al slitin, zachovává si tak pevnostní charakteristiky také u tlustších profilů, při současném udržení dobré odolnosti proti korozi pod napětím a lomové houževnatosti. Desky jsou dostupné ve dvou stavech: T7651 kombinuje nejvyšší pevnost s dobrou odolností proti odlupování a odolností proti korozi pod napětím, T7451 (dříve T73651) nabízí lepší odolnost proti korozi pod napětím a vynikající odolnost proti odlupování při mírně horší pevnosti. Plechy jsou dostupné jako plátované a neplátované a ve stavu po tepelném zpracování T76.

Aplikace: desky z této slitiny jsou vhodné pro použití na konstrukci trupu a přepážek. Typické použití plechů je na potahy křídel.

### **Slitina 7055 (Alcoa)**

Tepelné zpracování: **T7751, T77511**

Polotovary: desky, protlačované součásti

Popis: desky jsou dodávány ve stavu po tepelném zpracování T7751 a protlačované součásti ve stavu po tepelném zpracování T77511. Slitina byla vyvinuta pro užití na konstrukcích, kde je dominantní tlakové napětí. Dále poskytuje výhody oproti slitině 7050 v pevnosti v tlaku a tahu, při zachování ostatních vlastností, jako jsou lomová houževnatost nebo korozní odolnost.

Aplikace: jak již bylo řečeno je slitina 7055 ve stavu po tepelném zpracování T77 vhodná zejména tam, kde je dominantní tlakové namáhání, jako jsou horní strany křídel, horizontální stabilizátory nebo výztuhy kýlu. Další možné použití je u vodících lišt sedadel a v nákladním prostoru. Ve srovnání se slitinou 7150 po tepelných zpracováních T7651 nebo T7751 poskytuje tato slitina přibližně o 7 až 10% vyšší minima v tlakové a tahové pevnosti, což vede ke snížení hmotnosti.

### **Slitina 7056 (Alcan)**

Tepelné zpracování: **T7651**

Polotovary: desky

Popis: tato slitina poskytuje vylepšený poměr mezi pevností při statickém zatěžování a houževnatostí v porovnání se slitinami 7150 a 7449. Přestárnutí T7651 má za následek zachování velmi vysoké houževnatosti a vylepšení pevnosti při statickém zatěžování a korozní odolnosti.

Aplikace: desky z této slitiny jsou určeny pro použití na částech, které vyžadují lepší korozní odolnost společně s vysokou pevností a houževnatostí. Byla prokázána vynikající schopnost tváření vystárnutých součástí a jejich obrábění při

dokonalé rozměrové stálosti. Slitina je určena především pro malé až středně velké součásti jako např. horní potah trupu.

### **Slitina 7140 (Alcan)**

Tepelné zpracování: **T7451, T7651**

Polotovary: desky

Popis: slitina poskytuje vylepšený poměr mezi pevností a houževnatostí oproti slitinám 7010 a 7050. Slitina 7140 je v podstatě slitinou 7040 s optimalizovaným složením a z ní vyrobené tlustostěnné deskové produkty jsou dnes velmi často využívány u mnoha letounů. Slitina se projevuje menší citlivostí při kalení a menším vlastním pnutím než zmíněné slitiny, což vede k dobré obrobitelnosti s minimálním zkroucením a výbornou kvalitou povrchu. Obě tepelná zpracování mají za následek vysokou pevnost a lomovou houževnatost i u velmi tlustých profilů. Navíc tepelné zpracování T7451 přináší ještě lepší odolnost proti korozi pod napětím.

Aplikace: desky po obou tepelných zpracováních jsou ideální pro konstrukce vyžadující vyšší pevnost a houževnatost s dobrou korozní odolností, jako např. vzpěry křídel, žebra nebo přepážky a rámy trupu. Jsou zvláště vhodné pro jednoduché konstrukce nahrazující konstrukce spojované z více dílců.

### **Slitina 7150 (Alcoa)**

Tepelné zpracování: **T6151, T7751, T77511**

Polotovary: desky, protlačované součásti

Popis: desky z této slitiny ve stavu po tepelném zpracování T6151 jsou nejpevnějšími Al slitinami momentálně dostupnými pro výrobu dopravních letounů. Díky vysoké tuhosti a zaručené hodnotě lomové houževnatosti může být tato slitina možnou náhradou za slitinu 7075-T651, protože má asi o 41 až 69 MPa vyšší mez pevnosti. Slitina 7150 je v podstatě druhou generací slitiny 7050 a byla vyvinuta přednostně pro maximální pevnostní charakteristiky u desek tlustých 19,1 až 38,1mm.

Aplikace: desky po tepelném zpracování T6151 a T7751 a protlačované součásti po tepelném zpracování T77511 se dnes hojně používají u velkých dopravních a vojenských letadel pro horní panely křídel a horizontální stabilizátory. Slitina po tepelném zpracování T7751 a T77511 je vhodná právě pro různé tlakem zatížené výztuže vyžadující kombinaci vysoké meze kluzu v tlaku, mírně vyšší houževnatosti a dobré únavové a korozní odolnosti, v porovnání s dříve užívanými výztužemi ze slitin 7150-T6 nebo 7075-T6. Další možné aplikace protlačovaných součástí ze slitiny 7150-T77 jsou podélníky, nosníky kýlu nebo vodící lišty sedadel.



### **Slitina 7349 (Alcan)**

Tepelné zpracování: **T6511, T76511**

Polotovary: protlačované součásti

Popis: slitina poskytuje vyšší pevnostní vlastnosti než např. slitiny 7150 a 7175. Obě tepelná zpracování jak T6511 tak i T76511 dávají slitině vynikající kombinaci velmi vysoké pevnosti a korozní odolnosti.

Aplikace: tenké protlačované součásti z této slitiny jsou především vhodné pro vyztužující konstrukce, jakými jsou panely trupu, vodící lišty sedadel nebo podélníky podlahy či úložného prostoru. Všechny tyto aplikace vyžadují vysokou pevnost v tlaku a dobrou korozní odolnost.

### **Slitina 7449 (Alcan)**

Tepelné zpracování: **T6511, T7651, T7951, T79511**

Polotovary: desky, protlačované tyče, tlusté protlačované součásti

Popis: slitina byla vyvinuta, aby poskytovala lepší poměr mezi pevností a korozní odolností oproti slitině 7150. Tepelné zpracování T7651 bylo navrženo tak, aby slitina získala pevnost na úrovni slitiny 7150 při zlepšené korozní odolnosti. Tepelné zpracování T7951 má za cíl překonat pevnost slitiny 7150 a zároveň vylepšit korozní odolnost. Obě tato tepelná zpracování jsou určena pro desky a rovněž bylo dosaženo významného nárůstu tloušťky zpracovávaných polotovarů, u T7651 až do 100mm a u T7951 do 63mm. Pro protlačované tyče jsou určena dvě tepelná zpracování, T6511 a T79511, které vedou k vynikající kombinaci vysoké pevnosti a korozní odolnosti. Pro tlusté protlačované součásti je taktéž užito tepelného zpracování T79511, díky kterému slitina získává vyšší pevnost než slitina 7150-T6511, navíc s vylepšenou korozní odolností.

Aplikace: desky z této slitiny jsou především určeny pro použití na částech, které jsou nadměrně ohroženy korozí a vyžadující vysokou pevnost. Díky tomu, že mají tyto desky dobrou zásobu plasticity je možno je obrábět a tvářet s vynikajícími rozměrovými tolerancemi. Desky po tepelném zpracování T7651 jsou určeny pro středně velké části jako podélníky, žebra nebo rámy. Po tepelném zpracování T7951 jsou desky určeny pro malé až středně velké části jakými jsou např. horní panely křídel. Protlačované tyče se používají pro součásti zatížené tlakem, což mohou být konstrukce v horní části křídel. Tlusté protlačované součásti jsou taktéž používány tam, kde je zapotřebí dobrá korozní odolnost. Mají stejně jako desky dobrou zásobu plasticity a mohou být tvářeny za studena. V horní části křídel jsou tyto protlačované součásti používány na vyztužení dlouhých panelů obráběných z vysoce pevných slitin skupiny 7xxx.

### Slitina 7475 (Alcoa)

Tepelné zpracování: **T651, T7351, T7651, T61, T761**

Polotovary: desky, holé nebo plátované plechy

Popis: slitina byla vyvinuta pro aplikace vyžadující kombinaci vysoké pevnosti, vynikající lomové houževnatosti a odolnosti proti vzniku únavové trhliny. Hodnoty lomové houževnatosti u této slitiny jsou přibližně o 40% vyšší než u slitiny 7075 při stejném tepelném zpracování. Korozní odolnost a únavové chování slitiny 7475 je stejné a v některých případech i lepší než u mnoha běžných vysoce pevných slitin pro letecký průmysl, jakými jsou např. 7075, 7050 nebo 2024. Desky jsou dostupné po tepelném zpracování T651, T7651 a T7351. Plechy jsou buďto holé nebo plátované a po tepelném zpracování T61 nebo T761.

Aplikace: desky i plechy z této slitiny jsou především určeny pro součásti značně ohrožené únavovým lomem u vysoce výkonných letounů. Mohou to být potahy trupu a křídel, vzpěry křídel, přepážky trupu a další.

Tab.11 Chemické složení slitin soustavy Al – Zn – Mg

Slitina (výr.)	Obsahy chemických prvků												
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Li (Sn)	Ti	Zr (Bi)	Ag (Pb)	Ostatní	
	[%]												každý
<b>7040</b> (Alcan)	0,10	0,13	1,5- 2,3	-	1,7- 2,4	-	5,7- 6,7	-	0,06	0,05- 0,12	-	-	-
<b>7050</b> (Alcoa)	0,12	0,15	2,0- 2,6	0,10	1,9- 2,6	0,04	5,7- 6,7	-	0,06	0,08- 0,115	-	0,05	0,15
<b>7055</b> (Alcoa)	0,10	0,15	2,0- 2,6	0,05	1,8- 2,3	0,04	7,6- 8,4	-	0,06	0,08- 0,25	-	0,05	0,15
<b>7056</b> (Alcan)	0,10	0,12	1,2- 1,9	0,20	1,5- 2,3	-	8,5- 9,7	-	0,08	0,05- 0,15	-	-	-
<b>7075</b> (Alcoa)	0,40	0,50	1,2- 2,0	0,30	2,1- 2,9	0,18- 0,28	5,1- 6,1	-	0,20	-	-	0,05	0,15
<b>7140</b> (Alcan)	0,10	0,13	1,3- 2,3	-	1,5- 2,4	-	6,2- 7,0	-	0,06	0,05- 0,12	-	-	-
<b>7150</b> (Alcoa)	0,12	0,15	1,9- 2,5	0,10	2,0- 2,7	0,04	5,9- 6,9	-	0,06	0,08- 0,15	-	0,05	0,15
<b>7349</b> (Alcan)	0,12	0,15	1,4- 2,1	0,20	1,8- 2,7	0,1- 0,22	7,5- 8,7	-	-	-	-	-	-
<b>7449</b> (Alcan)	0,12	0,15	1,4- 2,1	0,20	1,8- 2,7	0,05	7,5- 8,7	-	-	-	-	-	-
<b>7475</b> (Alcoa)	0,10	0,12	1,2- 1,9	0,06	1,9- 2,6	0,18- 0,25	5,2- 6,2	-	0,06	-	-	0,05	0,15

Obsahy prvků jsou maximální možné, pokud není uveden rozsah.

Tab.12 Mechanické vlastnosti slitin soustavy Al – Zn – Mg

Slitina (výr.)	Tepel. zprac.	polo- tovar	směr	Tloušťka [mm]	Mechanické vlastnosti					
					$R_m$	$R_{p0,2}$	A	$K_{IC}$	E	$\rho$
					MPa	MPa	%	$MPa \cdot \sqrt{m}$	GPa	$g \cdot cm^{-3}$
<b>7075</b> (Alcoa)	0	plechy desky	LT	0,38-50,80	276	145	9-10	-	-	-
	T6	plechy		0,203-6,32	510-538	434-476	5-8			
	T651	desky		6,35-101,60	538-462 <sup>12)</sup>	462-372 <sup>12)</sup>	9-3 <sup>12)</sup>			
	T76	plechy		3,18-6,32	503	427	8	28,6		
	T7651	desky		6,35-25,4	496-490 <sup>12)</sup>	421-414 <sup>12)</sup>	8-6 <sup>12)</sup>			
	T73	plechy		1,02-6,32	462	386	8	-		
	T7351	desky		6,35-101,60	476-421 <sup>12)</sup>	393-331 <sup>12)</sup>	7-6 <sup>12)</sup>	32		
<b>Alclad 7075</b> (Alcoa)	0	plechy desky	LT	0,203-6,32	248-276	138-145	9-10	-	-	-
	T6	plechy		0,203-6,32	469-524	400-448	5-9			
	T651	desky		6,35-101,60	517-462 <sup>12)</sup>	448-372 <sup>12)</sup>	9-3 <sup>12)</sup>			
	T76	plechy		3,18-6,32	469-482	393-407	8			
	T7651	desky		6,35-25,4	476-490	400-414	8-6			
	T73	plechy		1,02-6,32	434-455	352-372	8			
	T7351	desky		6,35-25,40	455-476	372-393	8-7			
<b>7040</b> (Alcan)	T7451	desky	L	100	483	427	8	34,1 <sup>1)</sup>	-	2,82
				150	483	427	7	31,9 <sup>1)</sup>		
				200	469	421	5	28,6 <sup>1)</sup>		
	100			490	455	6	34 <sup>1)</sup>			
	150			480	445		33 <sup>1)</sup>			

Slitina (výr.)	Tepel. zprac.	polo- tovar	směr	Tloušťka [mm]	Mechanické vlastnosti					
					$R_m$	$R_{p0,2}$	A	$K_{IC}$	E	$\rho$
					MPa	MPa	%	$MPa \cdot \sqrt{m}$	GPa	$g \cdot cm^{-3}$
7050 (Alcoa)	T7651	desky	LT	6,35-24,40	524	455	8	26 <sup>2)</sup>	-	-
				50,83-76,20	524	455	7	24		
	T7451	6,35-50,80		510	441	9	29 <sup>3)</sup> 24 <sup>4)</sup>			
	T76	neplát. plechy		1,60-4,75	531	462	7	-		
		plát. plechy			503	427	7			
7055 (Alcoa)	T7751	desky	L	25,4	634	614 621 <sup>5)</sup>	11	-	-	-
			LT		641	614 648 <sup>5)</sup>	10	28,6		
	T7751 1	protla- čky	L		669	655 669 <sup>5)</sup>	11	-		
			LT		627	614	10	33		
7056 (Alcan)	T7651	desky	L	25	572	545 538 <sup>5)</sup>	-	30 (LT)	-	2,87
				38	558	531 524 <sup>5)</sup>				
7140 (Alcan)	T7451	desky	L	100	490	455	8	32 (LT)	-	2,83
				150	490	455	7	29 (LT)		
				200	483	448	5	24 (LT)		
	T7651			100	510	483	6	30		
				150	510	483		28		
				200	496	469		24		

Slitina (výr.)	Tepel. zprac.	polo- tovar	směr	Tloušťka [mm]	Mechanické vlastnosti						
					$R_m$	$R_{p0,2}$	A	$K_{IC}$	E	$\rho$	
					MPa	MPa	%	$MPa \cdot \sqrt{m}$	GPa	$g \cdot cm^{-3}$	
7150 (Alcoa)	T6151	desky	LT	19,05-25,40	579	538 531 <sup>5)</sup>	9	6)	-	-	
				25,43-38,10	579	531 531 <sup>5)</sup>	7				
	T7751		L	6,35-12,69	552	510 503 <sup>5)</sup>	8	-			
				12,70-19,04	572	531 524 <sup>5)</sup>	8				
				19,05-25,40	579	538 531 <sup>5)</sup>	8				
				25,41-38,10	579	538 531 <sup>5)</sup>	8				
				38,11-76,20	565	524 517 <sup>5)</sup>	7				
			LT	6,35-12,69	552	510 531 <sup>5)</sup>	8				
				12,70-19,04	572	524 545 <sup>5)</sup>	8				
				19,05-25,40	579	531 558 <sup>5)</sup>	8				22
				25,41-38,10	579	531 558 <sup>5)</sup>	8				24,2
				38,11-76,20	565	517 545 <sup>5)</sup>	6				7)
	T7751 1		L	1,00-6,34	594	545 510 <sup>5)</sup>	7	-			
				6,35-12,69	608	573 573 <sup>5)</sup>	8				
				12,70-19,04	615	580 580 <sup>5)</sup>	9				
				19,05-50,80	622	587 594 <sup>5)</sup>	8				
			LT	1,00-6,34	566	510 531 <sup>5)</sup>	-				-
				6,35-12,69	573	531 559 <sup>5)</sup>					
				12,70-19,04	580	552 566 <sup>5)</sup>					
				19,05-50,80	580	545 573 <sup>5)</sup>					

Slitina (výr.)	Tepel. zprac.	polo- tovar	směr	Tloušťka [mm]	Mechanické vlastnosti					
					$R_m$	$R_{p0,2}$	A	$K_{IC}$	E	$\rho$
					MPa	MPa	%	$MPa \cdot \sqrt{m}$	GPa	$g \cdot cm^{-3}$
7150 (Alcan)	T6511	tlusté protla- čky	L	19-50	614	579	8	-	-	2,83
	T7751 1				614	579 579 <sup>5)</sup>	8	23 <sup>1)</sup>		
7349 (Alcan)	T6511	protla- čky	L	≤20	665	625 635 <sup>5)</sup>	7	-	71	2,85
	T7651 1				627	579 580 <sup>5)</sup>	7			
7449 (Alcan)	T7651	desky	L	25	579	538	8	24,2 <sup>1)</sup>	-	2,85
				50	565	524	7	22 <sup>1)</sup>		
				100	544	510	6	20 <sup>1)</sup>		
	T7951			25	607	579 572 <sup>5)</sup>	-	23,1 <sup>1)</sup>		
				38	600	579 565 <sup>5)</sup>		23,1 <sup>1)</sup>		
				50	579	565 534 <sup>5)</sup>		22 <sup>1)</sup>		
	T6511	protla. tyče		D<20	dostupné na požádání u výrobce					
				20≤D≤100	695	660	6	-	-	
	T7951 1	protla. tyče		20≤D≤100	625	600 620 <sup>5)</sup>	-	-	71,5 73,5 <sup>8)</sup>	
				D>100	dostupné na požádání u výrobce					
		tlusté protla- čky		12-50	627	600 620 <sup>5)</sup>	8	25 <sup>1)</sup>	-	

Slitina (výr.)	Tepel. zprac.	polo- tovar	směr	Tloušťka [mm]	Mechanické vlastnosti					
					$R_m$	$R_{p0,2}$	A	$K_{IC}$	E	$\rho$
					MPa	MPa	%	$MPa \cdot \sqrt{m}$	GPa	$g \cdot cm^{-3}$
7475 (Alcoa)	T651	plechy desky	LT	6,35-12,675	538	462	10	46	-	-
				25,425-38,1	538	469	9	33 <sup>9)</sup>		
	T7351			25,43-38,10	490	414	9	55 44 <sup>10)</sup>		
				50,83-63,50	476	393	8			
				76,25-88,90	448	365	8			
	T61	holé plechy		1,016-6,325	517	441	9	82,4 65,9 11)		
		plátov. plechy		1,60-4,75	485	415	9	82,4 65,9 11)		
	T761	holé plechy		1,016-6,325	490	414	9	95,6 87,9 11)		
		plátov. plechy		1,60-4,75	462	386	9	95,6 87,9 11)		

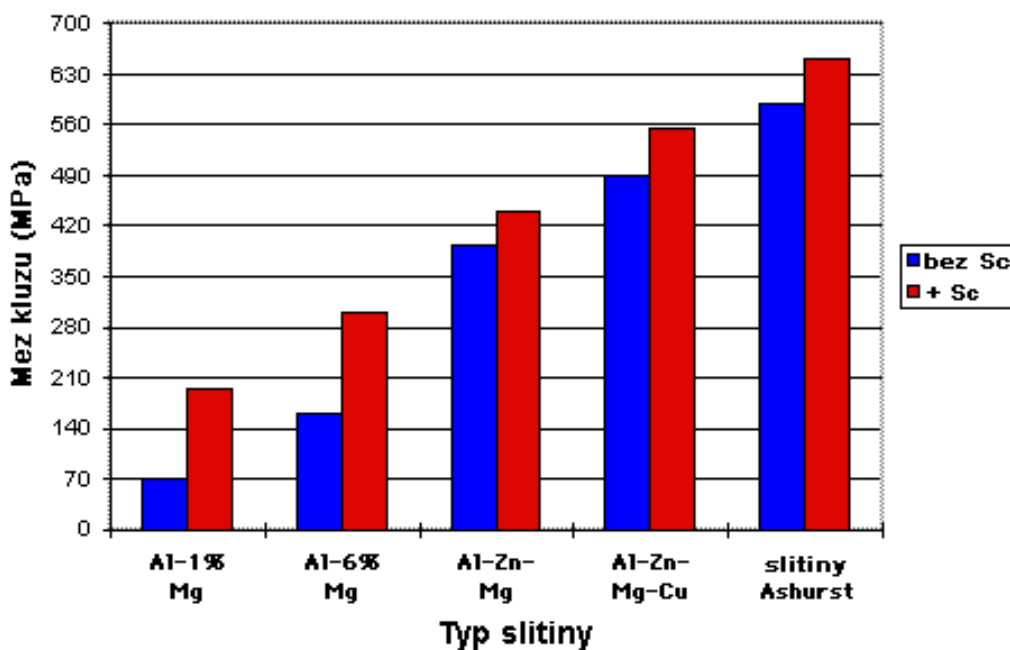
Uvedené hodnoty mechanických vlastností jsou garantované minimální.

#### Vysvětlivky:

- 1) hodnoty pro lomovou houževnatost jsou uvedeny pro směr LT
- 2) hodnota lomové houževnatosti  $26 MPa \cdot \sqrt{m}$  přísluší tloušťce polotovaru 25,42-50,80 mm
- 3) hodnota lomové houževnatosti  $29 MPa \cdot \sqrt{m}$  přísluší tloušťce polotovaru 25,42-50,80 mm
- 4) hodnota lomové houževnatosti  $29 MPa \cdot \sqrt{m}$  přísluší tloušťce polotovaru 127,03-152,4mm
- 5) hodnota meze kluzu v tlaku
- 6) hodnoty lomové houževnatosti jsou srovnatelné se slitinou 7075-T651(nezařazena)
- 7) hodnoty lomové houževnatosti na vyžádání u výrobce
- 8) hodnota 73,5 GPa odpovídá modulu pružnosti v tlaku
- 9) hodnota lomové houževnatosti  $46 MPa \cdot \sqrt{m}$  je typická ne zaručená hodnota, zatímco hodnota  $33 MPa \cdot \sqrt{m}$  je zaručená minimální hodnota pro tloušťku 31,75-38,10 mm
- 10) hodnota lomové houževnatosti  $55 MPa \cdot \sqrt{m}$  je typická ne zaručená hodnota, zatímco hodnota  $44 MPa \cdot \sqrt{m}$  je zaručená minimální hodnota pro tloušťku 31,75-101,60 mm
- 11) hodnoty lomové houževnatosti, které jsou v rámečku uvedeny nahoře přísluší tloušťce polotovaru 1,02-3,18mm, hodnoty které jsou uvedeny dole přísluší tloušťce polotovaru 3,20-6,32mm
- 12) s rostoucí tloušťkou materiálu klesá mez pevnosti, mez kluzu a tažnost

## 6 Slitiny Al – Sc

Skandium je jedním z neúčinněji legujících prvků v periodické tabulce a poskytuje nejvyšší zpevnění vztahené na at. hmot. % přidaného prvku do slitiny v porovnání s ostatními přísadovými prvky. Slitiny hliníku legované Sc mají specifické vlastnosti. Legováním několika desetin procenta Sc lze získat lepší mechanické i technologické vlastnosti, jako vyšší mez kluzu nebo zjemnění zrna. V posledních letech byl vývoj slitin hliníku legovaných Sc soustředěn na vysoce pevné slitiny typu Al – Li, slitiny Al – Mg (řady 5xxx), Al – Mg – Si (6xxx) a Al – Zn (7xxx). Legování malého množství Sc do různých typů Al slitin (viz. Obr.4) otvírá možnost nejen ke zlepšení vlastností stávajících slitin a slitin Al – Li, ale vede k použití i těch slitin, které doposud nenašly v leteckých konstrukcích uplatnění kvůli nízkým mechanickým a únavovým vlastnostem (slitiny řady 5xxx, 6xxx). Legování Sc do Al slitin není novinkou. V bývalém Sovětském svazu a i v dnešním Rusku jsou tyto slitiny (stejně jako slitiny Al-Li) v leteckých konstrukcích využívány (např. MIG 29 nebo řízené střely). Vývoj těchto slitin zde byl soustředěn na slitiny Al – Mg – Sc (01570) a Al – Li – Sc (1420, 1460). Současný vývoj slitin legovaných Sc je zaměřen zejména na jejich využití pro svařované konstrukce. Ukazuje se, že optimálních vlastností při legování Sc se dosahuje při současném legování malého množství Zr. Kombinace antirekrytalizačních prvků Sc + Zr má na potlačení rekrytalizace (a tím na zvýšení mechanických a únavových vlastností) prokazatelně větší účinek než každý z uvedených prvků samostatně. Vedle zlepšení svařitelnosti a významných antirekrytalizačních účinků přispívají Sc a Zr k precipitačnímu vytvrzení. [5, 9]



Obr.4 Nárůst meze kluzu Al slitin bez a s přísadou Sc



## 6.1 Vliv skandia na vlastnosti

Jak již bylo řečeno, je účinek Sc na vlastnosti velmi výrazný a ovlivňuje jak mechanické a únavové, tak i technologické vlastnosti. Rovněž korozní odolnost slitin s Sc je buď srovnatelná, a nebo lepší než u slitin bez Sc. [9]

Skandium dosahuje vylepšujících vlastností u Al slitin díky těmto třem základním charakteristikám [5]:

- vysoce koherentnímu precipitátu (dispersoidu)  $Al_3Sc$ ,
- většímu objemovému podílu koherentního precipitátu (vyšší rozpustnost a nižší at. hmot.),
- větší tepelná stabilita

Tyto charakteristiky vedou ke zlepšení [5]:

- pevnosti,
- odolnosti proti rekrystalizaci,
- zjemnění zrna,
- odolnosti proti vzniku trhlin za zvýšených teplot (např. při svařování)

### 6.1.1 Vliv na mechanické vlastnosti

Významným účinkem Sc na mechanické vlastnosti je jeho schopnost omezit nebo zabránit rekrystalizaci a tím zachovat tvářenou strukturu. V tomto směru je Sc výrazně účinnější než běžně používané antirekrystalizační prvky, jako Mn, Cr, a Zr. U vytvrditelných slitin lze legováním Sc omezit nebo zabránit rekrystalizaci při ohřevu na rozpouštěcí teplotu. Například u válcovaného materiálu ze slitiny 7xxx s přidávkou Sc se mez kluzu po tepelném zpracování může zvýšit až o 50MPa oproti slitině bez Sc. U nevytvrditelných slitin jsou předmětem zájmu především slitiny Al – Mg. V Tab.13 je uveden vliv Sc a Zr na mechanické vlastnosti válcovaných plechů u slitin Al – Mg s různým obsahem Mg. Ve srovnání se slitinami bez Sc je patrný výrazný vliv Sc především na mez kluzu. Z uvedených slitin je nejzajímavější zejména slitina s obsahem 6% Mg (01570). Po tváření za tepla nebo za studena a následném žíhání vykazuje tato slitina nerekrystalizovanou strukturu, a to i v případě tenkých plechů, které byly tvářeny za studena velkou redukcí. Vliv teploty žíhání na vlastnosti je dobře patrný z Tab.14. Určitou nevýhodou nerekrystalizovaných struktur je anizotropie vlastností vyplývající z usměrněné struktury.[9]

### 6.1.2 Vliv na superplasticitu

Díky rovnoměrnému rozdělení koherentního precipitátu  $Al_3Sc$  lze u slitin legovaných skandiem připravit stabilní jemnozrnnou strukturu, která je vhodná pro superplastické tváření. Pro tyto účely se ukazuje jako nejvhodnější slitina AlMg6Sc. Slitina vykazuje superplastické

chování v širokém rozmezí teplot (od 475 do 520 °C) a intervalu rychlostí deformace od  $10^{-3}$  až do  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ . [9]

Tab.13 Složení a vlastnosti slitin Al-Mg s Sc a bez něj

Typ slitiny	Označení	Střední složení	Mechanické vlastnosti		
			$R_m$ [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	A[%]
Al-Mg	AlMg1	Al-1.15Mg	120	50	28
Al-Mg-Sc	01515	Al-1.15Mg-0.3Sc-0.1Zr	250	160	16
Al-Mg	AlMg2	Al-2.2Mg-0.4Mn	190	90	23
Al-Mg	AlMg3	Al-3.5Mg-0.45Mn-0.65Si	235	120	22
Al-Mg-Sc	01523	Al-2.1Mg-0.3Sc-0.15Zr	270	200	16
Al-Mg	AlMg4	Al-4.2Mg-0.65Mn-0.06Ti	270	140	23
Al-Mg-Sc	01535	Al-4.2Mg-0.3Sc-0.1Zr	360	280	20
Al-Mg	AlMg5	Al-5.3Mg-0.55Mn-0.06Ti	300	170	20
Al-Mg-Sc	01545	Al-5.2Mg-0.3Sc-0.1Zr	380	290	16
Al-Mg	AlMg6	Al-6.3Mg-0.65Mn-0.06Ti	340	180	20
Al-Mg-Sc	01570	Al-5.8Mg-0.4Mn-0.25Sc-0.1Zr	400	300	15
Al-Mg-Sc	01571	Al-6.3Mg-0.35Sc-0.1Cr-0.1Zr	400	300	15

Tab.14 Vliv teploty žíhání na mechanické vlastnosti za studena válcovaných plechů tl. 1,5mm ze slitiny 01570 (doba žíhání 1 hodina)

Teplota žíhání [°C]	Orientace	$R_m$ [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	A[%]
325	L	445	330	13
	T	450	355	20
375	L	435	325	15
	T	440	330	20
425	L	415	275	16
	T	420	290	22
475	L	400	250	17
	T	400	255	21
525	L	385	210	17
	T	400	220	22

### 6.1.3 Vliv na svařitelnost

Vlivem Sc se výrazně snižuje náchylnost ke vzniku trhlin za tepla u svarových spojů, přičemž účinek je patrný již pouhým přidáním Sc do přídatného materiálu. Díky této vlastnosti se stávají svařitelnými i slitiny, které se obvykle nesvařují (řady 2xxx s Cu nebo slitina 7075). Přidáním Sc se zároveň zlepšuje svařitelnost i stávajících běžně svařovaných slitin (řady 5xxx a 6xxx). Legováním Sc se zvyšuje pevnost svarových spojů, a to např. u konvenčních slitin 7xxx použitím přídatného materiálu 5xxx se skandiem. Pevnost svarového spoje se dále zvyšuje legováním Sc do slitiny 7xxx. Pro uváděnou slitinu 01570 byl vyvinut speciální přídatný materiál 01571 s mírně vyšším obsahem Mg a pevnost svarového spoje není menší

než 85% pevnosti základního materiálu. Výborná svařitelnost slitin legovaných Sc tak umožňuje jejich využití i tam, kde vzhledem k jejich nižším mechanickým vlastnostem to nebylo možné. Jedná se zejména o možnost využití slitin řady 5xxx a 6xxx v leteckých svařovaných konstrukcích. [9]

## 6.2 Použití slitin hliníku se skandiem v leteckém průmyslu

Slitiny Al – Sc jsou již delší dobu používány v Rusku při konstrukci letounů MIG-29 nebo řízených střel. Nově společnost Daimler Benz Aerospace uvažuje o užití Al slitin s přísadou skandia pro nové generace letounů Airbus. Kombinace kompozitů  $Al - Al_3Sc$  a Al slitin s přísadou skandia jsou nyní testovány ve výzkumných zařízeních této společnosti a počítá se s tím, že se u tvářených produktů ze slitin Al – Sc řady 7x7x, jako jsou protlačované nebo tažené součásti, dosáhne zvýšení meze kluzu a meze pevnosti až k hodnotám kolem 700MPa. Slitiny soustavy Al – Mg – Sc ( Corus Ko8x42 / Alcoa C557 ) založené na sérii 5000 s malou přísadou skandia nabízí snížení hustoty, dobré vlastnosti co se týče odolnosti proti únavě a poškození a excelentní korozní odolnost. Materiálu je dostupný v podobě plechů a protlačovaných produktů a jeho cena je relativně nízká v porovnání se slitinami Al – Li. Statické vlastnosti slitiny Corus Ko8x42 jsou sice nižší než např. u slitiny 2524-T351, nicméně velmi dobrá odolnost proti porušení u slitin Al – Mg – Sc může vést k jejich použití na částech trupu v místech, kde je tato odolnost zvláště vyžadována. Velmi dobrá tepelná odolnost mikrostruktury umožňuje odolávat creepovém chování. Jedna z prvních aplikací slitin soustavy Al – Mg – Sc je pro vnitřní části klapek u A350. Slitiny hliníku s přísadou skandia jsou samozřejmě stále vyvíjeny, nová slitina Corus Ko8542 s vylepšenými statickými vlastnostmi by mohla být možnou náhradou za některé slitiny soustavy Al – Cu – Li. [5, 8]

## **Závěr**

Slitiny hliníku jsou s leteckým průmyslem spjaty od jeho počátků. V průběhu doby se osvědčily jako vhodný materiál pro letecké konstrukce a jsou používány dodnes. Postupem času byly vyvíjeny nové, přičemž cílem tohoto vývoje bylo vždy dosáhnout snížení hmotnosti při současném zlepšení mechanických vlastností. Dnes se dá říci, že nové slitiny jako takové v podstatě nevznikají, ale že vývoj v oblasti hliníkových slitin se zaměřuje především na zdokonalování slitin současných. Vyvíjejí se nové metalurgické procesy, díky kterým se dá velice přesně dosáhnout požadovaného chemického složení a tím také požadovaných vlastností slitiny. Dnes se čím dál více v konstrukcích nejnovějších letadel uplatňují především kompozitní materiály. Ale i přesto zůstávají hliníkové slitiny nedílnou součástí moderního leteckého průmyslu a to díky svým vlastnostem, které jiné materiály nahradit nemohou.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] MARTINEC, J.: Evropský systém značení hliníku a jeho slitin.[PDF dokument] ESAB Vamberk, s r.o. Dostupný z: <<http://www.hadyna.cz/products/migatronic/technology/EN%20zna%C4%8Den%C3%AD%20hlin%C3%ADku.pdf>>
- [2] USTOHAL, V.: Současný stav a trendy vývoje lehkých slitin v konstrukci draků letadel. Brno : Klub české společnosti pro nové materiály a technologie při VUT v Brně, listopad 2000. 120s.
- [3] <http://www.alcanaerospace.com/Aerospace/aerospace.nsf/html/FWFGHOME?Open&LG=1>
- [4] <http://www.alcoa.com/global/en/products/overview.asp?Product=Aerospace&Business=&Region=&Category=26&Query=&page=0>
- [5] <http://www.scandium.org/Sc-Al.html>
- [6] WILLIAMS, J.; STARKE, E. Progress in structural materials for aerospace systems. [PDF dokument]. Columbus (Ohio): Materials Science & Engineering Department, The Ohio State University; Charlottesville (Virginia): Materials Science & Engineering Department, The University of Virginia, August 2003. Dostupný z: <<http://www.sciencedirect.com/>>
- [7] HEINZ, A.; HASZLER, A.; KEIDEL, C.; MOLDENHAUSER, S.; BENEDICTUS, R.; MILLER, W. Recent development in aluminium alloys for aerospace applications. [PDF dokument]. Koblenz (Germany): Hoogovens Aluminium Rolled Products (now part of Corus Group Plc); IJmuiden (The Netherlands): Hoogovens Research & Development (now part of Corus Group Plc), 2000. Dostupný z: <<http://www.sciencedirect.com/>>
- [8] PACCHIONE, M. <[marco.pacchione@airbus.com](mailto:marco.pacchione@airbus.com)>; TELGKAMP, J. <[jens.telgkamp@airbus.com](mailto:jens.telgkamp@airbus.com)> Metal Design Principles, Airbus, Challenges Of The Metallic Fuselage. ICAS 2006-4.5.1. Dostupný z: <<http://www.optimage.co.uk/ICAS2006/TOPIC.HTM>>
- [9] MICHNA, Š.; LUKÁČ, I.; OČENÁŠEK, V.; KOŘENÝ, R.; DRÁPALA, J.; SCHNEIDER, H.; MIŠKUFOVÁ, A. a kol. Encyklopedie hliníku. Prešov: Adin, s r.o., 2005. 700s. ISBN 80-89041-88-4

## Seznam použitých zkratk a symbolů

$A$	tažnost	[%]
$E$	modul pružnosti v tahu	[GPa]
$K_{IC}$	lomová houževnatost	[MPa · $\sqrt{m}$ ]
$R_e$	mez kluzu v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu v tahu	[MPa]
$R_m$	mez pevnosti v tahu	[MPa]
$\rho$	hustota (měrná hmotnost)	[g · cm <sup>-3</sup> ]