

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Mechanické vlastnosti zápusťkového výkovku vrtulového listu
Mechanical properties of the die forging of the propeller blade

AUTOR: František Kalianko

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: doc. Ing. Jiří Cejp, CSc.

PRAHA 2021



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kalianko** Jméno: **František** Osobní číslo: **482821**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Mechanické vlastnosti zápustkového výkovku vrtulového listu

Název bakalářské práce anglicky:

Mechanical properties of the die forging of the propeller blade

Pokyny pro vypracování:

Studijní a rešeršní činnost zaměřená na hliníkové slitiny a zápustkové kování. Zhodnocení současného postupu výroby vrtulových listů v Avia Propeller s.r.o. Stanovení a provedení experimentálního programu. Diskuzi výsledků směřovat na nehomogenitu a anizotropii mechanických vlastností podél osy výkovku.

Seznam doporučené literatury:

KUHLMAN,G.W.: Forging of Aluminum Alloys. ASM Handbook, Volume 14A: Metalworking: Bulk Forming, p.299-312.
MICHNA,Š. a kol. : Encyklopedie hliníku, Andin, 2005.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Cejp, CSc., ústav materiálového inženýrství FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **04.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

doc. Ing. Jiří Cejp, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

Bakalářská práce hodnotí současnou výrobu výkovků vrtulových listů. V teoretické části pojednává o hliníkových slitinách používaných v letectví, zabývá se moderními, perspektivními slitinami a jejich tepelném zpracování. V experimentální části byly analyzovány mechanické vlastnosti zápusťkového výkovku z hliníkové slitiny Z 42 4201.61.

Klíčová slova

Slitina hliníku, Z 42 4201.61, zápusťkový výkovek, tepelné zpracování, mechanické vlastnosti

Annotation

The bachelor thesis review current manufacture of die forging propeller blades. The teoretical part deals with aluminum alloys used in aerospace industry, deals with modern, perspective alloys and their heat treatment. In the experimental part, the mechanical properties of the die forging from aluminum alloy Z 42 4201.61 were analyzed.

Keywords

Aluminum alloy, Z 42 4201.61, die forging, heat treatment, mechanical properties

Poděkování

Velmi rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Cejpovi, CSc. za trpělivost a odborné rady. Dále děkuji vedení a zaměstnancům Avia Propeller s.r.o. za cenné rady a možnost realizace experimentu. V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu v průběhu studia.

Obsah

Obsah	- 6 -
Úvod:	- 7 -
Teoretická část:	- 7 -
1. Hliník stále perspektivní:	- 7 -
1.1 Produkce hliníku	- 7 -
1.2 Hliník a člověk	- 8 -
1.3 Perspektivní hliníkové materiály	- 9 -
2. Hliníkové slitiny v letectví:	- 10 -
2.1 Aplikace v letectví:	- 10 -
2.2 Srovnání vybraných slitin	- 12 -
2.3 Zápustkové kování hliníkových slitin	- 13 -
2.4 Vady výkovků	- 13 -
3. Tepelné zpracování a povrchové úpravy hliníkové slitiny:	- 14 -
3.1 Tepelné zpracování hliníkových slitin	- 14 -
3.2 Stavy tepelného zpracování	- 16 -
3.3 Povrchové ochrany hliníku	- 17 -
4. Vrtule	- 18 -
4.1 Obecně o vrtuli	- 18 -
4.2 Vrtulové listy	- 18 -
5. Avia Propeller a požadavek na výkovek listu	- 20 -
Cíle práce	- 21 -
Experimentální část	- 21 -
6.1 Experimentální materiál	- 21 -
6.2 Technologický postup výroby výkovku	- 22 -
6.3 Experimentální metody a zařízení	- 23 -
7. Naměřené hodnoty a jejich diskuse	- 26 -
7.1 Odběr vzorků	- 26 -
7.2 Zkouška tahem	- 27 -
7.3 Měření tvrdosti	- 31 -
7.4 Mikrostruktura	- 32 -
Závěr	- 33 -
Zdroje	- 35 -
Seznam obrázků	- 36 -

Seznam tabulek..... - 37 -

Přílohy - 37 -

Úvod:

V zájmu udržení konkurenceschopnosti je v současné době kladen důraz na úsporu materiálu i času a firmy jsou nuceny hledat způsoby, jak optimalizovat náklady. Firma Avia Propeller s.r.o., která se zabývá vývojem, výrobou a údržbou vrtulí pro letecký průmysl musí navíc zajistit bezpečný provoz svých výrobků. I proto vznikla tato bakalářská práce, zaměřená na vybraný tvarově složitý výkovek z hliníkové slitiny Z 42 4201.61, určený pro kritický vysoce namáhaný díl v leteckém průmyslu.

Teoretická část:

1.Hliník stále perspektivní:

1.1 Produkce hliníku

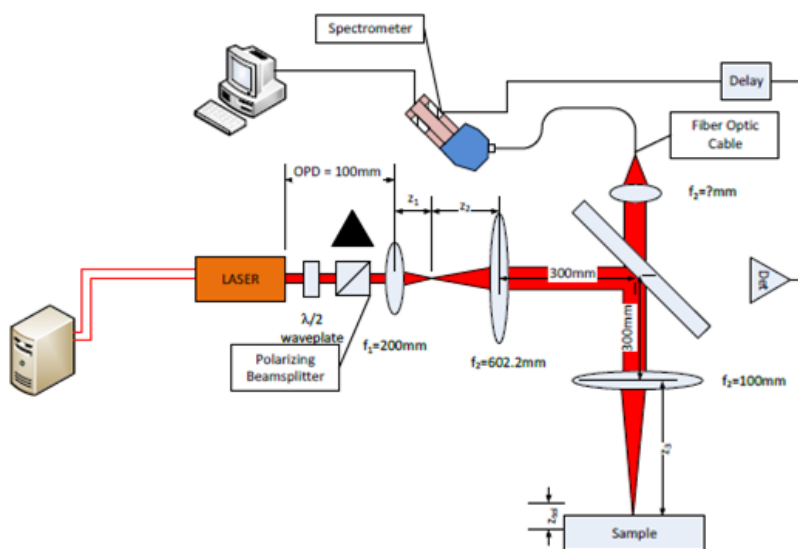
Primární výroba hliníku

Hliník má jedno z největších zastoupení prvků v zemské kůře. Jeho izolování a výroba začala až poměrně pozdě okolo roku 1859. Cena výroby hliníku byla vysoká, a dokonce se jednalo o šperkařský kov. Hliník se v přírodě nachází v přibližně 250 minerálech. Nejdůležitějším je bezpochyby korund, dále diaspor, boehmit, spinel, gibbsit, kyanit, andaluzit, silimanit, kaolinit, alunit a nefelin. Ekonomicky nejvýznamnější využitelnou rudou je bauxit. Nejedná se o specifický minerál, ale horninu, která se skládá většinou z hydratovaných oxidů hliníku, hlavně gibbsitu, boehmitu a diasporu. Přibližně 86 % světových nalezišť bauxitu se nachází v tropických nebo subtropických oblastech a vzniklo zvětráváním hornin. 13 % zásob je v krasových podložích v Evropě, Číně a pacifické oblasti. Zbylé usazeninové bauxity se nacházejí v Evropě. Světovým producentem bauxitu je dnes Austrálie. V roce 2016 těžila Austrálie 30 % světového bauxitu, následována Čínou (24 %), Brazílií (12 %) a Guineou (11 %). Dle odhadů drží Guinea až 27 % světových zásob. Avšak největším světovým výrobcem primárního hliníku je Čína, která vyrábí 50 % světového hliníku. [1,2,3]

Sekundární výroba hliníku

Celosvětová spotřeba hliníku roste ročně o miliony tun. Tím vzrůstá i výroba sekundárního hliníku (recyklování). V roce 2020 bylo vyrobeno přibližně 65 milionů tun primárního hliníku a celkově bylo vyrobeno 134 milionů tun hliníku. V porovnání s ocelí, kde výroba dosahuje 1 864 milionů tun ročně, je výroba hliníku stále malá, ale přesto životně důležitá pro letecký, dopravní a potravinářský průmysl. Navíc podíl výroby sekundárního hliníku dosáhl již 50 %. Podíl výroby sekundárního hliníku je významný zejména v Evropě. Vzhledem k ekologickým nárokům moderní doby bude tento podíl i nadále vzrůstat. Recyklace hliníku je oproti primárním zdrojům ve formě těžby a následnému zpracování jednoduchá a levná. V současnosti se daří recyklovat až 95 % hliníkového odpadu. V průběhu recyklace nedochází k výrazným ztrátám na množství nebo na kvalitě zpracovávané suroviny. Hliníkový šrot lze rozdělit na dvě suroviny nové

šrot – to je odpad hlavně od výrobců jako jsou odřezky, výronky nebo zmetky z výroby. Starý šrot – to jsou produkty na konci své životnosti nebo použité obalové materiály, řetězec sbírání odpadu je poměrně dlouhý a zahrnuje domácnosti, technické služby a obce. Tento starý šrot je velmi často kontaminován ať už jinými kovy nebo organickým odpadem, který musí být oddělen, k tomu slouží několik mechanických způsobů například pomocí magnetu, vířivých proudů nebo barevnými čidly. Různé druhy slitin je možné rozpoznávat rentgenovou metodou, v současnosti se stává stále dostupnější metoda spektrální analýzy založená na nejnovější technologii LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy). viz obrázek 1. [2,3]



Obrázek 1: Schéma LIBS systému [4]

1.2 Hliník a člověk

Hliník není považován za významný stopový prvek, protože není známa žádná biologická funkce v těle, kterou by ovlivňoval. Lidské tělo absorbuje z potravy pouze minimální podíl hliníku a ten vylučuje ledvinami. Při požití většího množství se rychle uloží do kostí a v delším časovém období je uvolňován. V současné době nebyla prokázána rizika pro lidské zdraví. Stále se však zkoumá spojitost hliníku s Alzheimerovou nemocí. Většina vodáren na celém světě používá hliníkový sulfát (kamenec) jako flotační činidlo při úpravě vody. V minulosti bylo hojně rozšířeno používání hliníkového nádobí a příborů. Dnes je široce využíván v potravinářství jako obalový materiál např. plechovky, fólie. Hydroxid hlinitý je široce používán v medikamentech, hlavně při léčbě žaludečních vředů nebo ledvinových obtíží. Hliníkové sloučeniny jsou používány v antiperspirantech, antiseptických roztocích a jako nosiče účinných látek ve vakcínách. Dnes bychom již velmi těžko hledali odvětví lidské činnosti, kde není přítomen hliník nebo jeho slitiny. Největší spotřeba je v dopravním průmyslu (přes 50 %), následuje stavebnictví a strojírenství, elektrotechnický a potravinářský průmysl. V dopravním průmyslu je pro jeho využití hlavním argumentem nízká hmotnost podle rovnice: **nižší hmotnost = nižší spotřeba paliva = nižší cena.**[3]

1.3 Perspektivní hliníkové materiály

Aplikace skandia

Hliníkové slitiny obsahující skandium reprezentují novou generaci vysokopevnostních slitin. Malé množství skandia má výrazný vliv na mechanické vlastnosti, což můžeme vidět na obrázku 2, vytváří precipitát Al_3Sc a zjemňuje zrna. Slitiny s touto příměsí jsou vytvrditelné, čehož se využívá hlavně u slitin Al-Mg-Sc. Skandium samo o sobě nebo v kombinaci se zirkonem podstatně zvyšují rekrystalizační teplotu až na 600 °C. Příklad skandia zlepšuje svařitelnost, čehož se využívá hlavně u slitin řady 2XXX a 7XXX a zlepšují odolnost proti vzniku trhlin za tepla, z toho důvodu se používá jako přídavek do svařovacích drátů pro svařování hliníku. Oproti slitinám na bázi Al-Li jsou levnější. Nejznámější je použití u letounů MIG 29 nebo na nové generaci Airbus A350. Kromě leteckého, kosmického a automobilového průmyslu se používá na sportovní náčiní a rámy jízdních kol. [3,5,6,7]



Obrázek 2: Vliv skandia na mez kluzu [6]

Aditivní technologie – A20x

Tato moderní slitina je určena pro odlévání a aditivní technologii. Používá se zejména na výrobu prototypů nebo funkčních dílů v letectví, je tepelně vytvrditelná ve stavu T7. V následující tabulce 1. je srovnání mechanických vlastností s běžně používanou slitinou AlSi10Mg na odlitky a pro 3D tisk. Jedná se o slitinu na bázi Al – Cu, která obsahuje hořčík a stříbro pro zvýšení slévatelnosti a dále keramické částice TiB_2 , které výrazně zvyšují pevnost. [8,9]

Tabulka 1: Porovnání A20x a AlSi10Mg pro aditivní technologii [8]

Název slitiny	Mez pevnosti Rm [MPa]	Mez kluzu Rp0,2 [MPa]	Tažnost [%]
A20x	460-510	370-430	13
AlSi10Mg	250-300	180-190	11

Pěnový hliník:

Jde de facto o kompozit, který se skládá z hliníkové slitiny a pórů, které jsou vyplněné plynem (argon, dusík nebo vzduch). Vyrábí se při slévání, kdy se do roztavené slitiny vmísí zpěňovadlo, které vytváří póry, a následně se nechá ztuhnout do bloků které je nutno obrábět. Další možností je metodou práškové metalurgie, kdy je slisovaná směs hliníkového prášku a práškového zpěňovadla zahřáta a požadovaný tvar vzniká ve formě. Díky svým přednostem, což je nízká hustota, tlumení hluku a vibrací, jakož i schopnost absorpce nárazové energie, se používá u lehkých a tuhých konstrukcí dopravníků a manipulačních zařízení, deformačních zón vozidel, na strojní díly nebo konstrukční prvky, které jsou určené pro tlumení hluku a vibrací. [3,7,10]

Superplastické hliníkové slitiny:

Největší výhodou superplastického tváření je nahrazení komplikovaného konstrukčního celku jedním výrobkem vyrobeného jedinou tvářecí operací. Od složitosti dílu a materiálových vlastností se odvíjí délka výrobního cyklu, která může trvat od několika minut až po hodiny, to závisí na dosažitelné rychlosti deformace. Základním předpokladem pro superplastické tváření hliníkových slitin je jemnozrnná struktura s velikostí zrna menší než 10 μm , tato struktura musí být rovněž odolná proti zhrubnutí v průběhu deformace. Vstupním materiálem je plech o tloušťce 0,8-6 mm. V následující tabulce 2 jsou vybrané slitiny a jejich podmínky superplastického tváření. [3,7]

Tabulka 2: Porovnání superplastických hliníkových slitin [7]

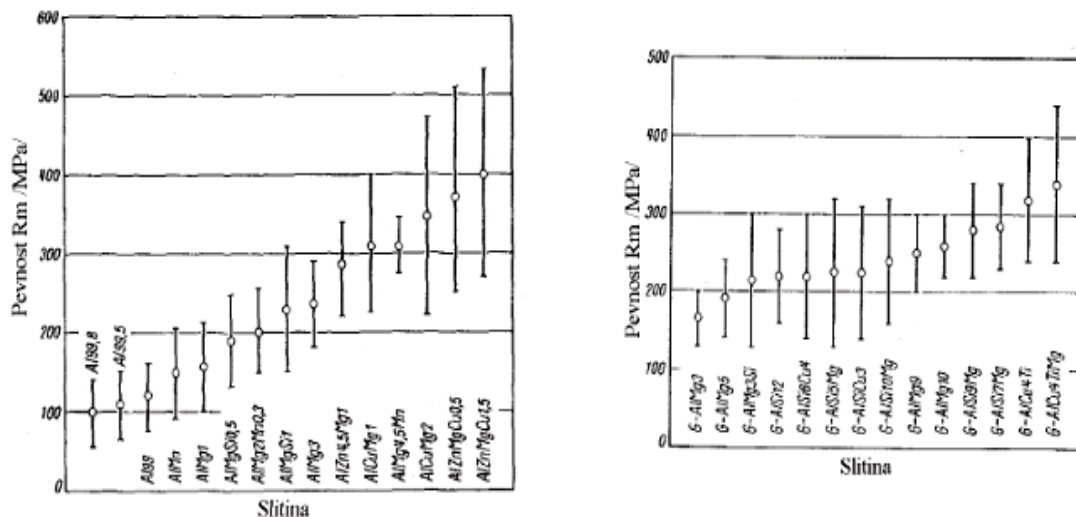
název	Teplota [°C]	Maximální deformace [%]	Rychlost deformace [s^{-1}]
Al6CuZr – supral	470	1360	10^{-3}
Al5MgMnCuCr	500	700	10^{-3}
Al2LiCuMgZr	500	820	$3 \cdot 10^{-3}$

Vzhledem k nutnosti vyhřívaných nástrojů, které udržují stálou teplotu plechu po dobu celého deformačního cyklu, je výroba dílů touto metodou drahá. Používá se tedy u velkých sériích výrobků anebo ve vojenském a kosmickém průmyslu. [3,7]

2. Hliníkové slitiny v letectví

2.1 Aplikace v letectví

Hliníkové slitiny zažily velký rozvoj s rozvojem letectví. Mají výhodnou kombinaci nízké hustoty a vysoké pevnosti. Toho se dosahuje vhodným chemickým složením s následným precipitačním zpevněním. Obecně lze říci, že s rostoucím obsahem legujících prvků hodnoty meze pevnosti rostou. Jak vidíme na obrázku 3 je však zásadní rozdíl mezi tvářenými a slévárenskými slitinami. Slévárenské slitiny mají sice vyšší celkový obsah prvků, ale nižší mez pevnosti než tvářené. Je to způsobeno tím, že litá struktura slitiny je hrubozrnná, nehomogenní z hlediska chemického složení a je pórovitá. [3,11]



Obrázek 3: Porovnání vybraných typu tvářených slitin (vpravo) a slévárenských slitin (vlevo) z hlediska pevnosti. [3]

V letectví jsou nejpoužívanější tvářené slitiny ve formě výkovek s následným tepelným zpracováním. K tomu jsou vhodné zejména slitiny řady 2xxx (Al-Cu-Mg), 6xxx (Al-Mg-Si), 7xxx (Al-Zn-Mg). V současné době nacházejí široké uplatnění nové slitiny řady 8xxx (hlavně báze Al-Li). Tyto slitiny nabízejí úsporu hmotnosti oproti předchozím řadám. Změny pevností v průběhu umělého nebo přirozeného stárnutí se u každé slitiny liší a mohou být ovlivněny například prodlevou mezi přirozeným a umělým stárnutím, velikostí plastické deformace po ochlazení, které následuje po rozpouštěcím žíhání nebo deformací vnesenou po umělém stárnutí. Dále mají velký vliv parametry a způsob tváření před tepelným zpracováním (kování, lisování, válcování). [3,11]

Řada 2000

Primární legurou je Cu, sekundární je Mg. Právě díky přítomnosti Cu jsou tepelně zpracovatelné, a tak mohou dosahovat vysokých pevnostních vlastností. Zpevňující fází je Al_2Cu . Mají špatnou odolnost proti korozi a jsou náchylné k interkrystalické korozi. Z tohoto důvodu se plechy plátují čistým hliníkem. Velmi známý název pro slitiny řady 2000 je dural – což bylo dřívější obchodní jméno pro slitinu hliníku obsahující 4 % mědi a 0,5 % hořčíku s následným rozpouštěcím žíháním a přirozeným stárnutím. [3,11]

Řada 6000

Tyto slitiny mají výborné schopnosti pro tváření, svařitelnost, odolnosti vůči korozi, mechanickou obrobitelnost při středních pevnostních vlastnostech. Mají nejmenší pevnostní charakteristiky z vytvrzovaných slitin. Důležité je množství intermetalické fáze Mg_2Si , díky které jsou tyto slitiny tepelně zpracovatelné. Používají se zejména v dopravním průmyslu. [3,11]

Řada 7000

Hlavním legujícím prvkem je zinek při obsahu 1–8 %. Spolu s přítomností Mg dosahují tyto slitiny po tepelném zpracování vysokých pevnostních vlastností např. $R_m = 580$ MPa u slitiny EN AW 7075. Další častou přísadou může být měď a chrom. Přestárnutím můžeme zvýšit korozní odolnost za cenu snížení pevnostních vlastností. Dnes se hlavně využívají v dopravním průmyslu a ve vojenských aplikacích. [3,11]

Řada 8000

Tato řada je vyhrazena pro legování jinými prvky, než jsou v řadách 2xxx-7xxx. Například Fe, Ni, které se používají pro zvýšení pevnosti při zachování elektrické vodivosti. Slitiny Al-Li jsou vyvinuty hlavně pro potřeby leteckého/raketového průmyslu. Největším přínosem je nízká hustota (může být až 2,47g/cm³ čistý hliník má 2,7 g/cm³). Na každé 1 % Li připadá snížení hustoty o 3 % a zvýšení modulu pružnosti o 5 %. Tento efekt je platný do obsahu 4 % Li. Dále vysoká pevnost a únavová odolnost. Nevýhodou je hlavně vysoká cena a technologická náročnost výroby. [3,11]

2.2 Srovnání vybraných slitin

V následující tabulce 3 můžeme vidět srovnání mechanických vlastností vybraných hliníkových slitin. Tyto slitiny jsou nenahraditelné v leteckém průmyslu.

Tabulka 3: Přehled a mechanické vlastnosti vybraných slitin

Název slitiny	Chemické značení	Rm [MPa]	Rp0,2[MPa]	Tažnost A [%]	Tvrdost [HB]
EN AW-2017A T4	AlCu4Mg	390	260	10	110
EN AW-2024 T3	AlCu4Mg1	480	320	15	120
EN AW-6061 T4	AlMg1SiCu	230	130	18	63
EN AW-7075 T6	AlZn5,5MgCu	560	480	7,9	150
En AW-8090 T651	AlLi2,5Cu1,5Mg1	470	400	3,5	138

Dosud nejrozšířenější slitiny jsou EN AW 2017A a EN AW 2024, které se používají na draky letadel, na nýtované součásti, na výrobu šroubových spojů, mají dobrou obrobitelnost, ale slabší chemickou odolnost a nejsou vhodné ke svařování. [3,12,13]

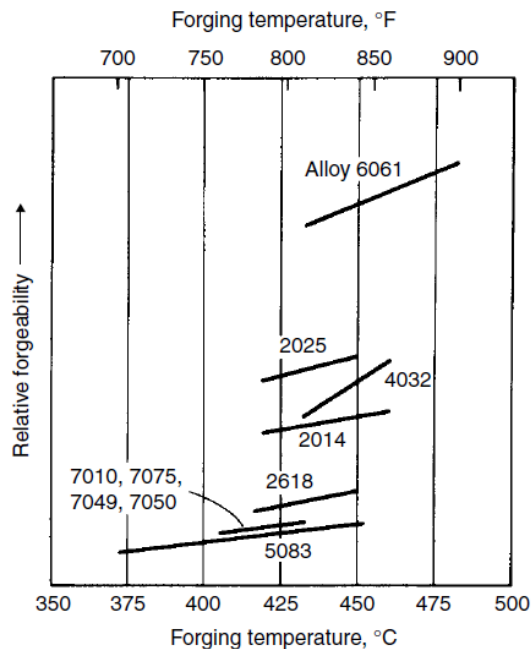
EN AW 6061 – díky dobré obrobitelnosti, vysoké svařitelnosti a vysoké korozní odolnosti se používá se pro těžké konstrukce jako například železniční vozy, mostní konstrukce, rámy nákladních automobilů, ale i jízdních kol. V letectví zejména na pláště rotorů vrtulníků, nebo kryt vrtule. [3,12,13]

EN AW 7075 – díky svým vysokým pevnostním vlastnostem se používá na vysoce namáhané konstrukční díly. V letectví se používá na podobné díly jako duraly a dále například na letadlová kování, potahy, žebra, přepážky a podélníky. [3, 12,13]

EN AW 8090 – tato slitina vznikla jako důsledek intenzivního vývoje nových lehkých materiálů pro letecký a kosmický průmysl. Má nízkou hustotu – 2,55g/cm³. V aplikacích často nahrazuje EN AW 2024 při současné úspoře hmotnosti. [3,12,13]

2.3 Zápustkové kování hliníkových slitin

Většina výkovků hliníkových slitin je kována v zápustkách, jejich relativní kovatelnost je vidět na obrázku 4. Jedná se o parametr, který představuje deformaci na jednotkové množství energie spotřebované při dané teplotě tváření. Hliníkové slitiny jsou lépe kovatelne než slitiny titanu, ale hůře kovatelne než uhlíkové nebo legované oceli.



Obrázek 4: Srovnání slitin z hlediska kovatelnosti [15]

Zejména slitiny 7xxx potřebují kovací tlaky výrazně vyšší než uhlíkové oceli. Postup kování spočívá ve vložení ohřátého materiálu do vyhřáté zápustky, kde je deformován, dokud nevyplní zápustku, přebytečný materiál odchází v dělicí rovině ve formě výronku. Vstupní materiál je vhodné použít již dostatečně protvářený například lisovanou tyč. U náročnějších výkovků je vhodné použít materiál, který byl v litém stavu homogenizačně žihán, což výrazně zlepšuje tvářitelnost. Při zápustkovém kování působí deformační síla na celou plochu výkovku. K mazání při kování se používají olejové nebo vodní suspenze s grafitem. [3,14]

Zápustkové kování se dále dělí podle možností rozměrových tolerancí a dosažitelných tlouštěk. Jde o předkovek, běžný výkovek, náročný výkovek a přesný výkovek. Toto rozdělení souvisí s technologickými a ekonomickými možnostmi. Běžné výkovky nenáročných tvarů, mají levnější kování, nemají vysoké nároky na kvalitu povrchu, ale následné obrábění je finančně náročné. Přesného kování se používá u tvarově náročných výkovků s vysokými žebry a malými rádiusy, tyto výkovky je nutné kovat ve více operacích a kovací nástroje jsou konstrukčně složitě. Hotové přesné výkovky není nutné kromě vrtání dále obrábět. [3,14]

2.4 Vady výkovků

Všechny technologické operace v průběhu výroby ovlivňují konečnou strukturu a vlastnosti výkovku. U vytvzovatelných hliníkových slitin je nutné počítat s výraznou nehomogenitou a anizotropií struktury a vlastností, u výkovků není tok materiálu ustálený v jednom směru, ale je v různých částech průřezu rozdílný. Při odběru vzorků pro zkoušku tahem a hodnocení struktury je nutné přihlídnout k tomu, jak bude výkovek namáhán a kde je kritické místo výkovku. U výkovků složitěho tvaru jsou místa, která jsou náchylná k tvorbě hrubozrnných vrstev – zpravidla na povrchu, která jsou odstraněna při následném obrábění. Hrubozrnné vrstvy často vznikají při tepelném zpracování, méně často při kování, ale mohou mít původ už ve výchozím materiálu, zvláště pokud jím je lisovaná tyč, je nutné zajistit, aby neměli povrchové rekrytalizované vrstvy. [3]

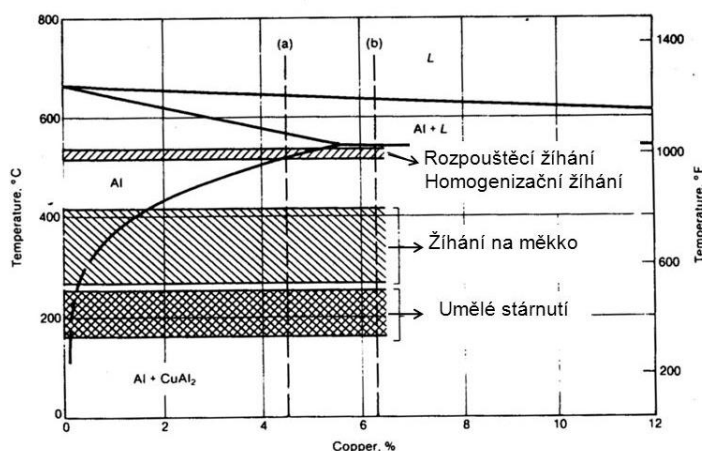
3. Tepelné zpracování a povrchové úpravy hliníkové slitiny:

3.1 Tepelné zpracování hliníkových slitin

Výrobky z hliníkových slitin jsou podrobeny jednomu nebo více žhacím cyklům za účelem dosažení požadované struktury/mikrostruktury a vlastností. Žhací cyklus sestává ze změny teploty v závislosti na čase. Důležité parametry jsou: ohřev a rychlost ohřevu, následuje výdrž na dané teplotě po dobu potřebnou k provedení příslušného tepelného zpracování. A nakonec ochlazování, při kterém je důležitá rychlost ochlazení. Na obrázku 5 jsou znázorněna pásma tepelného zpracování v diagramu hliník – měď. [3,11]

Žhání:

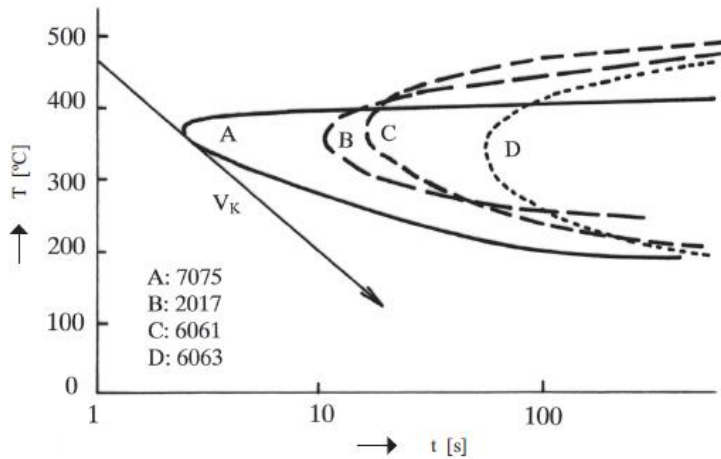
- *Rekrystalizační žhání* – dochází ke vzniku nové rekrystalizované struktury z původně deformované, která vznikla tvářením za studena. Nejběžnější teploty se pohybují 250–500 °C. [3]
- *Žhání s částečnou rekrystalizací* – aplikují se stejné teploty jako u rekrystalizačního žhání, ale je nutno volit kratší čas, aby nedošlo k plné rekrystalizaci. [3]
- *Stabilizační žhání* – účelem je stabilizace struktury, mechanických, fyzikálních, chemických vlastností a rozměrů výrobku. Používá se tehdy, pokud má slitina v provozu pracovat za zvýšené teploty nebo dochází za provozu k ohřevu součástí (třením). Stabilizační teplota leží výše, než je maximální předpokládaná teplota v provozu obvykle 240–350 °C, nejčastěji se aplikuje u odlitků. [3]
- *Žhání ke snížení pnutí* – obvyklá teplota 300–400 °C s výdrží na dané teplotě a následným řízeným ochlazováním. [3]
- *Homogenizace* – dochází k ní při vysoké teplotě (blízko solidu), účelem je odstranění nebo snížení chemické heterogenity difúzními procesy. [3]



Obrázek 5: Žhání v diagramu Al-Cu [16]

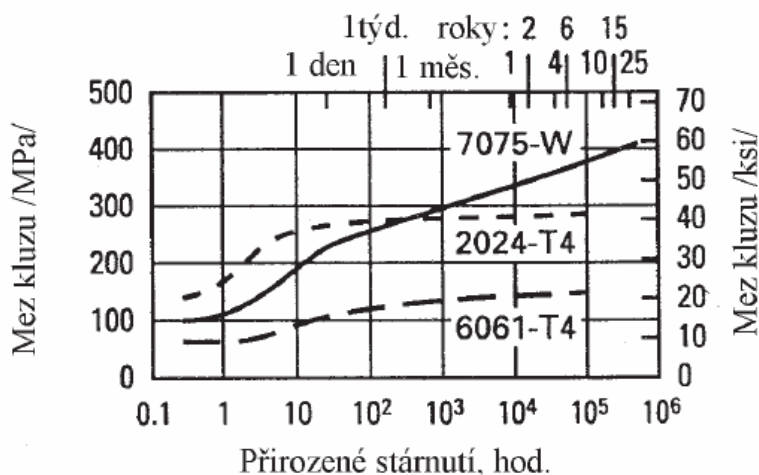
Precipitační zpevnění – vytvrzování:

- *Rozpouštěcí žíhání* – sestává z ohřevu na vhodnou teplotu, výdrže na teplotě po dobu nutnou k převedení jedné nebo více intermetalických fází do tuhého roztoku a následující rychlé ochlazení kritickou nebo nadkritickou rychlostí k získání prosyceného tuhého roztoku α . Obrázek 6 ukazuje různé kritické rychlosti ochlazování pro různé slitiny. Kritická rychlost ochlazování je taková nejmenší rychlost ochlazování, při které nenastává rozpad přesyceného tuhého roztoku. [3]



Obrázek 6: C křivky a kritická teplota V_k [3]

- *Stárnutí* – při tomto procesu dochází ke změně substruktury a tím ke změně mechanických, fyzikálních i technologických vlastností. Dělí se na přirozené – za pokojové teploty a na umělé – za zvýšených teplot. Někdy se realizuje stupňovité stárnutí, které probíhá při dvou nebo více zvyšujících se teplotách. Na obrázku 7 je znázorněn průběh přirozeného stárnutí třech typických vytvrzovatelných slitin. [3]



Obrázek 7: Vliv přirozeného stárnutí na mez kluzu [3]

3.2 Stavy tepelného zpracování

Základní stavy a značení slitin hliníku upravuje norma ČSN EN 515. Pro další zpracování polotovaru je důležité vědět v jakém stavu je výrobek dodáván. V následující tabulce 4 jsou nejčastěji používaná značení a jejich význam.

Tabulka 4: Značení stavu tepelného zpracování [3,11]

Označení stavu	Význam
F	Z výroby, pro tvářené výrobky nejsou stanoveny mechanické vlastnosti
O	Žíhané – pro tváření za tepla, nebo zvýšení tažnosti u slitin k odlévání
H	Deformačně zpevněný. číslice udávají faktor zpevnění H11 = lehce zpevněný až po H48 = tvrdý (plně zpevněný)
W	Po rozpouštěcím žíhání – nestabilní stav dochází k spontánnímu stárnutí při pokojové teplotě
T	Tepelně zpracovaný
T1	Ochlazení ze zvýšené teploty – přirozené stárnutí
T2	Ochlazení ze zvýšené teploty – tvářeno za studena – přirozené stárnutí
T3	Rozpouštěcí žíhání – tváření za studena – přirozené stárnutí
T351	Rozpouštěcí žíhání – uvolnění vnitřního napětí řízenou deformací – přirozené stárnutí
T4	Rozpouštěcí žíhání – přirozené stárnutí
T5	Ochlazení ze zvýšené teploty – umělé stárnutí
T6	Rozpouštěcí žíhání – umělé stárnutí
T651	Rozpouštěcí žíhání – uvolnění vnitřního napětí řízenou deformací – umělé stárnutí
T7	Rozpouštěcí žíhání – umělé přestárnutí a stabilizace
T8	Rozpouštěcí žíhání – tváření za studena – umělé stárnutí
T9	Rozpouštěcí žíhání – umělé stárnutí – tváření za studena
T10	Ochlazení ze zvýšené teploty – tváření za studena – umělé stárnutí

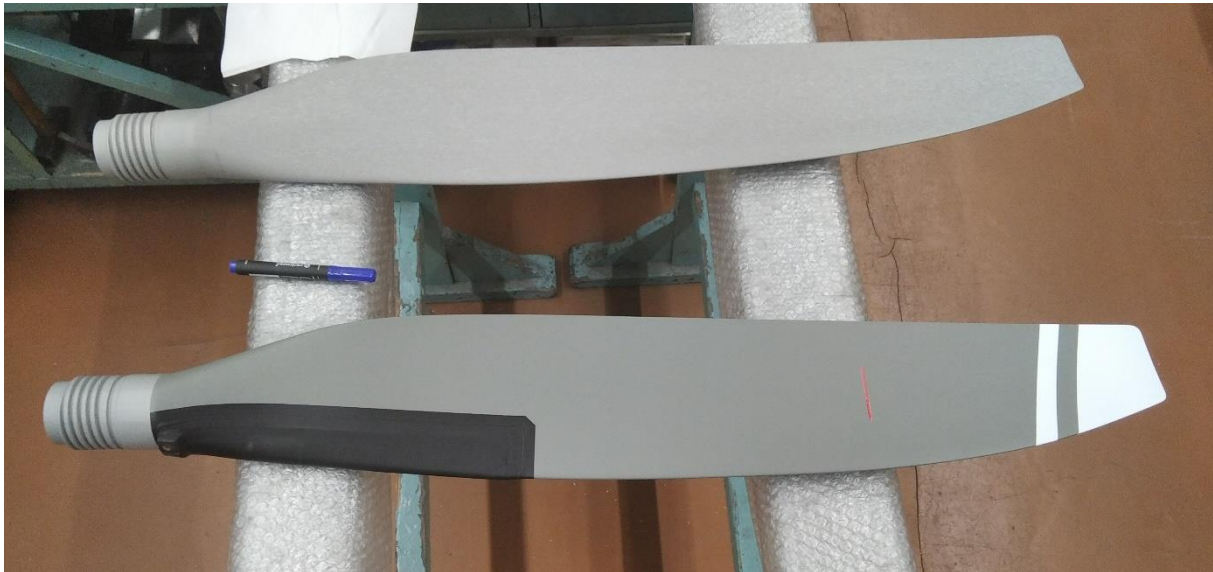
3.3 Povrchové ochrany hliníku

Korozní odolnost povrchu hliníkových slitin je způsobena především pasivací povrchu vrstvou Al_2O_3 , která je stálá v neutrálním prostředí, ale rozpouští se v zásaditém nebo kyselém prostředí. Největší korozní odolnost má hliník o vysoké čistotě, a hliníkové slitiny, které neobsahují měď. Hliníkové slitiny na bázi Al-Cu-Mg mají sklon k mezikrystalické korozi po hranicích zrn. Ten to jev je částečně odstraněn tepelným zpracováním a následným vytvrzováním. [3]

Způsoby zvyšování korozní odolnosti hliníkových slitin

Plátování čistým hliníkem nebo korozně odolnou slitinou se aplikuje zejména u plechů ze slitin, které mají horší korozní odolnost. Používá se zejména v leteckém průmyslu pro slitiny EN AW 2024, EN AW 2219, EN AW 7075. Plátování se aplikuje z jedné nebo obou stran, tloušťka bývá 2,5 – 5 % (z jedné strany) z celkové tloušťky plechu. [3]

Anodická oxidace – takzvaně eloxování, v prostředí elektrolytu se vytváří povrchová vrstva oxidu hliníku – Al_2O_3 . Vzniklá vrstva je nevodivá a velmi tvrdá, je vhodným podkladem pro následné barvení dílu. V leteckém průmyslu se používá elektrolyt kyseliny chromové, který vytváří oxidickou, charakteristicky šedou vrstvu silnou 3-8 μm , tu můžeme vidět na vzdálenějším listu na obrázku 8. Tato vrstva má velmi dobré protikorozní vlastnosti a zabraňuje nitkové korozi, zároveň tvoří vynikající adhezi pro následné lakování. [3]



Obrázek 8: Vrtulové listy po eloxu a finálním nátěru

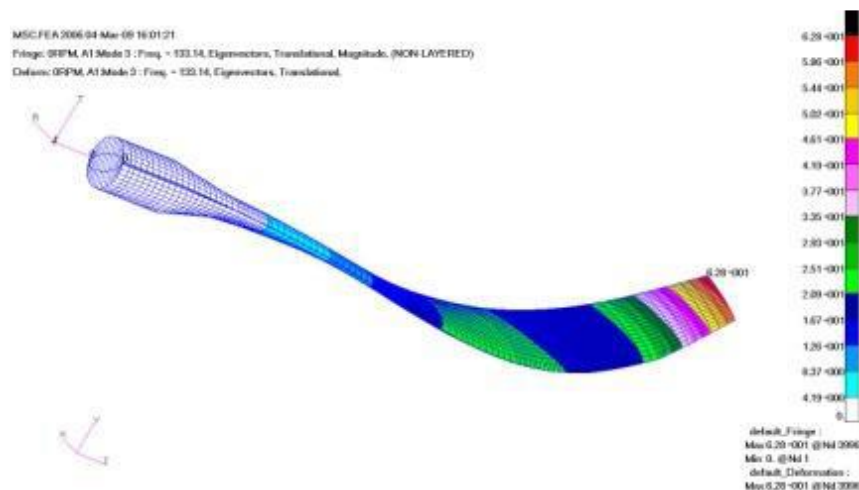
4. Vrtule

4.1 Obecně o vrtuli

Vrtule je nejstarším typem pohonu letadel těžších než vzduch a vzducholodí. K tahu nutnému k pohybu letadla dochází přeměnou mechanické energie motoru v kinetickou energii vzduchu, jde o urychlení vzduchu, který protéká kruhem tvořeným listy vrtule. Vrtule je tvořena dvěma nebo více listy, které mají podobný tvar jako je profil křídla letadla. Kromě optimálních aerodynamických vlastností je kladen požadavek na nízkou hmotnost a vysokou spolehlivost. Jedná se o kritickou část letecké konstrukce, která musí mít vlastní typový certifikát. V současné době zažívá vrtulářský obor oživení, a to zejména z ekologických a ekonomických důvodů. Hlavní hybnou silou je zvyšování cen paliva, kdy vrtule může snížit spotřebu oproti proudovému motoru až o 15 %. Je kladen také velký důraz na snižování hluku. Vyrábějí se vrtule pro nižší otáčky a s větším počtem listů. [17,18]

4.2 Vrtulové listy

Vrtulový list je klíčovou součástí vrtule, jeho bezprostředním působením na vzduch vzniká tah. Z hlediska konstrukčního řešení je požadavek na minimální hmotnost při současném zachování tvaru nutného k dosažení tahu a účinnosti, které jsou potřebné pro pohyb letadla, na němž má být provozován. Rozměry a tvary listu jsou dány kombinací pevnostních, dynamických a aerodynamických výpočtů. Vrtulové listy jsou pevnostně a dynamicky analyzovány pomocí metody konečných prvků viz obrázek 9. Výsledky analýz jsou ověřovány tenzometrickým měřením statických a dynamických napětí na listu při pozemních a letových zkouškách.[18]



Obrázek 9: Harmonická analýza listu

Typy listů

Dřevěné listy – dělí se na dva typy: pevné často dvoulisté, zhotoveny z výběrových desek a s vyvrtaným otvorem pro hřídel motoru. K opracování slouží zpravidla přesné kopírování nebo ruční zapuštění předepsaných tvarů profilů ve výkresových řezech a poté jejich plynulé propojení. Dalším typem jsou listy stavitelné, ty však musejí mít na kořenu listu válcové kovové pouzdro pro uchycení do náboje. Jedná se o kritické místo, kde je přenášeno velké namáhání, dalším kritickým místem je náběžná hrana,

kteřá bývá vyztužena umělým odolným materiálem nalepeným nebo zapuštěným do dřeva a opracovaným do vhodného aerodynamického tvaru. Dříve se používalo kování předtvarovaným plechem. U dřevěných listů je nutná dokonalá ochrana proti vlhkosti, která může deformovat tvar listu.[18]

Listy z hliníkových slitin – vyrábějí se výhradně z výkovků, které procházejí důkladnou kontrolou kvality kování, následného tepelného zpracování, ale také materiálového složení a mechanických vlastností. Mají široké možnosti použití od malých vrtulí až po vrtule o průměru 4 m. Profilová a kořenová část je určena komplexním výpočtem na počátku projektu. Listy jsou spojeny s nábojem pomocí kovového pouzdra nebo přírubovým ukončením listu v kořenové části. Jakékoliv poškození je třeba neprodleně opravit, aby se nestalo zárodkem únavové trhliny. Způsoby a velikost oprav poškození listu je nutné ověřit tenzometrickými měřeními, na obrázku 10 je list s rozmístěnými tenzometry. Kořen je kritická část listu, porucha v této části má často za následek ztrátu říditelnosti letounu, vlivem extrémní nevyváženosti vrtule. Výrobní postup je zčásti automatizován na numericky řízených strojích, a následně ručně dokončen. Velký důraz je kladen na rozměrovou a tvarovou kontrolu, dále probíhá statické vyvažování a pečlivé značení, kapilární defektoskopie na trhlinky povrchu a povrchová ochrana. [18]



Obrázek 10: Vrtulový list s nalepenými tenzometry

Kompozitní listy – skleněná, aramidová a uhlíková vlákna se používají v kombinaci s dřevěným jádrem nebo nosníkem z hliníkových slitin. Možností je také nosný potah s lehkou výplní vnitřního prostoru. Všechny tyto možnosti znamenají úsporu hmotnosti při možnosti vysoké tvarové přesnosti výrobků. K aplikaci v kritické části letecké konstrukce je zapotřebí velmi kvalitních forem a stálosti kvality používaných certifikovaných materiálů. Velmi důležitým prvkem je spoj kompozitních materiálů s ocelovým nebo duralovým kořenem listu, který je součástí uložení listu ve vrtulové hlavě. [18]

5. Avia Propeller a požadavek na výkovek listu

Firma Avia Propeller kromě vývoje a výroby nových vrtulí zabývá také údržbou vrtulí a licenční výrobou listů a krytu pro historické stroje. Ve výrobě jsou vrtulové listy a kryty například pro americké stíhačky z druhé světové války: North American P-51 Mustang, cvičné stroje North American T6 Texan, dále německý třímotorový transportní letoun Junkers Ju52, Focke-Wulf FW190, Jak-11. Nejnovější je rozšíření výroby o letoun Hawker Tempest, OV-10 Bronco a historický dvojplošník Boeing Stearman. [19]

K výrobě licenčních leteckých vrtulí a proniknutí na americký kontinent významně pomohlo dřívější propojení se zahraničním strategickým partnerem, kterým byl světově známý výrobce vrtulí – společnost UTC Hamilton Standard Division. Na konci roku 1998 došlo ke změně a většinovým vlastníkem se stal pan Gerd Muehlbauer, který je vlastníkem významné německé vrtulářské společnosti MT-PROPELLER, která vyrábí vrtule s dřevolaminátovými listy, zatímco Avia Propeller se specializuje na celokovové vrtule. [19]

Nově vyvinutý vrtulový list s pracovním označením 106" byl zaveden do sériové výroby v roce 2001. Je určený pro třílistou vrtuli řady V508 a motory Walter řady M 601. Tato zástavba byla certifikována (STC) a dodávána pro zemědělská letadla do severní Ameriky, jedná se o letadla Air Tractor a Ayers Trush. Zástavba úspěšně konkuruje americkému motoru Pratt & Whitney s vrtulí Hartzell. Tato kombinace vrtule-motor-letoun se stala oblíbenou volbou nejen v severní Americe a zvýšená poptávka po listech 106" vedla k potřebě vlastního zápusťového výkoveku. Výkovek není pouze jednoúčelový, pro list 106", ale umožňuje výrobu i jiných typů listů, například: 106"A/B, 99"A, 108" a v současné době je nejvíce používán pro listy AV-725, které dodávají pro kunovické letadlo řady L-410 na obrázku 11. Před rokem 2017 se používal jako vstupní polotovary pro výkovek hranol, který se musel nejprve rozříznout úhlopříčně a upravit do tvaru vhodného pro kování v zápusťce. To znamenalo velký podíl ruční práce. Dnes je výchozím polotovarem lisovaná tyč kruhová



Obrázek 11: L-410 s vrtulí AV 725

Cíle práce

Cíl práce respektuje požadavky společnosti Avia Propeller s.r.o., která se zabývá vývojem, výrobou a údržbou náročných dílů v leteckém průmyslu a je zaměřen na ověření, zda změna formy polotovaru pro zápusťkový výkovek listu neovlivní hodnoty vybraných materiálových charakteristik, které zajišťují provozní bezpečnost a spolehlivost výrobku. Pozornost bude zaměřena na průběh hodnot podél osy výkovek. Rovněž bude sledován rozptyl hodnot v oblasti kořenové části výkovek, která je klíčovou částí listu, za kterou je vrtulový list uchycen v náboji vrtule. Ve všech místech celého výkovek musí být zachovány minimální meze kluzu a pevnosti stanovené normou.

Experimentální část

6.1 Experimentální materiál

Experimentálním materiálem byla hliníková slitina Z 42 4201.61. Polotovar pro zápusťkové kování byl lisovaná tyč o průměru 100 mm a délky 1430 mm. Dále byl zpracován dle technologického postupu popsáno v odstavci 6.2 do tvarového výkovek 106" s označením tavby D3544 a pořadovým číslem 2624. Společnost Avia Propeller vyrábí z hliníkové slitiny Z 42 4201.61 vrtulové listy již od 50. let 20. století. Na výkovek byla provedena spektrální analýza pomocí SpektroTestu F. Zjištěné chemické vlastnosti jsou vidět v tabulce 5 a plně odpovídají normě ONZ 42 4201. Z hlediska nečistot je nejsledovanější Fe, která se dostává do slitiny hlavně ze vsázkových surovin při tavbě a ve slitinách Al – Cu snižuje pevnost. Dále Si, Zn, Ti, Ni, obsah ostatních prvků nesmí jednotlivě dosáhnout hodnoty 0,05 % a dohromady 0,15 %, přičemž celkový obsah nečistot může být maximálně 1,5 %. Zbytek obsahu tvoří hliník.

Tabulka 5: Chemické složení slitiny

	Cu (%)	Mg (%)	Mn (%)	Fe (%)	Si (%)	Ni (%)	Zn (%)	Ti (%)
předpis	3,800	0,400	0,400	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.
	4,800	1,100	1,000	0,500	0,500	0,100	0,200	0,200
Průměr ze dvou měření	4,130	0,660	0,510	0,055	0,220	0,019	0,013	0,020

Výrobní normy uvádějí pro každou slitinu, každý stav tepelného zpracování a rozměr výrobku, jak minimální hodnoty, tak rozpětí hodnot. Dle ONZ 42 4201 jsou minimální mechanické vlastnosti pro materiál Z 42 4201.61, zobrazeny v tabulce 6.

Tabulka 6: Minimální mechanické vlastnosti stanovené normou

	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	Tažnost A [%]	Tvrдость [HB]
Minimální hodnoty	370	235	12	95

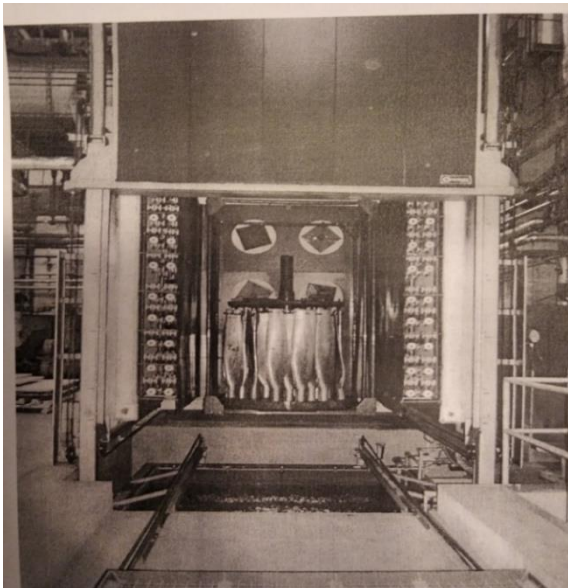
6.2 Technologický postup výroby výkovku

Ohřev polotovaru před kováním, se provádí ve vozových elektrických pecích s nuceným oběhem pecní atmosféry, polotovar musí být ohřátý na předepsanou teplotu 470°C. V celém objemu pecní vsázky je důležitá předepsaná teplota, ta je zajištěna pecním ventilátorem.[20]

Po vyjmutí polotovaru z pece je vložen do předeřáté zápustky (250 +/-10 °C) a kován malými údery během několika zdvihů beranu do konečného tvaru. Výronek vybíhá do horní části zápustky, aby se předešlo možnosti vzniku dutin a nerovnoměrného vyplnění požadovaného tvaru. Kování se provádí na protiběžném bucharu BECHE 40 mt (392kJ). Výronek se ořezává vodním paprskem. [20]

Po prvotní vizuální kontrole, zaměřené na deformace za tepla a případné nedostatky na hranách nebo rozích, se provede kontrola změřením tloušťky výkovku. [20]

Tepelné zpracování probíhá po ohřevu a výdrži na předepsané teplotě rozpouštěcího žíhání (500 °C po dobu 6 hodin), následně se výkovky prudce zchladí ve vodní lázni.



Požadavky na přesnost dodržení předepsané teploty v celém objemu pece a rychlý přenos ohřátých výkovků do vodní lázně, je splněn rychlokalicí pecí speciální konstrukce s uložením vodní nádrže pod pecí viz obrázek 12. Na konci výdrže se otevrou pouze spodní vrata pece a závěs s výkovky je spuštěn na řetězech do vodní lázně (55-60 °C). [20]

Obrázek 12: Pec na tepelné zpracování s vodní lázní

Z důvodu přirozeného stárnutí slitiny Z42 4201.61 je nutné přerovnat výkovky v zápustce, přičemž rovnání posledního kusu musí proběhnout nejdéle do 8 hodin po tepelném zpracování. Požadovaných mechanických vlastností dosahuje výkovek po 5 dnech přirozeného stárnutí za teploty 20°C. Následuje moření povrchu výkovků. [20]

Vzhledem k vysokým nárokům leteckého průmyslu se provádí důkladná kontrola. Na každém výkovku se provádí zkouška tvrdosti HB, a to v oblasti kořene vrtulového listu. Dále u jednoho kusu z tavby a zároveň jednoho kusu z vsázky tepelného zpracování se z nákovku provádí zkouška tahem a metalografická zkouška mikrostruktury na zjištění přehřátí. Každý výkovek musí projít důkladnou vizuální kontrolou povrchu (případně přebroušením), kapilární defektoskopií, která se provádí v přechodové části mezi kořenem a profilovou částí v oblasti dělicích rovin a kontrolou značení. [20]

6.3 Experimentální metody a zařízení

Zkouška tahem

Identifikace zkušební metody: ČSN EN ISO 6892.

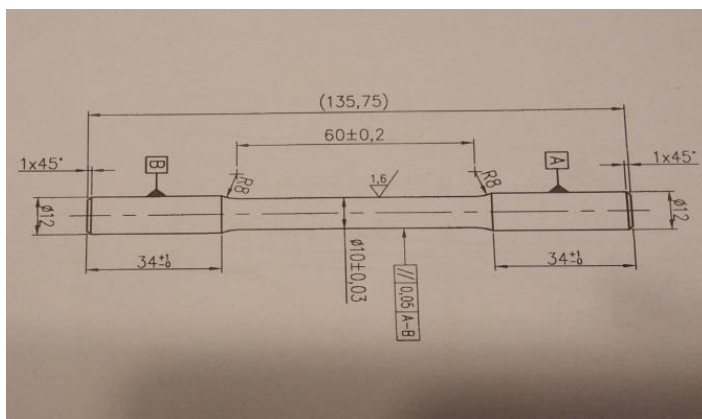
Při této zkoušce se určují obvykle meze pevnosti R_m , meze kluzu $R_{p0,2}$ a tažnost A , případně kontrakce Z . U hliníkových slitin závisí mechanické vlastnosti na více parametrech nejen na typu slitiny a typu výrobku, ale i na stavu tepelného zpracování tloušťce výrobku a směru odběru zkušební vzorku. [3,21]

Vlastní tahová zkouška byla prováděna na trhačím stroji Instron 4482 100 kN, který můžeme vidět na obrázku 13. Měření probíhalo bez průtahoměru a rychlost posuvu příčnicků byla 2 mm/min. Všechna měření probíhala za pokojové teploty a vzorky byly



Obrázek 13: Trhačím stroj Instron

ponechány ve zkušební místnosti 48 hodin před začátkem zkoušky. Vyhodnocení probíhalo pomocí softwaru Blue Hill. Před vlastní tahovou zkouškou proběhla kontrola průměrů všech zkušebních těles. Všechna zkušební tělesa splňovala tolerance dle výkresu. Na zkušebních tělesech byla vyznačena počáteční měřená délka, dle standardního postupu v naší firmě – ve formě rysky jehlou ve vzdálenosti 60 mm. Tvar zkušební tělesa je vidět na obrázku 14. Jedná se o nepoměrné zkušební těleso. Těleso je upnuto do čelistí viz obrázek 15 a postupně zatěžováno až do přetržení. Stroj se automaticky zastaví a poté je nutné vyjmout zkušební těleso a přiložit k sobě pro změření konečné délky a zúženého průměru. Získané údaje jsou zadány do softwaru. Hotový protokol z měření můžeme vidět v příloze.



Obrázek 14: Vzorek zkušební tělesa



Obrázek 15: Upnutí tělesa do čelistí

Zkouška tvrdosti

Identifikace zkušební metody: ČSN EN ISO 6506-1

Její oblíbenost je zejména v tom že je relativně jednoduchá, rychlá, a neporušuje zkoušený materiál. Tvrdost je důležitá mechanická vlastnost, definuje odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. K měření tvrdosti u hliníkových slitin se používá vnikací zkouška podle Brinella. Jde o statickou zkoušku. Je vhodná pro zkoušení jak malých vzorků, tak i pro rozměrné kusy. Hodnoty se pohybují v rozmezí HB 15 (čistý hliník) až po HB 150 (vysokopevnostní vytvrzovatelné slitiny). Pro výzkum se často používá měření podle Vickerse v oblasti mikrotvrdosti. [3,21]

Vzorky byly upraveny, aby měly dvě rovnoběžné plochy, a povrch byl vyleštěn. Měření probíhalo na tvrdoměru Wilson-Wolpert Testor 930/250, viz obrázek 16, kuličkou o průměru 2,5 mm a zátěžnou silou 62,5kgf. Jedná se o poměrně rychlé a pohodlné měření, se snadným vyhodnocením. Vrtulové listy jsou testovány Brinellovou zkouškou v průběhu i na závěr výroby. Zkoušejí se výkovky po tepelném zpracování a stárnutí, a rovněž se provádí zkouška tvrdosti po dokončení mechanického opracování listu.



Obrázek 16: Tvrdoměr Wilson-Wolpert

Světelná mikroskopie

Nejčastěji je analýza světelnou mikroskopií u výkovku využívána ke kontrole struktury po přehřátí, které vzniká v důsledku nedodržení předepsané teploty během kování nebo při následném tepelném zpracování.

K posouzení mikrostruktury výkovku byly odebrány vzorky, které byly upraveny pro pozorování na světelném mikroskopu běžnou metalografickou technikou, která zahrnovala:

Odběr vzorku

Z posuzovaného dílu byl proveden na metalografické řezačce, řezací kotouč byl chlazen vodou s inhibitorem koroze, aby se zabránilo tepelnému ovlivnění řezané plochy.

Fixace vzorku

Odebraný vzorek byl umístěn do zalévacího lisu Simplimet 2000 a zasypán pryskyřicí Multifast, pokud je nutné zabránění zaoblení hran při leštění použije se nejdříve pryskyřice Epomet F.

Podmínky lisování

lisovací teplota	-	160 °C
doba ohřevu	-	7 min
doba chlazení	-	5 min
lisovací tlak	-	19 kN

Broušení

Hrubé broušení odstranilo stopy po řezání vzorku a bylo provedeno na automatické brusce Phoenix 4000 pomocí brusného papíru o zrnitosti 80 za následujících podmínek:

otáčky kotouče	-	150 min ⁻¹
přítlak	-	150 N
doba broušení	-	30 s
chladičí médium	-	voda

Jemné broušení a leštění se uskutečnilo na automatické brusce a leštičce Phoenix 4000. Pomocí brusných papírů pod vodou a následně lešticími plátny pro leštění s diamantovými suspenzemi Metadi 6 μm a 3 μm.

Po vyleštění následuje leptání, které trvá zhruba 15 sekund a používá se leptadlo Keller.

Vlastní analýza mikrostruktury byla provedena na inverzním metalografickém mikroskopu Nikon Epiphot 200, který můžeme vidět na obrázku 17



Obrázek 17: Mikroskop Nikon Epiphot 200

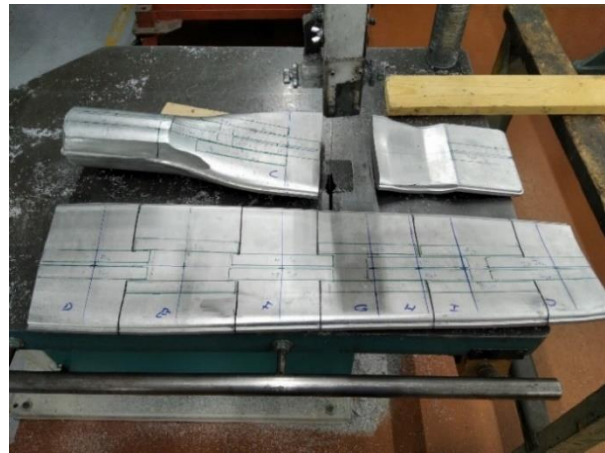
7. Naměřené hodnoty a jejich diskuse

7.1 Odběr vzorků

Protože z daného výkovku se vyrábí několik druhů vrtulových listů, nebyla pozornost zaměřena na specifické místo namáhání zjištěné MKP analýzou a tenzometrickými zkouškami, ale spíše na porovnání mechanických vlastností podél osy výkovku, a to na náběžné a odtokové hraně, v kořenové části výkovku a v nejsilnější profilové části. Pro porovnání byly odebrány vzorky z nákovku, kde jsou odebírány vzorky pravidelně. Po rozměření výkovku a zakreslení pozic pro jednotlivé vzorky (obr.18,19), byly vyřezány na hranoly 20x20x150 mm (obr.20), hranoly z nákovku jsou menší z důvodů rozměru nákovku tj, 15x15x115 mm, a zkušební tělesa byla rovnoměrně zkrácena v oblasti uchycení do čelistí zkušebního stroje. Po označení vibračním popisovačem byly stočeny na kulatinu o průměru 14 mm. Dále již probíhala výroba vzorků dle běžných standardů v naší firmě, kterou zajišťuje smluvní firma.



Obrázek 18: Rozměřený výkovek



Obrázek 19: Průběh řezání vzorků

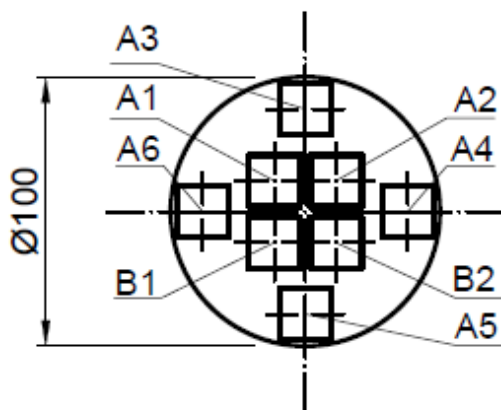


Obrázek 20: Vyřezané vzorky

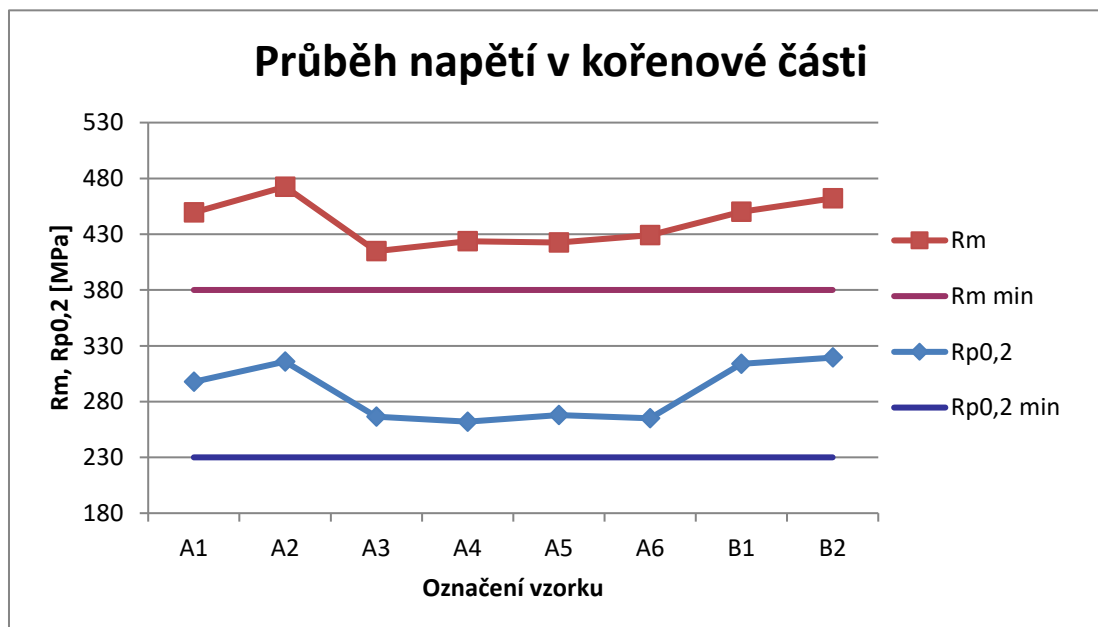
7.2 Zkouška tahem

Kořenová část listu

K prvnímu srovnávání mechanických vlastností dochází v kořenové části listu, jde o srovnání vlastností při okraji a blíže středu výkovku, viz obrázek 21. Z kořenové části výkovku bylo vyřezáno celkem 8 vzorků, 4 vzorky (A3, A4, A5, A6) z okrajových částí kořene, 2 vzorky (A1, A2) nad osou a 2 vzorky (B1, B2) pod osou výkovku, přičemž vzorky značené B1 a B2 zasahují do přechodové části mezi kořenem a profilovou částí výkovku. Vzorky z okrajových částí byli 15 mm od okraje výkovků, tudíž zasahují do oblasti, která je obráběna, ale je zčásti zachována i na hotových výrobcích. Z následujícího obrázku 22 je jasně patrný propad hodnot vůči vzorkům odebraným z prostřední části nad a pod osou výkovků. Také tyto vzorky splňují minimální mechanické vlastnosti stanovené normou.



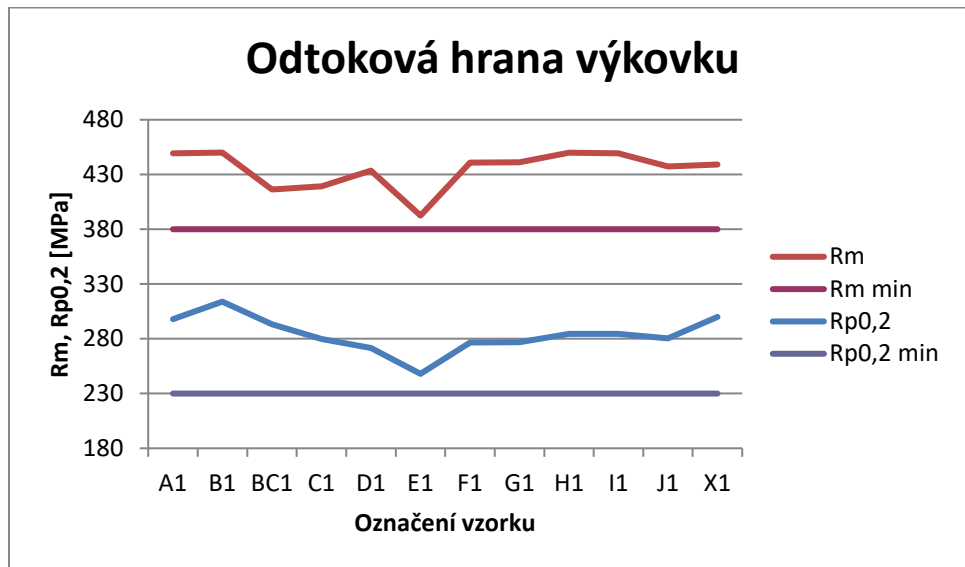
Obrázek 21: Schéma odběru vzorků v kořenové části



Obrázek 22: Průběh napětí v kořenové části

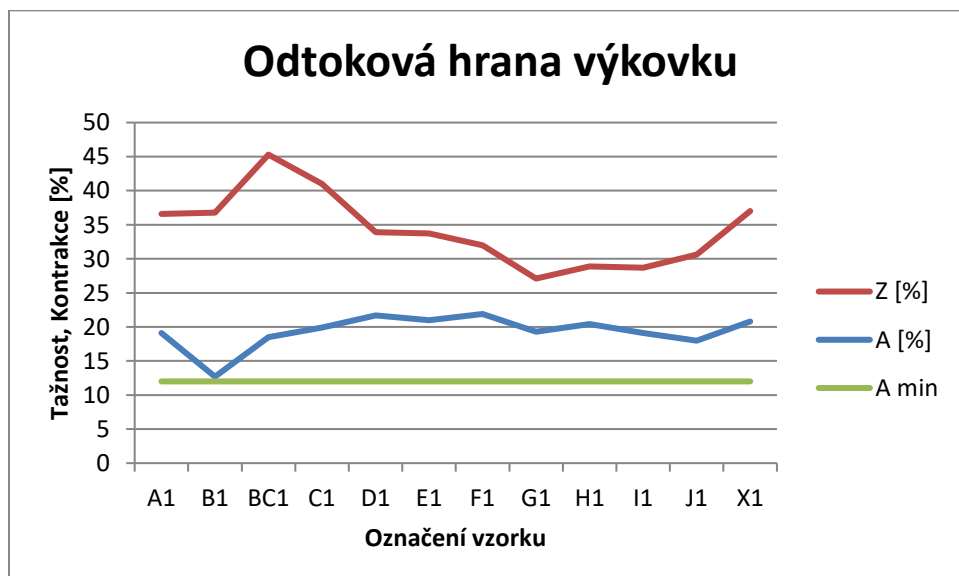
Odtoková hrana výkovku

Podél osy výkovku bylo navrženo dalších 18 vzorků pro tahovou zkoušku, jedná se o vzorky nad osou výkovku a rovnoměrně rozložené po obou stranách osy výkovku. Na obrázku 23 vidíme výsledky z odtokové části výkovku. U vzorku E1 je jasně vidět propad mechanických vlastností oproti ostatním vzorkům. Vzorek splňuje minimální mechanické vlastnosti. Oblast odběru vzorku E1 byla dále podrobena světelné mikroskopii.



Obrázek 23: Průběh napětí u odtokové hrany

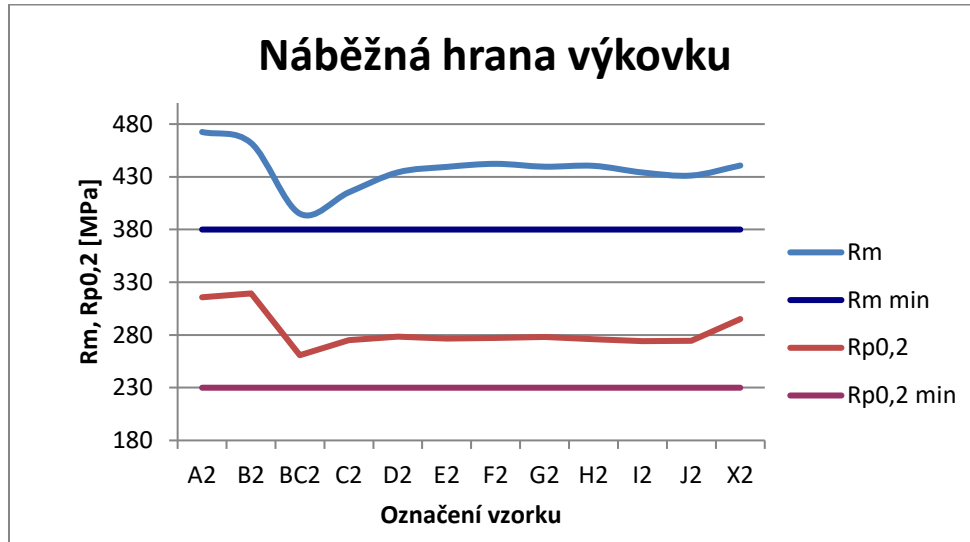
Na obrázku 24 je vidět průběh hodnot tažnosti A, a kontrakce Z. Norma stanovuje minimální hodnotu pro tažnost, kterou všechny vzorky splňují.



Obrázek 24: Průběh hodnot kontrakce a tažnosti

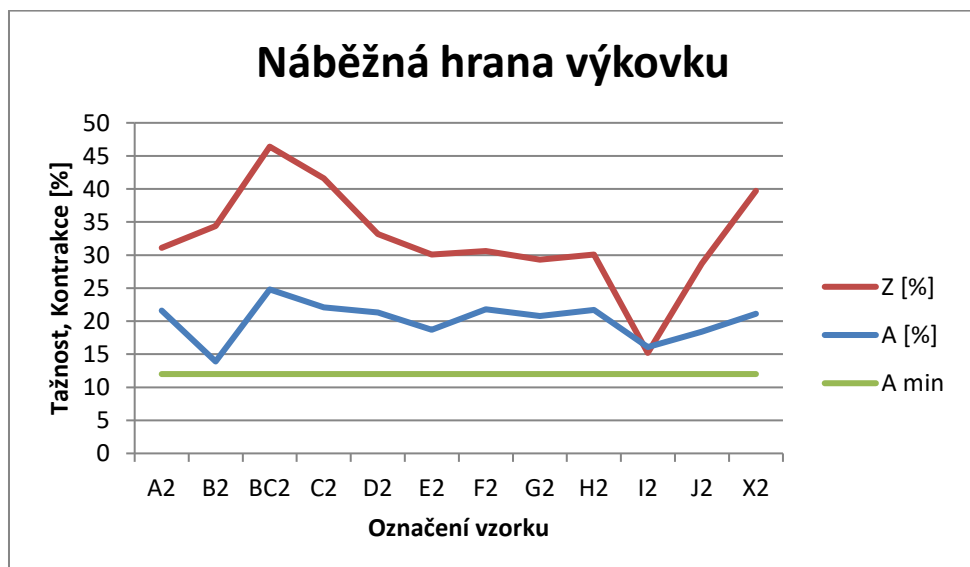
Náběžná hrana výkovku

Obrázek 25 zobrazuje průběh hodnot získaný z náběžné hrany výkovku. U vzorku BC2 je vidět propad mechanických vlastností. Kromě propadu u vzorku BC2 vykazuje náběžná hrana plynulejší průběh hodnot meze kluzu a meze pevnosti nežli odtoková hrana výkovku.



Obrázek 25: Průběh hodnot napětí u náběžné hrany

Obrázek 26 ukazuje průběh hodnot tažnosti A, a kontrakce Z, na náběžné hraně výkovku. Můžeme vidět velký rozptyl hodnot. Vzorky se měřili ručně a snaha byla je změřit v nejužším místě přetržení.



Obrázek 26: Průběh hodnot tažnosti a kontrakce

V následující tabulce 7 je vidět porovnání průměrných hodnot mechanických vlastností na odtokové hraně a na hraně náběžné.

Tabulka 7: Srovnání hodnot mechanických vlastností podél osy

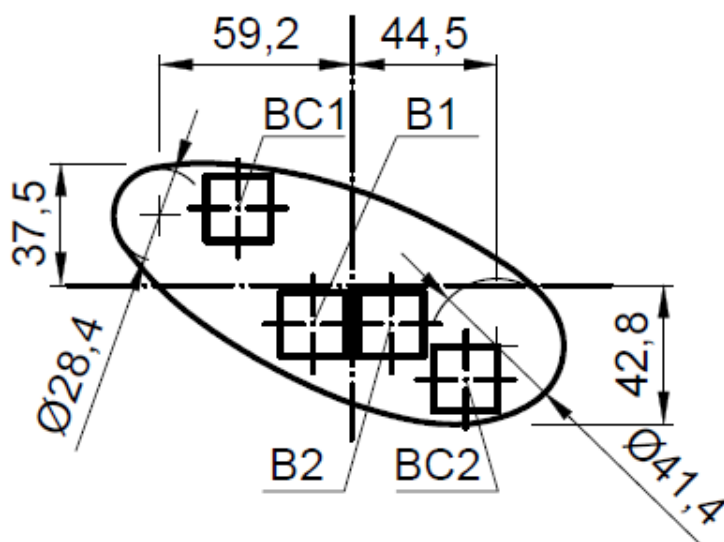
Vlastnost	Průměrná hodnota	
	odtoková hrana	náběžná hrana
Rp0,2 [MPa]	284	283
Rm [MPa]	435	437
A [%]	19,4	20,2
Z [%]	34,3	32,4

První profil výkovku

Srovnání v tabulce 8 se zabývá nejsilnější profilovou částí výkovku, jedná se o vzorky BC1 a BC2, jeden vzorek byl odebrán pod osou (BC2) výkovku a druhý nad osou (BC1). Oba vzorky byli stejně vzdálené od povrchu výkovku, vzdálenost od osy výkovku byla nepatrně rozdílná BC1 = 25 mm a BC2 = 30 mm. Je jasně patrný propad hodnot u vzorku, který byl ve spodní části zápusťky. Schéma míst odběru vzorků je vidět na obrázku 27. Je důležité, že tento vzorek, splňuje minimální mechanické vlastnosti předepsané normou.

Tabulka 8: Porovnání vzorků

název vzorku	Rp0,2	Rm	A	Z
	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
BC1	293	416	18,5	45,5
BC2	261	395	25,0	46,5



Obrázek 27: Odběr vzorků v profilové části

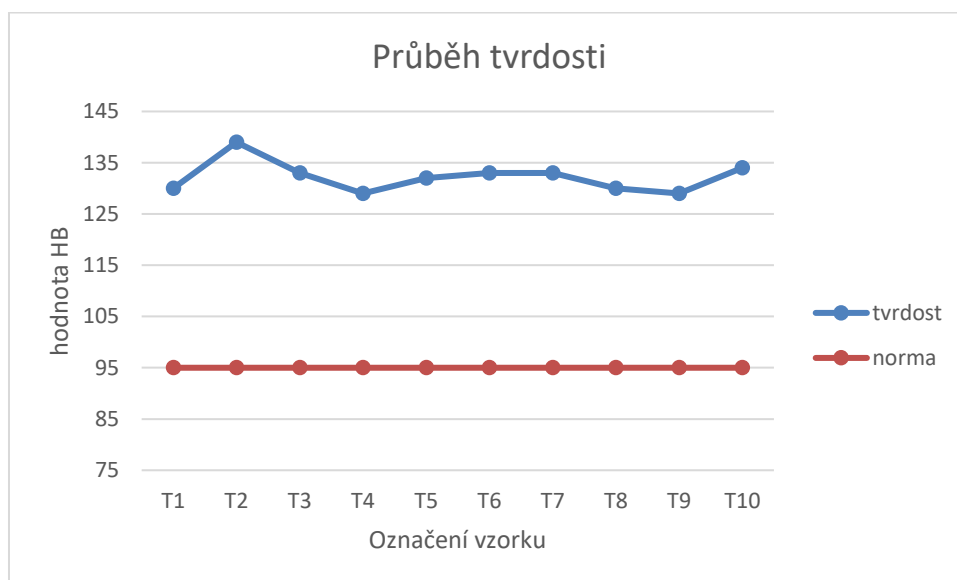
7.3 Měření tvrdosti

Pro měření tvrdosti bylo použito 10 vzorků rozložených po celé délce. Přesná pozice vzorku je zobrazena v příloze. Zjištěná tvrdost je v tabulce 9 a pohybuje se od 129 HB do 139 HB. Hodnota 139 HB byla naměřena na vzorku T2 a jde o nejvzdálenější hodnotu od ostatních, které se pohybují od 129-134 HB. Vzorek T2 byl přeměřen znovu se stejným výsledkem = 139 HB.

Tabulka 9: Naměřené tvrdosti

Označení vzorku	Tvrdost HB
T1	130
T2	139
T3	133
T4	129
T5	132
T6	133
T7	133
T8	130
T9	129
T10 nákovek	134
Průměr	132

Na obrázku 28 je znázorněn průběh tvrdostí podél osy výkovku. Všechny vybrané vzorky vyhovují a splňují normu která stanovuje minimální tvrdost 95 HB.

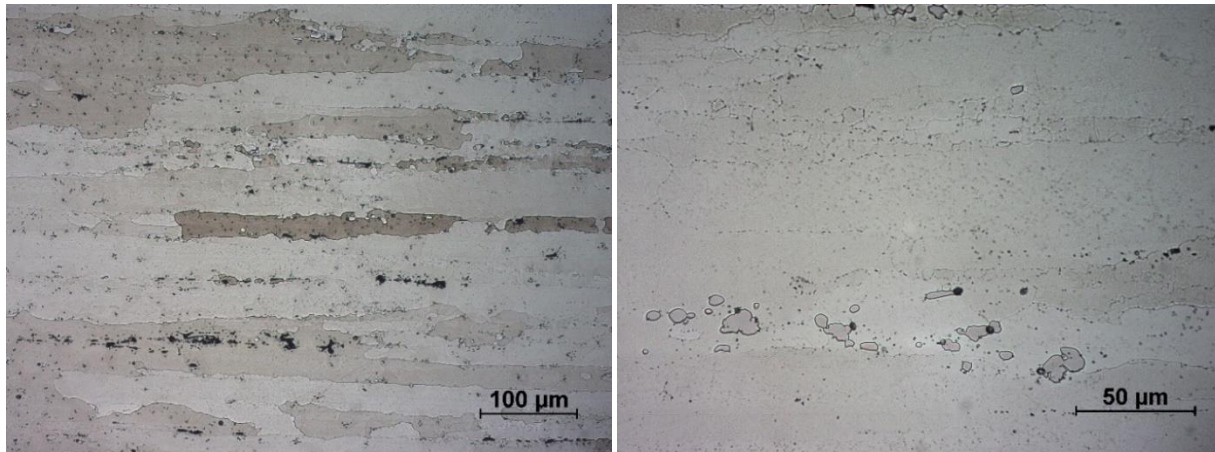


Obrázek 28: Průběh tvrdosti HB podél osy výkovku

7.4 Mikrostruktura

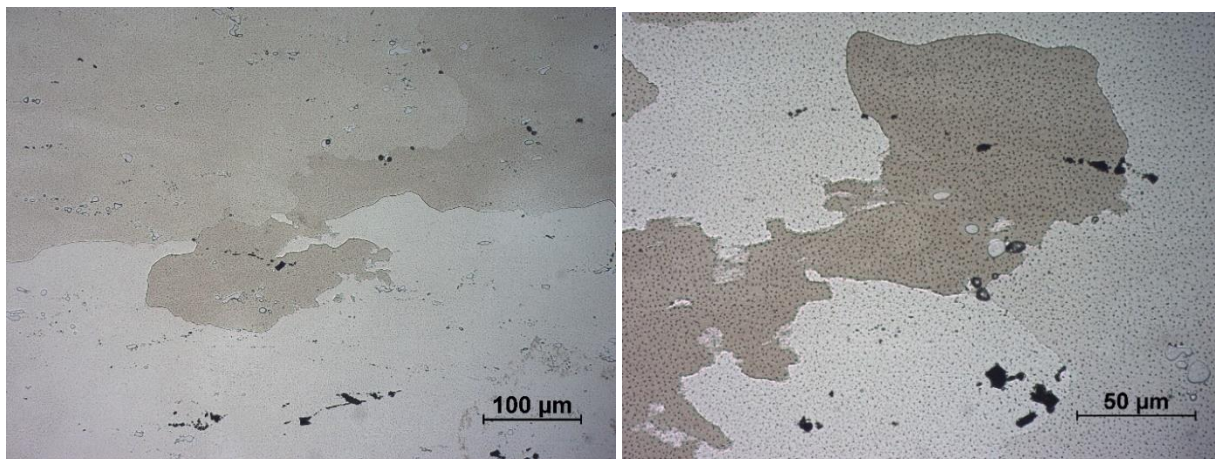
V zápusťce je tok materiálu velice komplikovaný, takže vybrat vhodná místa odběru materiálu pro vzorky k hodnocení struktury je i s ohledem na rozměry vzorku obtížné. K ověření byly nakonec odebrány čtyři vzorky, jeden z kořenové části, jeden z nákovku a dva z profilové části výkovku, z nichž jeden se nachází v místě, které vykazovalo nižší hodnoty meze kluzu. Obr. 29-32 dokumentují předpoklad výrazné nehomogenity a anizotropie struktury výkovku.

Na vzorku M1 z kořenové části listu nejsou patrné stopy po přehřátí.



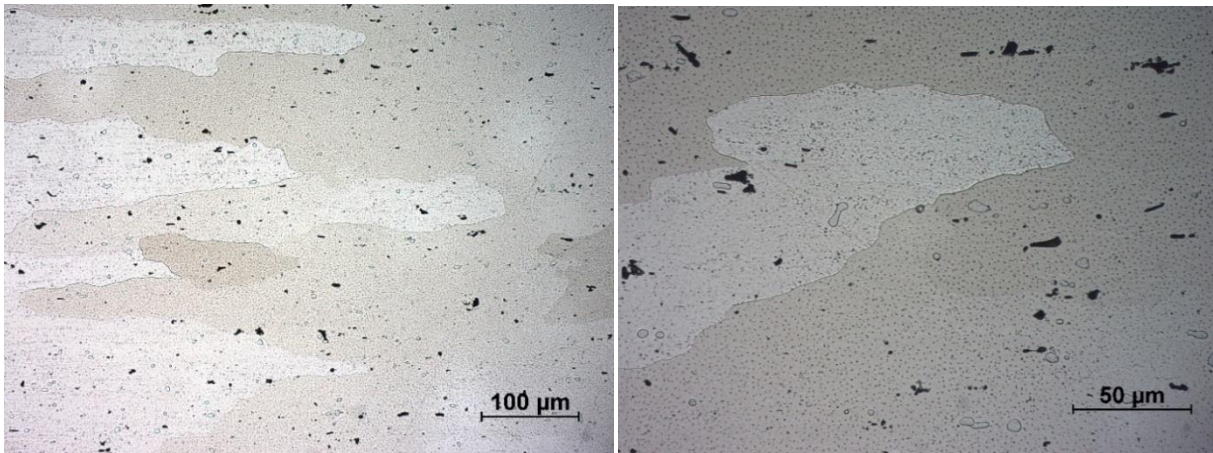
Obrázek 29: Vzorek M1. kořenová část

Vzorek M2 byl odebrán z přibližně stejného místa, kde byla provedena tahová zkouška u vzorku E1. Nejsou patrné stopy po přehřátí



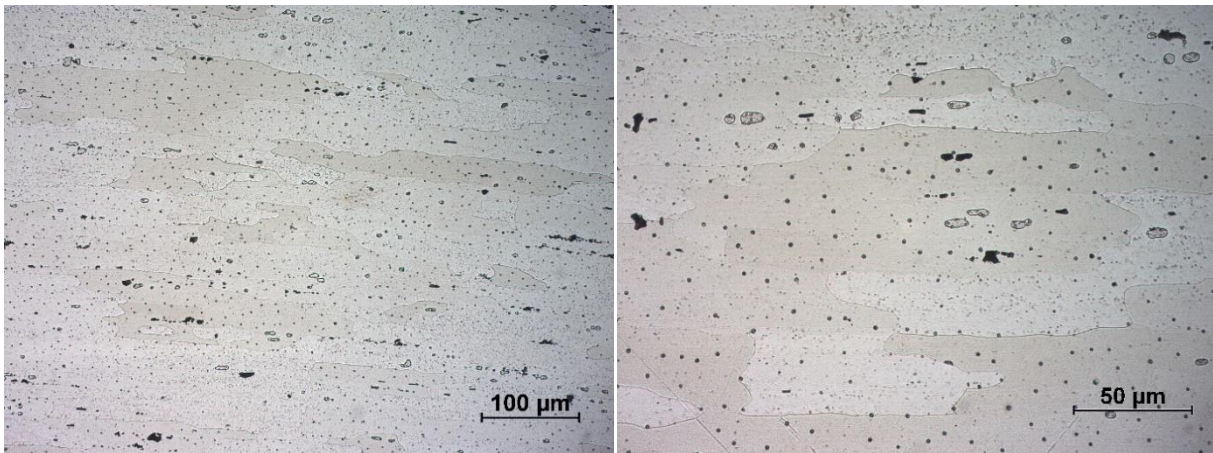
Obrázek 30: Vzorek M2 Profilová část

Vzorek M3 byl odebrán z profilové části výkovku, která je na špičce hotového vrtulového listu. Na vzorku M3 nejsou patrné stopy po přehřátí.



Obrázek 31: Vzorek M3 Profilová část

Vzorek M4 byl odebrán z nákovku, jedná se o nejslabší místo výkovku s tloušťkou 15 mm. Toto místo určeno pro kontrolu mikrostruktury na přehřátí u každé dávky tepelného zpracování. Nejsou patrné známky přehřátí.



Obrázek 32: Vzorek M4 nákovek

Závěr

V teoretické části práce byla udělána rešerše o hliníkových slitinách používaných v leteckém průmyslu. Pozornost byla zaměřena i na moderní, perspektivní slitiny a jejich tepelné zpracování. V letectví je kladen maximální důraz na lehké, ale zároveň vysoce pevné materiály, což hliníkové slitiny splňují.

Problémem složitých profilů u velkých výkovků a výlisků z vytvrditelných slitin hliníku, kam patří i list vrtule, je typická nehomogenita a anizotropie vlastností. Ta ve většině

případů souvisí s působením nehomogenní deformace při kování a rozpadem tuhého roztoku při následném tepelném zpracování vytvrzováním.

Při zápustkovém kování listů vrtule se jako vstupní materiál použila lisovaná tyč, u které lze očekávat vláknitou strukturu, která vzniká v průběhu lisování. Takováto nehomogenní struktura se v průběhu kování v zápustce podstatně změní a má výrazný vliv na konečné vlastnosti výkovku. Proto byla experimentální část práce sestavena tak, aby ověřila, zda se změna polotovaru, která byla ve firmě CPF zvolena, neprojeví negativně na požadovaných hodnotách materiálových charakteristik, zajišťujících bezpečnost výrobku.

I přes složitý postup volby místa a odběru materiálu pro mechanické zkoušky, byl z komplikovaného tvaru listu vrtule získán dostatečný soubor vzorků pro zkoušku tahem.

Na podkladě výsledků provedených zkoušek lze konstatovat, že:

Struktura i mechanické vlastnosti výkovku listu vrtule jsou podle předpokladu nehomogenní a anizotropní.

Zjištěné mechanické vlastnosti splnily minimální požadované hodnoty stanovené normou i přes hodnot, který např. u meze kluzu byl v rozsahu 248-319 MPa.

Výkovek listu vrtule, na který byl použit ekonomicky výhodnější tyčový polotovar, vykázal materiálové charakteristiky, které jsou zárukou bezpečného provozování výrobku.

Zdroje

- [1] Britt, A. F., 2018. Australian Resource Reviews: Bauxite 2017. Geoscience Australia, Canberra
- [2] Alumina production and recycling [online], Dostupné z: <https://www.world-aluminium.org>
- [3] MICHNA, Štefan. Encyklopedie hliníku. [Prešov: Adin], 2006. ISBN 80-89041-88-4.
- [4] Laser-induced breakdown spectroscopy [online], Dostupné z: <http://www.expertsmind.com/questions/laser-induced-breakdown-spectroscopy-30138353.aspx>
- [5] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL: Perspektivní materiály. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 9788001041673.
- [6] L. C. Kramer, W. T. Tack, M. T. Fernandes: Scandium in Aluminum Alloys, *Advanced Materials & Processes* 10/97, 23.
- [7] Ahmad, Z. The properties and application of scandium-reinforced aluminum. *JOM* 55, 35–39 (2003).
- [8] Aluminum A20x [online], Dostupné z: <https://www.aeromet.co.uk>
- [9] Goehrke, Sarah Anderson: High-Performance Aluminum Alloy for Additive Manufacturing in Focus fo Renishaw and Aeromet 2017 [online], Dostupné z: <https://3dprint.com/183628/renishaw-aeromet-a20x-alloy/>
- [10] Nová, Iva, Jiří Machuta: Výrobky z hliníkové pěny [online], Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyrobky-z-hlinikove-peny>
- [11] Metallic materials and elements for aerospace vehicle structures, MIL-HDBK-5J 2003
- [12] přehled slitin hliníku [online], Dostupné z: <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku>
- [13] přehled slitin hliníku [online], Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-group/Aluminum-Alloy>
- [14] KUHLMAN, G.W.: Forging of Aluminum Alloys. ASM Handbook, Volume 14A: Metalworking: Bulk Forming, p.299-312.
- [15] ASM Handbook No.2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and special-Purpose Materials, ASM International, Metal Park Ohio, 1990, s.29.
- [16] Heat Treating of Aluminum Alloys [online], Dostupné z: https://www.engineersedge.com/materials/heat_treating_of_aluminum_alloys_10079.htm
- [17] POMPE, Vilém: Vrtule stále nemají rozumnou alternativu, VZLÚ, Praha 2006

[18] HUJEČEK, Zdeněk: Vrtule – Studijní modul 17

[19] Avia Propeller [online] Dostupné z: <http://www.aviapropeller.cz/>

[20] Lüftner, Vladimír. Výroba vrtulových listů v kovárně Czech Precision Forge,

[21] PTÁČEK, Luděk, et al. Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma LIBS systému [4]	- 8 -
Obrázek 2: Vliv skandia na mez kluzu [6].....	- 9 -
Obrázek 3: Porovnání vybraných typu tvářených slitin (vpravo) a slévárenských slitin (vlevo) z hlediska pevnosti. [3].....	- 11 -
Obrázek 4: Srovnání slitin z hlediska kovatelnosti [15].....	- 13 -
Obrázek 5: Žíhání v diagramu Al-Cu [16].....	- 14 -
Obrázek 6: C křivky a kritická teplota V_k [3]	- 15 -
Obrázek 7: Vliv přirozeného stárnutí na mez kluzu [3].....	- 15 -
Obrázek 8: Vrtulové listy po eloxu a finálním nátěru.....	- 17 -
Obrázek 9: Harmonická analýza listu	- 18 -
Obrázek 10: Vrtulový list s nalepenými tenzometry	- 19 -
Obrázek 11: L-410 s vrtulí AV 725.....	- 20 -
Obrázek 12: Pec na tepelné zpracování s vodní lázní.....	- 22 -
Obrázek 13: Trhací stroj Instron.....	- 23 -
Obrázek 14: Vzorek zkušebního tělesa	- 23 -
Obrázek 15: Upnutí tělesa do čelistí	- 23 -
Obrázek 16: Tvrdoměr Wilson-Wolpert.....	- 24 -
Obrázek 17: Mikroskop Nikon Epiphot 200	- 25 -
Obrázek 18: Rozměřený výkovek	- 26 -
Obrázek 19: Průběh řezání vzorků	- 26 -
Obrázek 20: Vyřezané vzorky	- 26 -
Obrázek 21: Schéma odběru vzorků v kořenové části	- 27 -
Obrázek 22: Průběh napětí v kořenové části.....	- 27 -
Obrázek 23: Průběh napětí u odtokové hrany	- 28 -
Obrázek 24: Průběh hodnot kontrakce a tažnosti	- 28 -
Obrázek 25: Průběh hodnot napětí u náběžné hrany.....	- 29 -
Obrázek 26: Průběh hodnot tažnosti a kontrakce	- 29 -
Obrázek 27: Odběr vzorků v profilové části	- 30 -
Obrázek 28: Průběh tvrdosti HB podél osy výkoveku	- 31 -
Obrázek 29: Vzorek M1. kořenová část.....	- 32 -
Obrázek 30: Vzorek M2 Profilová část.....	- 32 -
Obrázek 31: Vzorek M3 Profilová část.....	- 33 -
Obrázek 32: Vzorek M4 nákovek.....	- 33 -

Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání A20x a AlSi10Mg pro aditivní technologii [8]	- 9 -
Tabulka 2: Porovnání superplastických hliníkových slitin [7]	- 10 -
Tabulka 3: Přehled a mechanické vlastnosti vybraných slitin.....	- 12 -
Tabulka 4: Značení stavu tepelného zpracování [3,11]	- 16 -
Tabulka 5: Chemické složení slitiny	- 21 -
Tabulka 6: Minimální mechanické vlastnosti stanovené normou.....	- 21 -
Tabulka 7: Srovnání hodnot mechanických vlastností podél osy.....	- 30 -
Tabulka 8: Porovnání vzorků	- 30 -
Tabulka 9: Naměřené tvrdosti.....	- 31 -

Přílohy

- Příloha 1: Tabulky pozic odběru vzorků
- Příloha 2: Schéma výkovku vrtulového listu
- Příloha 3: Tabulka měření vzorků
- Příloha 4: Protokol provedené tahové zkoušky
- Příloha 5: Tabulky naměřených hodnot