



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA OPTICKÝCH ZRCADEL PRO VYSOKOFREKVENČNÍ ANTÉNY

MANUFACTURE OF OPTICAL MIRRORS FOR HIGH-FREQUENCY ANTENNA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. DUŠAN MUZIKANT

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JOSEF SEDLÁK, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Dušan Muzikant

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výroba optických zrcadel pro vysokofrekvenční antény

v anglickém jazyce:

Manufacture of optical mirrors for high-frequency antenna

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod
2. Vlastnosti duralových slitin
3. Zbytková napětí v povrchových vrstvách obrobků
4. Chemické niklování a galvanické zlacení duralových dílů
5. Technologičnost výroby eliptického a hyperbolického zrcadla
6. Vliv chemického niklování na jakost povrchové vrstvy leštěných ploch zrcadel
7. Závěr

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je rozbor problematiky výroby optických zrcadel pro vysokofrekvenční antény Národní observatoře v Chile k projektu Atacama Large Millimeter Array (ALMA). Teoretická část práce bude zaměřena na popis duralových slitin, zbytkových napětí po obrábění a charakteristiku povrchových úprav. V praktické části bude provedena analýza současného výrobního stavu ve firmě Frentech Aerospace s.r.o. se zaměřením na integritu a zbytková napětí v povrchových vrstvách při dokončovacím způsobu obrábění.

Seznam odborné literatury:

1. PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM 1.vyd. 246s. 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
2. PTÁČEK, L. a kol. Nauka o materiálu I. 1. vyd. Brno: CERM, 2001. ISBN 80 - 7204 - 193 - 2.
3. KOČMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, 2002. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
4. VALÁŠEK, P. Jakost povrchové vrstvy titanových slitin po obrábění: Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, červen 2004. 68 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc.
5. SOSNOVÁ, M. Kluzné vrstvy a metody hodnocení adhezivně-kohezivního a tribologického chování. Plzeň: ZČU, 2006, 68 s. FRVŠ 1230/2006.
6. MICHNA, Š., LUKÁČ, I., OČENÁŠEK, V. a kol. Encyklopedie hliníku. Adin s.r.o. Prešov, 2005, 720 s.
7. HRUBÝ, V., TULKA, J., KADLEC, J. Povrchové technologie. Vojenská akademie Brno, 1995, 120 s.
8. FIALA, J., KRAUS, I. Povrchy a rozhraní. Česká technika, ČVUT v Praze, 2009, 299 s.
9. DVOŘÁK, M. a kol. Technologie II. 2. vyd. Brno: CERM, 7/2004, 237 s. ISBN 80-214-2683-7.
10. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Příručka obrábění-kniha pro praktiky. Přel. KUDELA, M. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 16.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou výroby vysokofrekvenčních eliptických a hyperbolických optických zrcadel, které tvoří jednu z nejdůležitějších funkčních součástí parabolických satelitů určených pro největší a na světě nejvýše položený mezinárodní astronomický radioteleskop ALMA, realizovaný na náhorní plošině Chajnantor v Chile v Jižní Americe. Jednotlivé kapitoly jsou koncipovány ve smyslu toku technologického postupu výroby, obsahující teoretický i praktický rozbor dané problematiky. Obsah práce směřuje především k popsání a objasnění příčin jednotlivých problémů během daného druhu výroby.

Klíčová slova

Optická zrcadla, slitiny hliníku, zbytková napětí, chemické niklování, galvanické zlacení, pitting, ALMA.

ABSTRACT

This thesis deals with problems with manufacturing of high frequency elliptic and hyperbolic optic mirrors, which makes one of the most important functional parts of parabolic satellites made for biggest and highest placed international astronomical radio-telescope in the world - ALMA, which is built on Chajnantor plateau in Chile in South America. Individual chapters are designed in the flow of technological process of manufacturing, containing theoretical and practical analysis of the problems. Content of the thesis leads especially to description and clarification of individual causes of problems during manufacturing.

Key words

Optical mirrors, aluminum alloy, residual stress, chemical nickel plating, gold electroplating, pitting, ALMA.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MUZIKANT, D. *Výroba optických zrcadel pro vysokofrekvenční antény*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 116 s., 5 příloh. Vedoucí práce: Ing. Josef Sedlák Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Výroba optických zrcadel pro vysokofrekvenční antény vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum:

.....
Dušan Muzikant

Poděkování

Děkuji tímto **Ing. Petrovi Valáškoví** z firmy Frentech Aerospace s.r.o. za cenné podklady, rady a připomínky k vypracování této diplomové práce a za drahocenný čas, který mi tímto věnoval. Dále chci poděkovat mému vedoucímu **Ing. Josefu Sedlákoví Ph.D.** za pomoc při organizaci a jednání o vzniku daného tématu. V neposlední řadě patří velké díky **Prof. Ing. Bohumilu Bumbálkoví CSc.** za poskytnutí důležité literatury a mnoha cenných rad.

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení	5
Poděkování	6
Obsah	7
Úvod	9
1 HLINÍKOVÉ SLITINY	12
1.1 Vlastnosti hliníku a jeho slitin	12
1.2 Rozdělení slitin hliníku	17
1.2.1 Značení hliníkových slitin	18
1.2.2 Slévárenské slitiny Al	23
1.2.3 Tvářené slitiny Al	25
1.2.4 Pěnový hliník a jeho slitiny	27
1.2.5 Slitiny Al pro práškovou metalurgii	28
1.3 Tepelné zpracování hliníkových slitin	29
1.4 Slitiny typu Al-Mg-Si	33
1.4.1 Obecné informace	33
1.4.2 Binární diagram a základní metalurgické pochody	36
1.4.3 Ternární diagram Al-Mg-Si	39
2 ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ V POVRCHOVÝCH VRSTVÁCH	41
2.1 Integrita povrchu	41
2.2 Vznik zbytkových napětí	42
2.3 Druhy zbytkových napětí	43
2.4 Metody měření zbytkových napětí	44
2.5 Vliv zbytkových napětí na výrobu optických zrcadel	45
3 TECHNOLOGIČNOST VÝROBY OPTICKÝCH ZRCADEL	46
3.1 Představení firmy Frentech Aerospace s.r.o.	46
3.2 Výkresová dokumentace	47
3.3 Charakteristiky materiálu	49
3.4 Technologický postup výroby	50
3.5 Technologie tvarového frézování	52
3.5.1 Použitý HSC stroj a jeho technické parametry	52
3.5.2 Použité nástroje	53
3.5.3 Tvarové frézování řádkováním	54
3.5.4 Frézování eliptického zrcadla	57
3.5.5 Frézování hyperbolického zrcadla	61
3.6 Mezioperační a výstupní kontrola po frézování	64
3.6.1 Měřicí přístroj	64
3.6.2 Měření tvarové a rozměrové přesnosti	65
4 LEŠTĚNÍ FUNKČNÍCH PLOCH	68
5 POVRCHOVÉ ÚPRAVY	71
5.1 Rozdělení povrchových úprav	71
5.2 Mechanické předúpravy povrchu	75
5.3 Chemické a elektrochemické předúpravy povrchu	76

6 CHEMICKÉ NIKLOVÁNÍ OPTICKÝCH ZRCADEL.....	86
6.1 Chemické pokovení součástí	86
6.2 Niklové povlaky vyloučené chemicky	88
6.2.1 Fosforanové redukční lázně	89
6.2.2 Hydrazinové redukční lázně	90
6.2.3 Boranové redukční lázně	90
6.2.4 Složení niklovací lázně	90
6.3 Proces chemického niklování optických zrcadel.....	92
7 GALVANICKÉ ZLACENÍ OPTICKÝCH ZRCADEL	94
7.1 Galvanické (elektrochemické) pokovení součástí.....	94
7.2 Zlaté povlaky	98
7.3 Proces galvanického zlacení optických zrcadel.....	100
8 VLIV VAD NA VÝSLEDNOU JAKOST POVRCHU	101
8.1 Zbytková napětí v povlaku	101
8.2 Vodíkový pitting.....	102
8.3 Vady po chemickém niklování optických zrcadel.....	104
8.4 Vady po galvanickém zlacení optických zrcadel.....	107
ZÁVĚR	109
Seznam použitých zdrojů	111
Seznam použitých zkratek a symbolů	114
Seznam příloh.....	116

ÚVOD

Již v dávném starověku bylo lidstvo při pohledu na Slunce, Měsíc nebo na noční oblohu plnou zářících hvězd fascinováno. Astronomie je často označována za nejstarší vědní disciplínu vůbec. Lidé mají už po tisíciletí jednu jedinou společnou vlastnost, a to touhu po poznání. Odkud jsme se vzali? Kdy to bylo a co to způsobilo? Jsme ve vesmíru jediní živoucí tvorové? I proto v dnešní době stále patří astronomie mezi nejdynamičtější vědní obor, který využívá nejmodernějších technických poznatků a technologií.

Roku 1953 vznikla organizace astronomů, tehdy sdružující pět evropských států, nesoucí název ESO (European Southern Observatory). Která je v současné době nejvýznamnější evropskou organizací pro astronomický výzkum ze zemského povrchu.

Rozvoj moderních počítačových a výrobních technologií vedl vědce z ESO k myšlence vytvoření nejvýkonnějšího radioteleskopu ALMA pro pozorování chladného vesmíru, který zřejmě skýtá odpovědi na otázky našeho kosmického původu. Cílem je pozorovat záření o vlnových délkách okolo 1 mm z nejchladnějších objektů ve vesmíru, tedy nejvzdálenějších galaxií a mračen v mezihvězdném prostoru, které mají teplotu blízkou se absolutní nule. Tato poskytnutá data umožní vědcům zkoumat fyzikální a chemické podmínky v molekulových mračnecích, což jsou v podstatě husté oblasti plynu a prachu, ve kterých se rodí nové hvězdy.

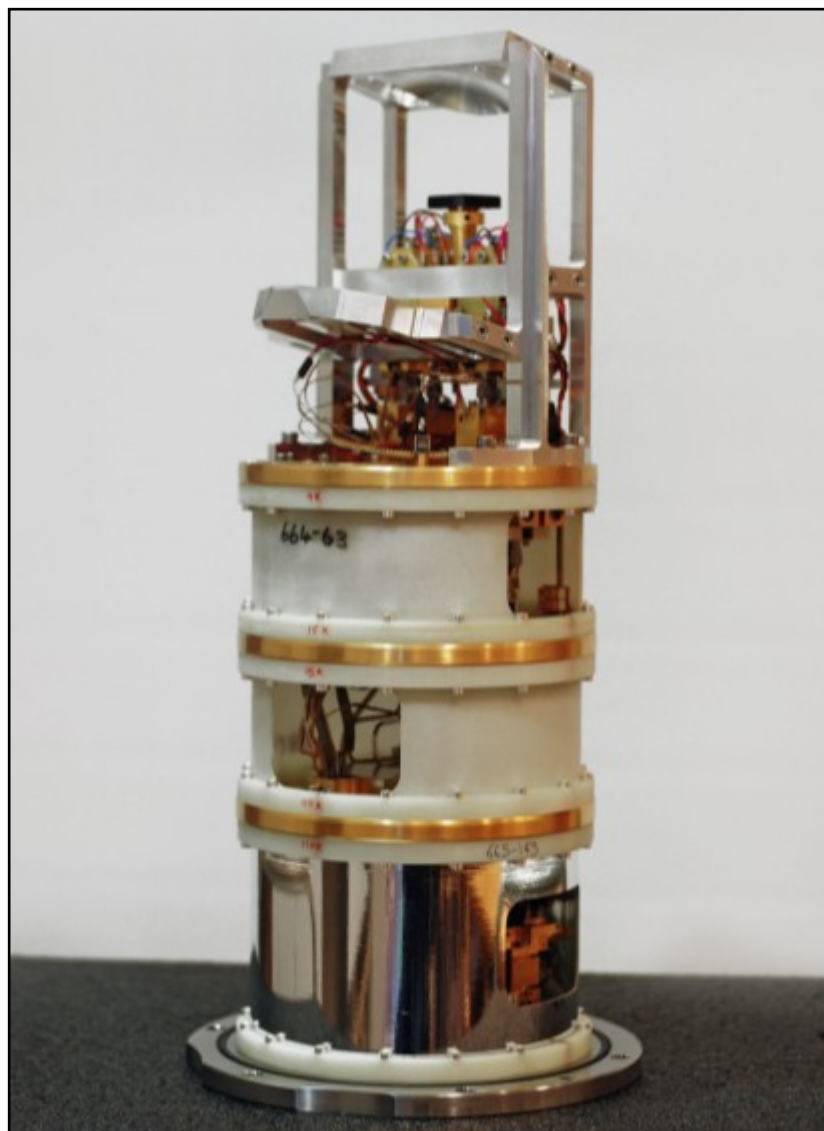
Výstavba tohoto v historii největšího existujícího astronomického projektu probíhá ve výšce 5000 metrů nad mořem na jednom z nejsušších míst planety (vlhkost pohlcuje sledované záření), na náhorní plošině Chajnantor v Chilských Andách. S touto výškou se jedná o nejvýše položenou vesmírnou observatoř na světě.



Obr. 1 Vize projektu ALMA.¹

ALMA (Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array) bude sestávat z 66 vysoce citlivých a přesných parabolických antén obr. 1, které budou pracovat na vlnových délkách od 0,3 do 9,6 mm při frekvenci 31 GHz až 950 GHz. Celkově bude zapojena jako interferometr, tedy vznikne spojením 50 parabolických antén o průměru 12 m obr. 3. Celá tato soustava bude doplněna o čtyři pomocné parabolické antény o průměru 12 m a o dvanáct 7 m parabolických antén. Každá z antén se bude moci po náhorní plošině přesouvat dle potřeby na vzdálenost od 150 metrů až do 16 kilometrů, čímž vzniká variabilní radioteleskop.

Tato práce přináší náhled na výrobu a problémy s ní spojené jedné z nejdůležitějších součástí parabolické antény, tedy vysokofrekvenční optické zrcadlo, které směřuje signály zachycené parabolou do snímače napojeného na výpočetní techniku (tzv. receiver). Toto zrcadlo je téměř identické s tím, které je zobrazeno na obr. 2 ve vrchní části.



Obr. 2 Receiver parabolické antény s optickým vysokofrekvenčním zrcadlem.¹

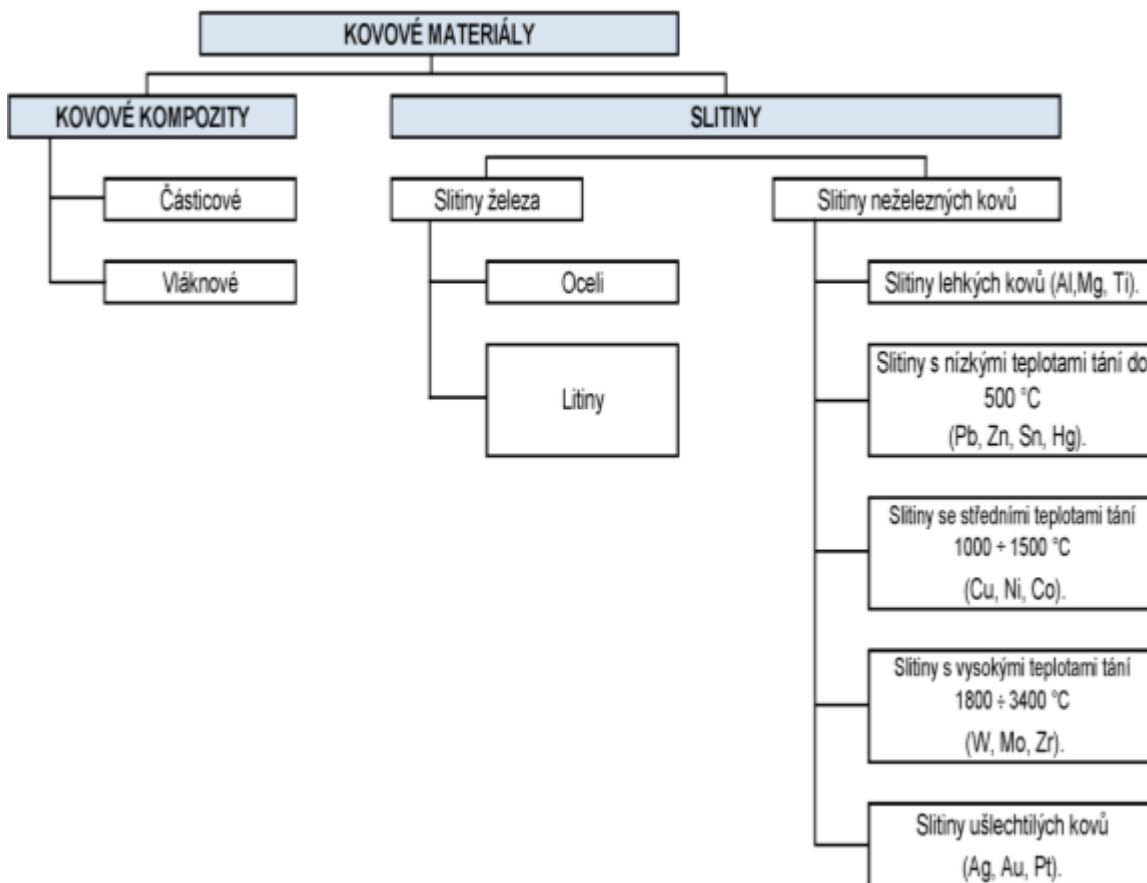


Obr. 3 Parabolická vysokofrekvenční anténa o průměru 15 metrů.¹

1 HLINÍKOVÉ SLITINY

1.1 Vlastnosti hliníku a jeho slitin

Slitiny neželezných kovů (viz. obr. 1.1) se v průmyslové výrobě používají především pro své specifické fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti (vysoká elektrická nebo tepelná vodivost, nízká měrná hmotnost, dobré pevnostní a plastické charakteristiky při různých extrémních teplotách).



Obr. 1.1.1 Rozdělení kovových materiálů.^{11, 12}

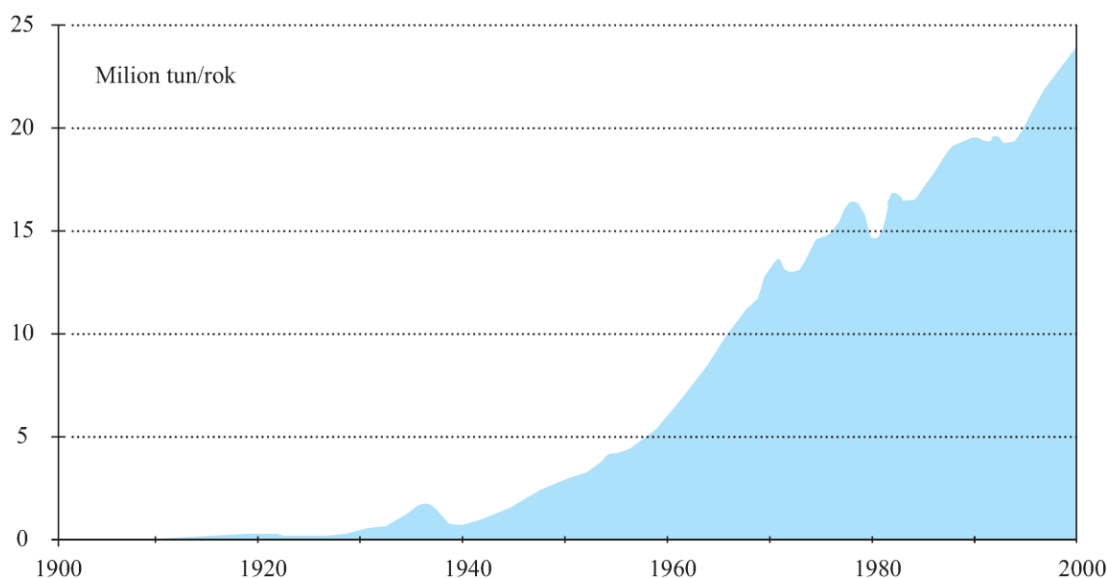
Kamenec a jíly, které obsahují hliník, byly využívány v medicíně, barvířství a při výrobě keramiky už ve starověkém Řecku a Římě. Během středověku byl hliník alchymisty díky svým vlastnostem považován za materiál se zvláštní symbolikou. Až roku 1807 ho Humphry Davy označil za samostatný kov a navrhl název alumium, který byl poté změněn na aluminium kvůli tehdejšímu všeobecnému názvosloví ostatních prvků. Teprve po dvaceti letech výzkumu (r. 1827) byl Friedrichem Wöhlerem poprvé izolován jako prvek. První slitina hliníku určená pro průmyslové použití (na bázi Al-Cu-Mg-Mn) byla vyvinuta v roce 1906 a stala se základem pro pozdější výrobu vytvrditelných slitin. Masovému průmyslovému rozšíření výroby však bránila jeho prozatímní vysoká cena. Hliník měl po mnoho desetiletí vyšší cenu

než zlato, svědčí o tom i fakt, že byl použit jako šperk pro výzdobu královské koruny, která byla vystavena na Světové výstavě klenotů v Paříži roku 1855.

Dle údajů IAI (International Aluminium Institute) se datuje počátek průmyslové výroby hliníku do roku 1859 (5700 t·rok⁻¹). Do poloviny 20. století se však s použitím hliníku a jeho slitin spíše experimentovalo.

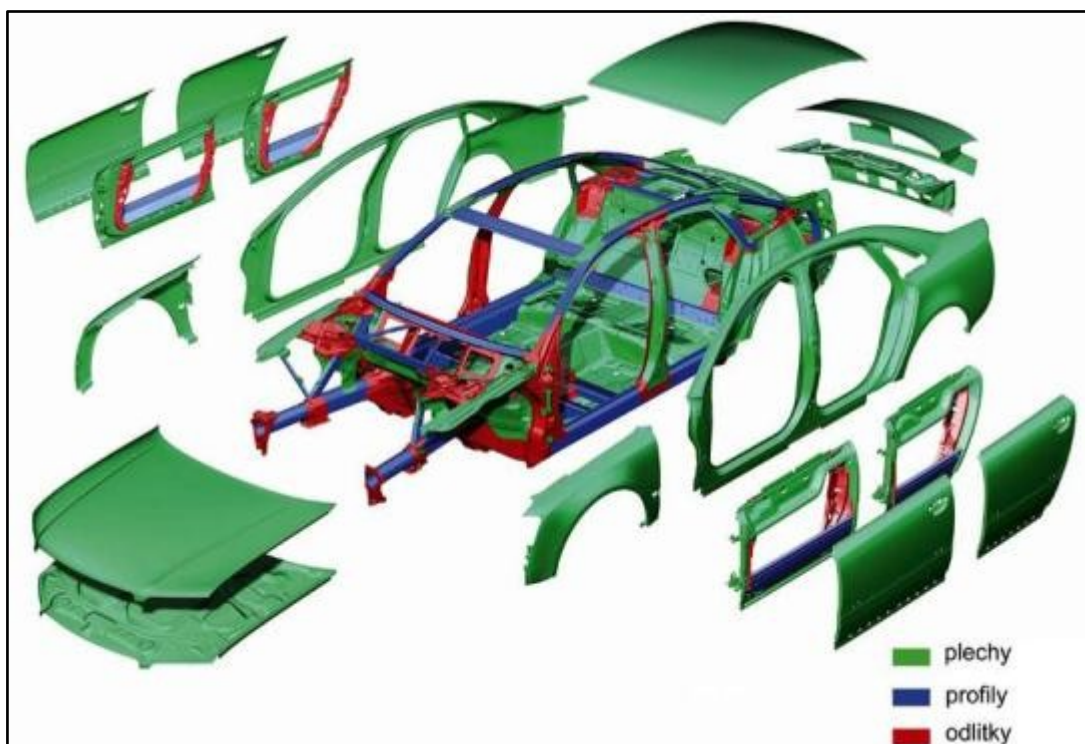
Ke zvýšení produkce hliníku došlo díky jeho použití ve vojenské technice během období druhé světové války. Ovšem po jejím konci nastal značný pokles výroby, způsobený ekonomickou situací především států Evropy.

Se zotavující se ekonomikou průmyslových velmocí během následujících let, nastalo i značné zdokonalení metody výroby hliníku elektrolýzou, které znamenalo snížení jeho ceny a následný růst objemu výroby (obr. 1.1.1). V roce 2008 dosahovala produkce výroby již 40 000 000 t·rok⁻¹ a i nadále se předpokládá značný růst, způsobený vývojem rozvojových zemí.

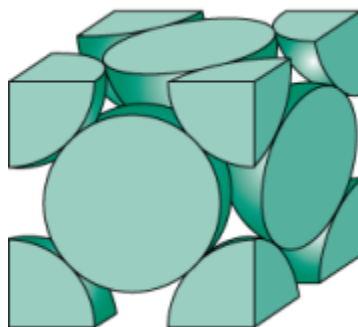


Obr. 1.1.1 Přehled světové produkce hliníku.⁶

Je samozřejmé, že právě díky svým ojedinělým vlastnostem našel hliník a jeho slitiny uplatnění ve všech oborech lidské činnosti. Největším odběratelem hliníkových materiálů se stala oblast dopravního průmyslu (automobilová, letecká, lodní), kde je cílem navrhnout a sestavit lehčí avšak plně homologované dopravní prostředky jako při použití např. ocelových součástí. V automobilovém průmyslu vedla snaha dosáhnout nejnižší možné hmotnosti k myšlence výroby karoserie auta pouze z hliníkových materiálů, tedy především z hliníkových plechů a profilů, které mají nahradit hliníkové odlitky. Koncept takto navrženého automobilu Audi A8 je zobrazen na obr. 1.1.2. Touto realizací lze snížit hmotnost osobního automobilu až o 800 kg.

Obr. 1.1.2 Celohliníkový koncept Audi A8.¹⁶

Technicky čistý hliník (99,5%) je nealotropický stříbrobílý kov, který patří mezi lehké kovy dle obr. 1.1, kam se obvykle řadí kovy s hustotou nižší než $5000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. V tomto stavu má kubickou plošně středěnou (FCC) mřížku (obr. 1.1.4) a může dosahovat vysoké čistoty od 99,0% až do 99,999% Al.

Obr. 1.1.4 Kubická plošně středěná mřížka Al (FCC)¹⁷.

V tomto stavu je však poměrně měkký a tvárný a pro konstrukční použití tedy nevhodný a musí se legovat vhodnými zpevňujícími prvky (především Cu, Mg, Mn, Si, Zn aj.) se kterými tvoří v praxi jednoznačně nejperspektivnější a stále více využívané slitiny hliníku (viz. kap. 1.2). Al velice dobře odolává atmosférické korozi díky kompaktní nevodivé povrchové pasivační oxidické vrstvě Al_2O_3 . Se zvyšující se čistotou jeho korozivzdornost roste, kdežto nečistoty (Fe, Si, Cu, Mn, Zn a Ti) zvyšují pevnost, ale snižují plasticitu. Ve volné přírodě se Al nachází přibližně v 250 různých minerálech (tab. 1.1.1), z nichž nejdůležitější je korund a boehmit.

Tab. 1.1.1 Přehled základních minerálů hliníku.⁶

Minerál	Chemický vzorec	Hmotnostní % Al ₂ O ₃
Korund	Al ₂ O ₃	100,0
Diaspor, boehmit	Al ₂ O ₃ ·H ₂ O	85,0
Gibbsit (hydrargilit)	Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O	65,4
Spinel	Al ₂ O ₃ ·MgO	71,0
Kyanit, andaluzit, silamanit	Al ₂ O ₃ ·SiO ₂	63,0
Kaolinit	Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ ·2H ₂ O	39,5
Alunit	K ₂ SO ₄ ·Al ₂ (SO ₄) ₃ ·4Al(OH) ₃	37,0
Nefelín	(Na, K) ₂ O·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	32,3 ÷ 35,9
Leucit	K ₂ O·Al ₂ O ₃ ·4SiO ₂	23,5
Sericit	K ₂ O·3Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂ ·2H ₂ O	38,4

Nejvýznamnější ekonomicky využitelnou rudou pro průmyslovou výrobu hliníku je bauxit. Bauxit (viz tab. 1.1.2) je hornina složená především z hydratovaných oxidů hliníku (např. boehmit, gibbsit a diaspor) a dalších příměsí ve formě silikátů, jílu, usazenin a hydroxidů železa, která se vyskytuje převážně v tropických a subtropických oblastech (tj. v oblastech s dobrým odvodněním), jako je např. Oceánie, Latinská Amerika a Asie. Jedna tona Al se získává přibližně ze 4÷6 t bauxitu (v závislosti na jeho bohatosti) a roční produkce Al z bauxitu je odhadována na 130 mil tun·rok⁻¹.

Tab. 1.1.2 Vybrané vlastnosti hlinitých minerálů.⁶

Minerál	Chemické složení	Krystalografický systém	Měrná hmotnost [g·cm ³]	Obsah Al [%]	Mohsova tvrdost
Korund	Al ₂ O ₃	hexagonální	3,98	53,0	9
Diaspor	Al ₂ O ₃ ·H ₂ O	ortorombický	3,44	45,0	6,5÷7
Boehmit	Al ₂ O ₃ ·H ₂ O	ortorombický	3,01	45,0	4÷5
Gibbsit	Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O	monoklinický	2,41	34,6	2,5÷3,5
Bayerit	Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O	monoklinický	2,53	34,6	/
Tohdit	5Al ₂ O ₃ ·H ₂ O	hexagonální	3,72	10,2	/

Hliník a jeho slitiny spojují optimální kombinaci fyzikálních (např. tepelná vodivost a hustota), mechanických a technologických (dobré plastické parametry pro tváření za tepla i za studena), chemických vlastností (odolnost proti atmosférické korozi, naopak neodolává hydroxidům NaOH, KOH a halovým kyselinám HCl a HF), které umožňují aplikaci hliníkových materiálů téměř ve všech oblastech lidské činnosti (obr. 1.1.2). Vybrané základní technické vlastnosti a parametry Al jsou uvedeny v tab. 1.1.3.

Tab. 1.1.3 Vybrané technické vlastnosti hliníku.^{6, 12, 13, 14}

Vlastnost	Hodnota
Druh mřížky	Kubická plošně centrovaná K12
Skluzové roviny / skluzové směry	{111} / <110>
Hustota	2,6989 g·cm ⁻³ (při 20 °C)
Atomová hmotnost	26,98154
Teplota tavení	660,4 °C
Latentní teplo tavení	397 kJ·kg ⁻¹
Teplota varu	2 494 °C
Latentní teplo tvaru	10,78 MJ·kg ⁻¹
Tepelná vodivost	247 W·m ⁻¹ (při 25 °C)
Teplotní roztažnost (interval 20÷200 °C)	24,5 μm·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Elektrická vodivost	2,65 Ωmm ² ·m ⁻¹ (64% vodivosti Cu)
Elektrický odpor	26,20 nΩ·m (Al 99,999% při 20 °C) 26,55 nΩ·m (Al 99,800% při 20 °C)
Objemová změna při krystalizaci	6,5%

Jak již bylo zmíněno, technicky čistý hliník má velice nízké pevnostní charakteristiky (viz tab. 1.1.3). Kdežto slitiny se vyznačují nízkou hustotou, dobrými mechanickými vlastnostmi, jsou dobře obrobitelné a nemagnetické. Těchto vlastností se dosahuje legurami (Cu, Si, Zn, Mn a Ni) a také precipitačním vytvrzováním. Do slitin určených pro obrábění se přidává Pb a Bi v hmotnostním množství 1,0÷2,5%, které způsobují tvorbu krátkých a drobných třísek. Mezi nejčastěji používané slitiny patří Al-Si, Al-Mg, Al-Cu-Mg, Al-Cu-Mg-Si, Al-Zn-Mg-Cu a superlehké slitiny Al-Li-X (X = Cu, Mg, Zr, Sc) a Mg-Li.

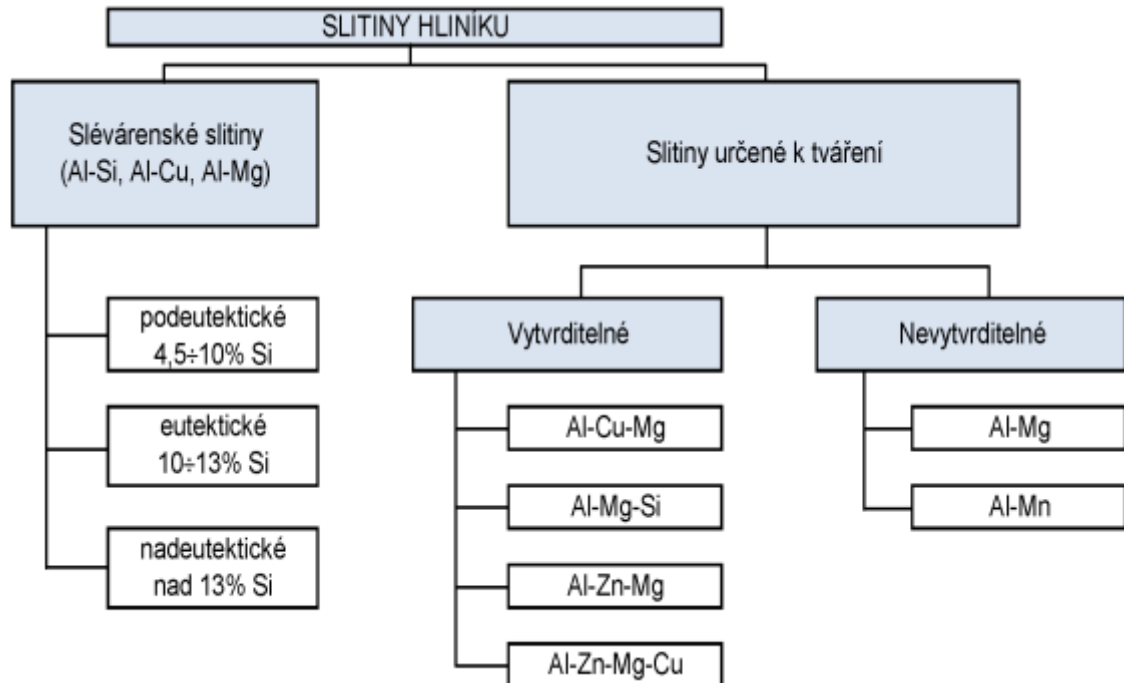
Tab. 1.1.3 Vlastnosti technicky čistého hliníku v žíhaném stavu.^{6, 13, 14}

Čistota hliníku	Tvářený hliník ČSN EN 485	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	HBS [-]	E [GPa]	Výrobek
Al 99,50%	AW-1050A - O	20	65÷95	20÷30	20	71	B, S, E, F, W
Al 99,99%	AW-1199A - O	10	40÷50	70÷90	15	62	S, F

Poznámka: B - tyče; S - plechy, pásy; E - profily; F - fólie; W - dráty.

1.2 Rozdělení slitin hliníku

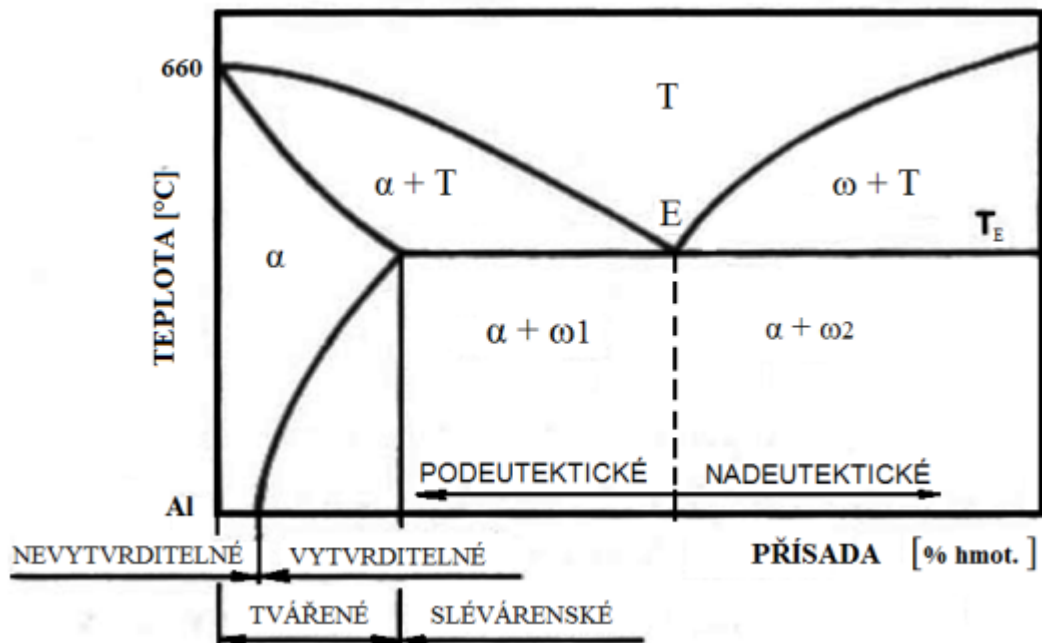
Slitiny hliníku lze rozdělit dle základního binárního diagramu Al-X na obr. 1.2.2 do dvou základních skupin (obr. 1.2.1):



Obr. 1.2.1 Rozdělení slitin hliníku.¹⁷

Další možné modifikace těchto základních druhů představují¹³:

- pěnový hliník a jeho slitiny,
- slitiny Al pro práškovou metalurgii (SAP, SAA).



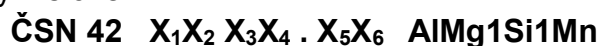
Obr. 1.2.2 Binární rovnovážný diagram Al - X.¹⁷

1.2.1 Značení hliníkových slitin

V současnosti je platné značení hliníku a jeho slitin podle norem ČSN i podle norem ČSN EN, které mají v technické praxi přednost.

1.) Označování Al a jeho slitin dle ČSN

Dle norem ČSN jsou jednotlivé typy hliníku a jeho slitin označovány vždy samostatnou normou ČSN a šestmístným číslem, toto číselné označení lze doplnit i chemickým složením^{14,15}:



42	-třída norem, udává hutnictví;
X₁X₂	-skupina norem 40÷45 uvádí, že jde o Al nebo slitiny Al na odlitky či pro tváření;
X₃ X₄	-skupina těžkých a lehkých neželezných kovů;
X₁	-číslice 3 označuje těžké neželezné kovy a jejich slitiny, -číslice 4 označuje lehké neželezné kovy a jejich slitiny;
X₂	-sudé číslice (0, 2, 4, 6, 8) označují slitiny tvářené, -liché číslice (1, 3, 5, 7, 9) označují slitiny slévárenské;
X₅	-způsob tepelného zpracování
X₆	-jen u tvářených materiálů, kde s první doplňkovou číslicí (X ₅) udává stav a jakost, -u litých materiálů je tato druhá doplňková číslice neobsazena;

2.) Označování stavů Al a jeho slitin dle ČSN EN 515

Značení stavů dle ČSN EN 515 (třídící znak 42 0053) se používá pro tvářený Al a jeho slitiny, kdy tato norma rozlišuje pět základních stavů:

F	-stav tvářený z výroby, kdy se nespecifikují mechanické vlastnosti;
O	-stav žíhaný (měkký) s nízkou mezí pevnosti;
H	-stav deformačně zpevněný u výrobků tvářených za studena po žíhání nebo po tváření za tepla, -za písmenem vždy následují nejméně dvě číslice, z nichž první označuje způsob zpracování a druhá stupeň deformačního zpevnění;
W	-nestabilní stav po rozpouštěcím žíhání u slitin, které stárnou při normální teplotě (přirozené stárnutí);
T	-stav tepelně nebo tepelně-mechanicky zpracovaný, zpravidla precipitačně vytvrzený, -první číslice rozlišuje pořadí základních etap zpracování (rozpouštěcí žíhání, stárnutí a tváření za studena), další číslice vyjadřují varianty těchto etap.

Přehled vybraných stavů hliníku a jeho slitin je uveden v tab. 1.2.1.

Tab. 1.2.1 Přehled označování stavů tvářeného hliníku podle ČSN EN 515.^{21,40}

Označení ČSN EN 515	Stav	Charakteristika zpracování
F	tvářený z výroby	dále tepelně nebo mechanicky nezpracovaný
O	měkký	žíhaný nebo tvářený
O1	měkký	žíhaný při vysoké teplotě a pomalu ochlazený
O2	tepelně-mechanicky zpracovaný	zpracovaný při vysoké teplotě ke zvýšení tvařitelnosti
O3		žíhaný při vysoké teplotě k vyrovnaní chemického složení
H12	1/4 tvrdý	deformačně zpevněný tvářením za studena
H14	1/2 tvrdý	deformačně zpevněný tvářením za studena
H16	3/4 tvrdý	deformačně zpevněný tvářením za studena
H18	4/4 tvrdý	deformačně zpevněný tvářením za studena
W51	tepelně-mechanicky zpracovaný	tvářený za studena deformací tahem 1÷5 % po rozpuštěním žíhání, jestliže se výrobky dále nevyrovnávají
T1	vytvrzený za studena	přirozeně stárnutý po tváření za tepla a zrychlené ochlazení
T2	tepelně-mechanicky zpracovaný	přirozeně stárnutý po tváření za tepla, zrychleném ochlazení a tváření za studena
T3		přirozeně stárnutý po rozpuštěním žíhání a tváření za studena
T31		T3, je-li deformace při tváření za studena je ~1 %
T4	vytvrzený za studena	přirozeně stárnutý po rozpuštěním žíhání
T5	vytvrzený za tepla	uměle stárnutý po tváření za tepla a zrychleném ochlazení
T6	vytvrzený za tepla	uměle stárnutý po rozpuštěním žíhání
T651		po rozpuštěním žíhání, uvolnění vnitřního pnutí řízenou velikostí vypnutí (trvalá deformace pro válcovanou nebo za studena dokončenou tyč 1÷3 %) a umělém stárnutí; po vyrovnaní se tyto výrobky již nevyrovnávají.
T61		T6, nedostárnutí pro zlepšení tvařitelnosti
T7	přestárnutý	uměle stárnutý po rozpuštěním žíhání
T73		T7 k dosažení max. odolnosti proti korozi za napětí
T76		T7 k dosažení max. odolnosti proti vrstevnaté korozi
T8	tepelně-mechanicky zpracovaný	uměle stárnutí po rozpuštěním žíhání a tváření za studena
T81		T8, je-li deformace ~1 %
T82		T8, je-li deformace ~2 %
T9		tvářený za studena po rozpuštěním žíhání a umělém stárnutí

3.) Označování Al a jeho slitin dle ČSN EN

a) Al a slitiny Al pro tváření dle ČSN EN 573-1, 573-2 a 573-3

Jednotlivý označující kód následuje v tomto pořadí: EN, mezera, písmeno A (aluminium), písmeno W (wrought- tvářené výrobky), pomlčka a čtyři číslice, které udávají určitou řadu slitin Al. Tyto řady jsou rozděleny dle obsahu převládajících chemických prvků (tab. 1.2.2). Případně lze tento kód také doplnit v hranatých závorkách údaji o chemickém složení (např. EN AW-6082 [AlSi1MgMn]). Srovnání označení hliníku a jeho slitin podle norem ČSN EN 573-1 až 573-3, ČSN a DIN 1725-1 je uvedeno v tab. 1.2.3 až tab. 1.1.10.

Tab. 1.2.2 Rozdělení řad slitin hliníku dle ČSN EN 573-1 až 573-3.⁶

Řada	Hlavní prvky	Řada	Hlavní prvky
1000	Al min. 99,00% a více	5000	AlMg
2000	AlCu	6000	AlMgSi
3000	AlMn	7000	AlZn
4000	AlSi	8000	Al s různými prvky

Pokud se požaduje uvedení několika slitinových prvků v označení, udávají se v pořadí podle jejich klesajících jmenovitých obsahů. Jestliže jsou jejich obsahy shodné, uvádějí se v abecedním pořadí jejich chemických značek. Počet chemických značek slitinových prvků se omezuje na čtyři. Jednotlivé národní odchylky jsou označeny velkými písmeny abecedy, kromě I, O a Q.

Tab. 1.2.3 Značení slitin hliníku řady 1000.⁶

Technicky čistý hliník - řada 1000					
Značení slitin dle ČSN EN 573-3		Značení slitin dle ČSN		Značení slitin dle DIN 1725-1	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AW-1050A	EN AW-Al 99,5 (A)	ČSN 42 4004 ČSN 42 4005	Al 99,5 E	3.0255	Al 99,5
EN AW-1080A	EN AW-Al 99,8 (A)	ČSN 42 4002	Al 99,8	3.0285	Al 99,8
EN AW-1200	EN AW-Al 99,0	ČSN 42 4009	Al 99,0	3.0205	Al 99,0

Tab. 1.2.4 Značení slitin hliníku řady 2000 - AlCu.⁶

Slitiny hliníku - řada 2000 - AlCu					
Značení slitin dle ČSN EN 573-3		Značení slitin dle ČSN		Značení slitin dle DIN 1725-1	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AW-2024	EN AW-AlCu4Mg1	ČSN 42 4203	AlCu4Mg1	3.1355	AlCuMg2
EN AW-2030	EN AW-AlCu4PbMg	ČSN 42 4254	AlCu4PbMg	-	-
EN AW-2117	EN AW-AlCu2,5Mg	ČSN 42 4204	AlCu2Mg	3.1305	AlCu2,5Mg0,5

Tab. 1.2.5 Značení slitin hliníku řady 3000 - AlMn.⁶

Slitiny hliníku - řada 3000 - AlMn					
Značení slitin dle ČSN EN 573-3		Značení slitin dle ČSN		Značení slitin dle DIN 1725-1	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AW-3003	EN AW-AlMn1Cu	-	-	3.0517	AlMnCu
EN AW-3103A	EN AW-AlMn1 (A)	ČSN 42 4432	AlMn1	-	-
EN AW-3207	EN AW-AlMn0,6	-	-	3.0506	AlMn0,6

Tab. 1.2.6 Značení slitin hliníku řady 4000 - AlSi.⁶

Slitiny hliníku - řada 4000 - AlSi					
Značení slitin dle ČSN EN 573-3		Značení slitin dle ČSN		Značení slitin dle DIN 1725-1	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AW-4032	EN AW-AlSi12,5MgCuNi	ČSN 42 4237	AlSi12Ni1Mg	-	-

Tab. 1.2.7 Značení slitin hliníku řady 5000 - AlMg.⁶

Slitiny hliníku - řada 5000 - AlMg					
Značení slitin dle ČSN EN 573-3		Značení slitin dle ČSN		Značení slitin dle DIN 1725-1	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AW-5019	EN AW-AlMg5	ČSN 42 4415	AlMg5	3.3555	AlMg5
EN AW-5251	EN AW-AlMg2Mn0,3	ČSN 42 4412	AlMg2	3.3525	AlMg2Mn0,3
EN AW-5754	EN AW-AlMg3	ČSN 42 4413	AlMg3	3.3535	AlMg3

Tab. 1.2.8 Značení slitin hliníku řady 6000 - AlMgSi.⁶

Slitiny hliníku - řada 6000 - AlMgSi					
Značení slitin dle ČSN EN 573-3		Značení slitin dle ČSN		Značení slitin dle DIN 1725-1	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AW-6012	EN AW-AlMgSiPb	-	-	3.0615	AlMgSiPb
EN AW-6060	EN AW-AlMgSi	ČSN 42 4401	AlMgSi	3.3206	AlMgSi0,5
EN AW-6082	EN AW-AlSi1MgMn	ČSN 42 4400	AlMg1Si1Mn	3.2315	AlMgSi1

Tab. 1.2.9 Značení slitin hliníku řady 7000 - AlZn.⁶

Slitiny hliníku - řada 7000 -AlZn					
Značení slitin dle ČSN EN 573-3		Značení slitin dle ČSN		Značení slitin dle DIN 1725-1	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AW-7020	EN AW-AlZn4,5Mg1	ČSN 42 4441	AlZn5Mg1	3.4335	AlZn4,5Mg1
EN AW-7022	EN AW-AlZn5Mg3Cu	-	-	3.4345	AlZnMgCu0,5
EN AW-7075	EN AW-AlZn5,5MgCu	ČSN 42 4222	AlZn6Mg2Cu	3.4365	AlZn4,5MgCu1,5

Tab. 1.2.10 Značení slitin hliníku řady 8000 - různé.⁶

Slitiny hliníku - řada 8000 - různé					
Značení slitin dle ČSN EN 573-3		Značení slitin dle ČSN		Značení slitin dle DIN 1725-1	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AW-8011A	EN AW-AlFeSi (A)	-	-	3.0915	AlFeSi

Řada 9000 je doposud ponechána volná bez obsazení konkrétní slitinou.

Jestliže způsob použití hliníku či jeho slitiny vyžaduje specifické rozmezí chemického složení minimálně jednoho prvku, píše se před chemické složení písmeno abecedy. Např. pro materiály používané v elektrotechnice se používá písmeno E: EN AW-5305 [EAl 99,85Mg1].

b) Al slitiny na odlitky dle ČSN EN 1706

Norma ČSN EN 1706 je platná pro slitiny hliníku na odlitky a stanoví následné označování (tab. 1.2.12): EN, mezera, A (aluminium), C (casting- odlévané výrobky), doplněno pěti číslicemi, které vyjadřují řadu slitiny dle převládajících chemických prvků (tab. 1.2.11) Případně lze tento kód také doplnit v hranatých závorkách údaji o chemickém složení (např. EN AC-21000 [AlCu4MgTi]).

Tab. 1.2.11 Rozdělení řad slitin hliníku dle ČSN EN 1706.⁶

Řada	Hlavní prvky	Řada	Hlavní prvky
10000	Al min. 99,00% a více	50000	AlMg
20000	AlCu	60000	AlMgSi
30000	AlMn	70000	AlZn
40000	AlSi	80000	Al s různými prvky

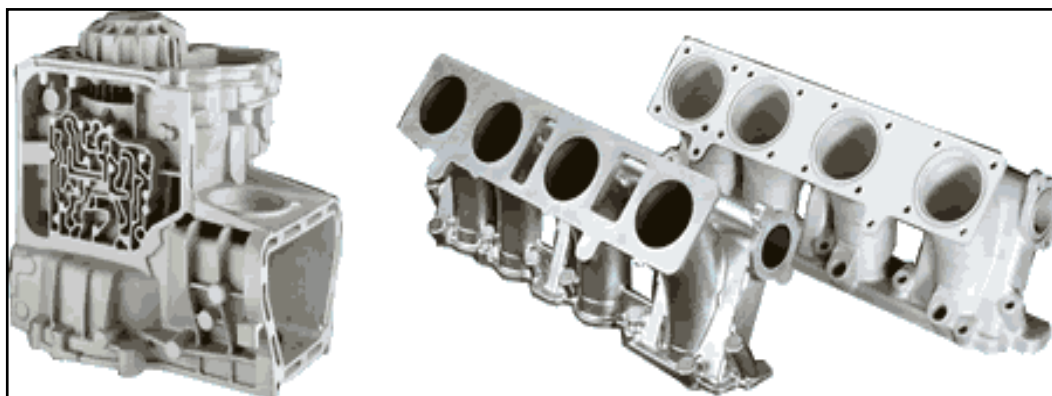
Tab. 1.2.12 Značení slitin hliníku na odlitky.⁶

Slitiny hliníku na odlitky					
Značení slitin dle ČSN EN 1706		Značení slitin dle ČSN		Značení slitin dle DIN 1725-2	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AC-21000	EN AC-AlCu4MgTi	-	-	3.1371	AlCu4MgTi
EN AC-21100	EN AC-AlCu4Ti	-	-	3.1841	AlCu4Ti
EN AC-43000	EN AC-AlSi10Mg	ČSN 42 4331	AlSi10MgMn	3.2381	AlSi10Mg
EN AC-43300	EN AC-AlSi9Mg	ČSN 42 4331	AlSi10MgMn	3.2373	AlSi9Mg
EN AC-46000	EN AC-AlSi9Cu3	ČSN 42 4339	AlSi8Cu2Mn	3.2163	AlSi9Cu3
EN AC-47000	EN AC-AlSi12 (Cu)	ČSN 42 4330	AlSi12Mn	3.2583	AlSi12 (Cu)
EN AC-51400	EN AC-AlMg5 (Si)	ČSN 42 4515	AlMg5Si1Mn	3.3261	AlMg5Si

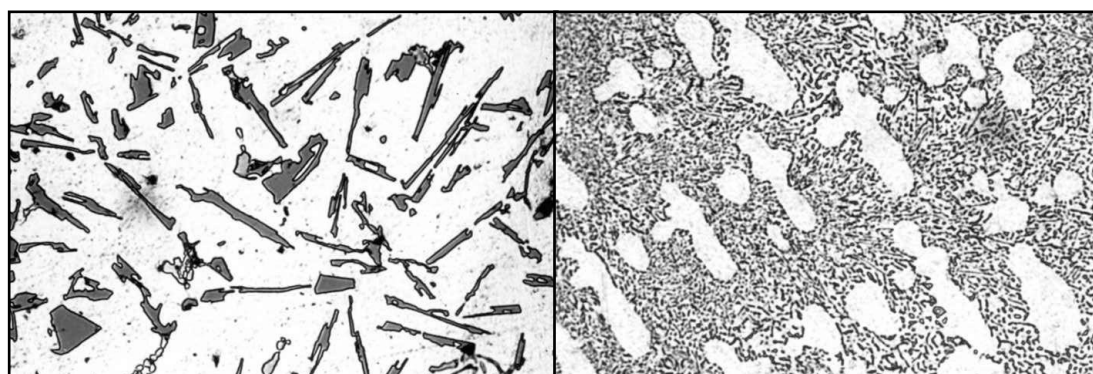
1.2.2 Slévárenské slitiny Al

Slévárenské slitiny Al musí mít především dobrou slévatelnost, mechanické vlastnosti, odolnost proti korozi, svařitelnost a obrobitelnost. Dobrá slévatelnost znamená, že výsledné chemické složení slitiny leží v blízkosti eutektického bodu rovnovážného diagramu (obr. 1.2.2), proto tedy obsahují více legujících prvků (8÷15 %) než slitiny tvářené. Hlavními představiteli jsou slitiny Al-Si (Cu, Mg, Mn), Al-Cu (Ni, Cr) a Al-Mg (Si).

Používají se v hojně míře především pro své příznivé technologické vlastnosti, které umožňují odlévat i složité tenkostěnné odlitky do pískových forem, kokil nebo i tlakové lití (obr. 1.2.3). Kromě chemického složení ovlivňuje výsledné vlastnosti slitiny i samotný způsob odlévání (následná rychlost chlazení) a sekundární tepelné zpracování. Např. tlakové odlitky, které jsou formou rychle ochlazovány, mají jemnozrnnou strukturu a jejich fáze α je přesycena přísadami, takže přirozeně stárnou bez předchozího rozpouštěcího žíhání.

Obr. 1.2.3 Příklady vysokotlakých odlitků.¹⁶

Nejznámější skupinou slévárenských slitin jsou slitiny Al-Si, tzv. **siluminy**, které obsahují 5÷12 % Si a další přísady, jako např. Mn, který eliminuje nepříznivý vliv příměsi Fe na tažnost, houževnatost a slévárenské vlastnosti. Přidáním Cu lze zvýšit mez únavy ale na úkor odolnosti proti korozi. Nejlepší slévárenské vlastnosti mají eutektické siluminy (s obsahem 10÷12 % Si). Ke změně vlastností siluminů se používají operace očkování a modifikace (porovnání struktur uvedeno na obr. 1.2.4), které budou probrány v kap. 1.2.



a) nemodifikovaný silumin Al-Si

b) modifikovaný silumin Al-Si

Obr. 1.2.4 Struktura siluminů.¹⁷

Siluminy mají nízkou měrnou hmotnost ($2\,650\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), dobrou odolnost proti korozi a dobré slévárenské vlastnosti (malá smrštivost a náchylnost k praskání). Siluminy s přísadou Mg, Cu nebo Ni (tab. 1.2.13) se vytvrzují za tepla (dosahují $R_m = 250\div 300\text{ MPa}$). Používají se převážně na tenkostěnné odlitky nepropustné pro kapaliny a pro potravinářský průmysl.

Tab. 1.2.13 Vlastnosti vybraných slitin hliníku na odlitky.¹²

SLITINA HLINÍKU ČSN EN 573	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	HBS [-]	Metoda lití
EN AC-42000 [AlSi7Mg] - T6	220	260	1	90	K, S, L
EN AC-43000 [AlSi10Mg] - T6	220	260	1	90	K, S
EN AC-44100 [AlSi12] - F	80	170	5	55	K, S, L
EN AC-46200 [AlSi8Cu3] - F	100	170	1	75	K, S, D
EN AC-48000 [AlSi12CuNiMn] - T6	240	280	< 1	100	K
EN AC-51000 [AlMg3] - F	70	150	5	50	K, S

Poznámka: T6 - stav vytvrzený za tepla, F - stav odlitý; K - do kovové formy, S - do pískové formy, D - tlakové lití, L - do vytavitelného modelu.

Slitiny typu Al-Mg obsahují 3÷11 % Mg, Mn eliminující škodlivý vliv Fe a přísadu Si, která zlepšuje slévárenské vlastnosti, ale zhoršuje vzhled povrchu (pórovitost). Tyto slitiny mají vysokou odolnost proti korozi, nejvyšší měrnou pevnost a dobrou obrobitelnost a leštitelnost. Používají se na odlitky odolávající atmosférické korozi i mořské vodě.

1.2.3 Tvářené slitiny Al

Tvářené slitiny hliníku jsou určeny především pro následné zpracování tvářením, proto je žádoucí, aby v jejich mikrostruktuře převládal tuhý plastický roztok α a měli tedy dobrou tvařitelnost. Dle diagramu na obr. 1.2.2 se jedná tedy o slitiny s nižšími obsahy legujících prvků než u slitin určených k odlévání. Dle jejich dalšího možného zpracování je možno je dělit:

A) Vytvrditelné slitiny hliníku tvoří pro průmyslové použití nejdůležitější skupinu hliníkových slitin. Mezi jejich přednosti patří možnost následného vytvrzení, při kterém dochází k výraznému zvýšení mechanických vlastností (tab. 1.2.14). Nejznámějším představitelem jsou **duraly** (slitiny **Al-Cu**, popř. **Al-Cu-Mg**), dále se jedná např. o slitiny **Al-Mg-Si** (řada 6000), **Al-Zn-Mg**, **Al-Zn-Mg-Cu** (řada 7000) a relativně nové slitiny **Al-Li**.

Duraly patří mezi vytvrditelné slitiny s vysokou pevností. Nejrozšířenější je skupina **Al-Cu₄-Mg**, která má v měkkém stavu pevnost 200 MPa a tažnost 20 % a po vytvrzení dosahuje pevnosti 400÷420 MPa. Jejich značnou nevýhodou je však nízká korozní odolnost, proto se plátují čistým hliníkem v tloušťce přibližně 5 % tloušťky plechu. Hlavní oblast použití je v leteckém a dopravním průmyslu. Vyšších mechanických vlastností se dosáhne při zvýšeném obsahu Mg. Tato slitina se nazývá **superdural** **Al-Cu₄-Mg**, po tvářením za studena a vytvrzování dosahuje meze pevnosti nad 500 MPa.

Slitiny **Al-Mg-Si** (zvané též **Pantal**¹⁸) neobsahují více než 1,5 % přísadových prvků a po vytvrzení dosahují meze pevnosti R_m do 350 MPa, nejnížší ze všech vytvrditelných slitin (na vytvrzení slitin se podílí fáze Mg_2Si). Naopak mají velmi dobrou korozní odolnost a svařitelnost a našly využití v přesné mechanice, optice, stavebnictví, jako bytové doplňky či jako části karoserií v automobilním průmyslu. Tato skupina slitin bude podrobně probrána v kap. 1.3.

Nejvyšších pevností v tahu (až 600 MPa) dosahují slitiny **Al-Zn-Mg** a **Al-Zn-Mg-Cu** (3÷8 % Zn, 1÷3 % Mg a max. 2 % Cu). Přísada Cu dodává slitinám vysokou pevnost ($R_{P0,2} > 480$ MPa po vytvrzení), ale ubírá korozní odolnost (mezikrystalová koroze). Slitiny bez obsahu Cu mají velkou teplotní stabilitu tuhého roztoku α , což usnadňuje následné vytvrzování (během rozpouštěcího žíhání). Zvýšení korozní odolnosti je dosaženo pomocí dvojitého umělého stárnutí. Tyto slitiny jsou široce používány na vysoce namáhané součástky v leteckém a automobilovém průmyslu.

Snaha o snížení hmotnosti bez ztráty pevnostních vlastností slitin v leteckém průmyslu vedla k výzkumu slitiny **Al-Li**. Ovšem tato binární slitina je velice křehká, proto se do komerčních slitin přidávají kromě Li (max. 3 %) také Cu (až 5 %), Mg (až 2 %), popř. Zr. Poprvé byly použity na Airbus 340, následně na MIG 29 a také v kosmickém průmyslu (NASA).

Tab. 1.2.14 Vlastnosti vybraných tvářených slitin hliníku (při 20 °C).¹²

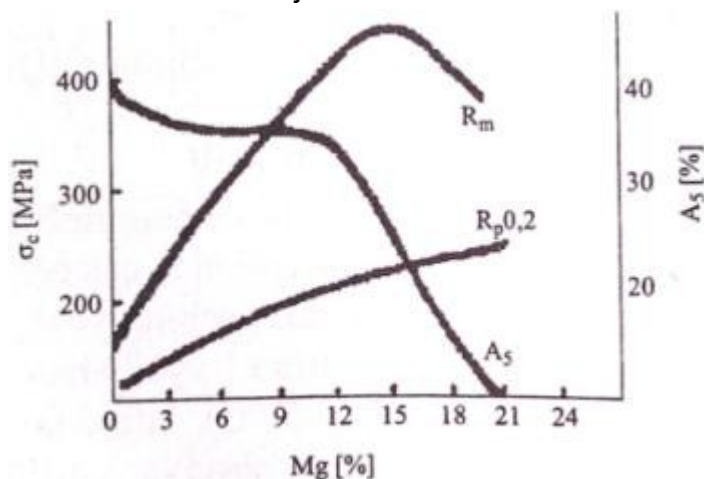
SLITINA HLINÍKU ČSN EN 573	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	HBS [-]	E [GPa]
EN AW-3103 [AlMn1] - H14	120	140	4	45	67
EN AW-5019 [AlMg5] - H14	210	300	4	80	70
EN AW-6082 [AlSi1MgMn] - T6	260	300	9	90	70
EN AW-7005 [AlZn4,5Mg1,5] - T6	290	350	10	-	71
EN AW-7178 [AlZn7MgCu] - T6	540	600	4	180	72

Poznámka: T6 - stav vytvrzený za tepla, H14 - stav po tváření za studena.

B) Nevytvrditelné slitiny hliníku jsou charakteristické nižšími pevnostními charakteristikami. Jejich mechanické vlastnosti následným precipitačním vytvrzováním příliš zlepšit nejdou a jsou závislé především na substitučním zpevněním tuhého roztoku (druhou variantou je následné tváření za studena). Jedná se především o slitiny Al-Mn nebo Al-Mg.

Zpevnění skupiny **Al-Mn** je nízké, protože je způsobeno pouze tuhým roztokem Mn v Al, proto se někdy do slitiny přidává Cu. Obsah Mn jakožto hlavního legujícího prvku bývá max. 1,5 %. Slitiny Al-Mn1 a Al1Mn1Cu jsou hojně využívány v automobilovém průmyslu (trubky, chladiče, topení aj.), dále v chemickém a potravinářském průmyslu (nápojové plechovky). Mají velice dobrou tvařitelnost, svařitelnost i korozivzdornost při $R_m = \sim 150$ MPa.

Al-Mg je dvoufázová slitina $\alpha+\beta$ (Al_3Mg_2), ve které se s rostoucím obsahem Mg zvyšují i pevnostní charakteristiky (obr. 1.2.5). Jeho obsah však nepřesahuje 6 %. Slitina AlMg₃ dosahuje pevnosti přibližně 240 MPa, kdežto AlMg₆ až $R_m = 360$ MPa. Skupina slitin Al-Mg se vyznačuje dobrou korozní odolností (nápojové plechovky) a patří mezi nejlépe svařitelné Al slitiny. Díky odolnosti proti koroznímu působení mořské vody jsou tyto slitiny často používány na součásti lodních trajektů.

Obr. 1.2.5 Vliv obsahu Mg na mechanické vlastnosti slitin Al-Mg.¹³

1.2.4 Pěnový hliník a jeho slitiny

Inspirace vědců a výzkumníků přírodními materiály jako je např. dřevo, které má vynikající vlastnosti při minimální hmotnosti, vedla k výzkumu kovových pěn především z lehkých kovů. Pěnový hliník je principiálně kompozit, složený z hliníkové slitiny a pórů vyplněných plynem, které jsou rozloženy rovnoměrně v objemu matrice.

Pěnový hliník lze vyrobit dvěma způsoby:

a) slévárensky:

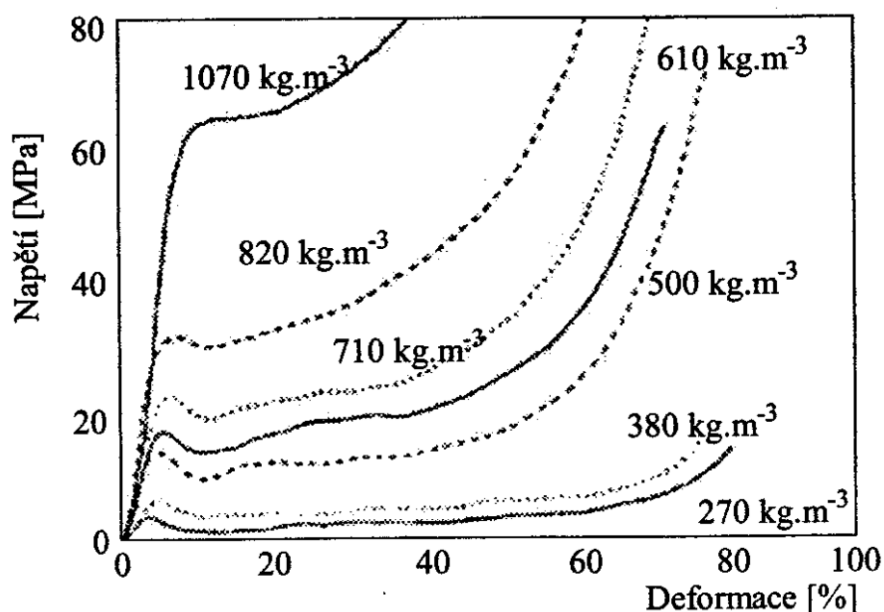
-do roztavené slitiny Al se vmísí zpěňovadlo (např. kovový hydrid), který se v tavenině rozloží a vytváří póry; tato pěna se nedá odlévat, proto se vyrábí velké ingoty, ze kterých se následným obráběním vytváří jednotlivé součástky (ovšem s celulárním povrchem).

b) technologiemi práškové metalurgie:

-prášková směs Al spolu se zpěňovadlem se zahřívá a lisuje, vzniká tak přímo hotová součást s požadovaným tvarem.

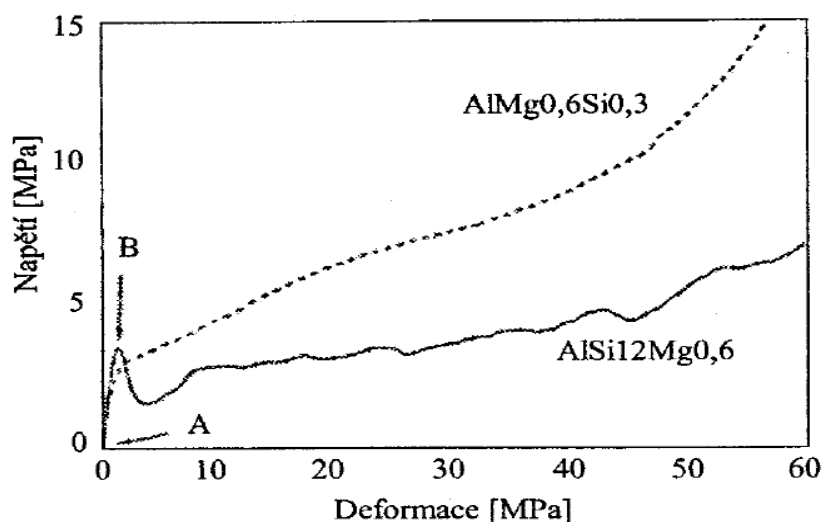
Na obr. 1.2.6 je zobrazeno deformační chování zpěněné křehké slévárenské slitiny $AlSi12Mg0,6$, kde je patrné, že deformační křivka se skládá ze tří úseků. První část je téměř elastická (nastává elastická deformace stěn pórů), druhá část je deformační plateau (stěny pórů se plasticky deformují nebo křehce lámou v celém objemu, dochází k ustálení viskozity nezávisle na zvyšující se rychlosti smykové deformace).

Nakonec po deformaci všech pórů nastává proces zhutnění s prudkým nárůstem napětí. Skoky zřejmé v oblasti počátku plateau mají charakter horní a spodní meze kluzu (jejich hodnoty vzrůstají s růstem hustoty).



Obr. 1.2.6 Vliv hustoty na deformační chování zpěněné slévárenské slitiny $AlSi12Mg0,6$.¹³

Srovnání rozdílného průběhu deformačních křivek pro tvářenou slitinu $\text{AlMg}_{0,6}\text{Si}_{0,3}$ a křehké zpěněné slévárenské slitiny $\text{AlSi}_{12}\text{Mg}_{0,6}$ je zobrazeno na obr. 1.2.7. Jako perspektivní aplikací se jeví použití pěnového hliníku i jako zvukového izolátoru (zvukotěsného materiálu), protože dosahuje přibližně polovičních hodnot součinitele pohltivosti zvuku než polyuretanová pěna (PU), což je v praxi často dostačující.



Obr. 1.2.7 Srovnání průběhu deformačních křivek slitin $\text{AlMg}_{0,6}\text{Si}_{0,3}$ a $\text{AlSi}_{12}\text{Mg}_{0,6}$.¹³

1.2.5 Slitiny Al pro práškovou metalurgii

Podstatou výroby prášků pro následné práškové aplikace je omýlání oxidických vrstev Al_2O_3 vznikajících na povrchu hliníku. Proces omýlání se provádí nejčastěji v kulovém mlýně. V současné době může být jako základního prášku využito prakticky všech slitin Al, včetně nových slitin Al-Li.

Modifikací tohoto způsobu je výroba tzv. reakčním mletím, kdy se místo Al_2O_3 používá Al_4C_3 . Tyto zpevňující částice vznikají chemickou reakcí mezi Al a vpraveným C. Reakčním mletím lze dosáhnout prášků s obsahem až 5 hmotnostních procent uhlíku, což představuje přibližně 20 % objemu Al_4C_3 . Optimální kombinace pevnostních a plastických vlastností je dosahováno při 2 % C. Tyto materiály vykazují také podstatně vyšší odolnost proti tečení při srovnání s mechanicky legovaným Al.

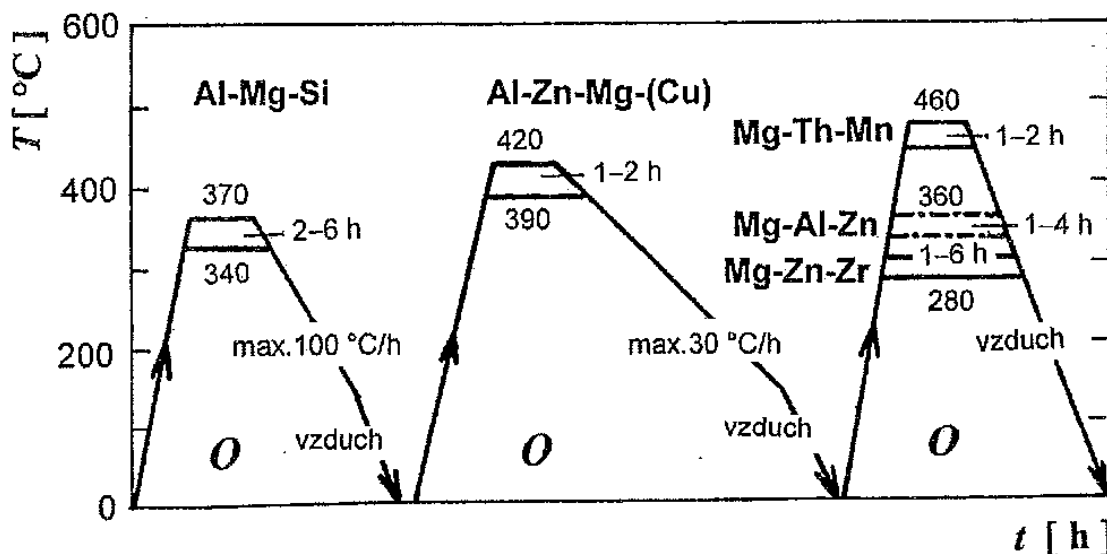
Spékané disperzně zpevněné materiály na bázi Al se používají především v automobilové dopravě a v letectví. Vykazují vysokou odolnost rekrystalizačním procesům, radiační stabilitu a dobrou žárupevnost (např. $\text{AlFe}_6\text{Cr}_2\text{Si}_1$ do 350 °C a $\text{AlFe}_8\text{V}_1\text{Si}_2$ do 420 °C). Slouží také k výrobě např. permanentních (tvrdých) magnetů ze slitiny AlNiCo (8 % Al, 15 % Ni, 23 % Co, 4 % Cu, 1 % Ti), která je těžko obrobitelná a špatně slévatelná.¹³

1.3 Tepelné zpracování hliníkových slitin

Hlavními operacemi tepelného zpracování součástí ze slitin hliníku jsou především žíhání a vytvrzování. Jako nejčastější druh se používá žíhání rekrytalizační.

Žíhání na snížení zbytkových napětí se používá u tvarově složitějších součástí tvářených za tepla, odlitků (litých zejména do kovových forem), svařenců a obrobků. Ke snížení pnutí dochází již od teploty přibližně 200 °C, ovšem neúčinnější je toto žíhání v rozmezí teplot 300÷350 °C ovšem vždy probíhá při teplotách nižších než je teplota rekrytalizace daného materiálu, po dobu 1÷8 h s ochlazením na vzduchu. Při teplotě nad 300 °C může již dojít k poklesu pevnosti.

Žíhání rekrytalizační (obr. 1.3.1) se zpravidla zařazuje jako mezioperační po tváření za studena, popř. může být i konečnou operací (pokud je spolu s vysokou tvárností dosaženo i dostačující pevnosti). Po tomto druhu žíhání v rozmezí teplot 300÷400 °C, která je závislá na čistotě a stupni tváření materiálu, dochází v materiálu k obnově tvárných vlastností. Slitiny Al-Mg-Si se změkčují žíháním při teplotě 340÷370 °C s pomalým ochlazením (max. 100 °C·hod⁻¹).



Obr. 1.3.1 Rekrytalizační žíhání vybraných slitin.²¹

Homogenizační (rozpuštěcí) žíhání se používá pro vyrovnání chemické nesejnorodosti (homogenizace fázové nebo chemické heterogenity slitiny) zejména před tvářením k odstranění dendritického odmíšení v odlitku. Může být i první etapou vytvrzování. Teplota žíhání je vyšší než teplota solvu (křivka mezní rozpustnosti přísady) tuhého roztoku α a proces probíhá 0,5÷1 h (pro jemnozrnné tvářené výrobky) a až 16 h (pro hrubozrnné odlitky).

Při pomalém ochlazování má výrobek minimální zbytková napětí ale hrubé zrno. Po rychlém ochlazení má výrobek velká zbytková napětí, ale zachovává homogenní tuhý roztok (např. zvýšení odolnosti proti korozi).

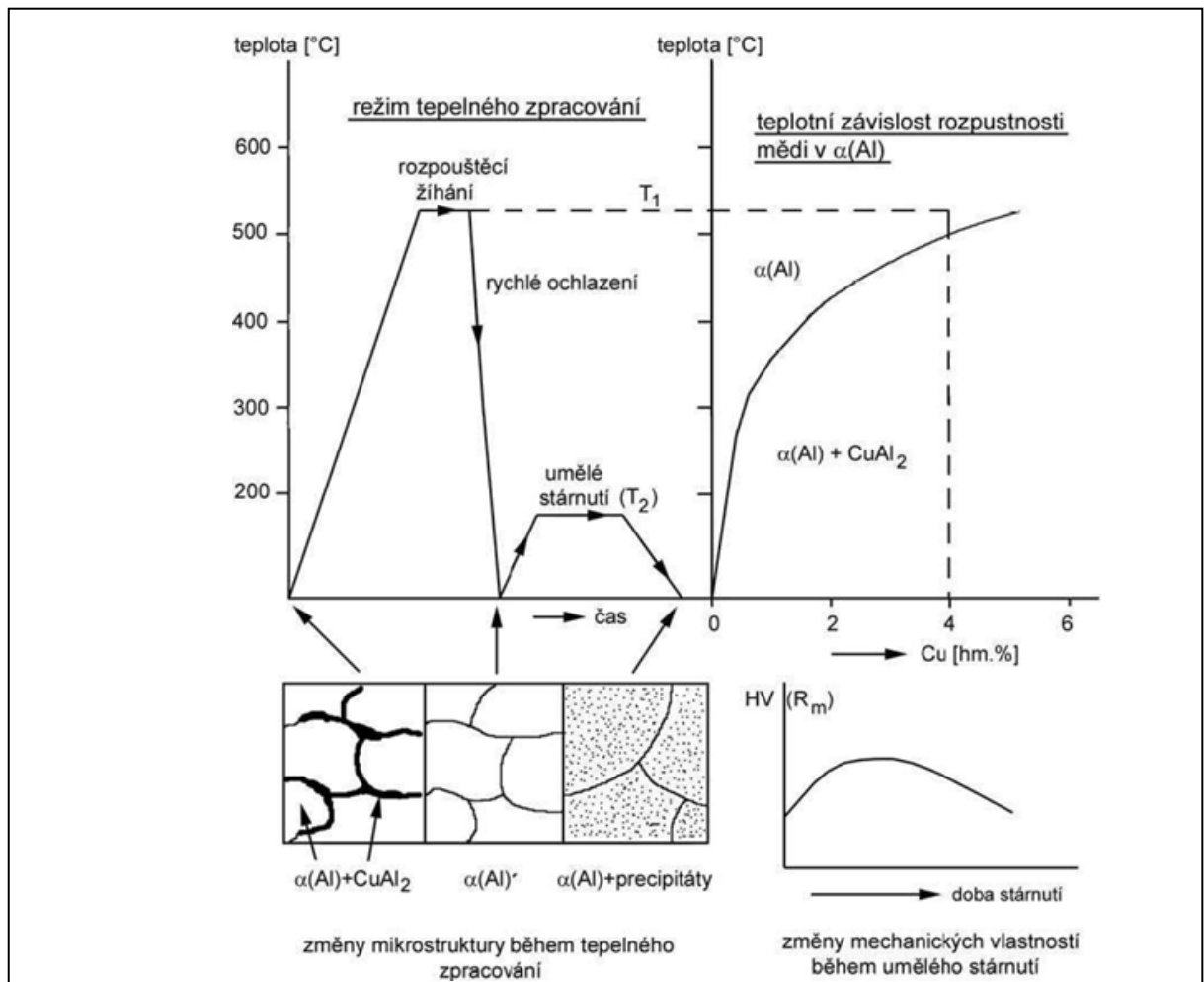
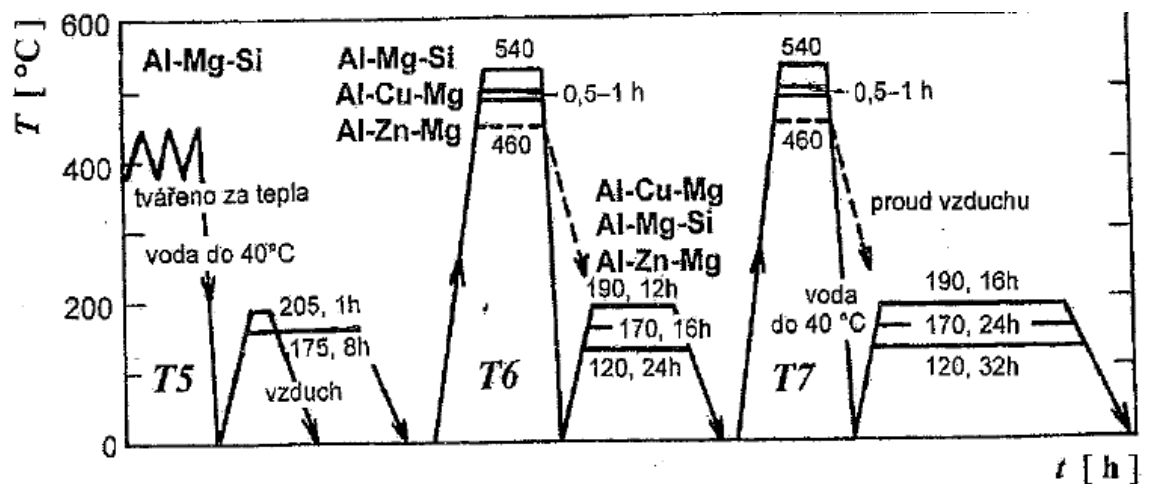
Žihání již vytvrzených slitin se používá k jejich odpevnění, pokud je tento materiál určen pro další operaci např. tváření při teplotě 350°C.

Vytvrzování slouží k získání vysokých pevnostních vlastností hliníkových slitin. Základní, ne však dostačující, předpoklady aby byla slitina vytvrditelná, jsou:

- slitina musí obsahovat dostačující množství legujícího prvku,
- legující prvek musí mít dobrou rozpustnost v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$,
- rozpustnost legujícího prvku v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$ musí s rostoucí teplotou vzrůstat.

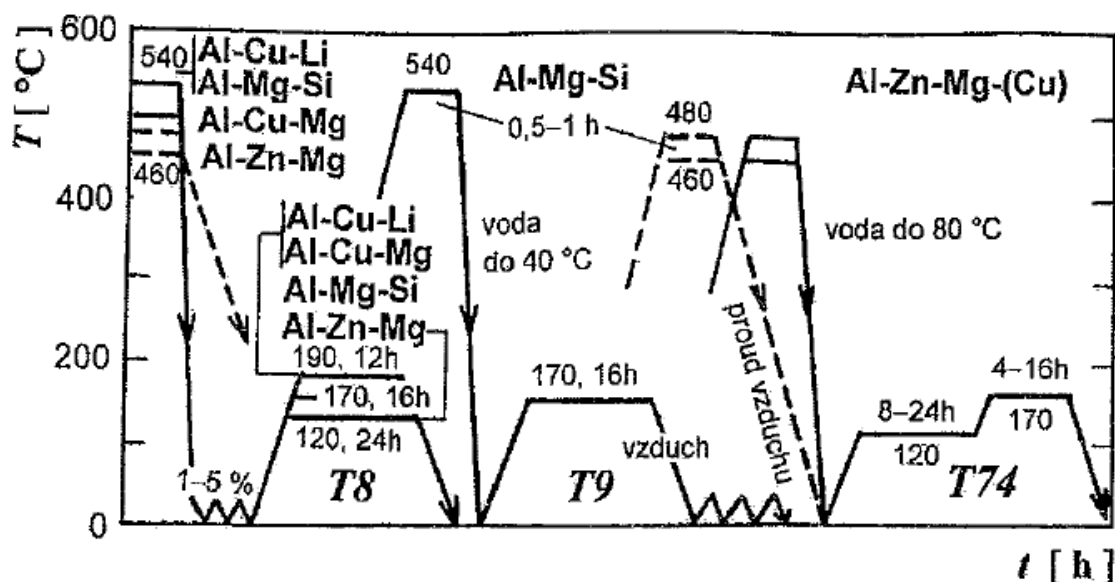
Vytvrzování sestává z rozpouštěcího ohřevu (žihání), následného rychlého ochlazení s vytvořením metastabilního přesyceného tuhého roztoku α a z jeho následného umělého stárnutí - rozpadu (viz. obr. 1.3.2).

- **Rozpouštěcí žihání** se musí provádět v oblasti homogenního tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$. Nejčastěji se používá rekrytalizačního žihání. Při tomto žihání dojde k maximálnímu rozpuštění fáze přísady do tuhého roztoku hliníku $\alpha(\text{Al})$. Při volbě teploty rozpouštěcího žihání se vychází z fázového diagramu slitiny a z přesnosti regulace v peci. U hliníkových slitin leží teploty rozpouštěcího žihání v rozmezí 470÷530 °C. Během homogenizačního ohřevu nesmí dojít k překročení teploty solidu, aby nedošlo k natavení hranic zrn slitiny (dochází k degradaci mechanických vlastností).
- Cílem následného **rychlého ochlazení** (nejčastěji do vody) je znovu vyloučení fáze přísady, tedy vznik přesyceného tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})'$, u něhož je obsah příměsí prvku vyšší v porovnání s rovnovážnou rozpustností při dané teplotě. U objemnějších součástí, kde hrozí nebezpečí deformace, se používá méně razantnějšího ochlazovacího média.
- Jako poslední operací je **umělé stárnutí**, což je ohřev na teplotu 140÷200 °C s následnou výdrží. Tímto procesem dochází k rozpadu nestabilního přesyceného tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})'$ tzv. precipitací, kdy se v tuhém roztoku vylučují velice jemné (desítky až stovky nm) částice intermediálních fází - tzv. precipitáty. Tyto jemné precipitáty představují překážku pro skluz dislokací, čímž dochází ke zpevnění slitiny (nárůst meze pevnosti R_m a tvrdosti). U některých slitin dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku už při teplotě okolí. Tento děj je označován jako přirozené stárnutí.

Obr. 1.3.2 Schéma precipitační vytvrzování slitiny AlCu4.²⁰Obr. 1.3.3 Termogram pro zpracování T5 až T7 vybraných slitin hliníku.²¹

Na obr. 1.3.3 a 1.3.4 jsou uvedeny termogramy pro zpracování T5, T6, T7, T8, T9 a T74 (označení stavů dle ČSN EN 515) vybraných slitin hliníku. Rychlé ochlazení po tváření za tepla umožňuje umělé stárnutí při 205 °C nebo při 175 °C (stav T5), podle toho, zda je požadována větší houževnatost

nebo maximální zpevnění. Vytvrzování za tepla probíhá u těchto slitin po rozpouštěcím žhání při teplotě $495\div 540\text{ }^{\circ}\text{C}$ a po dobu $20\text{ min}\div 1\text{ h}$ s následným ochlazením do teplé vody a umělým stárnutím při teplotě $150\div 175\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu $6\div 16\text{ h}$ na vzduchu.



Obr. 1.3.4 Termogram pro zpracování T8, T9 a T74 vybraných slitin hliníku.²¹

Pro získání jemnější mikrostruktury, která má přímý vliv na mechanické vlastnosti, se u hliníkových slitin využívá metod očkování a modifikace. Jedná se o zásahy do slitiny před jejím odlitím.

Při **očkování** se primární krystaly zjemňují záměrným vnášením zárodků krystalů primárního tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$ do taveniny (platí pro všechny tvářené slitiny a podeutektické siluminy). Pro tyto materiály se používá zejména Ti a B (např. ve formě slitiny AlTi5B1). U nadeutektických siluminů lze zjemňovat i primární krystaly křemíku, k čemuž se využívá fosfor.

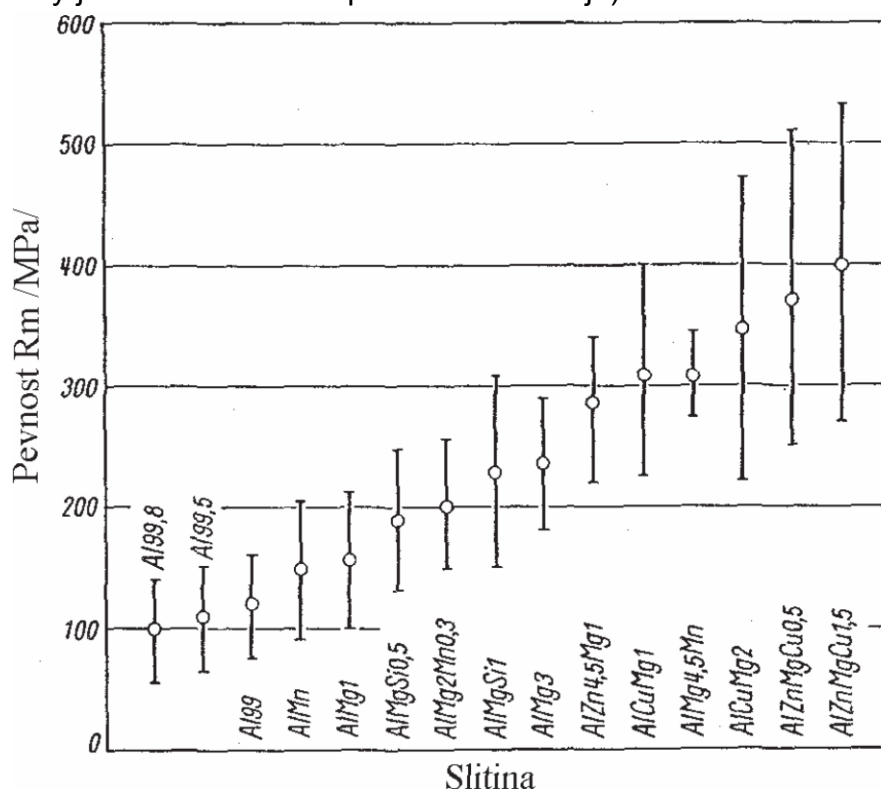
Modifikace je primárně využívána pro slitiny Al-Si, které mají nízkou plasticitu. Bez modifikování by proto jejich další možné zpracování nebylo prakticky možné. Mechanismus modifikace je analogický jako při přeměně lupínkového na kuličkový grafit u litin. Dochází ke zjemnění eutektického křemíku, který výrazně ovlivňuje pevnostní charakteristiky. U eutektické slitiny dojde po modifikaci ke zvýšení meze pevnosti z přibližně 140 MPa na 180 MPa za současného zvýšení tažnosti z cca 3 % na 15 %. K modifikaci slitin Al-Si se využívá nejčastěji sodíku (řádově v tisících hm. %), který se přidává do taveniny slitiny ve formě soli nebo kovu. Druhým často používaným prvkem je stroncium (řádově v setinách hm. %), které se do taveniny slitiny přidává např. ve formě slitiny Al-Sr. Příklad nemodifikované a modifikované struktury siluminu je uveden na obr. 1.2.4.

1.4 Slitiny typu Al-Mg-Si

1.4.1 Obecné informace

Jak již bylo řečeno, slitiny typu Al-Mg-Si patří mezi tvářené vytvrditelné slitiny hliníku s nejnižšími mechanickými vlastnostmi (R_m = do 350 MPa) ale především s velmi dobrou korozní odolností. Mezi další charakteristické znaky patří výborná schopnost ke tváření, svařitelnost a mechanická obrobiteľnosť.

Tyto slitiny se vytvrzují precipitačním vytvrzováním při tepelném zpracování (viz. kap. 1.3). Srovnání tvářených slitin z hlediska meze pevnosti R_m v základním stavu je uvedeno na obr. 1.4.1. Slitiny Al-Mg-Si našly hlavní využití v komponentech pro automobilovou i leteckou dopravu, částech mostních konstrukcí, architektuře a sportovním vybavením (např. rámy jízdních kol a části posilovacích strojů).

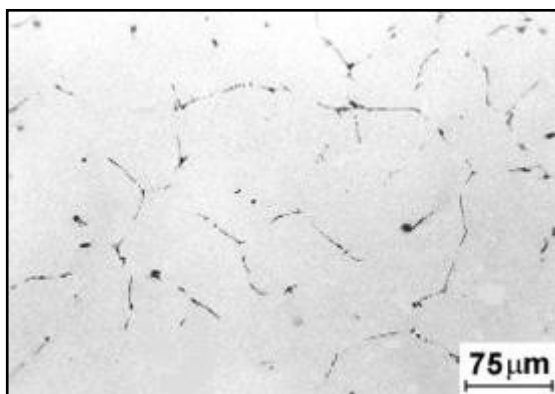


Obr. 1.4.1 Porovnání hliníkových slitin z hlediska pevnosti v tahu R_m .¹⁵

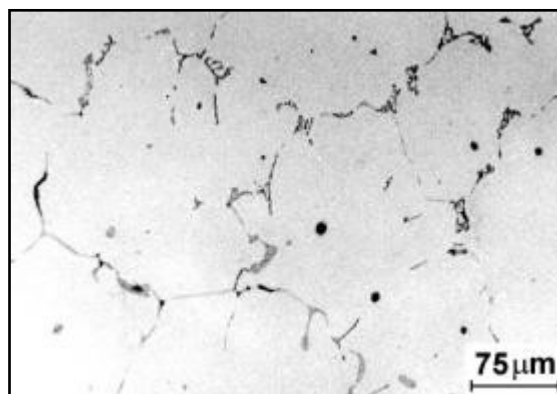
Slitiny hliníku jsou pro dosažení požadovaných optimálních vlastností, jako je např. zvýšená pevnost v tahu či zlepšená obrobiteľnosť, legovány různými chemickými prvky a příměsemi. V tab. 1.4.1 jsou uvedeny nejpoužívanější legující prvky a jejich základní vliv na vlastnosti hliníku a jeho slitin. Z hlediska pevnostních vlastností je důležité množství intermetalické fáze Mg_2Si ve struktuře slitiny (obr. 1.4.2a až d), díky které jsou následně tepelně zpracovatelné a některé i samozakalitelné.

Tab. 1.4.1 Vliv legujících prvků na vlastnosti Al a jeho slitin.⁶

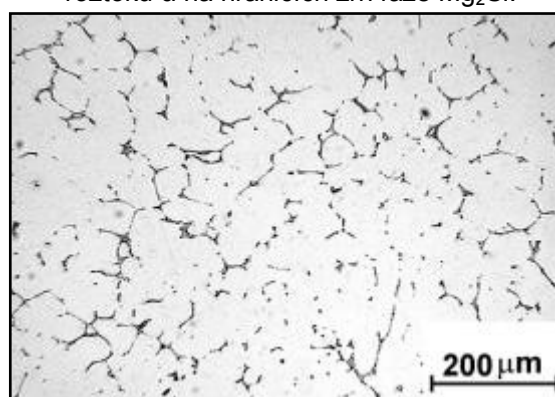
Prvek	Vliv na technicky čistý hliník a jeho slitiny
B	-zjemňuje strukturu
	-zvyšuje elektrickou vodivost u technicky čistého Al
	-zvyšuje schopnost Al zachytávat neutrony
Bi	-zlepšení obrobiteľnosti
Sb	-zvyšuje odolnost proti korozi v mořské vodě
	-snižuje náchylnost Al-Mg slitin ke vzniku trhlin za tepla
Cr	-u vytvrditelných slitin zvyšuje kalitelnost
	-snížení náchylnosti k růstu zrn u Al-Mg slitin
	-zpomalení procesu rekystalizace u Al-Mg-Si a Al-Mg-Zn slitin
Cu	-zvýšení pevnostních vlastností následným vytvrzováním
	-snižuje odolnost proti korozi
Co	-u slitin Al-Si s obsahem Fe transformuje jehlicová zrna na kulové (zvýšení pevnostních i plastických vlastností)
Fe	-přirozenou nečistotou v hliníku a jeho slitinách
	-tvoří intermetalické fáze (Al_3Fe , Al_7Cu_2Fe), které snižují plastické a únavové vlastnosti
Pb	-zlepšení mechanické obrobiteľnosti
	-u slitin Al-Cu-Mg může být příčinou vzniku trhlin za tepla (segregace)
Li	-tvoří koherentní precipitáty Al_3Li , které zvyšují pevnostní a plastické vlastnosti
	-nízká měrná hmotnost ještě více zlehčuje slitiny Al
Mg	-zvýšení pevnostních vlastností a teploty rekystalizace
	-zjemňuje zrno a blokuje růst zrn v případě jejich vyloučení jako precipitátů
Ni	-zvýšení pevnostních vlastností za vyšších teplot, zlepšení korozní odolnosti
	-snížení koeficientu teplotní roztažnosti
	-vysoká absorpce neutronů - nežádoucí ve slitinách pro energetiku
Si	-tvorba fází Mg_2Si , které zvyšují schopnost vytvrzení
Sn	-hlavním legujícím prvkem pro ložiskové slitiny Al-Sn
	-u slitin Al-Cu v malém množství (0,05%) zvyšuje rychlost stárnutí za vyšších teplot a pevnostní vlastnosti
	-u slitin Al-Cu s vyšší koncentrací než 0,05% způsobuje vznik trhlin za tepla a zhoršuje odolnost proti korozi
Ti	-přidává se spolu s B za účelem zjemnění struktury (tvorba jemných intermetalických částic B_2Ti již v průběhu krystalizace)
Zn	-hlavním legujícím prvkem tepelně zpracovatelných slitin (série 7xxx)
Zr	-vytváří jemné precipitáty, které blokují proces zotavení a rekystalizace
	-u slitin Al-Zn-Mg je přidávám s cílem získání jemné struktury u odlitků



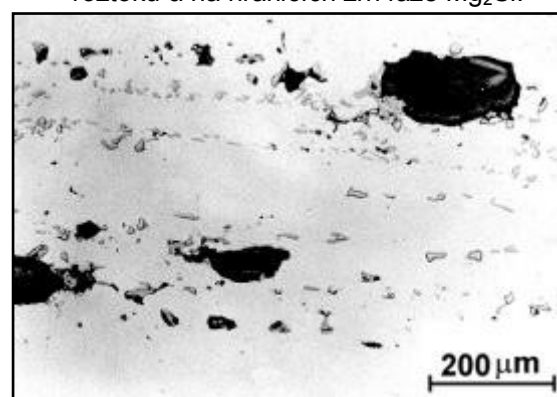
a) Struktura slitiny Al(MgSi)0,5; zrna tuhého roztoku α na hranicích zrn fáze Mg_2Si .



b) Struktura slitiny Al(MgSi)1; zrna tuhého roztoku α na hranicích zrn fáze Mg_2Si .



c) Struktura slitiny AlMg3,3Si0,28; částice Mg_2Si vyloučené v mezidendritických prostorech.



d) Struktura slitiny Al-Mg-Si-Pb; fáze Pb(BiMg) vyloučené na hranicích zrn tuhého roztoku α .

Obr. 1.4.2 Mikrostruktura vybraných druhů slitin v závislosti na chem. složení .¹⁹

Vlastnosti hliníku a jeho slitin (fyzikální, chemické, mechanické aj.) jsou ovlivňovány čistotou vstupních prvků, použitou technologií tavení, odlévání i tváření. Pro metalurgické pochody je důležité znát teplotu tání a skupenské teplo tání (molární entalpie tání hliníku). S postupem času a s rostoucími technickými možnostmi měření teploty tání a dosažení maximální možné čistoty hliníku, byly určeny teploty tání pro různé čistoty hliníku (tab. 1.4.2).

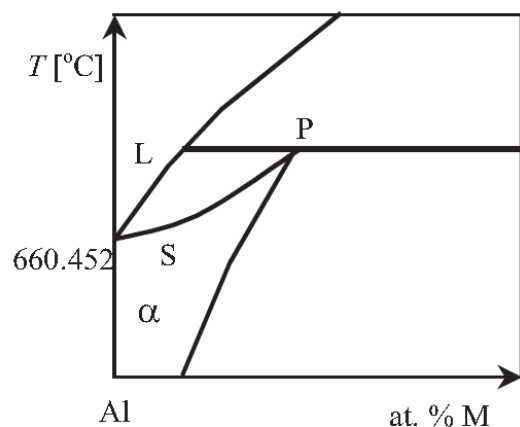
Tab. 1.4.2 Teplota tání hliníku.⁶

Čistota hliníku [%]	Teplota tání [°C]
99,2000	657,000
99,5000	658,000
99,6000	658,700
99,9700	659,800
99,9960	660,240
99,9995	660,452

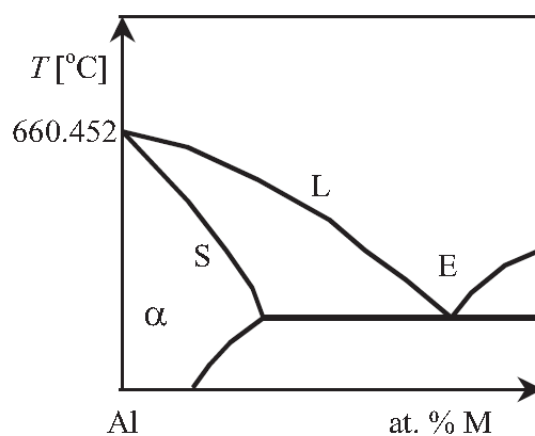
1.4.2 Binární diagram a základní metalurgické pochody

Pro pochopení základních metalurgických procesů u jednotlivých slitin se vychází z binárních diagramů (Al-Mg, Al-Cu, Al-Mn, Al-Si aj.), které charakterizují stabilitu jednotlivých fází především z hlediska fyzikálních veličin (teploty, tlak a chemické složení). V těchto diagramech tvoří hliník s přísadou vždy substituční tuhý roztok α , který má lepší mechanické vlastnosti než čistý hliník (při dobré tvařitelnosti a houževnatosti). Maximální rozpustnost příměsí v tuhém roztoku hliníku je při eutektické teplotě. S klesající teplotou jejich rozpustnost klesá (při pokojové teplotě bývá zanedbatelná).

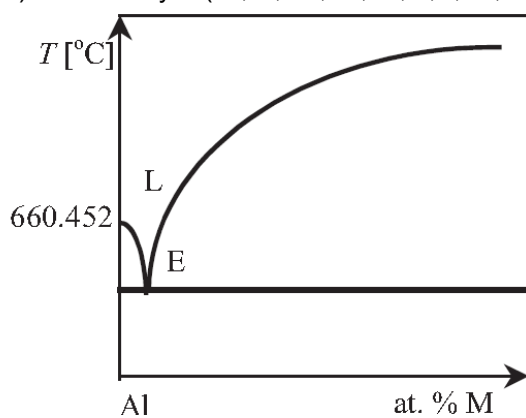
Binární rovnovážné diagramy jsou při minimálním obsahu přísadu typu eutektického nebo peritektického typu. Při vyšších koncentracích přísady dochází k tvorbě intermetalických fází (přísady Cu, Mg, Mn) nebo se jedná o diagram s částečnou vzájemnou rozpustností obou prvků v tuhém stavu (např. Al-Si). Diagramy jsou děleny do čtyř základních typů podle charakteru průběhu křivek solidu a likvidu a podle rozpustnosti přísady v tuhém roztoku Al (viz. obr. 1.4.3 a tab. 1.4.3).



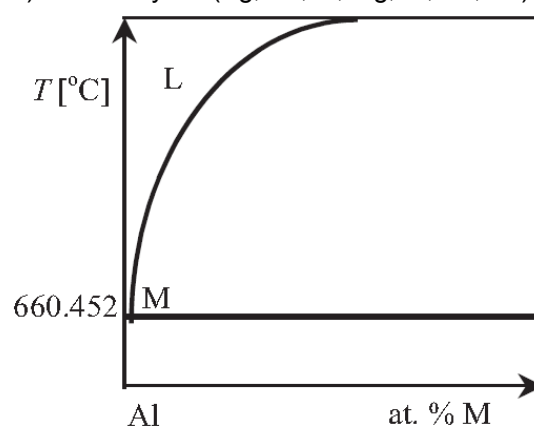
a) Peritektický P (Cr, Hf, Mo, Nb, Ta, Ti, V, W, Zr)



b) Eutektický E1 (Ag, Au, Li, Mg, Si, Sn, Zn)



c) Eutektický E2 (B, Co, H, Mn, Ni, Pb, Sb, Sc)



d) Monotektický M (K, N, Na, P, S, He, Ne, Ar)

Obr. 1.4.3 Základní typy binárních diagramů pro Al-příměs.⁶

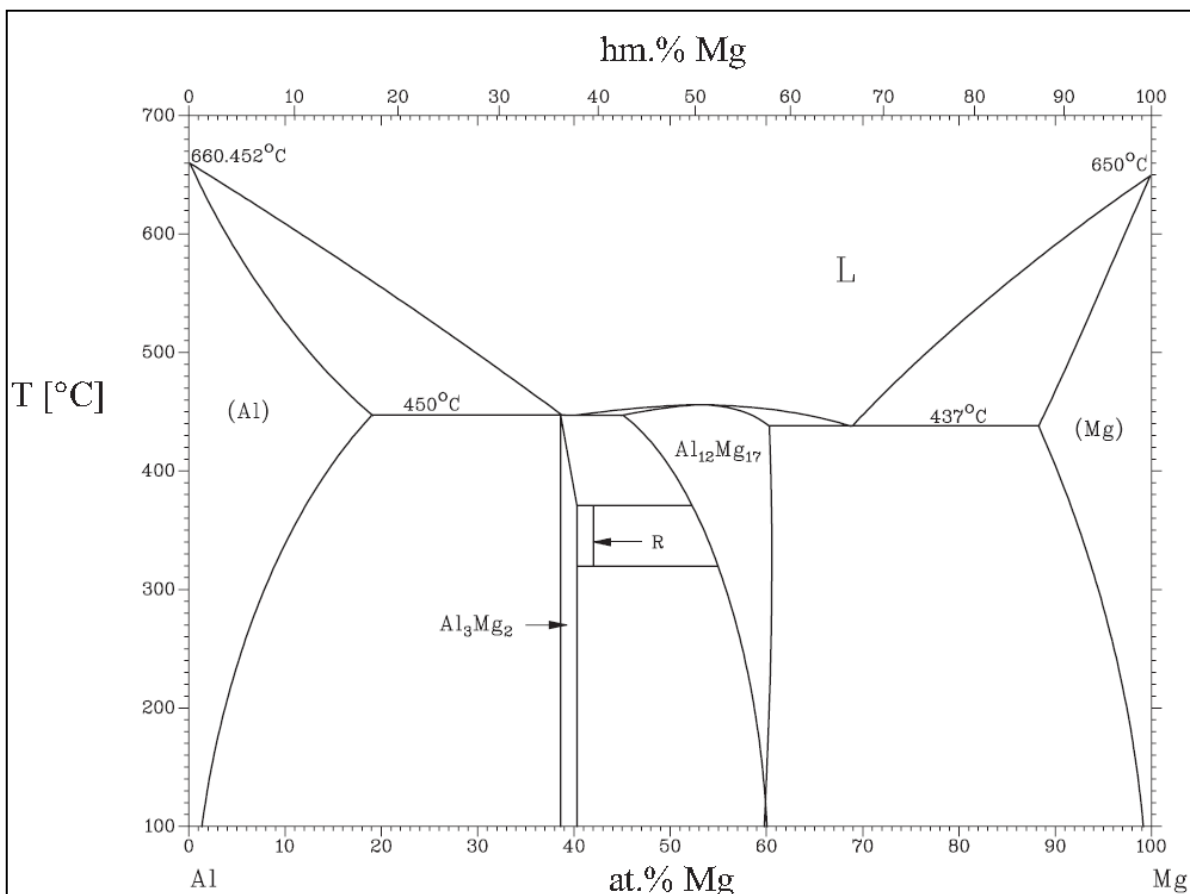
Tab. 1.4.3 Základní typy binárních diagramů pro hliník.⁶

Typ diagramu	Název	Vlastnost
P	peritektický	příměs zvyšuje teplotu tání Al
E1	eutektický	příměs snižuje teplotu tání Al a v α je dobře rozpustná
E2	eutektický	s omezenou rozpustností příměsi v tuhém roztoku α hliníku
M	monotektický	reakce probíhá při složení blízkém čistému Al (rozpustnost příměsiv likvidu je omezená a s poklesem teploty se výrazně zmenšuje na hodnoty pod 0,1 at.% příměsového prvku v blízkosti teploty tání Al)

Binární slitiny Al-Mg tvoří základ skupiny tepelně nezpevňovaných slitin. Hořík se v tuhém roztoku α rozpouští od cca 17,4 hm. % při teplotě 450 °C až do koncentrace 1,9 hm. % Mg při 200 °C, což u všech technických slitin vyvolává segregaci fáze β (Al_3Mg_2). V binárních slitinách se však neprojevuje efekt disperzního zpevnění při koncentracích méně než 7 hm. % Mg. Obsah Mg ve slitinách pro tváření však nebývá větší než právě 7 hm. %, protože slitiny s vyšším obsahem mají horší odolnost proti korozi (kterou vyvolává sloučenina Al_3Mg_2 vylučující se na hranicích zrn) a tvárnost. S obsahem Mg postupně stoupá i pevnost, naopak tažnost zpočátku klesá a teprve od 3 hm. % Mg se mírně zvyšuje.

Na obr. 1.4.4 je zobrazen rovnovážný fázový diagram systému Al-Mg. Rovnovážné tuhé fáze v systému Al-Mg jsou:

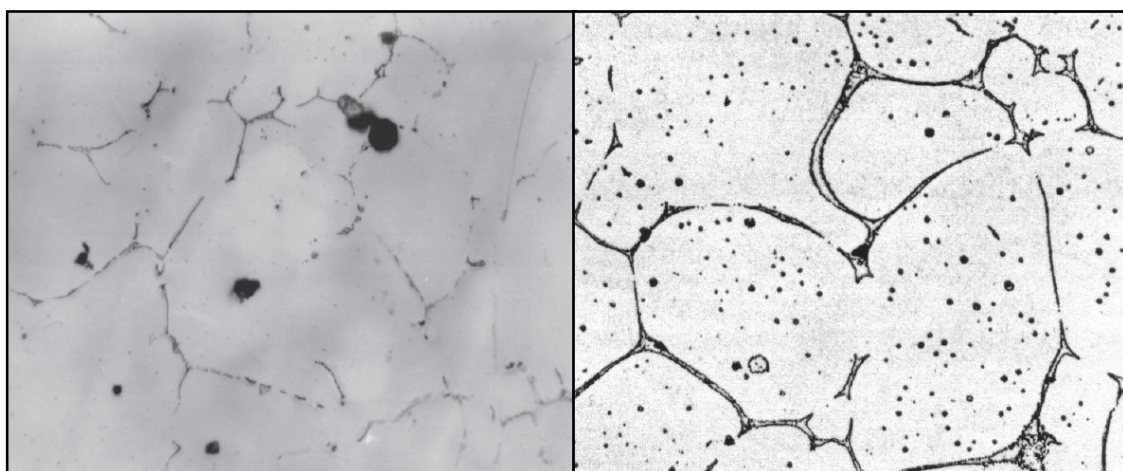
- (Al) KPC tuhý roztok s maximální rozpustností 11,8 at. % Al v Mg při eutektické teplotě 437 °C,
- sloučenina β s přibližným složením Al_3Mg_2 se složitou KPC strukturou (za nízkých teplot dochází k martenzitické transformaci β na jinou strukturu),
- sloučenina R (často označovaná jako ϵ) o složení 42 at. % Mg,
- sloučenina γ s přibližným složením odpovídajícím $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ při 58,6 at. % Mg.

Obr. 1.4.4 Fázový diagram systému Al-Mg.⁶Tab. 1.4.4 Význačné body a reakce v systému Al-Mg.⁶

Reakce	Složení [at.% Mg]	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Typ reakce
$L \rightarrow (\text{Al}) + \beta$	38,0 / 18,6 / 38,5	450	Eutektická
$L \rightarrow \gamma + (\text{Mg})$	69,0 / 62,3 / 88,5	437	Eutektická
$L \rightarrow \beta + \gamma$	41,2 / 40,3 / 45,0	450	Eutektická
$\beta + \gamma \rightarrow R$	40,3 / 52,0 / 42,0	370	Peritektoidní
$R \rightarrow \beta + \gamma$	42,0 / 40,3 / 55,0	320	Eutektoidní
$L \rightarrow \gamma$	42,8 ÷ 43,4	455	Kongruentní
$L \rightarrow \beta$	38,5	451	Kongruentní

Poznámka: fáze β odpovídá stechiometrii sloučeniny Al_3Mg_2 ,
fáze γ odpovídá stechiometrii sloučeniny $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$.

Rovnovážnou krystalizaci lze pozorovat pouze při rychlostech ochlazování nižších než $5 \cdot 10^{-6} \text{ K} \cdot \text{h}^{-1}$. Při nerovnovážné krystalizaci dochází k dendritické likvacii s tvorbou fáze Al_3Mg_2 i při malých obsazích hořčíku (okolo 4÷5 hm. %). Tato fáze je při teplotách pod $350 \text{ }^\circ\text{C}$ velmi křehká, při vyšších teplotách se stává plastickou. Na obr. 1.4.5 a) je mikrostruktura slitiny AlMg_2 v litém stavu, kde je vyloučená fáze Al_3Mg_2 na hranicích dendritů a v podobě tmavých skvrn. Na obr. 1.4.5 b) je mikrostruktura slitiny AlMg_{10} po odlití a následném tepelném zpracování (režim T4), kde se fáze Al_3Mg_2 (šedá) nachází ve formě síťoví na hranicích zrn.

a) Struktura slitiny AlMg_2 litý stav.b) Struktura slitiny AlMg_{10} litý stav, po TZ.Obr. 1.4.5 Mikrostruktura vybraných druhů slitin Al-Mg .⁶

1.4.3 Ternární diagram Al-Mg-Si

Diagram Al-Mg-Si patří mezi jednodušší typy ternárních diagramů, protože v tomto systému nebyl zjištěn výskyt ternárních fází. Stabilní vyskytující se fáze jsou uvedeny v tab. 1.4.5, kde křemík je přítomen v elementární formě.

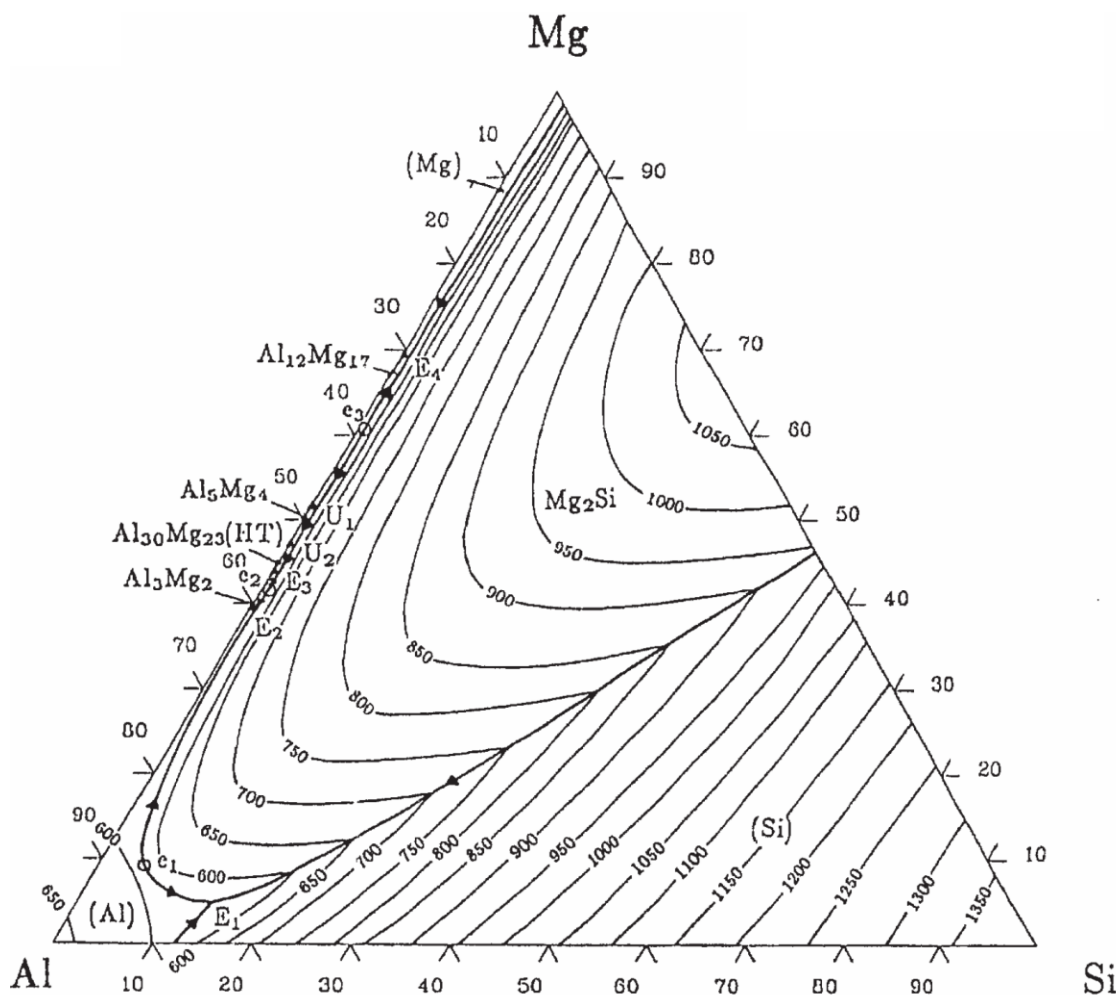
Tab. 1.4.5 Tuhé fáze vyskytující se v systému Al-Mg-Si .⁶

Označení v diagramu	β	ϵ	ζ	-	-
Fáze	Al_3Mg_2	$\text{Al}_{30}\text{Mg}_{23}$	$\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$	Al_5Mg_4	Mg_2Si
T výskytu [$^\circ\text{C}$]	< 450	450÷370	< 460	-	< 1085

Na obr. 1.4.6 je uveden ternární diagram Al-Mg-Si (projekce povrchu likvidu), ve kterém je teplota E_1 uváděna v rozmezí $550 \div 560 \text{ }^\circ\text{C}$, teplota E_4 v rozmezí $434 \div 437 \text{ }^\circ\text{C}$, což jsou body téměř identické s binárním eutektickým bodem $L = (\text{Mg}) + \text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$. Atomy Mg a Si v tuhém roztoku (Al) mají snahu tvořit precipitáty fáze Mg_2Si . V tab. 1.4.6 jsou uvedeny reakce probíhající v rovnovážném systému Al-Mg-Si .

Tab. 1.4.6 Tuhé fáze vyskytující se v systému Al-Mg-Si.⁶

Označení v diagramu	Typ	T [°C]	Složení L [at. %]		
			Al	Mg	Si
L = (Al)+Mg ₂ Si	e ₁	593	-	-	-
L = Al ₃ Mg ₂ +Mg ₂ Si	e ₂	-	-	-	-
L = Al ₁₂ Mg ₁₇ +Mg ₂ Si	e ₃	-	-	-	-
L = (Al)+Mg ₂ Si+(Si)	E ₁	550	81,1	4,8	14,1
L = (Al)+Al ₃ Mg ₂ +Mg ₂ Si	E ₂	444	65,3	34,5	0,2
L = Al ₃ Mg ₂ + Al ₃₀ Mg ₂₃ +Mg ₂ Si	E ₃	445	63,1	36,7	0,2
L = Al ₁₂ Mg ₁₇ +(Mg)+Mg ₂ Si	E ₄	434	32,3	67,5	0,2
L+Al ₁₂ Mg ₁₇ = Al ₅ Mg ₄ +Mg ₂ Si	U ₁	452	56,0	43,8	0,2
L+Al ₅ Mg ₄ = Al ₃₀ Mg ₂₃ +Mg ₂ Si	U ₂	448	59,0	40,8	0,2

Obr. 1.4.6 Ternární diagram Al-Mg-Si - povrch likvidu (koncentrace v at. %).⁶

2 ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ V POVRCHOVÝCH VRSTVÁCH

2.1 Integrita povrchu

Výsledné vlastnosti výrobků jsou do jisté míry ovlivňovány vlastnostmi povrchových a podpovrchových vrstev. Tyto vzájemné vazby se nazývají integritou povrchu. Integrita povrchu je odrazem podmínek, za kterých funkční plocha vzniká a vyjadřuje tedy vztah mezi geometrickými, mechanickými a fyzikálními vlastnostmi povrchu jako jsou např. zbytková napětí, tvrdost, mikrostruktura materiálu, odolnost proti únavovým poškozením.

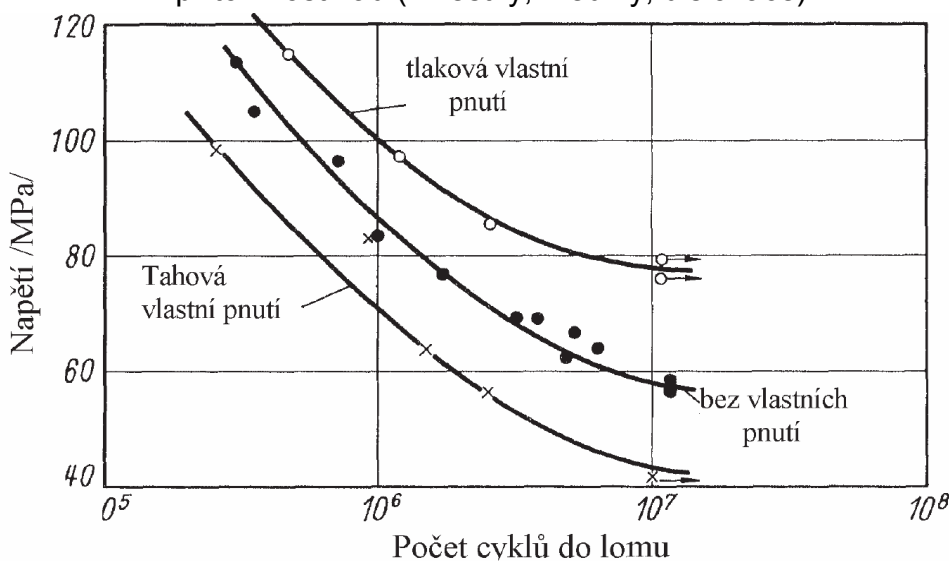
Povrch součástí je od procesu výroby, montáže až po funkční proces vystaven působení mnoha vlivů, které mohou způsobit jeho poškození (obr. 2.1.1). Složky integrity povrchu, které stav povrchu popisují, jsou³⁷:

Vnější vlivy:

- mechanické (provozní napětí),
- chemické (koroze),
- fyzikální (záření, bludné proudy aj.),
- kombinace více vlivů (koroze pod napětím, elektrochemická koroze, tepelné zpracování, tváření).

Vnitřní vlivy:

- zbytková napětí,
- jakost povrchu,
- materiálové a mechanické vlastnosti povrchu (tvrdost, zpevnění, povrchová úprava),
- přítomnost vad (vměstky, zřediny, dislokace).



Obr. 2.1.1 Vliv vnitřních napětí na únavové vlastnosti slitiny AW 6061-T6.⁶

Zbytková napětí tvoří jeden z důležitých faktorů při hodnocení integrity povrchu, protože mohou způsobit mikrotrhliny až trhliny celé součásti.

2.2 Vznik zbytkových napětí

Každá technologická (výrobní) operace ovlivňuje velikost zbytkových napětí jen v takovém objemu materiálu, v jakém je schopna vyvolat plastickou deformaci, tepelně jej ovlivnit nebo působit kombinací těchto vlivů. Hlavními příčinami vzniku zbytkových napětí jsou:

- **nerovnoměrná plastická deformace** vyvolaná tzv. silovým účinkem (tedy působením mechanických sil a momentů),
- **nerovnoměrný lokální ohřev či lokální ochlazování** (tzv. tepelná pnutí), které způsobují roztažení či smrštění součástí,
- **nerovnoměrné změny struktury** (tzv. strukturální pnutí), vznikající při změně hustoty (měrných objemů), vyvolané působením teploty a různých druhů napětí při procesu řezání, tváření a tepelném zpracování (např. fázové přeměny, precipitace nových strukturních složek, změna velikosti a orientace zrn, vnitřní vady aj.),
- **chemické procesy**, zejména absorpce, difuze a s nimi spojené chemické reakce, které vznikají při pronikání částic (z prostředí, chladicích a mazacích prostředků, materiálu nástroje atd.).

Při procesu obrábění je podstatou vzniku zbytkových napětí pružně-plastická deformace. Jednotlivé způsoby obrábění a použité pracovní podmínky lze zjednodušeně hodnotit podle vlivu na rozložení napěťových a teplotních polí v obrobku. Důležitým faktorem je doba působení, rychlost procesu, geometrie nástroje, velikost tření a vlastnosti obráběného materiálu.

Vznik zbytkových napětí při obrábění kovových materiálů se pro normální podmínky řídí zákony plasticity a je možno ho charakterizovat vybranými procesy:

1) Při oddělování třísky dochází v oblasti zóny řezání k intenzivní pružně-plastické deformaci, zasahující i pod obrobený povrch. Vlivem nedokonalostí bříty nástroje se část požadované třísky neodřízne a tím dochází k pěchování povrchu. Při plastické deformaci kovu klesá jeho hustota a roste měrný objem. Změna hustoty je nepřímo úměrná velikosti plastické deformace, při zvětšení měrného objemu vzniká v povrchové vrstvě tlakové napětí.

2) Při vytvoření jednotlivých elementů třísky (u materiálů s drobnou třískou) se narušuje spojení mezi třískou a obráběným materiálem, proto se účinek napěťového pole do obrobeného povrchu prakticky nepřenáší. Třecí síly na hřbetě se snaží prodloužit zrna v povrchové vrstvě a zvětšit tak povrch, čemuž ale brání níže položené neovlivněné vrstvy materiálu. V povrchové vrstvě tedy vzniká zbytkové napětí tlakové.

3) Při obrábění houževnatých materiálů vzniká plynulá tříska a spojení mezi ní a obráběným materiálem se nenarušuje. Důsledkem toho dochází k deformaci zrn základního materiálu. Zrna u obrobeného povrchu se deformují přibližně ve směru odchodu třísky. Může dojít i k jejich přeorientování, např. protažení ve směru kolmém na obrobený povrch a stlačení ve směru rovnoběžném s povrchem. Povrchová vrstva se snaží zaujmout menší povrch, a protože spodní vrstvy zůstávají beze změny, vzniká zbytkové napětí tahové.

4) Při vyvolání vyšších teplot v povrchové vrstvě vznikne napětí tahové. Teplotní deformací přesahující mez kluzu dojde k plastickému zkrácení povrchové vrstvy, čemuž brání spodní nedeformované (neohřáté) vrstvy.^{35, 36}

2.3 Druhy zbytkových napětí

Obecně známé je tlakové a tahové napětí, které nabývá různého rozsahu svého působení v materiálu. Z hlediska velikosti a rozsahu zbytkových napětí jsou rozeznávány tři základní skupiny³⁶:

- **zbytková napětí I. druhu** (makroskopická) - zahrnují oblast většího počtu zrn (celou součást nebo její převážnou část); vnitřní síly a momenty spojené se zbytkovým napětím jsou v celé oblasti v rovnováze a jakýkoliv zásah do této rovnováhy (porušení kompaktnosti) má za následek makroskopické změny rozměrů;
- **zbytková napětí II. druhu** - jsou pozorovatelná v oblasti několika, jednoho nebo jen části zrna; vnitřní síly a momenty jsou v dostatečně velké oblasti v rovnováze a její porušení vede ke vzniku mikroskopické deformace;
- **zbytková napětí III. druhu** - jsou pozorovatelná v mikroskopické oblasti zahrnující několik atomových vzdáleností; vnitřní síly a momenty ve sledované oblasti představující část zrna jsou v rovnováze a jejím porušením dochází k ultramikroskopickým změnám rozměru.

V reálných součástech se vždy vyskytují současně všechny tři druhy zbytkových napětí. Z hlediska studia a poznání vlastností vrstev ovlivněných zbytkovými napětími po obrábění, jsou nejvíce významná napětí I. druhu. Jejich znalost je důležitá pro optimalizaci výrobního obráběcího procesu v závislosti na funkčních vlastnostech opracovaných součástí.

2.4 Metody měření zbytkových napětí

Metody měření zbytkových napětí lze rozdělit na **destruktivní** (založeny na měření deformace, která vznikne po odstranění vrstvy materiálu obsahující zbytková napětí), **polodestruktivní** (umožňují použít součást i po jejím změření) a **nedestruktivní** (nemají vliv na další funkčnost součásti).

Podle principu je možné metody měření zbytkových napětí rozdělit³⁶:

- mechanické (měření deformace),
- fyzikální (měření změn vlastností),
- chemické (změny vyvolané chemickými procesy).

Obecně je možno tedy tyto metody rozdělit na analytické (výpočtové) a experimentální, které jsou uvedeny v tab. 2.4.1.

Tab. 2.4.1 Metody zjišťování zbytkových napětí.³⁶

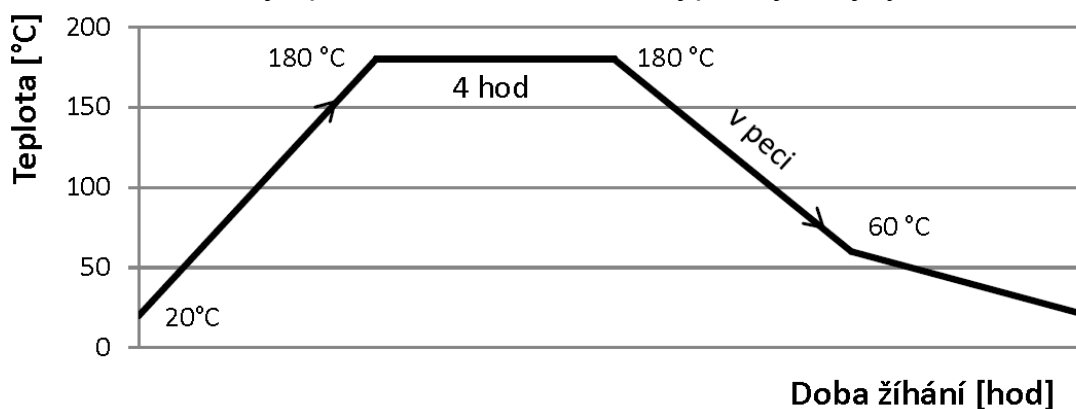
Metody zjišťování zbytkových napětí	Tvar součásti	Způsob měření	
Mechanické	plochý tvar	deformace pásků	změna délky
			změna zakřivení
		vrtání děr	válcová díra
			mezikruží
	rotační tvar	změna rozměru válce	odstranění povrchové vrstvy
			rozříznutí trubky
		trubka	odstranění povrchové vrstvy
			odstranění vnitřní vrstvy
			rozříznutí
		kroužek	změna křivosti
podélné pásy z kroužků			
obecný tvar	metoda sítí	deformace sítě	
	křehké laky	vznik trhlin	
	křehké modely	vznik trhlin	
Fyzikální RTG	obecný tvar	difrakce	vzdálenost meziatomových rovin
Fyzikální ultrazvuk		šíření vln	změna rychlosti
			odraz vln
			vnitřní tlumení
Elektrické	obecný tvar	změna proudu	změna potenciálu procházejícího proudu
			změna velikosti vířivých proudů
			změna indukčního toku
Magnetické	obecný tvar	změny magnetizmu	magnetická indukce
			zbytkový magnetismus
Akustické	obecný tvar	prozvučitelnost	četnost akustických emisí
Chemické	obecný tvar	difuze vodíku	trhliny na povrchu
		změna chemické aktivity	změna struktury

2.5 Vliv zbytkových napětí na výrobu optických zrcadel

Během zpracování polotovaru (EN AW 6061 T651 o průměru 264 mm) až k samotné finální podobě optického zrcadla (eliptického a hyperbolického), byl zjištěn problém s tvarovou stabilitou tohoto kusu.

Upínací plocha na polotovaru je pro zajištění dokonalého usazení v upínacím přípravku v přípravných operacích jemně frézována. Po uvolnění z upínacího přípravku docházelo k tvarové deformaci. Toto bylo prvotně zjištěno položením opracovávaného zrcadla na rovnou granitovou desku měřicího stanoviště, kdy docházelo ke kývání kusu. Po rozboru technologického postupu a jednotlivých operací bylo objasněno, že se tak děje vlivem zbytkových napětí po frézování.

Jako první možnost k odstranění těchto deformací bylo použito žíhání ke snížení zbytkových napětí, jehož průběh je zobrazen na obr. 2.5.1. Zrcadla se pro odstranění vnitřních napětí žíhají při 180 °C po dobu 4h s následným ochlazením v peci na teplotu 60 °C. Nevýhodou této operace je, že se musí provádět třikrát během výrobního procesu (viz technologický postup kap. 3.4), aby se zamezilo jakýmkoli deformacím (a tedy nepřesnostem) v průběhu výroby. S tím souvisí i zvýšení nákladů především na seřizování stroje, protože během žíhání stroj pracuje na jiných zakázkách.



Obr. 2.5.1 Průběh žíhání optických zrcadel na odstranění vnitřního napětí.

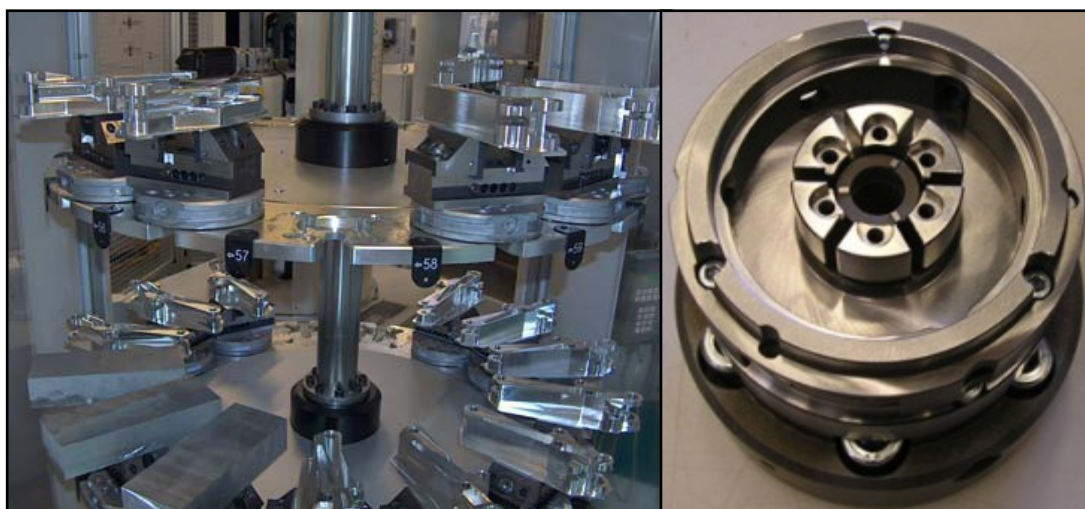
Současně se laborovalo s použitím různých typů fréz a řezných destiček ve snaze snížit velikost zbytkových napětí a tím eliminovat nutnost operace žíhání. Použité frézy: $\varnothing 16$ -R4, $\varnothing 20$ kulová, $\varnothing 50$ -R4, $\varnothing 50$ -R19, $\varnothing 80$ -R19. Zbývající informace o použitých typech VBD a řezných parametrech již nejsou z firemních zdrojů dostupné.

U vyzkoušených typů fréz se však tento efekt nepotvrdil a operace žíhání tedy zůstává zařazena v technologickém postupu. Během zkoušení byly současně optimalizovány řezné podmínky vzhledem k co nejlepší jakosti povrchu. Nejlepších parametrů bylo dosaženo frézou $\varnothing 80$ -R19 jejíž označení je uvedeno v tab. 3.5.2.

3 TECHNOLOGIČNOST VÝROBY OPTICKÝCH ZRCADEL

3.1 Představení firmy Frentech Aerospace s.r.o.

Brněnská firma Frentech Aerospace s.r.o. byla založena roku 1994 se zaměřením na výrobu součástí a náhradních dílů pro přesnou mechaniku, mikroelektroniku, lékařské a speciální přístroje. Od roku 1997, kdy uskutečnila první dodávku pro společnost Airbus, se její výrobní portfolio zaměřilo především na letecký (Airbus), vesmírný a obranný průmysl, mikroelektroniku, mikrovlnné radarové a rádiové systémy (např. projekty ESO a ESA v Chile), lékařskou a přístrojovou techniku a upínací zařízení.



Obr. 3.1.1 Příklad výroby fy Frentech Aerospace.³²

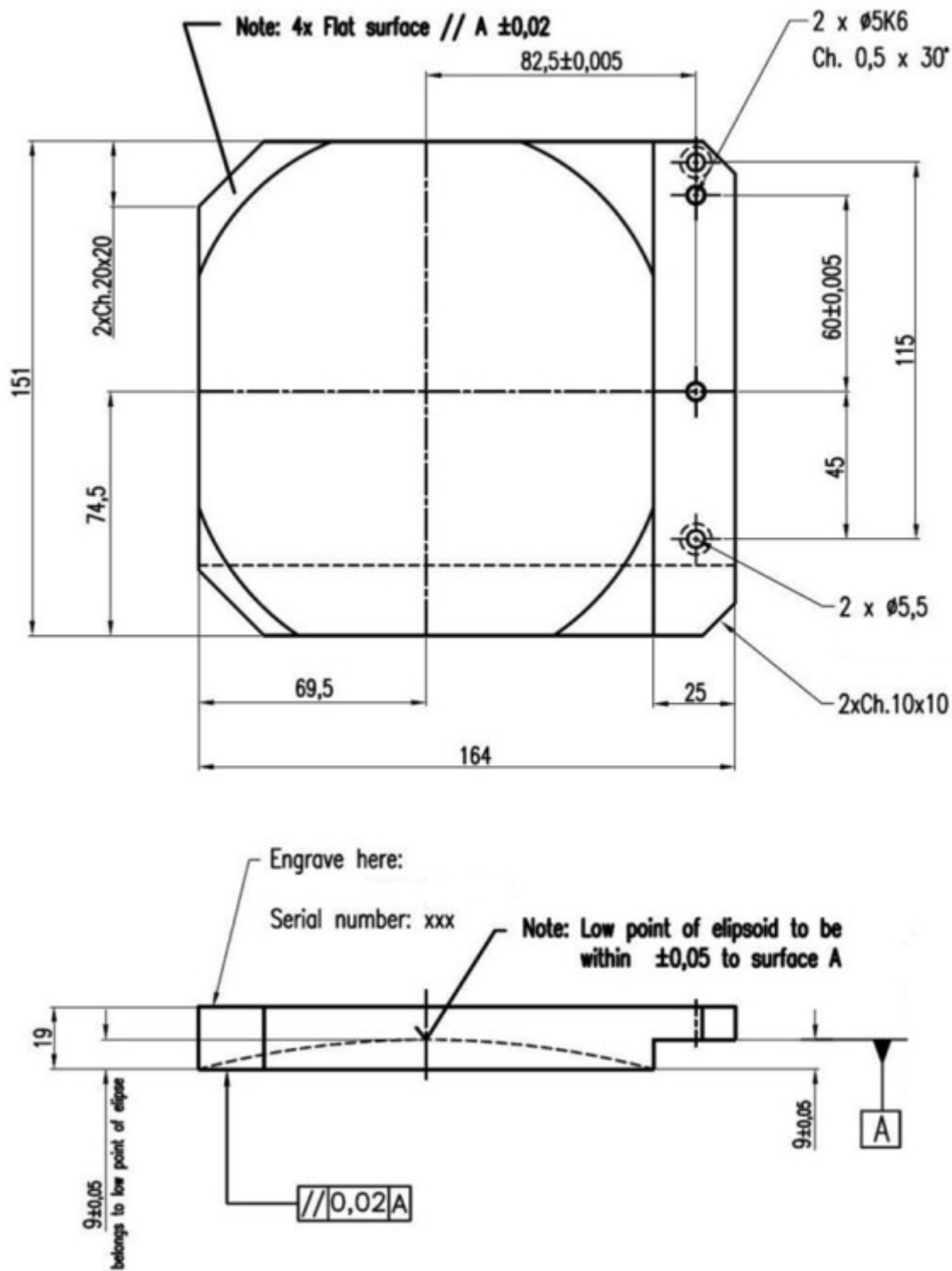
Firma Frentech Aerospace s.r.o. investovala nemalé peníze do nejmodernějšího strojního vybavení. Např. robotický skladový robot, robotické ovladače pro CNC frézovací centra či automatickým systém plánování a výroby včetně zpětné vazby od strojů. V tab. 3.1.1 jsou uvedeny některá moderní strojní zařízení, které firma vlastní.

3.1.1 Vybraná strojní obráběcí automatizovaná centra.³²

Stroj	Označení	Výrobce	Počet os	Počet strojů
Soustružnické centrum	STAR VNC 20C	STAR	4	1
	STAR SV 32	STAR	9	1
	INTEGREX 100	MAZAK	5	1
	INTEGREX 200	MAZAK	4+1	1
Frézovací centrum	MCFV 1060	TAJMAC	3	1
	VARIAXIS 630	MAZAK	5	2
	PICOMAX 90	FEHLMANN	5	1
	PICOMAX 95	FEHLMANN	5	1
	FH 580	MAZAK	4	2

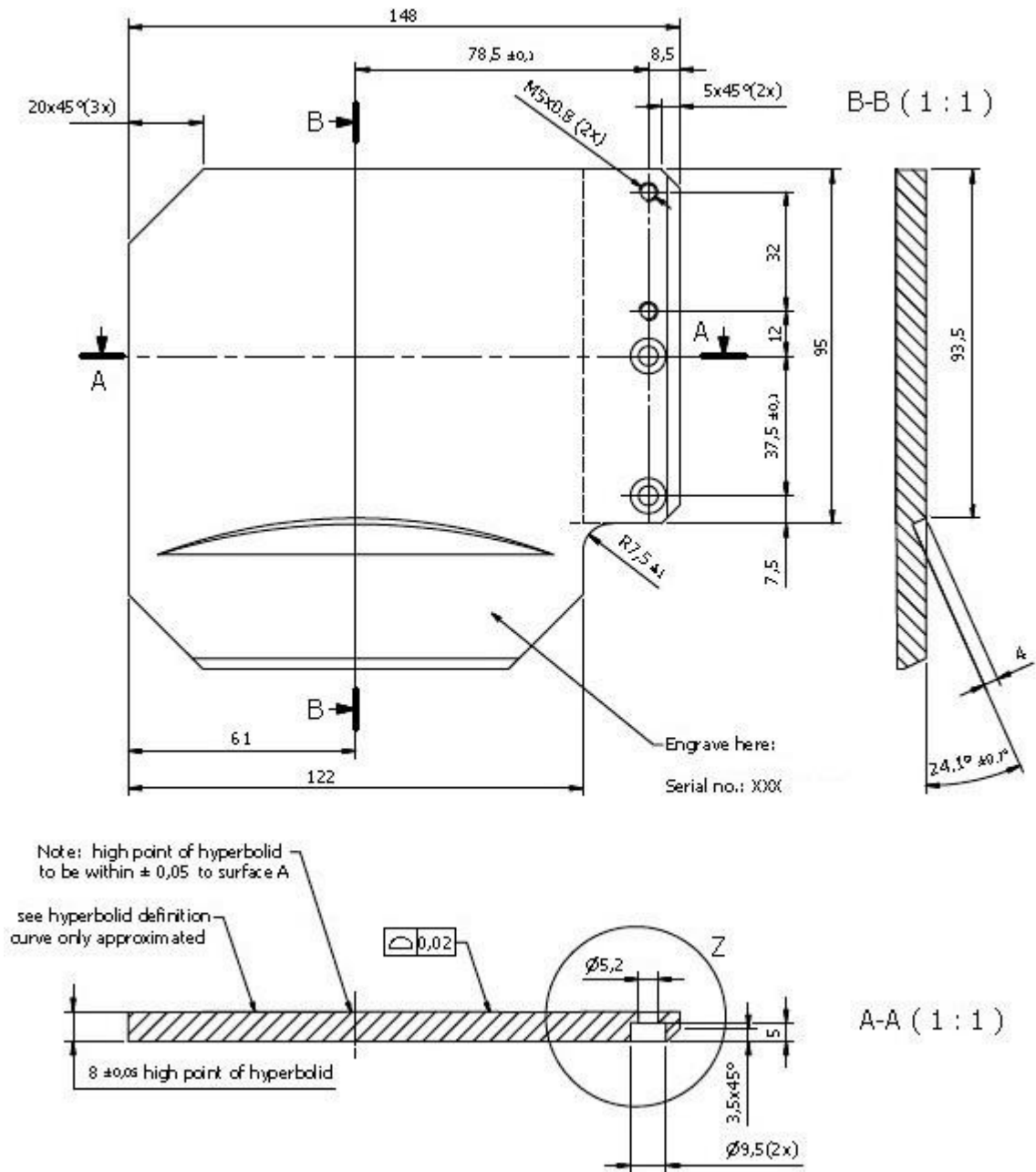
3.2 Výkresová dokumentace

Na obrázku 3.2.1 je zobrazena část výkresu eliptického zrcadla s hlavními rozměry. Celý výkres je uveden v příloze č. 4. a výkres sestavy v příloze č. 5.



Obr. 3.2.1 Výřez výkresu eliptického zrcadla.⁴¹

Na obrázku 3.2.2 je zobrazena část výkresu hyperbolického zrcadla s hlavními rozměry. Celý výkres je uveden v příloze č. 4.



Obr. 3.2.2 Výřez výkresu hyperbolického zrcadla.⁴¹

3.3 Charakteristiky materiálu

Pro vysokofrekvenční optická zrcadla byla zvolena jako základní materiál slitina hliníku Al-Mg-Si, konkrétně EN AW 6061 T651 [AlMg1SiCu] ve formě kruhové tyče o průměru 254 mm. Její chemické složení je uvedeno v tab. 3.3.1, fyzikální vlastnosti v tab. 3.3.2 a základní mechanické vlastnosti v tab. 3.3.3.

Tab. 3.3.1 Chemické složení slitiny AW 6061.^{33, 34}

Chemické složení slitiny AW 6061 dle EN 573-3 (hmotnostní %, zbývající část Al)										
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Jiné prvky		Al
								každý prvek	celkem	
0,40÷ 0,80	max. 0,7	0,15÷ 0,40	max. 0,15	0,8÷ 1,2	0,04÷ 0,35	max. 0,25	max. 0,15	max. 0,05	max. 0,15	zbytek

Tab. 3.3.2 Fyzikální charakteristiky slitiny AW 6061.³⁴

Fyzikální charakteristiky				
Hustota	2700 kg·m ⁻³	Tepelná vodivost při 20°C	stav T6	1,55 W·cm ⁻¹ K ⁻¹
Bod tání	582 °C		(-20÷100)°C	23,4·10 ⁻⁶ K ⁻¹
Modul pružnosti v tahu E	69 Gpa		(-20÷200)°C	24,3·10 ⁻⁶ K ⁻¹
Modul pružnosti ve smyku G	26 Gpa		(-20÷300)°C	25,4·10 ⁻⁶ K ⁻¹

Tab. 3.3.3 Minimální mechanické vlastnosti slitiny AW 6061.^{33, 34}

Minimální mechanické vlastnosti dle normy EN 755.2								
Druh profilu	Tepelný stav	Pevnost v tahu Rm [MPa]		Smluvní mez kluzu Rp _{0,2} [MPa]		Min. tažnost [%]		Tvrdost HB*
		min.	max.	min.	max.	A	A _{50mm}	
Tyče	T4	180	-	110	-	15	13	~65
	T6	260	-	240	-	8	6	~85
Trubky	T4	180	-	110	-	15	13	~65
	T6	260	-	240	-	10	8	~85
Profily	T4	180	-	110	-	15	13	~65
	T6	260	-	240	-	10	8	~85

Poznámka: * - hodnoty jsou pouze informativního charakteru

3.4 Technologický postup výroby

V tab. 3.4.1 a 3.4.2 jsou uvedeny výrobní postupy pro výrobu zrcadel.

Tab. 3.4.1 Technologický postup pro výrobu eliptického zrcadla.⁴¹

Eliptické zrcadlo				Výrobní dávka: 20 ks
Č. op.	Popis	Odd.	Stroj čas [min]	Poznámka
10	řezání tyčí	sklad	5,0	řezat na L=25mm; 2ks na víc
20	příprava konv. frézky	frez kon	30,0	
30	fréz konv. frézka FNG-J20	frez kon	15,0	frézovat oplošení 160mm z obou stran, tloušťku přerovnat z jedné strany
40	příprava Picomax	frez cnc	120,0	nahrát program
50	frézování CNC PICOMAX 95	frez cnc	25,0	hrubovat s přídavky 0,5mm na plochu
60	žihání	TPZ	0,0	dle programu, ochlazení v peci do min. 60°C
70	příprava Picomax	frez cnc	120,0	nahrát pgm; mezioperačně balit do krabiček; díly musí být bez škrábanců
80	frézování CNC PICOMAX 95	frez cnc	55,0	frézovat hotově šikinu 65°, vrtat, zahloubit; spodní up. plocha s příd. 0,2; frézovat hotově míru 151; hrubovat eliptickou plochu základna A a horní plochy s přídavkem 0,2mm
90	frézování CNC PICOMAX 95	frez cnc	0,0	
100	meziop. kontrola	kontrola	0,0	
110	žihání	TPZ	0,0	dle programu, ochlazení v peci do min. 60°C
120	příprava CNC centra	frez cnc	90,0	nahrát pgm; mezioperačně balit do krabiček; díly musí být bez škrábanců
130	fréz. CNC MCFV	frez cnc	20,0	frézovat hotově spodní plochu; požadovaná rovinnost do 0,006; gravírovat popis a sériové číslo
140	žihání	TPZ	0,0	dle programu, ochlazení v peci do min. 60°C
150	meziop. kontrola	kontrola	0,0	kontrolovat rovinnost do 0,006 základny
160	příprava Picomax	frez cnc	120,0	nahrát pgm; tl. vrstvy PÚ 14μm +5 na zrcadle a bocích; díl musí být bez škrábanců
170	frézování CNC PICOMAX 95	frez cnc	100,0	frézovat hotově tvar eliptické plochy, zákl. A, vypíchnutí; opracování elipsoidu nejhůře Rt0,4; vrtat pr. 5K6 s ohl. na PÚ
180	frézování CNC PICOMAX 95	frez cnc	0,0	manipulovat v bavlněných rukavicích; mezioperačně balit do hedváb. papíru a spec. krabiček; gravírovat kříž a bod 25° míry 4,66
190	příprava zámečnick	zameč.	30,0	díly musí být bez škrábanců; manipulovat v bavlněných rukavicích; mezioperačně balit do hedváb. papíru a spec. krabiček
200	zámečnick	zameč.	15,0	celkově odjehlit
210	meziop. kontrola	kontrola	0,0	
220	kooperace	KOOP	0,0	leštěním sjednotit povrch po frézování s ohledem na požadovanou geom. přesnost
230	meziop. kontrola	kontrola	5,0	měřit parametr Rt; 100% kontrola elipsoidu; manipulovat v bavlněných rukavicích; mezioperačně balit do hedváb. papíru a spec. krabiček.
240	povrchová úprava	KOOP	0,0	chemicky niklovat 12-14 μm, chránit otvory 2x pr. 5K6
250	meziop. kontrola	kontrola	0,0	
260	kooperace	KOOP	0,0	díly musí být bez škrábanců; manipulovat v bavlněných rukavicích; mezioperačně balit do hedváb. papíru a spec. krabiček
270	kooperace	KOOP	0,0	leštit na Rt = <0,1
280	meziop. kontrola	kontrola	5,0	měřit parametr Rt, 100% kontrola elipsoidu; manipulovat v bavlněných rukavicích, mezioperačně balit do hedváb. papíru a spec. krabiček
290	povrchová úprava	KOOP	0,0	zlatit tl. vrstvy 5 μm, na zadní straně zrcadla nanést pouze 1-2μm; otvory 5K6 chránit; vystavit protokol od měření
300	konečná kontrola	kontrola	15,0	100% vizuální kontrola; vystavit ke každému dílu protokol k elipsoidu, otvorům, mírám k základně A
310	konečná kontrola	kontrola	0,0	manipulovat v bavlněných rukavicích; mezioperačně balit do hedváb. papíru a spec. krabiček

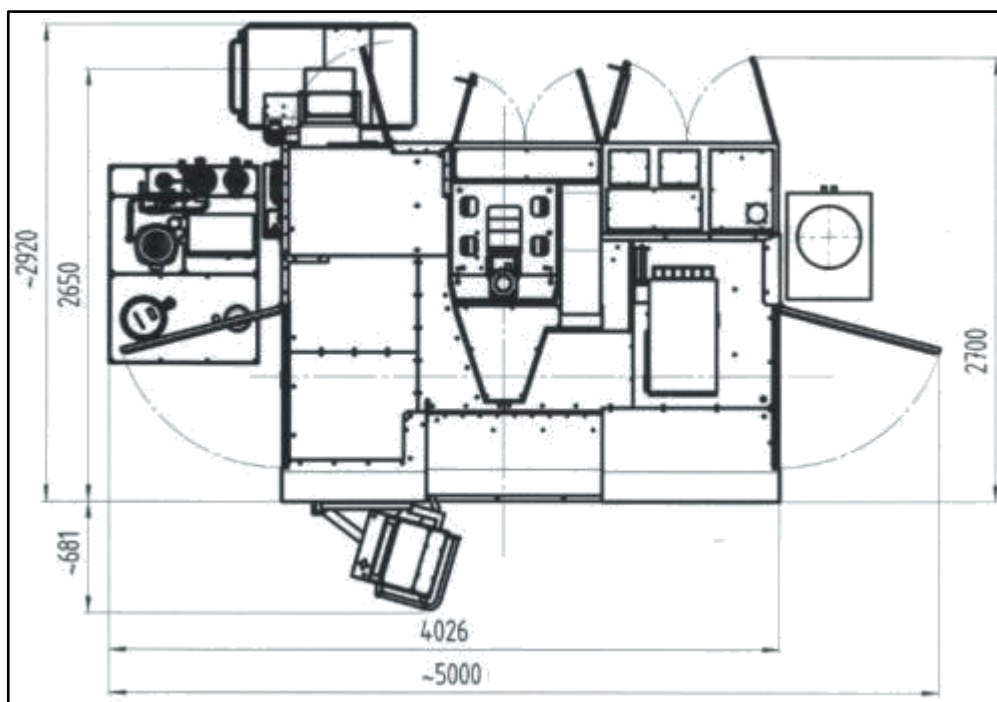
Tab. 3.4.2 Technologický postup pro výrobu hyperbolického zrcadla.⁴¹

Hyperbolické zrcadlo				Výrobní dávka: 20 ks
Č. op.	Popis	Odd.	Stroj. čas [min]	Poznámka
10	příprava řezání	sklad	10,0	číslo příjmu materiálu
20	řezání tyčí	sklad	5,0	řezat na L=20mm; 2ks na víc
30	příprava konv. frézky	frez kon	30,0	
40	fréz konv. frézka FNG-J20	frez kon	15,0	frézovat oplošení 156mm z obou stran, tloušťku přerovnat z jedné strany
50	příprava Picomax	frez cnc	120,0	nahrát program
60	frézování CNC PICOMAX 95	frez cnc	15,0	hrubovat s přídavky 0,5mm na plochu
70	meziop. kontrola	kontrola	0,0	
80	žihání	TPZ	0,0	dle programu, ochlazení v peci do min. 60°C
90	příprava Picomax	frez cnc	120,0	nahrát pgm; díly musí být bez škrábanců
100	frézování CNC PICOMAX 95	frez cnc	50,0	frézovat hotově plochy míra 148, vybrání, sražení, vrtat a zahloubit otvory, fréz. závity; hrubovat spodní upínací plochu zákl. A a hyperbolickou plochu s přídavkem 0,2mm na plochu
110	frézování CNC PICOMAX 95	frez cnc	0,0	mezioperačně balit do krabiček
120	meziop. kontrola	kontrola	0,0	
130	žihání	TPZ	0,0	dle programu, ochlazení v peci do min. 60°C
140	příprava CNC centra	frez cnc	90,0	nahrát pgm; mezioperačně balit do krabiček; díly musí být bez škrábanců
150	fréz. CNC MCFV	frez cnc	20,0	frézovat spodní plochu dílu na míru od vrcholu hyperbolické plochy; rovinnost 0,006; gravírovat popis a sériové číslo
160	žihání	TPZ	0,0	dle programu, ochlazení v peci do min. 60°C
170	meziop. kontrola	kontrola	0,0	kontrolovat rovinnost do 0,006 upínací plochy u všech kusů
180	příprava Picomax	frez cnc	120,0	nahrát program; díly musí být bez škrábanců
190	frézování CNC PICOMAX 95	frez cnc	85,0	frézovat hotově tvar hyperbolické plochy, zákl. A, vypichnutí; opracování hyperboloidu nejhůře Rt0,4; tl. vrstvy PÚ 14 μm +5 na zrcadle a bocích
200	frézování CNC PICOMAX 95	frez cnc	0,0	manipulovat v bavlněných rukavicích; mezioperačně balit do hedváb. papíru a spec. krabiček; gravírovat popis a sériové číslo
210	příprava zámečnick	zameč.	30,0	díly musí být bez škrábanců; manipulovat v bavlněných rukavicích; mezioperačně balit do hedváb. papíru a spec. krabiček
220	zámečnick	zameč.	15,0	celkově odjehlit
230	meziop. kontrola	kontrola	0,0	
240	kooperace	KOOP	0,0	leštěním sjednotit povrch po frézování s ohledem na požadovanou geom. přesnost
250	meziop. kontrola	kontrola	5,0	měřit parametr Rt; 100% kontrola hyperboloidu; manipulovat v bavlněných rukavicích; mezioperačně balit do hedváb. papíru a spec. krabiček.
260	povrchová úprava	KOOP	0,0	chemicky niklovat 12-14 um
270	meziop. kontrola	kontrola	0,0	
280	kooperace	KOOP	0,0	díly musí být bez škrábanců; manipulovat v bavlněných rukavicích; mezioperačně balit do hedváb. papíru a spec. krabiček
290	kooperace	KOOP	0,0	leštit na Rt = <0,1 plochu hyperboloidu
300	meziop. kontrola	kontrola	5,0	měřit parametr Rt, 100% kontrola hyperboloidu; manipulovat v bavlněných rukavicích; mezioperačně balit do hedváb. papíru a spec. krabiček
310	povrchová úprava	KOOP	0,0	zlatit tl. vrstvy 5 um, na zadní straně zrcadla nanést pouze 1-2um; vystavit protokol od měření
320	konečná kontrola	kontrola	15,0	100% vizuální kontrola; vystavit ke každému dílu protokol k hyperboloidu a mírám vztaženým k němu a zákl. A
330	konečná kontrola	kontrola	0,0	manipulovat v bavlněných rukavicích; balit do hedváb. papíru a spec. krab.

3.5 Technologie tvarového frézování

3.5.1 Použitý HSC stroj a jeho technické parametry

Pro frézování konečného eliptického respektive hyperbolického tvaru optického zrcadla je použito robotického vertikálního vysokorychlostního frézovacího centra Picomax® 95 od firmy Fehlmann, který je zobrazen na obr. 3.5.1 a jehož technické parametry jsou uvedeny v tab. 3.5.1.



Obr. 3.5.1 Schéma frézovacího centra Picomax® 95.⁴¹

Tab. 3.5.1 Technická specifikace frézovacího centra Picomax® 95.⁴¹

VERTIKÁLNÍ HSC FRÉZOVACÍ CENTRUM PICOMAX® 95			
Max. pojezd		Výměník nástrojů	
X	800 mm	Max. počet nástrojů	100 ks
Y	500 mm	Max. průměr nástroje	∅ 160 mm
Z	610 mm	Max. vyložení nástroje	350 mm
Pracovní stůl		Max. hmotnost nástroje	5 kg
Rozměry prac. stolu	1600 x 550 mm	Rychlost posuvu	
T-drážka (š / počet)	12-H8 / 10	X, Y, Z	48 000 mm·min ⁻¹
Max. zatížení stolu	600 kg	Přesnost polohování	
Vřeteno		Tolerance polohy	0,003 mm
Typ upínání	HSK A63	Tolerance opakovatelnosti	0,002 mm
Rozsah otáček	50÷20 000 min ⁻¹	Rozlišení měřicího systému	0,001 mm
Výkon	až 24 kW	Provozní tlak	6 bar
Max. točivý moment	120 Nm/1920 min ⁻¹	Váha stoje	9400 kg

3.5.2 Použité nástroje

Při procesu optimalizování výroby, resp. frézování tvaru na čisto, byly vyzkoušeny následující druhy fréz: $\varnothing 50$ -R19, $\varnothing 20$ -kulová, $\varnothing 50$ -R4, $\varnothing 16$ -R4 a $\varnothing 80$ -R19.

Nejlepších výsledků jakosti povrchu se dosahovalo s frézou $\varnothing 80$ -R19, která je zobrazena na obr. 3.5.2 a jejíž označení je uvedeno v tab. 3.5.2.

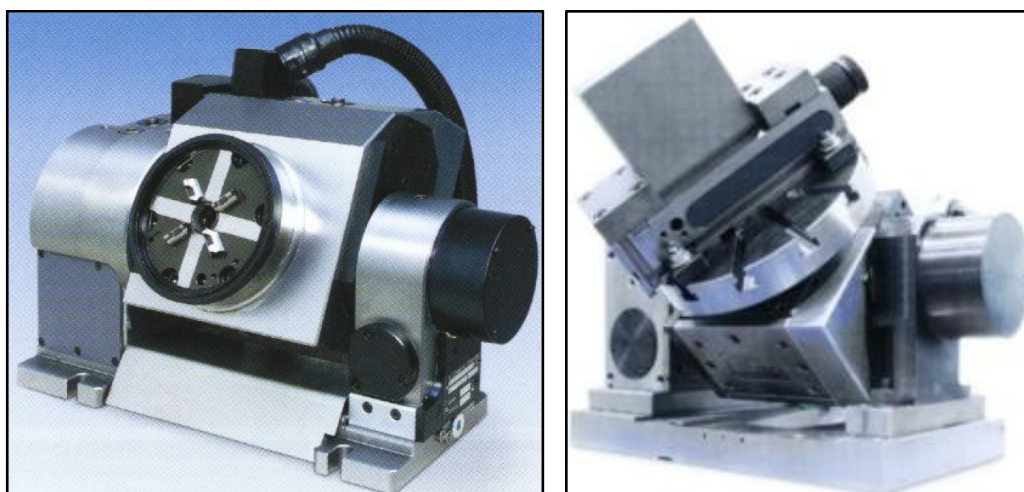
Tab. 3.5.2 Označení použitého nástroje.⁴¹

Držák	E9304 5545 2250
Fréza	AAFC.80.R04
Destička	XDEX 40T3ZZFRM60H216T



Obr. 3.5.2 Fréza pro dokončovací operaci frézování.

Pro umožnění manipulace s obrobkem během výrobního procesu a jeho vhodné natočení do požadované pozice, je použito pneumaticko-hydraulicky řízeného přídavného dělicího přístroje, který je zobrazen na obr. 3.5.3.



Obr. 3.5.3 Přídavný dělicí přístroj.⁴¹

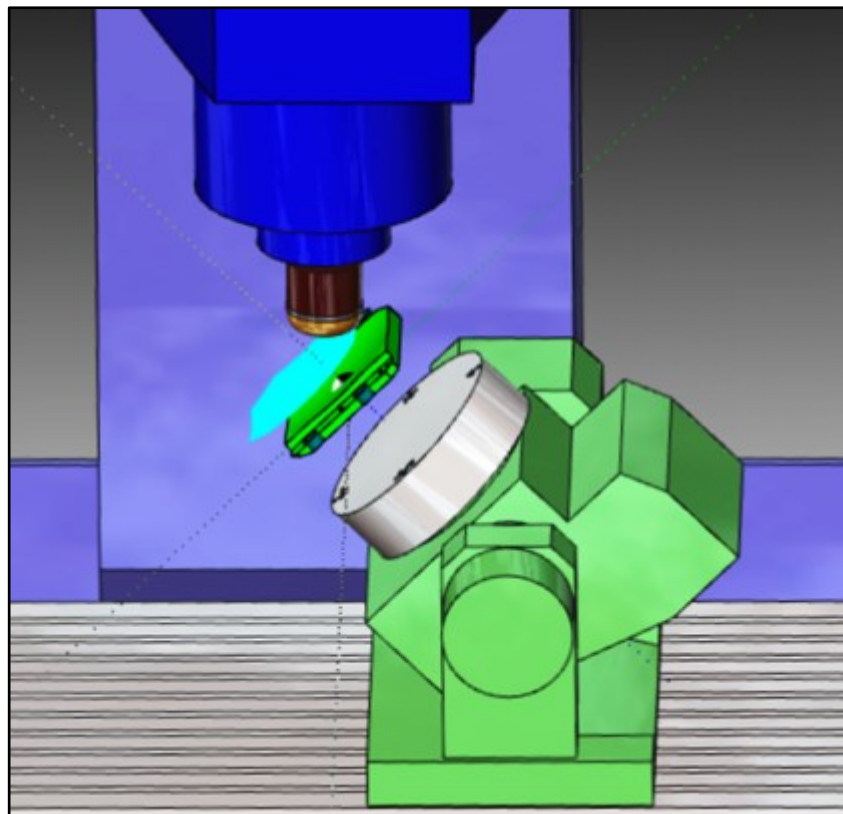
3.5.3 Tvarové frézování řádkováním

Vstupním materiálem pro výrobu optických zrcadel je kruhová tyč ze slitiny hliníku EN AW 6061 T651 o průměru 254 mm. Ze které se opracováním na konvenčních strojích vytvoří polotovar, který je zobrazen na obr. 3.5.4



Obr. 3.5.4 Polotovar pro výrobu optických zrcadel

Celý proces tvarového frézování eliptických i hyperbolických zrcadel se provádí při upnutí, které je znázorněno na obr. 3.5.5.



Obr. 3.5.5 Upnutí eliptického zrcadla.

Během procesu frézování koná fréza vertikální posuv. Po projetí jedné vertikální dráhy se posune o jeden krok (tzv. řádkování) a celý cyklus se opakuje. Ukázka programování těchto pohybů je uvedena v tab. 3.5.3 a 3.5.4. **Po frézování na čisto dosahuje povrch hodnoty Ra pod 0,15 μm.**

Tab. 3.5.3 Ukázka programu pro frézování eliptického zrcadla.⁴¹

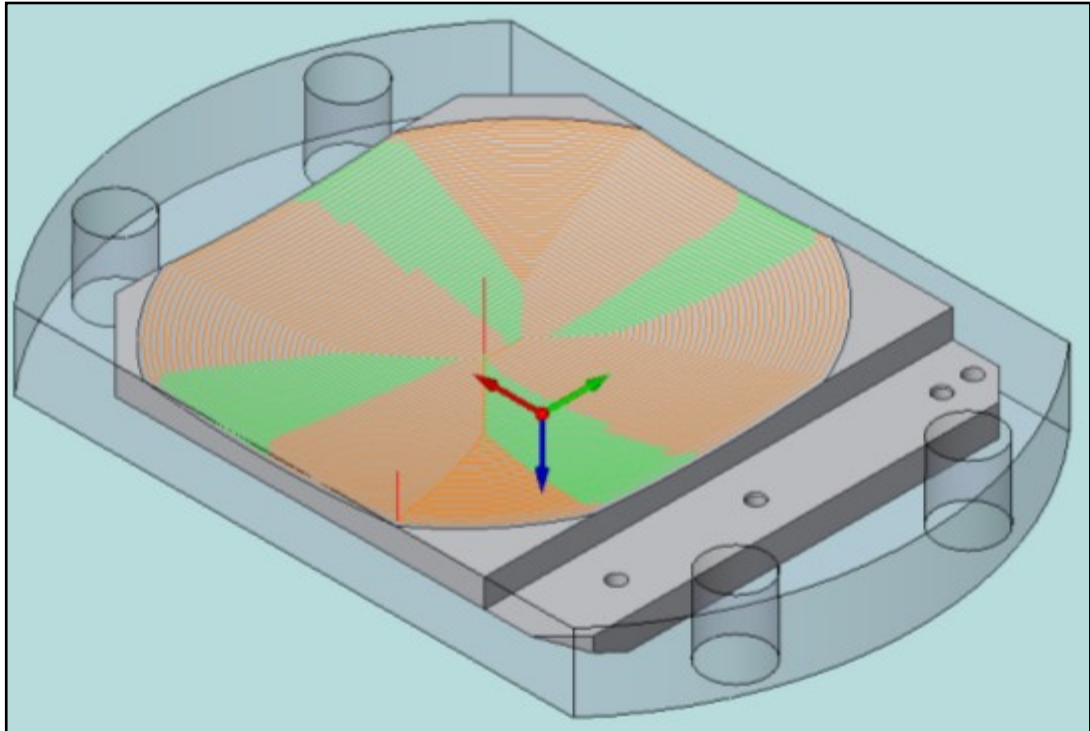
0 BEGIN PGM 0584 MM	396 * - 3DM-MODEL6-T1 - 3-D MODEL
1 ;FEHLMANN P95M	397 L X-16.395 Y-70.31 R0 FMAX
2 ;Ver.GPP 2009_10_05	398 L Z+80 R0 FMAX
3 ;Date:08-JAN-2010 Time:10:43:54	399 L Z+23.08 R0 FMAX
4 ;ELLIPTICAL_MIRROR	400 L Z+21.08 R0 FQ103 M90
5 * - IDN.: 5 ST FREZA D16 JABRO T-5	401 L X-16.432 Z+21.033 R0 FQ103 M90
6 * - IDN.: 8 NAVRTAVAK D6 T-8	402 L X-16.745 Y-70.301 Z+20.647 R0 FQ103 M90
7 * - IDN.: 14 UHLOVA FREZA D6X30 T-14	403 L X-17.057 Y-70.292 Z+20.261 R0 FQ103 M90
8 * - IDN.: 12 VYVRT.TYC D5K6 T-12	404 L X-17.369 Y-70.283 Z+19.877 R0 FQ103 M90
9 * - IDN.: 1 ST FREZA TIZIT D80 R19 T-1	405 L X-17.578 Y-70.278 Z+19.621 R0 FQ103 M90
10 * - IDN.: 6 ST FREZA D8 TORNADO T-6	406 L X-17.788 Y-70.272 Z+19.364 R0 FQ103 M90
11 * - IDN.: 7 ST FREZA D6 TORNADO T-7	407 L X-18.103 Y-70.264 Z+18.979 R0 FQ103 M90
12 M57 M32	408 L X-18.419 Y-70.256 Z+18.595 R0 FQ103 M90
13 M126	409 L X-18.629 Y-70.25 Z+18.339 R0 FQ103 M90
14 Z-5 FMAX M91	410 L X-18.734 Y-70.248 Z+18.212 R0 FQ103 M90
15 TOOL CALL 2 Z ;POUZE PRO OSU VRETENA	411 L X-19.049 Y-70.25 Z+17.834 R0 FQ103 M90
16 CYCL DEF 247 NASTAVIT REF. BOD ~ Q339=+18 ;CISLO VZTAZNEHO BODU	412 L X-19.259 Y-70.252 Z+17.583 R0 FQ103 M90
17 ;[...]!	413 L X-19.47 Y-70.254 Z+17.333 R0 FQ103 M90
18 CYCL DEF 10.0 OTACENI	414 L X-19.68 Y-70.256 Z+17.083 R0 FQ103 M90
19 CYCL DEF 10.1 ROT+0	415 L X-19.89 Y-70.258 Z+16.833 R0 FQ103 M90
20 CYCL DEF 19.0 ROVINA OBRABENI	416 L X-20.205 Y-70.249 Z+16.455 R0 FQ103 M90
21 CYCL DEF 19.1 B+0 C+0 F9999	417 L X-20.521 Y-70.24 Z+16.077 R0 FQ103 M90
22 CYCL DEF 19.0 ROVINA OBRABENI	418 L X-20.836 Y-70.232 Z+15.701 R0 FQ103 M90
23 CYCL DEF 19.1	419 L X-21.046 Y-70.226 Z+15.451 R0 FQ103 M90
24 CYCL DEF 7.0 NULOVY BOD	420 L X-21.37 Y-70.229 Z+15.071 R0 FQ103 M90
25 CYCL DEF 7.1 X+0	421 L X-21.586 Y-70.231 Z+14.819 R0 FQ103 M90
26 CYCL DEF 7.2 Y+0	422 L X-21.802 Y-70.233 Z+14.567 R0 FQ103 M90
27 CYCL DEF 7.3 Z+0	423 L X-22.018 Y-70.235 Z+14.315 R0 FQ103 M90
28 TOOL CALL 2 Z S16000 DL+0.06 DR+0 ; ST FREZA D16 JABRO;D-16 R-0	424 L X-22.246 Y-70.232 Z+14.047 R0 FQ103 M90
29 TOOL DEF 5	425 L X-22.401 Y-70.23 Z+13.866 R0 FQ103 M90
30 ;[...]!	426 L X-22.719 Y-70.219 Z+13.492 R0 FQ103 M90
	427 L X-22.932 Y-70.211 Z+13.242 R0 FQ103 M90

Tab. 3.5.4 Ukázka programu pro frézování hyperbolického zrcadla.⁴¹

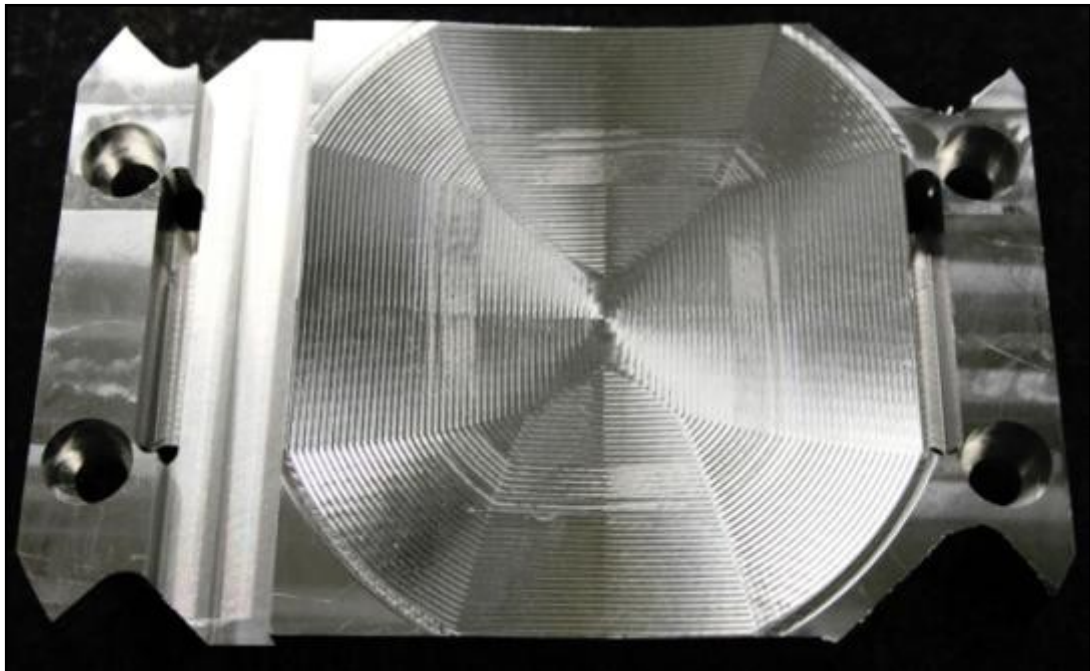
0 BEGIN PGM 0594 MM	136 * - 3DM-MODEL4-T1 - 3-D MODEL
1 ;FEHLMANN P95M	137 L X-44.806 Y+20.802 R0 FMAX
2 ;Ver.GPP 2009_10_05	138 L Z+45 R0 FMAX
3 ;Date:08-JAN-2010 Time:13:14:06	139 L Z+0.494 R0 FMAX
4 ;HYPERBOLIC_MIRROR	140 L Z-9.506 R0 FQ103 M90
5 BLK FORM 0.1 Z X-78 Y-120.4901 Z-20	141 L X-44.858 Y+20.942 Z-9.58 R0 FQ103 M90
6 BLK FORM 0.2 X+78 Y+120.4901 Z+0	142 L X-44.884 Y+21.012 Z-9.617 R0 FQ103 M90
7 * - IDN.: 1 ST FREZA TIZIT D80 R19 T-1	143 L X-44.754 Z-9.4 R0 FQ101 M90
8 * - IDN.: 5 ST FREZA D16 JABRO T-5	144 L X-44.72 Y+21.151 Z-9.33 R0 FQ101 M90
9 * - IDN.: 7 ST FREZA D8 TORNADO T-7	145 L X-44.703 Y+21.221 Z-9.296 R0 FQ101 M90
10 M57 M32	146 L X-44.962 Z-9.73 R0 FQ103 M90
11 M126	147 L X-45.014 Y+21.361 Z-9.806 R0 FQ103 M90
12 Z-5 FMAX M91	148 L X-45.04 Y+21.431 Z-9.845 R0 FQ103 M90
13 TOOL CALL 4 Z ;POUZE PRO OSU VRETENA	149 L X-44.651 Z-9.194 R0 FQ101 M90
14 CYCL DEF 247 NASTAVIT REF. BOD ~ Q339=+18 ;CISLO VZTAZNEHO BODU	150 L X-44.631 Y+21.512 Z-9.155 R0 FQ101 M90
15 ; [...]!	151 L X-44.039 Y+21.589 Z-8.16 R0 FQ101 M90
16 CYCL DEF 10.0 OTACENI	152 L X-43.743 Y+21.628 Z-7.663 R0 FQ101 M90
17 CYCL DEF 10.1 ROT+0	153 L X-43.105 Y+21.632 Z-6.599 R0 FQ101 M90
18 CYCL DEF 19.0 ROVINA OBRABENI	154 L X-42.68 Y+21.634 Z-5.89 R0 FQ101 M90
19 CYCL DEF 19.1 B+0 C+0 F9999	155 L X-42.201 Z-5.092 R0 FQ101 M90
20 CYCL DEF 19.0 ROVINA OBRABENI	156 L X-41.722 Z-4.295 R0 FQ101 M90
21 CYCL DEF 19.1	157 L X-41.363 Y+21.636 Z-3.698 R0 FQ101 M90
22 CYCL DEF 7.0 NULOVY BOD	158 L X-40.765 Z-2.704 R0 FQ101 M90
23 CYCL DEF 7.1 X+0	159 L X-40.405 Z-2.108 R0 FQ101 M90
24 CYCL DEF 7.2 Y+0	160 L X-39.846 Z-1.18 R0 FQ101 M90
25 CYCL DEF 7.3 Z+0	161 L X-39.567 Y+21.638 Z-0.718 R0 FQ101 M90
26 TOOL CALL 4 Z S15000 DL+0 DR+0 ; ST FREZA TIZIT D80 R19;D-79.959 R-19	162 L X-39.489 Y+21.641 Z-0.588 R0 FQ101 M90
27 TOOL DEF 2	163 L X-40.038 Z-1.499 R0 FQ103 M90
28 ; [...]!	164 L X-40.649 Z-2.511 R0 FQ103 M90
29 CALL LBL 212	165 L X-41.015 Z-3.119 R0 FQ103 M90
30 CALL LBL 200	166 L X-41.442 Z-3.829 R0 FQ103 M90
31 CALL LBL 2	167 L X-41.931 Z-4.642 R0 FQ103 M90
32 * - 3DM-MODEL4-T1	168 L X-42.358 Z-5.353 R0 FQ103 M90
33 ; [...]!	169 L X-42.846 Z-6.167 R0 FQ103 M90
	170 L X-43.396 Z-7.083 R0 FQ103 M90

3.5.4 Frézování eliptického zrcadla

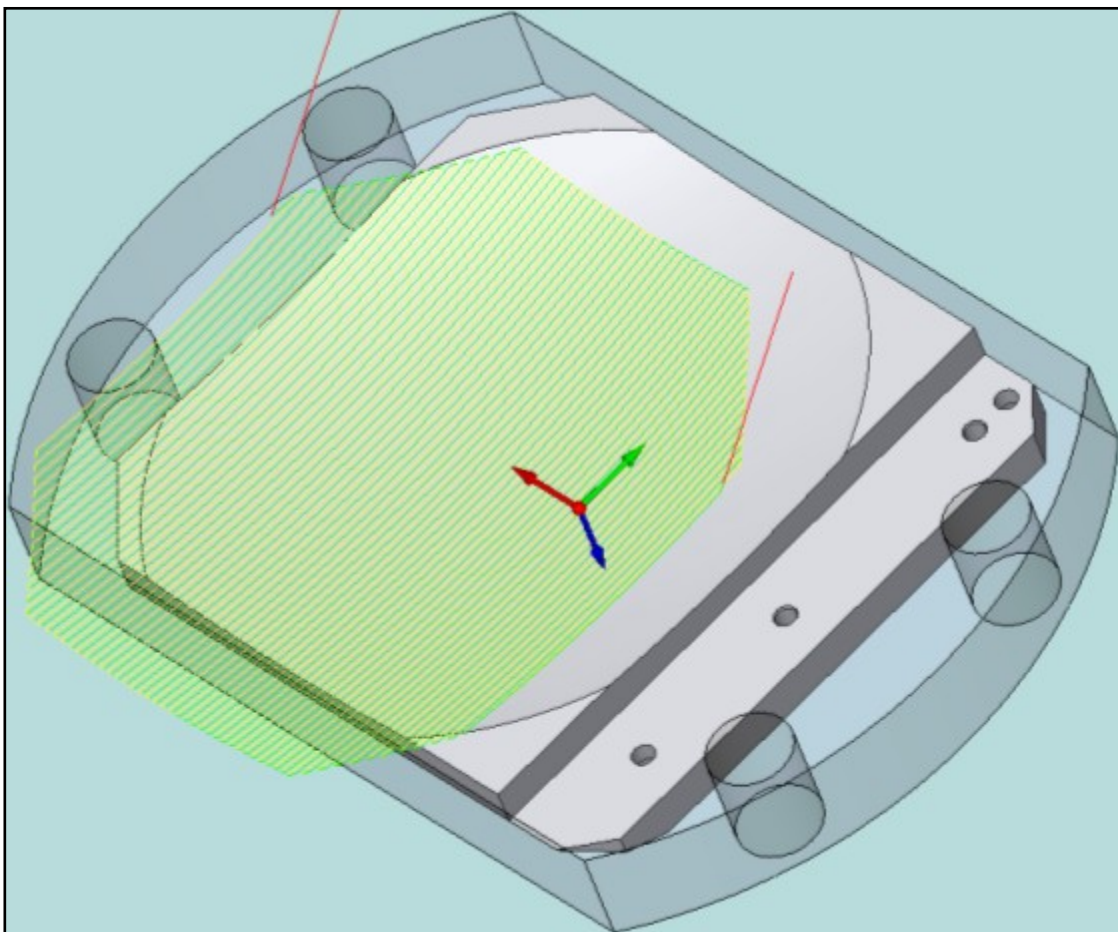
Na obrázcích 3.5.6 až 3.5.13 jsou zobrazeny namodelované dráhy nástroje a vyrobená součást po dané operaci.



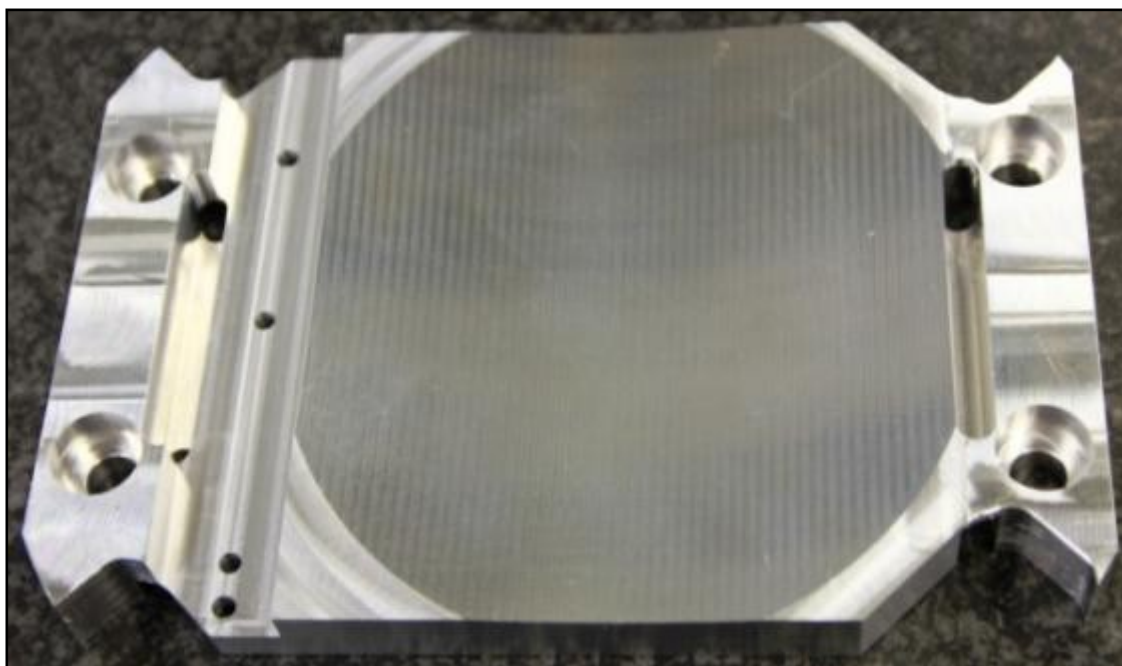
Obr. 3.5.6 Hrubování tvaru s přídávkem na plochu 0,5 mm a bočním krokem 1,5 mm; č. op. 60.



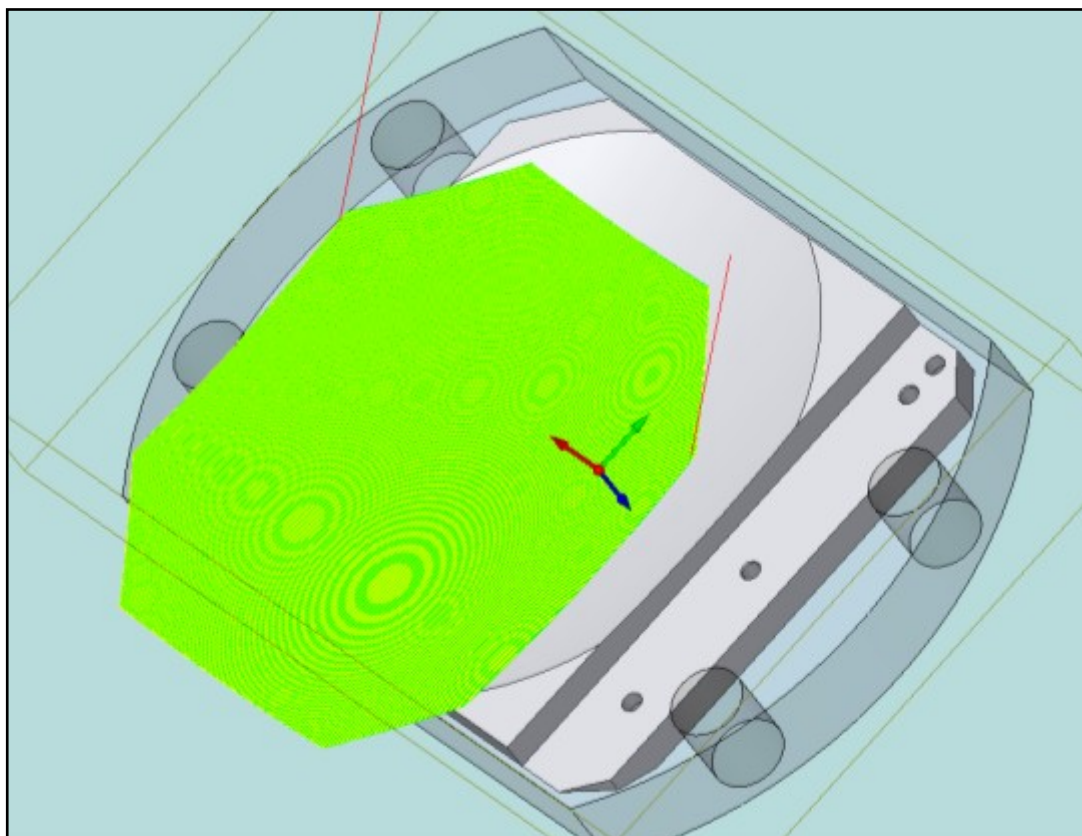
Obr. 3.5.7 Hrubování tvaru s přídávkem na plochu 0,5 mm a bočním krokem 1,5 mm; č. op. 60.



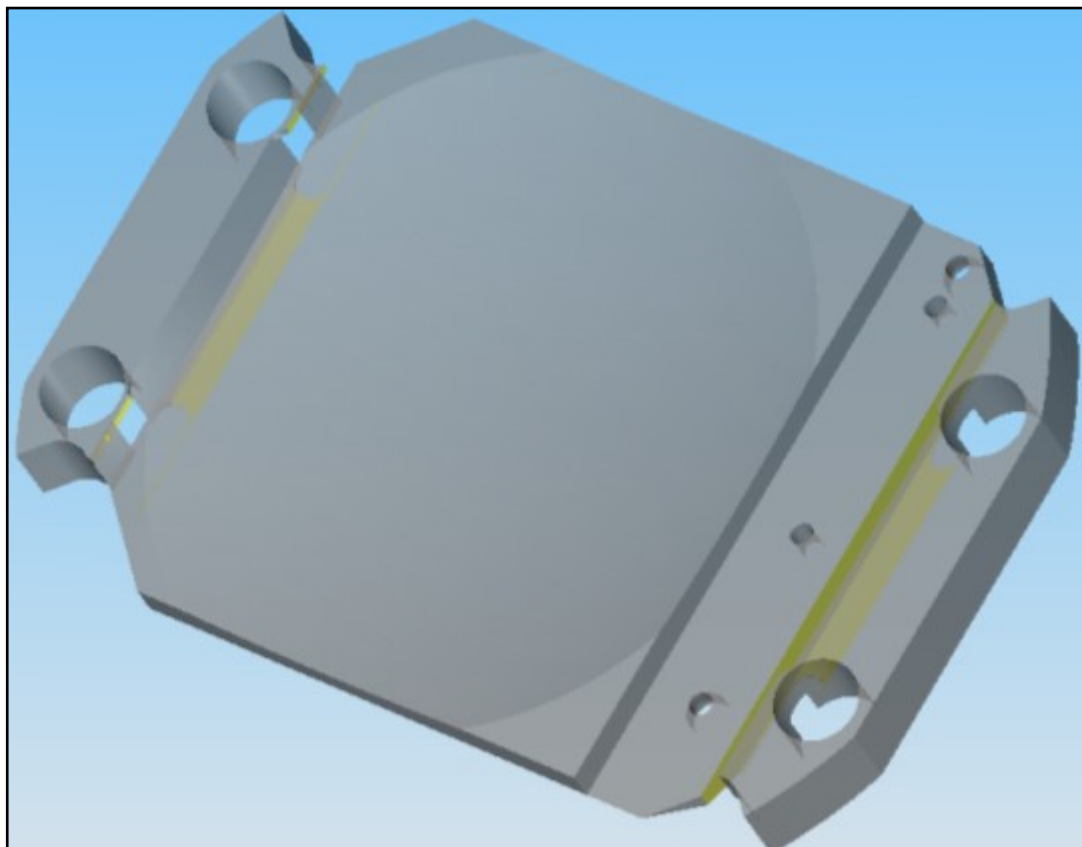
Obr. 3.5.8 Hrubování tvaru s přídavkem na plochu 0,25 mm a bočním krokem 1,2 mm; č. op. 90.



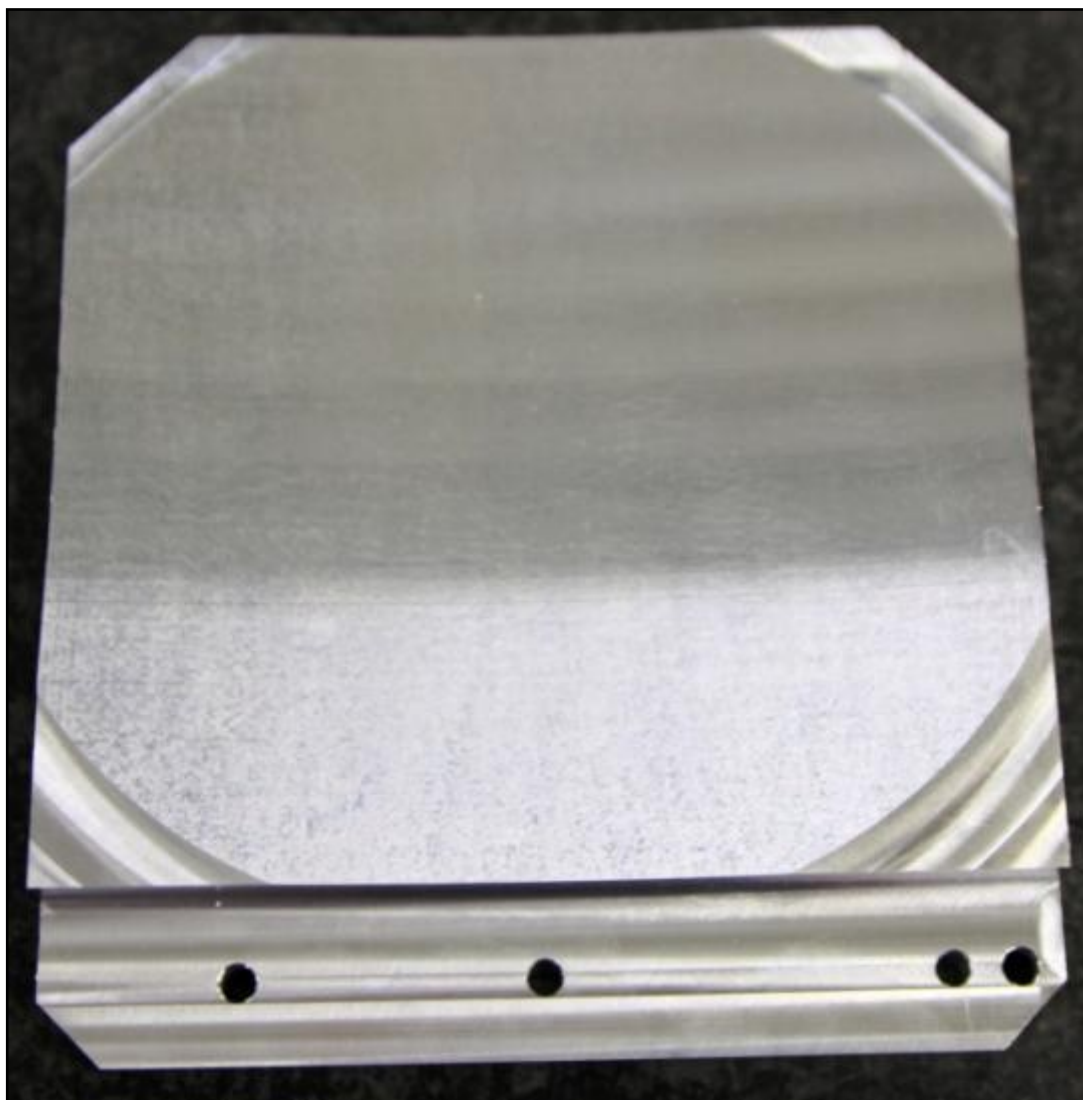
Obr. 3.5.9 Hrubování tvaru s přídavkem na plochu 0,25 mm a bočním krokem 1,2 mm; č. op. 90.



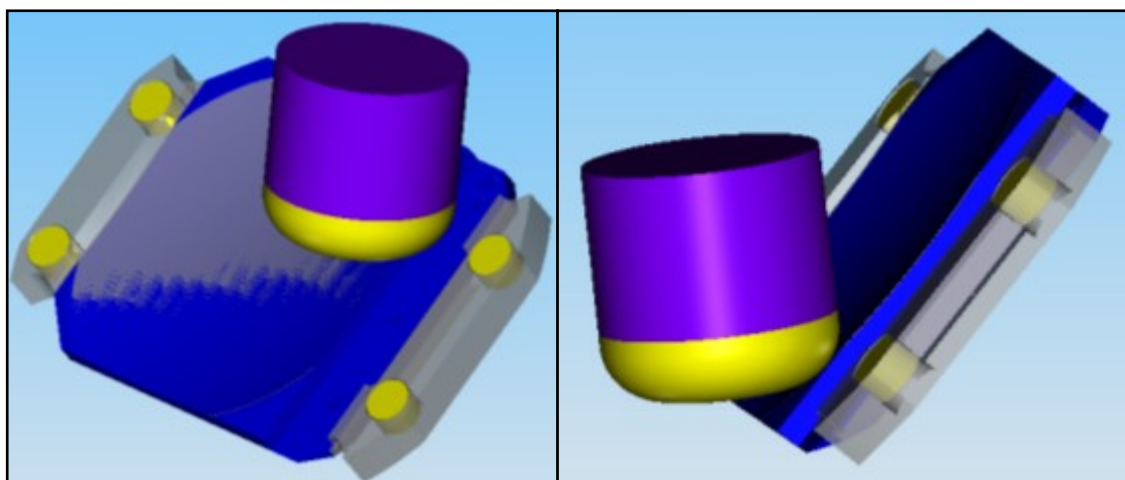
Obr. 3.5.10 Frézování na čisto s bočním krokem 0,21 mm; č. op. 180.



Obr. 3.5.11 Hotové zrcadlo po frézování na čisto (po odpíchnutí), č. op. 180.



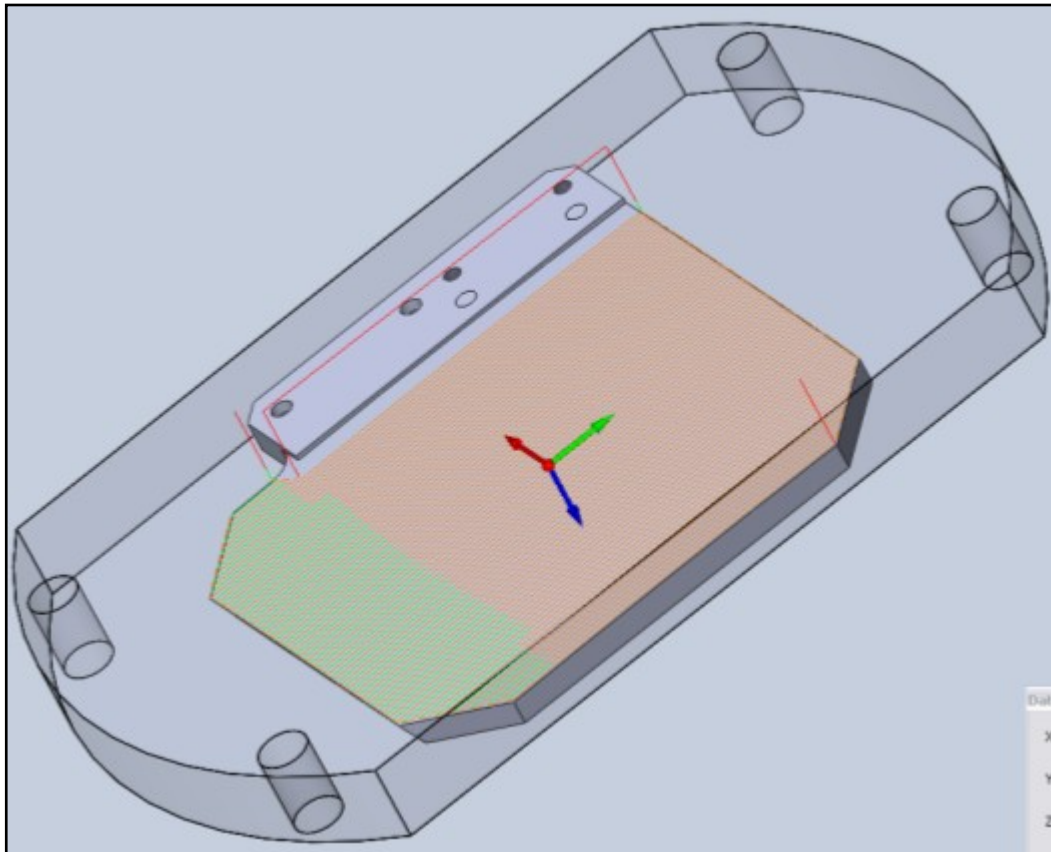
Obr. 3.5.12 Hotové zrcadlo po frézování po frézování na čisto (po odpíchnutí); č. op. 180.



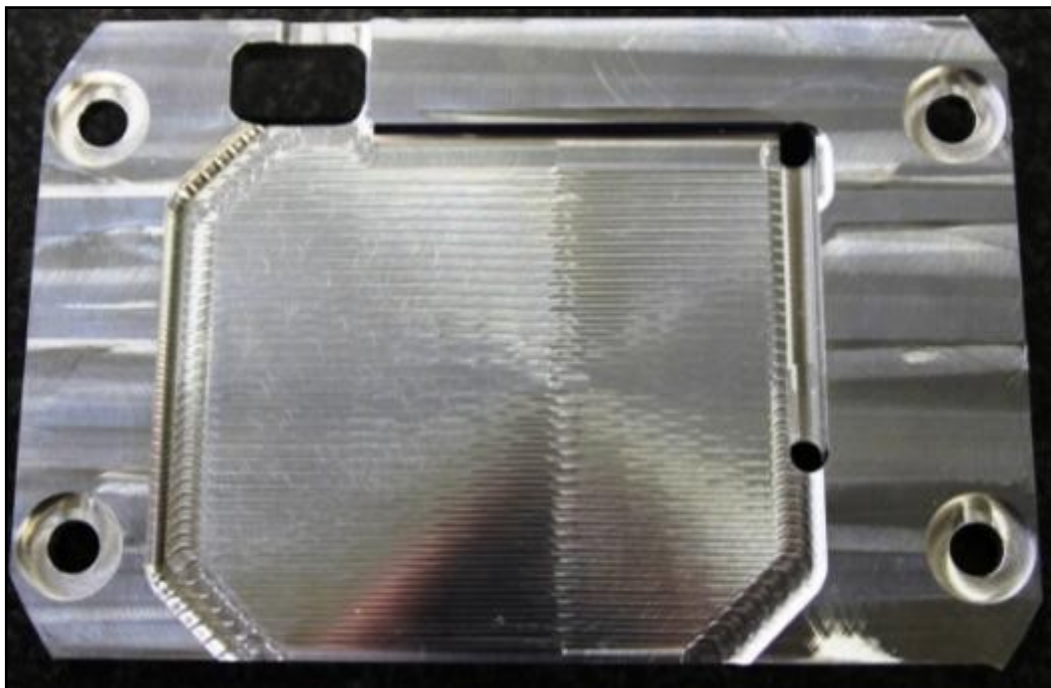
Obr. 3.5.13 Horní a dolní poloha nástroje při obrábění na čisto.

3.5.5 Frézování hyperbolického zrcadla

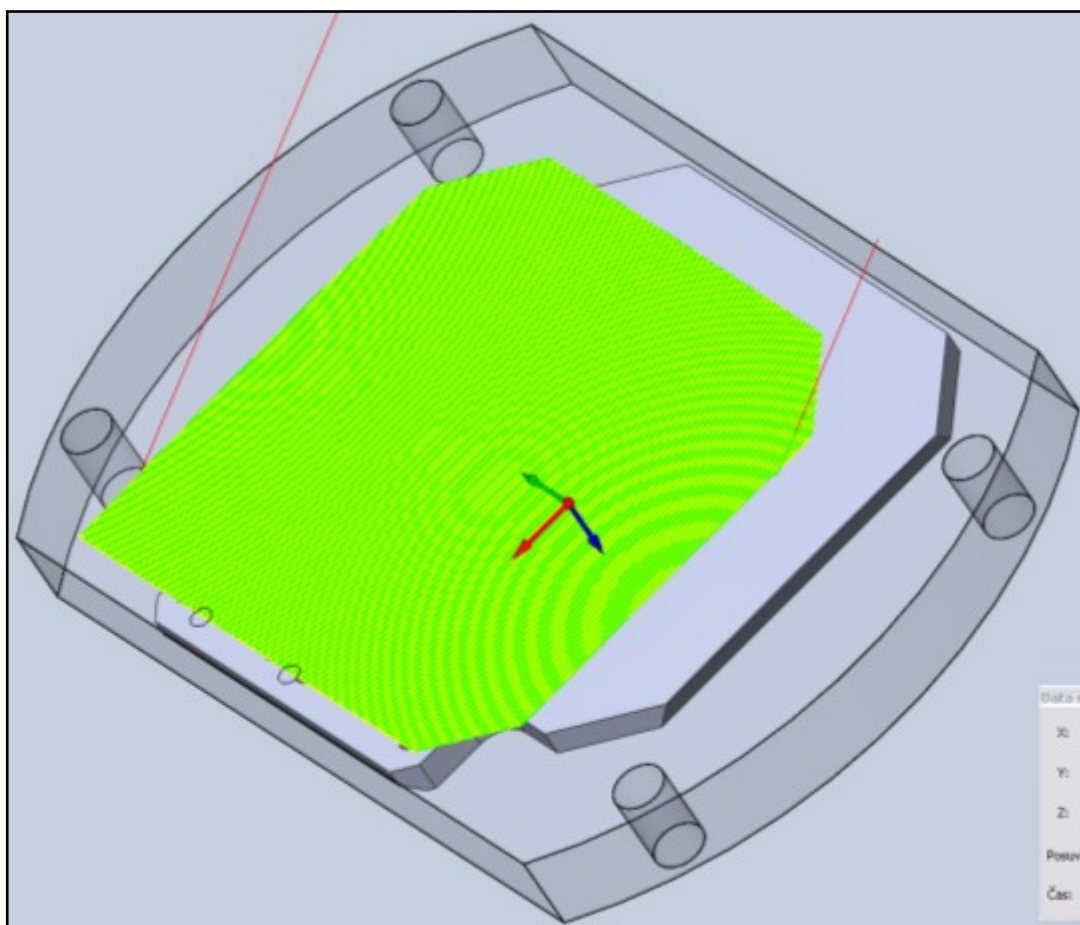
Na obrázcích 3.5.14 až 3.5.18 jsou zobrazeny namodelované dráhy nástroje a vyrobená součást po dané operaci.



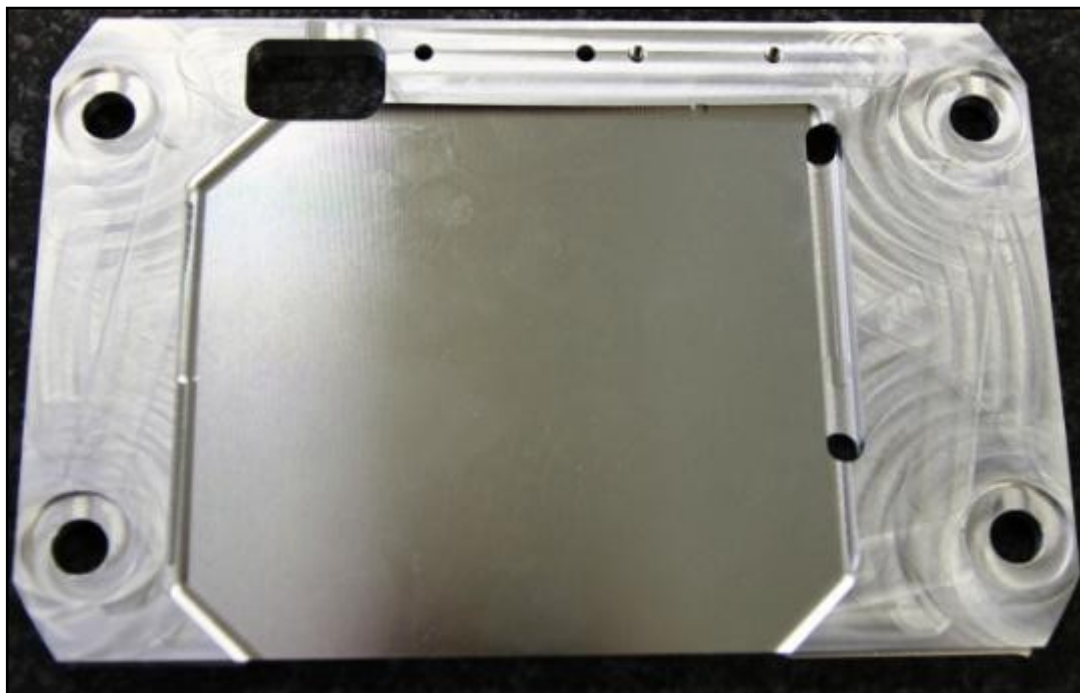
Obr. 3.5.14 Hrubování s přídavkem na plochu 0,5 mm a bočním krokem 1,5 mm; č. op. 60.



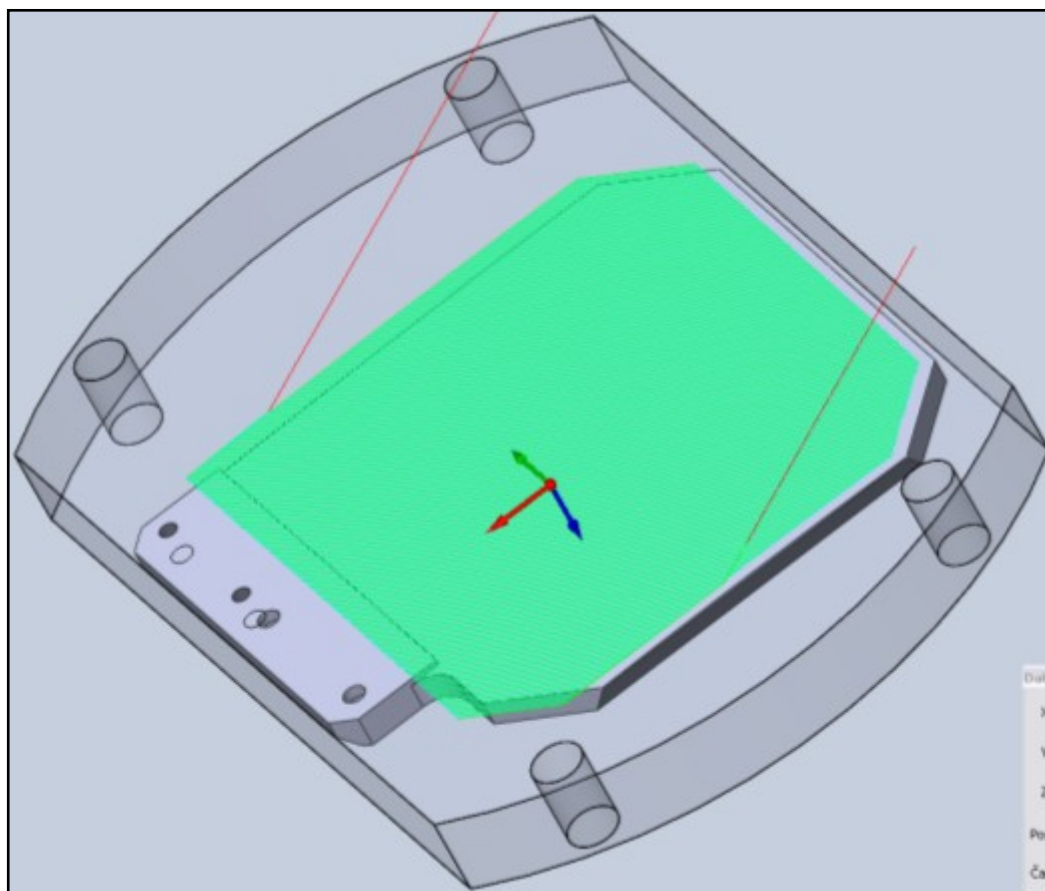
Obr. 3.5.15 Hrubování s přídavkem na plochu 0,5 mm a bočním krokem 1,5 mm; č. op. 60.



Obr. 3.5.16 Hrubování s přídávkem na plochu 0,25 mm a bočním krokem 0,5 mm; č. op. 60.



Obr. 3.5.17 Hrubování s přídávkem na plochu 0,25 mm a bočním krokem 0,5; č. op. 60.



Obr. 3.5.18 Frézování na čisto s bočním krokem 0,21 mm; č. op. 190.

3.6 Mezioperační a výstupní kontrola po frézování

3.6.1 Měřicí přístroj

Pro mezioperační i finální měření rozměrů povrchu (R_a , R_z , R_t), tvarové a rozměrové přesnosti je použito 3D měřicí CNC centrum Crysta-Apex C 7106 od firmy Mitutouyo, který je zobrazen na obr. 3.6.1 a jehož základní technické parametry jsou uvedeny v tab. 3.6.1



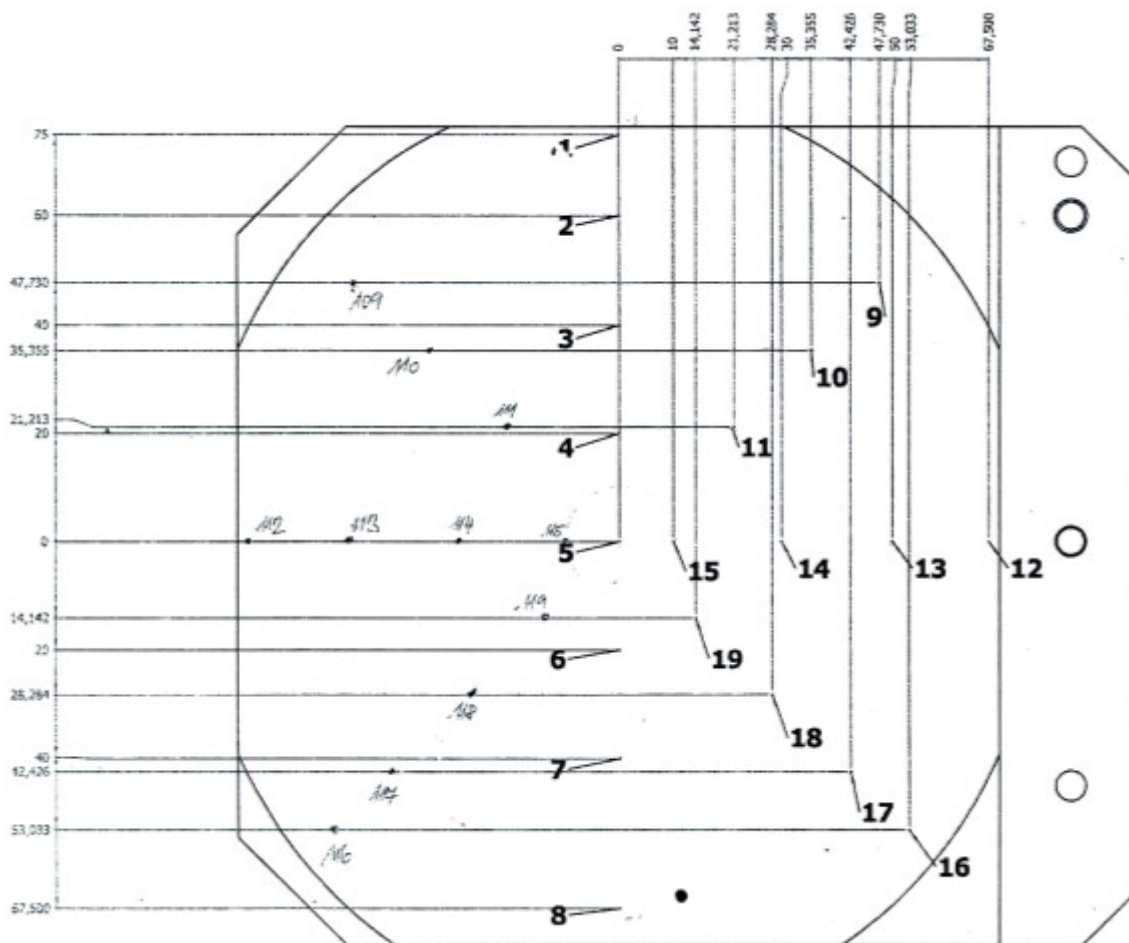
Obr. 3.6.1 Měřicí centrum Crysta-Apex C 7106.⁴¹

Tab. 3.6.1 Technická specifikace 3D měřicího centra Crysta-Apex C 7106.⁴¹

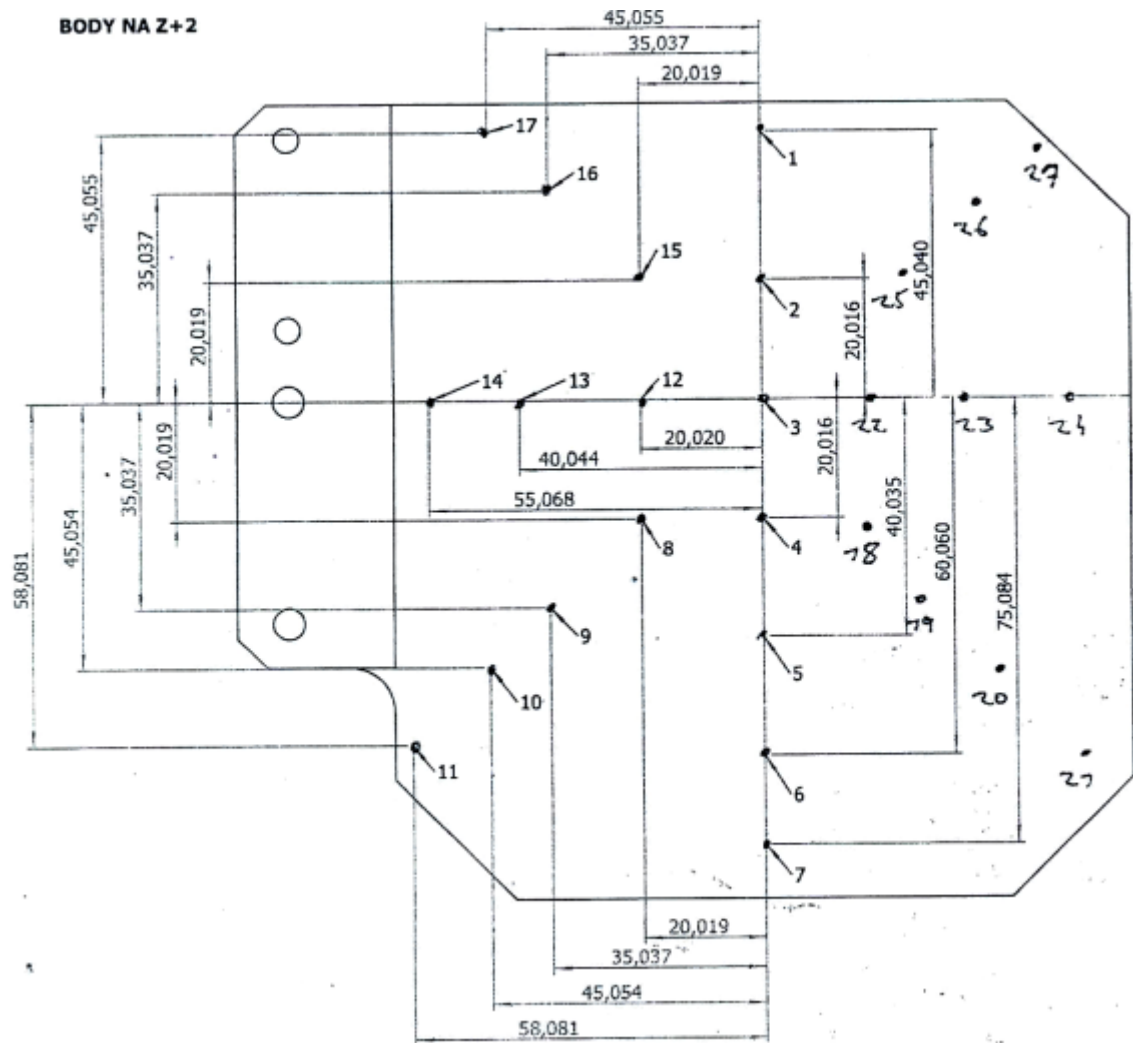
CNC Crysta-Apex C 7106			
Rozměry pracovní oblasti		Rozměry stroje	
X	705 mm	Šířka	1470 mm
Y	1005 mm	Délka	1950 mm
Z	605 mm	Výška	2730 mm
Měřicí stůl		Měřená součást	
Materiál	žulový kvádr	Maximální výška	800 mm
Rozměry	(860 x 1720) mm	Maximální váha	1000 kg
Pracovní teplota		Rozlišitelnost měření	0,0001 mm
Teplota v okolí stroje	18÷22 °C	Rychlost měření	8 mm·s ⁻¹
Změna za hodinu	1,0 °C	Tlak vzduchu	0,4 Mpa
Změna za den	2,0 °C	Váha stroje	1951 kg

3.6.2 Měření tvarové a rozměrové přesnosti

Během jednotlivých operací frézování se provádí mezioperační kontrola, kdy se na jednotlivých typech zrcadel měří stanovené kontrolní body (viz obr. 3.6.2 a 3.6.3) a jakost povrchu. Na obr. 3.6.4 jsou uvedeny naměřené hodnoty jakosti povrchu pro eliptické zrcadlo po poslední operaci frézování a na obr. 3.6.5 pro hyperbolické. Měřicí protokol eliptického i hyperbolického zrcadla je uveden v příloze č. 1.

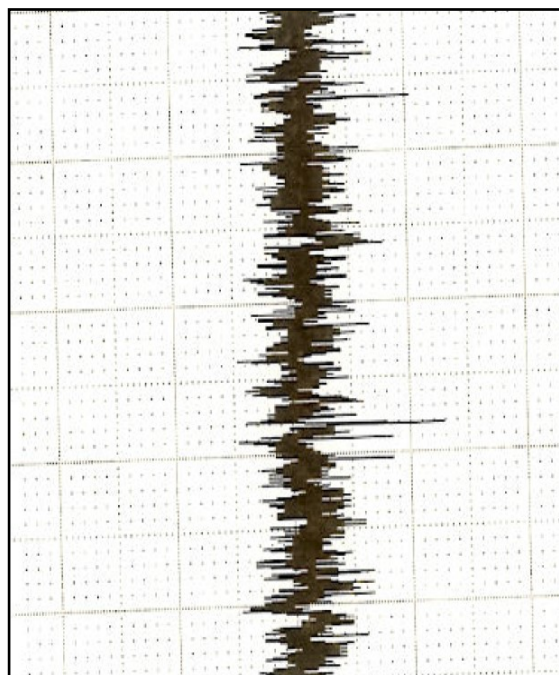


Obr. 3.6.2 Kontrolní body na eliptickém zrcadle.⁴¹

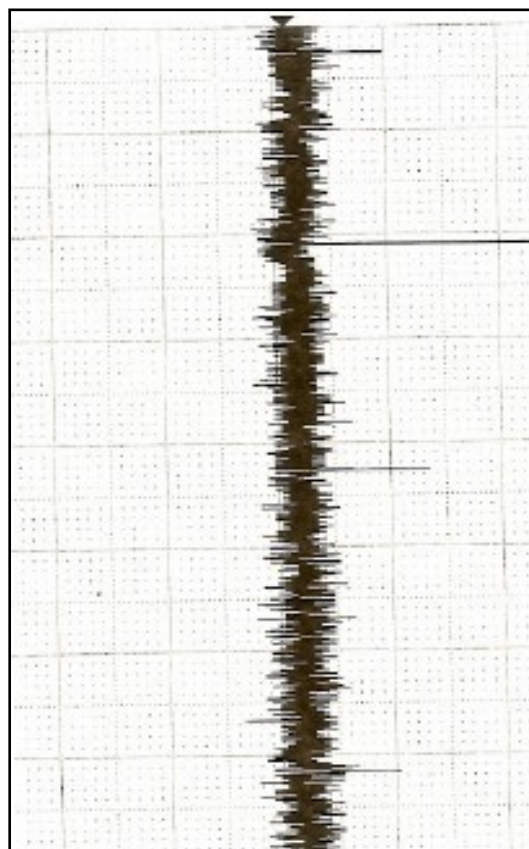


Obr. 3.6.3 Kontrolní body na hyperbolickém zrcadle.⁴¹

ELIPTICKÉ ZRCADLO	
Datum:	04. 02. 2011
Čas:	13:36:03
Ra	= 0,027 μm
Rz	= 0,239 μm
Rt	= 0,350 μm
V-Mag	= 50000
H-Mag	= 20
V-Div	= 0,2 μm / 10mm
H-Div	= 500 μm / 10mm

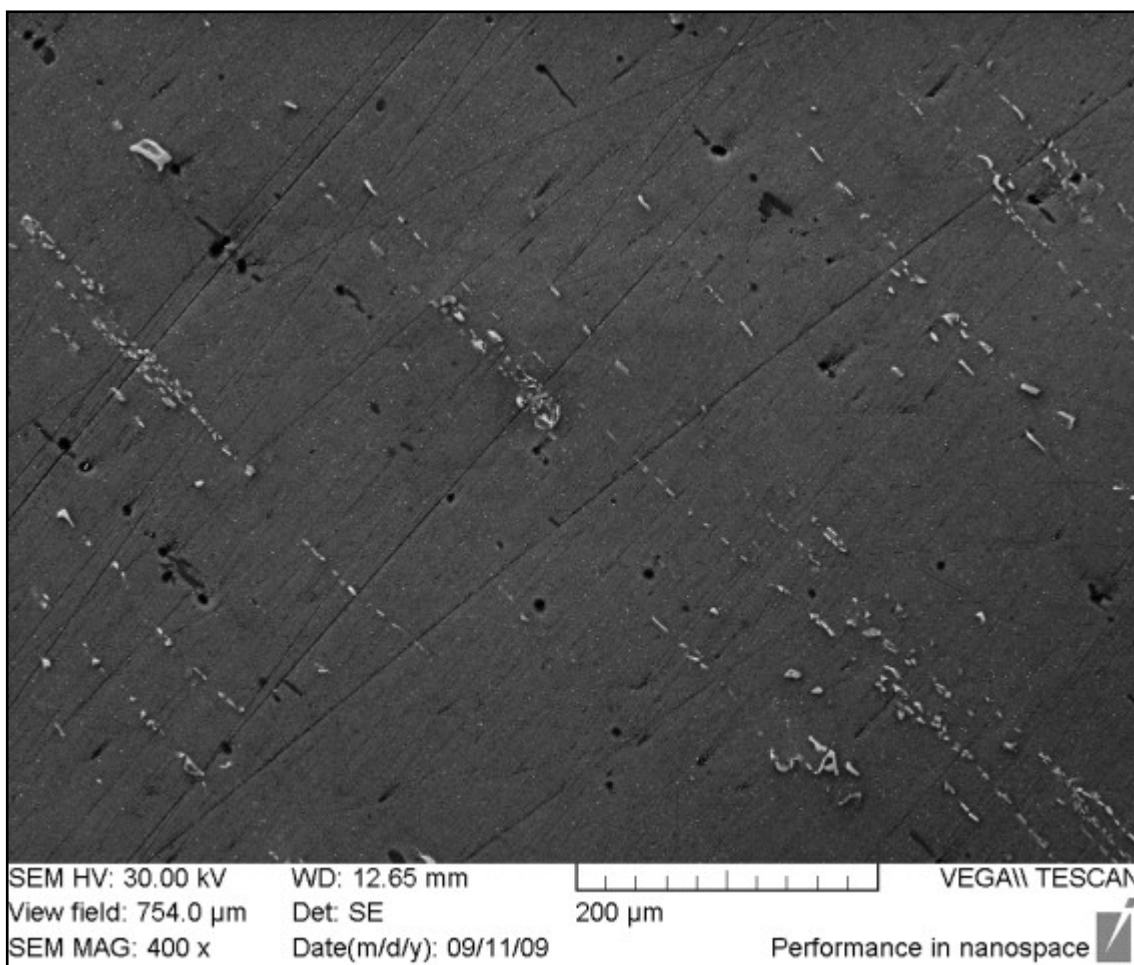
Obr. 3.6.4 Jakost povrchu eliptického zrcadla.⁴¹

HYPERBOLICKÉ ZRCADLO	
Datum:	04. 02. 2011
Čas:	13:39:05
Ra	= 0,025 μm
Rz	= 0,198 μm
Rt	= 0,638 μm
V-Mag	= 50000
H-Mag	= 20
V-Div	= 0,2 μm / 10mm
H-Div	= 500 μm / 10mm

Obr. 3.4.5 Jakost povrchu hyperbolického zrcadla.⁴¹

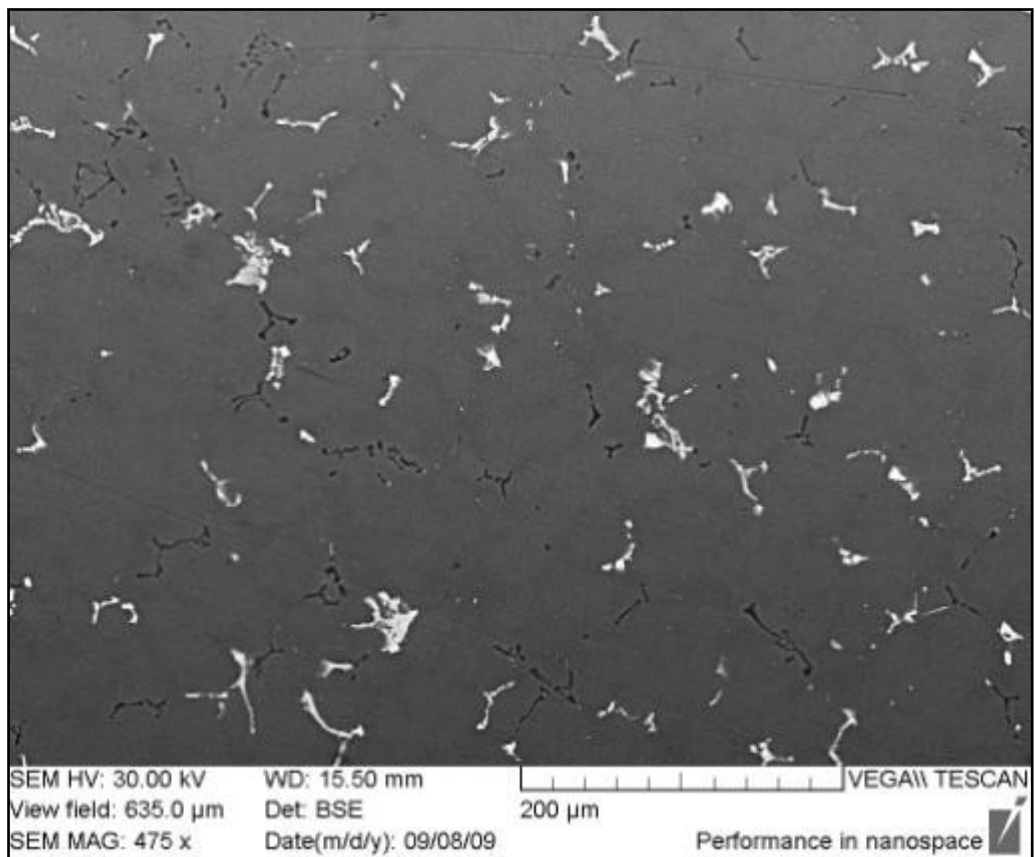
4 LEŠTĚNÍ FUNKČNÍCH PLOCH

Po frézování eliptického a hyperbolického tvaru zrcadel následuje operace ruční leštění. Na funkční plochy nejsou zadány požadavky na hodnoty parametrů povrchu. Cílem je odstranit nerovnosti a stopy po předešlých operacích, které jsou zřetelné na obr. 4.1. Pokud by nedošlo k odstranění těchto povrchových rýh, po následném chemickém niklování by i výsledná povlakovaná plocha nesla znaky nerovností a nesplňovala by tedy stanovené požadavky na jakost povrchu.

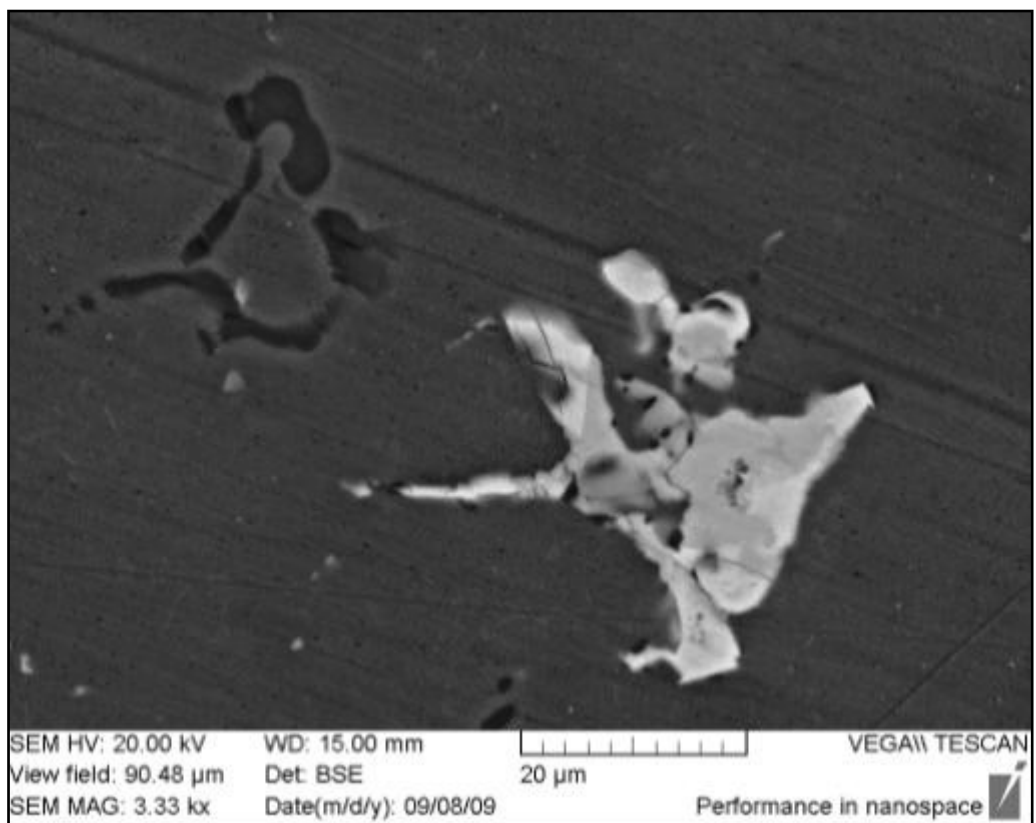


Obr. 4.1 Povrchová struktura slitiny AW 6061 T651 po frézování.⁴¹

Zdánlivě jednoduchá operace však skrývá řadu překážek. Prvním problémem bylo docílení rovnoměrného pohybu a tedy úběru materiálu po tvarových plochách. Což se ukázalo strojně jen těžko proveditelné. Další překážkou jsou sloučeniny legur, které jsou patrné na obr. 4.2 a 4.3. Chemické složení jednotlivých útvarů je uvedeno v tab. 4.1a příloze č. 2. Tyto vyloučené fáze jsou tvrdší, než základní materiál (tedy slitina hliníku). Při leštění dochází k úběru základního materiálu, kdežto úběr vyloučených fází je minimální. Tím dochází ke zhoršení parametrů jakosti povrchu.



Obr. 4.2 Povrchová struktura slitiny AW 6061 T651 po frézování.⁴¹



Obr. 4.3 Detail povrchové struktury slitiny AW 6061 T651.⁴¹

Tab. 4.1 Chemický rozbor struktur ve slitině z obr. 4.3.⁴¹

Tmavá plocha						
El	AN	Net	Unn [wt%]	Norm [wt%]	Atom [at%]	Error [%]
Mg	12	110262	45,13	40,98	43,90	2,50
Al	13	55896	39,58	35,94	34,69	1,90
Si	14	35207	25,43	23,09	21,41	1,10
Bílá plocha						
El	AN	Net	Unn [wt%]	Norm [wt%]	Atom [at%]	Error [%]
Al	13	32460	75,26	74,83	85,18	3,70
Fe	26	2496	14,86	14,78	8,13	0,50
Mn	25	1761	9,20	9,15	5,12	0,40
Mg	12	468	1,25	1,24	1,57	0,10
Šedá plocha						
El	AN	Net	Unn [wt%]	Norm [wt%]	Atom [at%]	Error [%]
Al	13	39439	99,70	94,73	94,18	4,80
Mg	12	2714	5,55	5,27	5,82	0,40

Poznámka:

El:	Element	Chemický prvek.
AN:	Atomic Number (Z)	Atomové číslo (Z).
Net:	Net counts	Počet RTG kvant připadajících na charakteristické píky daného prvku (pouze informativní charakter).
Unn:	Unnormalized weight	Nenormalizované hmotnostní procenta - standardní výstup naměřeného spektra = relativní poměry prvků jsou přesné, absolutní přibližné (suma může vycházet i víc než 100 %).
Norm:	Normalized weight	Normalizované hmotnostní procenta (přepočet na 100 % celkem).
Atom:	Atomic percent	Atomární procenta - přepočet dle normalizovaných wt% dle atomových hmotností.
Error:	Odchylka měření	Standardní odchylka (sigma 1) přesnosti metody pro daný prvek.

Po chemickém niklování se leštění provádí tentokrát s již zadanými požadovanými parametry, které jsou $R_t < 0,2$ a $R_a < 0,1$. Odebíraná vrstva tvoří maximálně 5 μm z niklového povlaku.

Další informace k této kapitole bohužel nejsou známé ani dostupné, protože se jedná o know-how firmy, která tuto kooperaci provádí.

5 POVRCHOVÉ ÚPRAVY

5.1 Rozdělení povrchových úprav

Při použití všech kovových i nekovových výrobků v průmyslové výrobě či jiných odvětvích hospodářství, dochází k jejich interakci s určitým provozním prostředím a často jsou tyto výrobky vystaveny vzájemnému styku s jinou součástí. Tím dochází k degradaci jejich povrchových vrstev vlivem koroze, opotřebení, abraze a jiných provozních vlivů.

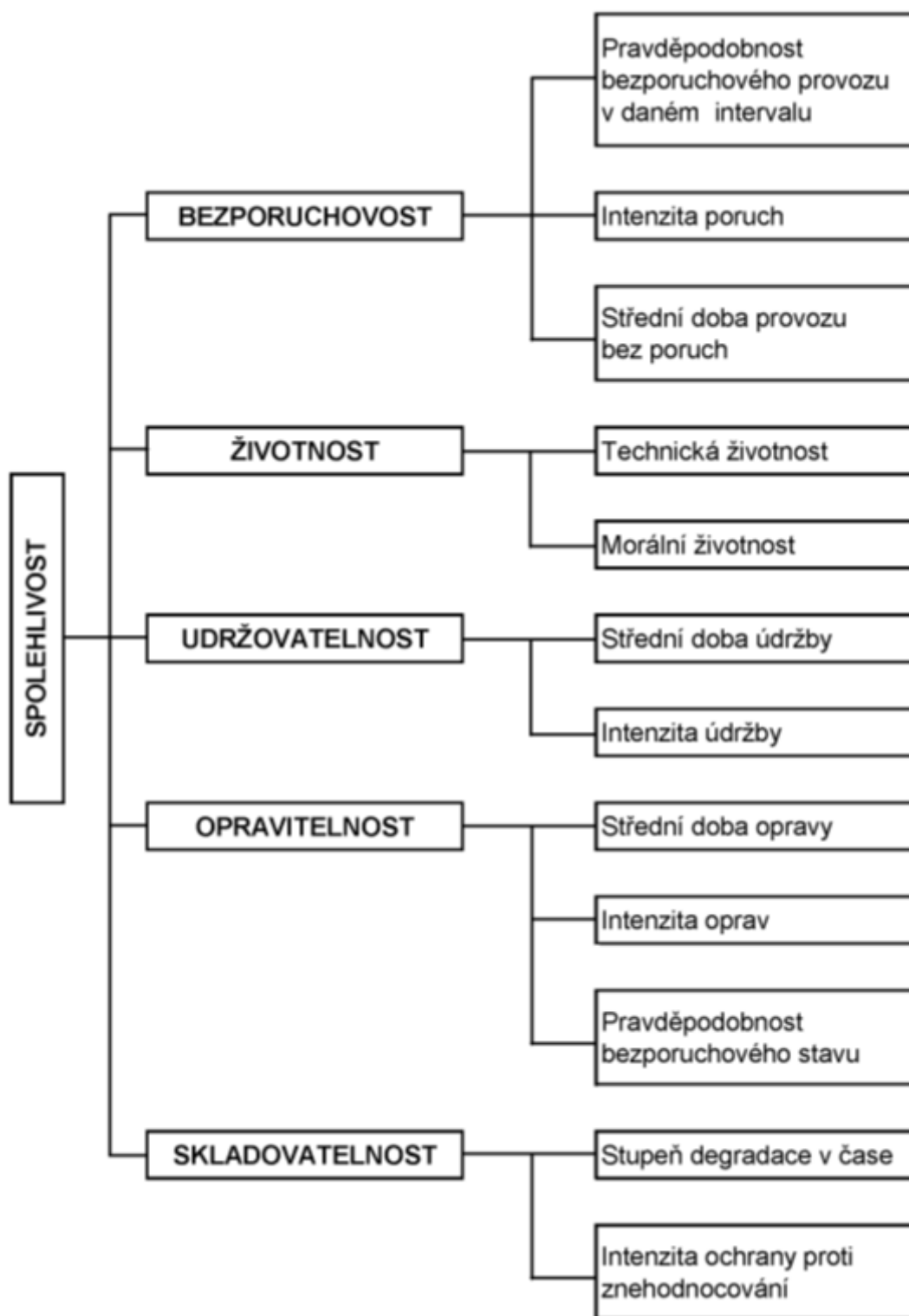
Z tohoto důvodu se již od starověku využívají rozmanité povrchové úpravy, které zvyšují požadované vlastnosti součástí pro dosažení maximální jakosti, optimální funkčnosti, provozní spolehlivosti, dlouhodobé životnosti a řešení otázky vnějšího vzhledu. Mezi nejčastěji požadované vlastnosti povrchu patří zvýšená otěruvzdornost a žáruvzdornost, tvrdost, design (vzhledové vlastnosti), změna elektrické, magnetické, tepelné a fotonické vodivosti a v neposlední řadě i zvyšování korozní odolnosti. Teorie povrchových úprav tedy sdružuje obsáhlý souhrn informací z fyziky, chemie, biochemie, elektrochemie, materiálového inženýrství a metalurgie.

Cílem úpravy povrchu je obecně dosažení a zlepšení těchto vlastností:

- tribologických (zvýšení kluzných vlastností, zvýšení odolnosti vůči opotřebení),
- mechanických povrchu (tvrdost, houževnatost, odolnost únavě),
- chemických (korozní a difúzní odolnost, katalytická schopnost),
- magnetických, vodivostních, optických, optoelektronických,
- estetických.

Je zřejmé, že povrchové úpravy mají přímý dopad na souhrnnou jakost. Vhodnou povrchovou úpravou mohou být pozitivně ovlivněny charakteristiky spolehlivosti uvedené na obr. 5.1.1. Pro výrobek je také významný pojem **technická spolehlivost**. Ta je definována jako souhrn vlastností, které mu umožňují plnit technickými předpisy stanovené funkce během požadovaného provozního období (životnosti).

Při volbě druhu povrchové úpravy je třeba brát v úvahu funkčnost, technickou životnost, rychlost opotřebovávání, konstrukční a technologické řešení výrobku. Ale také proveditelnost povrchové úpravy a požadavky na výslednou jakost povrchu (povlaku). Nevhodnou volbou povrchové úpravy může dojít buď k poškození součásti (deformace a rozměrové změny) nebo k rapidnímu zvýšení výrobních nákladů.



Obr. 5.1.1 Základní charakteristiky spolehlivosti a vybrané kvantifikovatelné veličiny.⁸

U vytvářených vrstev povlaků je zaveden pojem **technická životnost povlaku**, který vyjadřuje dobu provozu nebo dobu skladování výrobku až do okamžiku mezního znehodnocení dané vrstvy či povlaku stanoveného technickou dokumentací, tzn. narušení životnosti.

Povlaky mohou být děleny z mnoha hledisek, např. fyzikálních, chemických, účelových či funkčních. Z makroskopického hlediska je předmětné dělení dle chemické podstaty (charakteru) povlaku a způsobu jeho vytvoření²²:

1.) ANORGANICKÉ POVLAKY:

a) **Kovové povlaky** vytvořené:

- chemickým bezproudovým pokovováním,
- elektrolytickým (galvanickým) pokovováním,
- pokovováním v roztavených kovech,
- difúzním pokovováním,
- pokovováním ve vakuu (PVD, CVD),
- žárovým stříkáním,
- plátováním (výbuchem, válcováním),
- navařováním.

b) **Nekovové povlaky** vytvořené:

- pasivováním,
- oxidací (konverzní vrstvy),
- smaltováním,
- žárovým stříkáním keramických materiálů,
- vytvrzováním za studena (malty),
- vyzdívkami a obklady,
- anorganickými nátěry.

2.) ORGANICKÉ POVLAKY:

a) **Povlaky z nátěrových hmot** vytvořené:

- ručně štětcem,
- stříkáním,
- máčením,
- poléváním,
- stíráním,
- navalováním,
- elektroforeticky.

b) **Povlaky z plastů** vytvořené:

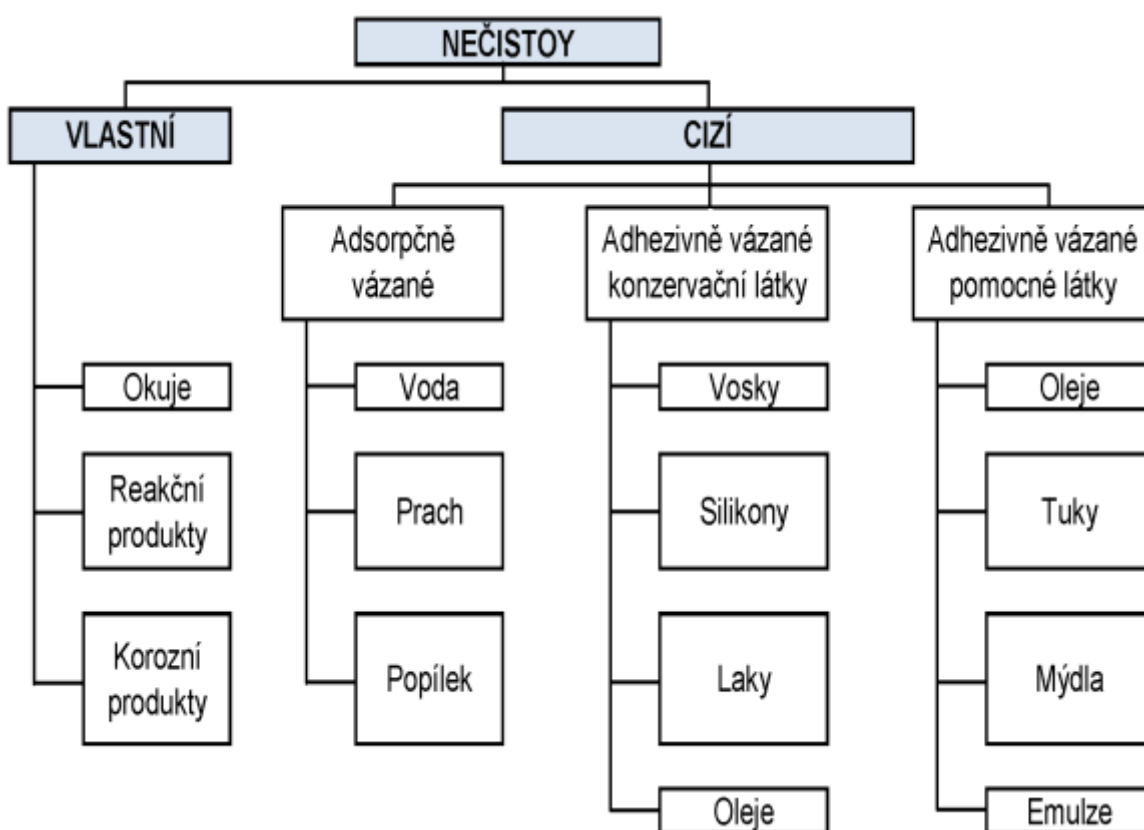
- stříkáním práškových plastů,
- žárovým stříkáním,
- vířivým nanášením,
- plátováním,
- nanášením plastisolu.

c) **Povlaky pro dočasnou ochranu** vytvořené:

- konzervačními prostředky,
- vosky, tmely a speciálními ochrannými nátěry.

Před vlastní aplikací určitého druhu technologie povrchové úpravy je třeba povrch požadované součásti zbavit nečistot vázaných mechanicky (prach, třísky), chemicky (okuje, oxidy, koroze), a nedokonalostí po předchozím opracování, aby bylo dosaženo povrchu kovově čistého s požadovanou jakostí a aktivního vůči následnému pokovování. Druhy nečistot jsou uvedeny na obr. 5.1.2.

Kvalitním splněním těchto úkonů se zajišťují vhodné podmínky pro dostatečnou přilnavost povlaku, jeho celistvost, stejnoměrnou tloušťku a vyhovující vzhled. Proces odstraňování vlastních nečistot se nazývá **moření**, kdežto proces odstraňování cizích nečistot **odmašťování**.



Obr. 5.1.2 Druhy nečistot.⁸

5.2 Mechanické předúpravy povrchu

Předběžnými mechanickými úpravami se vytváří určitá požadovaná jakost a kvalita povrchu součásti (hodnocená geometrickými parametry). Jejich účelem je zajistit především:

- očištění povrchu od hrubých nečistot,
- podmínky pro vyhovující přilnavost následujících vrstev (povlaků),
- podmínky pro zvýšení odolnosti proti korozi a opotřebení,
- povrch odpovídající vzhledovým požadavkům,
- zlepšení mechanických vlastností povrchu.

Technologie používané k mechanickým předúpravám mohou být v procesu výroby součásti zařazeny i jako konečné operace. Mezi nejběžnější patří:

- broušení,
- leštění,
- kartáčování,
- omílání,
- otryskávání,
- otryskávání suchým ledem,
- čištění vysokotlakým vodním paprskem.

Použití broušení pro tyto účely je však odlišného charakteru. Nedochozí při něm k velkému úběru materiálu jako při přesném broušení, ale cílem je odstranění nerovností a sjednocení geometrie i kvality povrchu. Tato operace je ovšem jednou z nejnákladnějších mechanických úprav, proto se její použití volí, jen pokud jsou na jakost povrchu kladeny vysoké požadavky.

Hranice mezi broušením a leštěním není přesně definována. Leštění je chápáno jako operace, při níž dochází k úběru menší vrstvy než při broušení, navíc dochází k plastické deformaci povrchové vrstvy při dosažení jakosti povrchu Ra pod 0,1 μm a vysokého lesku. Leštění může být použito pro úpravu jak základního materiálu, tak výsledného povlaku. Na konečnou výši lesku povrchové vrstvy nebo povlaku má vliv kromě použitého nástroje a jeho obvodové rychlosti i použitá leštící pasta. Mimo homogenizované tukové komponenty obsahují pasty různé abrazivní látky jako např. leštící zeleň (oxid chromitý), leštící červeň (oxid železitý), umělý korund (oxid hlinitý), vídeňské vápno (oxid vápenatý), pemzu aj. Při předlešťování se používají tvrdší látkové, plstěné nebo kožené kotouče a ostřejší i mastnější pasty při větších obvodových rychlostech. Pro finální dolešťování pak měkké kotouče, jemnější a sušší pasty při menších obvodových rychlostech.²⁵

5.3 Chemické a elektrochemické předúpravy povrchu

Nejčastějšími technologickými procesy při těchto úpravách jsou odmašťování, moření, odrezování a leštění. Chemické a elektrochemické úpravy tedy slouží k odstranění nečistot z povrchu součásti vázaných chemickými nebo fyzikálními silami, převedení nečistot do stavu emulze či roztoku a zabránění jejich zpětnému vyloučení na povrchu dané součásti.

1.) Odmašťování (podle druhu použitých prostředků) může probíhat:

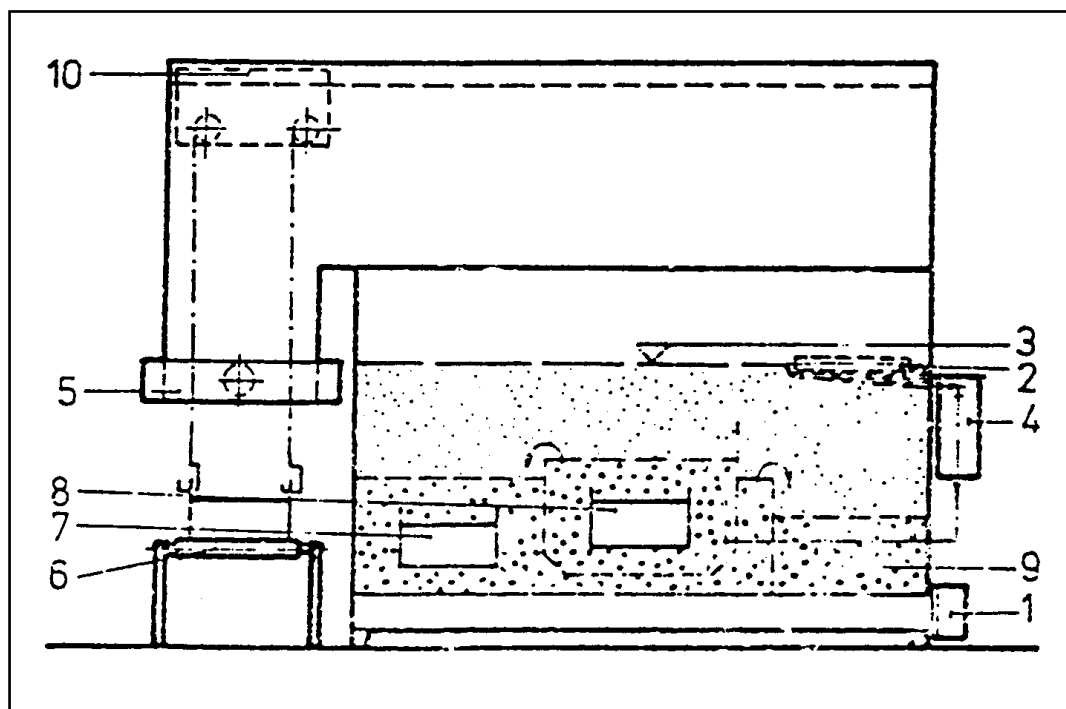
- v organických rozpouštědlech,
- ve vodných alkalických roztocích,
- emulzí.

a) Odmašťování v organických rozpouštědlech je nejjednodušší způsob odmašťování velmi a středně znečištěných povrchů s vysokou čistící účinností při relativní jednoduchosti procesu. Nevýhodou tohoto procesu je, že jej nelze použít na vlhké povrchy, nelze jím odstraňovat heteropolární nečistoty (anorganické soli, pot atd.) a likvidace rozpouštědel je z environmentálního hlediska velice obtížná.

Odmašťování je v podstatě fyzikální rozpouštění mastnot v daném rozpouštědle. Jeho rychlost závisí na přísunu rozpouštědla k povrchu a následného odsunu nasyceného roztoku mastnoty do rozpouštědla (prouděním). Rozpustnost mastnot se zvyšuje s rostoucí teplotou rozpouštědla (analogicky je největší při bodě varu rozpouštědla). Používají se rozpouštědla hořlavá (benzín, petrolej, nafta) a nehořlavá (chlorované uhlovodíky, chlorofluorované deriváty metanu, etanu a etylenu).

Čistění hořlavými rozpouštědly se provádí zpravidla jen ručně. Jejich výhodou je poměrná levnost, naopak nevýhodou je právě hořlavost, eventuální výbušnost a malá rozpouštěcí schopnost na mastnoty z leštících past. Na hrubé čistění silných vrstev nečistot se používá petrolej, po kterém ale povrch zůstává slabě mastný a je nutno jej odmastit ještě dalšími prostředky.

Masivněji využívané jsou rozpouštědla z chlorovaných uhlovodíků (trichloretylen, tetrachloretylen, tetrachloretan, tetrachlormetan, perchloretylen). Mají vynikající rozpustnost tuků a olejů, jsou nehořlavá a nenapadají povrch kovu. Ovšem mají narkotizační účinky a mohou se rozkládat vlivem katalytického působení kyselin a kovů, tepla a světla (vzniká chlorovodík popř. jedovatý fosgen, který způsobuje korozi strojů a zařízení). Proto je nutná pravidelná kontrola PH, použití tzv. stabilizátorů rozkladu (organické látky, které reagují alkalicky - fenoly, amíny) a především filtračního zařízení. Schéma linky na odmašťování je uvedeno na obr. 5.3.1.



1 - topení, 2 - chladič, 3 - hladina par, 4 - odlučovač vody (alkalizátor), 5 - odsávání,
6 - válečková dráha, 7 - lázeň I, 8 - lázeň II, 9 - destilátor, 10 - dopravník.

Obr. 5.3.1 Schéma zařízení pro odmašťování v chlorovaných uhlovodících.²²

Odmašťování v organických rozpouštědlech lze provádět těmito způsoby:²⁴

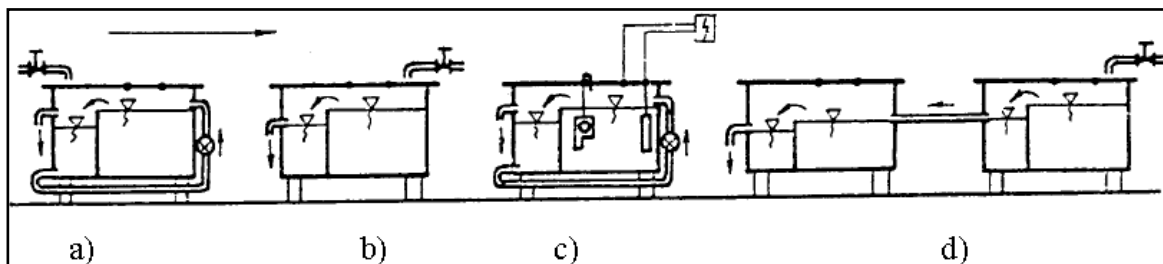
- **PONOREM**, předměty se postupně ponořují do čistého rozpouštědla, které může být studené nebo ohřáté.
- **STRÍKÁNÍM**, se používá pro velmi znečištěné předměty zpravidla v kombinaci s následným odmašťováním ponorem nebo parami rozpouštědel.
- **PARAMI ROZPOUŠTĚDEL**, které vznikají nad vroucí lázní s rozpouštědlem; na chladnějším povrchu součásti páry kondenzují a nastává tak rychlé rozpouštění mastnot, které trvá po tu dobu, než se součást ohřeje na teplotu par; je považováno za ekonomicky nejvýhodnější a nejrychlejší.

b) Odmašťování ve vodných alkalických roztocích je detergentní proces na odstraňování mastnot a nečistot fyzikálními a fyzikálně-chemickými pochody, jde především o:

- smáčení povrchu (vytěsnění mastných nečistot z povrchu součástí),
- dispergaci (rovnoměrné rozptýlení látky v kapalném prostředí) a emulgaci (vznik emulze mechanickým rozptýlením dvou vzájemně nemísitelných složek),
- stabilizaci vytvořených roztoků z nečistot,
- redepozici (zabránění zpětnému usazování nečistot na povrchu).

Oproti organickým rozpouštědlům mají několik podstatných výhod: jsou nehořlavé, mnohem levnější, odmašťovací proces je hygienicky méně závadný a hlavně mnohem účinnější (odstranění tuhých látek - nečistot nerozpustných v organickém rozpouštědle). Ovšem použití alkalických roztoků není vhodné pro čištění litiny před nátěry a pro předměty s malými otvory nebo tvarově velmi členité. V těchto případech je obtížné dosáhnout dokonalého oplachu. Následné zbytky roztoků způsobují korozi nebo nevhodné podmínky pro následující povrchovou úpravu (přilnavost, pórovitost). Pro odmašťování hliníku, cínu, zinku a jejich slitin se korozní účinek alkalických roztoků zmírňuje přidáním křemičitanů do lázně.

Odmašťovací lázně jsou složeny z alkalických anorganických solí, povrchově aktivních látek (smáčedla, tenzidy) a komplexotvorných látek (podporují vytvoření chemické vazby mezi vodným roztokem a mastnotou).



a - chemické odmašťování, b - jednostupňový oplach s přeplavem,
c - elektrolytické odmašťování, d - dvoustupňový oplach.

Obr. 5.3.2 Schéma odmašťovací linky v alkalických roztocích.²²

Alkalické prostředky (alkalické anorganické soli) jsou základní složkou odmašťovací lázně. Nejčastěji se používá hydroxid sodný NaOH (tzv. louh), nižší alkalitu mají roztoky s uhličitanem sodným Na₂CO₃. Fosforečnany mají dobrou dispergační schopnost a zlepšují následnou oplachovatelnou předmětů. Ze všech alkalických solí mají nejlepší smáčivost, emulgační a dispergační vlastnosti křemičitanu. Povrchově aktivní látky (PAL) snižují povrchové (smáčedla) a mezifázové (tenzidy) napětí.

Odmašťování v alkalických roztocích lze provádět těmito způsoby:

- **PONOREM** (ponoření předmětů do van), je sám o sobě relativně málo účinný proces (tab. 5.3.1), jeho účinnost se zvyšuje intenzivním mícháním (prouděním) lázně a zvyšováním její teploty.

Tab. 5.3.1 Pracovní podmínky při odmašťování ponorem.²⁴

Materiál	Teplota [°C]	Koncentrace [kg/100l]	Čas odmašťování [min]
Ocel	70 ÷ 95	3 ÷ 7	3 ÷ 7
Hliník, mosaz, zinek	60 ÷ 80		

- **STRÍKÁNÍM** (v postřikovacích strojích), které je mnohem účinnější než odmašťování ponorem, protože kromě chemického účinku má proud směsné kapaliny i mechanický účinek; příklad pracovních podmínek je uveden v tab. 5.3.2.

Tab. 5.3.2 Pracovní podmínky při odmašťování stříkáním.²⁴

Materiál	Teplota [°C]	Koncentrace [kg/100l]	Čas odmašťování [min]	Tlak [MPa]
Ocel	50 ÷ 70	2 ÷ 3	1 ÷ 2	0,1 ÷ 0,5
Hliník, mosaz, zinek	40 ÷ 60			

- **ULTRAZVUKEM**, je založeno na procesech kavitace, kdy se v kapalině vyvolávají tlakové a podtlakové vlny o tlaku přibližně 10^8 Pa a intenzitou $2\div 5 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ generátorem o frekvenci $20\div 40$ kHz; tento proces uvolňuje nečistoty i z nepřístupných míst povrchu a z jeho pórů.
- **VYSOKOTLAKOU PAROU nebo HORKÝM TLAKOVÝM PROUDEM ROZTOKU**, se užívá na čištění velkých, rozměrných a velmi silně znečištěných předmětů.
- **ELEKTROLYTICKY**, kdy je předmět ponořen do alkalického roztoku (elektrolytu), kterým prochází stejnosměrný proud; jeho průchodem dochází k disociaci vodíku a kyslíku na elektrodách - vznik bublin, které narušují adhezní síly mezi nečistotami a povrchem součásti a odtrhávají je od povrchu.

Katodický způsob zapojení je účinnější než anodické, protože dochází k vyvíjení dvojnásobného množství vodíku než kyslíku na anodě, což zvyšuje mechanický čistící účinek. V tomto případě však může u některých materiálů dojít k difuzi vodíku a tedy vzniku vodíkové křehkosti. Další nevýhodou může být sporadické vylučování kovových nečistot z lázně a jejich usazování na odmašťovaném předmětu ve formě slabě přilnutého povlaku.

Mimo vodíku se na katodě vylučují i alkalické kovy, které se ihned slučují s vodou na alkalický hydroxid. Dochází tedy k místnímu zvýšení alkality, což sice zintenzivňuje odmašťovací proces, ale u barevných kovů (Pb, Sn, Zn, Cu) může způsobovat jejich oxidaci. Katodický proces odmašťování by neměl trvat déle než 3 minuty.

Při anodickém zapojení nedochází ke vzniku vodíkové křehkosti, ale mechanický účinek vylučovaného kyslíku je menší než vodíku při katodickém zapojení. Často dochází vlivem působení kyslíku k částečnému naleptání povrchu, které je ale pro následné pokovování spíše pozitivním efektem. Působení kyslíku může způsobit ale i oxidaci mastnot, které se poté musí odstraňovat složitými technologickými pochody.

Katodicko-anodické zapojení se v praxi používá nejčastěji a využívá výhod obou jednotlivých zapojení. Převážná část procesu probíhá při katodickém zapojení, kde dochází k vyloučení nečistot. V následném anodickém zapojení dochází k jejich rozpuštění a k částečnému naleptání povrchu. U ocelových součástí je možno provést oba cykly v jedné vaně, protože ocel se v alkalickém roztoku nerozpouští. U barevných kovů je nutno provést každý z cyklů v samostatné vaně, protože jinak by docházelo ke zpětnému vylučování jak nečistot, tak i odleptaných částic zpět na povrch součástí.

c) Odmašťování emulzí spočívá v současnému použití organického rozpouštědla (obvykle destilační ropné frakce s vyšším bodem vzplanutí), organických emulgátorů (mýdla, sulfonáty) a alkalických prvků. Tato metoda sdružuje výhody odmašťování organickými rozpouštědly a alkalickými vodnými roztoky:²⁴

- organické rozpouštědlo snadno rozpouští mastnoty a dobře smáčí povrch,
- povrchově aktivní látky (tenzidy, emulgátory) jsou lépe rozpustné v organickém rozpouštědle než v alkalickém roztoku, proto působí účinněji na čištěný povrch,
- vysoký obsah emulgátorů lehce disperguje mechanické nečistoty,
- emulzní prostředky mají neutrální reakci, proto jsou vhodné pro všechny druhy kovů,
- zbytky emulgátorů a roztoků jsou snadno opláchnutelné vodou.

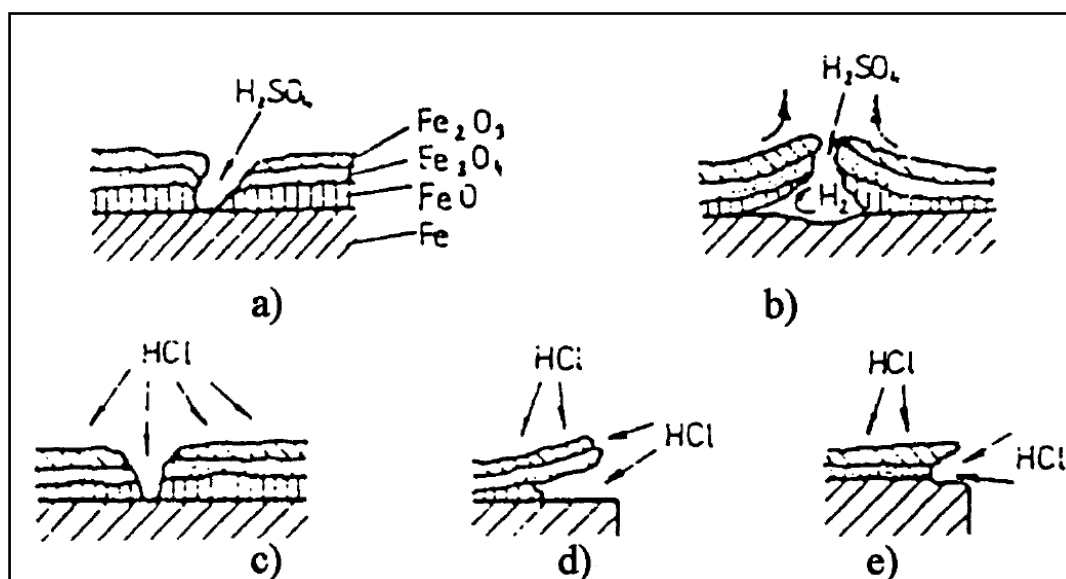
Emulzní odmašťování je možno aplikovat ponorem, stříkáním i ručním nanášením. Rozpouštědlo rozpouští mastnoty, snižuje jejich viskozitu a penetraci rozpouštědla do vrstvy nečistot podporují přítomné emulgátory. Poté se součást oplachuje vodou, kdy jsou nečistoty i zbytky rozpouštědla odplaveny ve formě vodné emulze. Proces je velmi účinný i při normální teplotě a vhodný pro velmi znečištěné (mastné) povrchy.

2.) Moření je chemický proces, kterým se z povrchu součásti odstraňují chemicky vázané nečistoty, především oxidační produkty (např. korze, okuje) vytvářené vlivem okolního prostředí, mechanickým, tepelným nebo chemickým zpracováním. Při průběhu procesu dochází k chemické reakci a následnému rozpouštění oxidačních zplodin převážně v kyselinách a kyselých solí, méně často v alkalických činidlech (neželezné kovy).

Kyselé prostředí (anorganické kyseliny a jejich směsi) se používá pro moření oceli, litiny, lehkých (Al) a těžkých neželezných kovů (Cu, Zn, Sn, Pb, Ni, Ti a jejich slitin). Alkalické prostředí se používá pro moření lehkých neželezných kovů (Al, Mg a jejich slitin). Velice důležitým parametrem je doba moření, tedy čas, po který je mořený předmět vystaven vlivu mořicího činidla. Pokud je čas delší, dochází k tzv. přemoření, které se projevuje nadměrným rozpouštěním podkladového kovu a případnou difuzí vodíku do materiálu, čímž dochází ke vzniku následné vodíkové křehkosti.

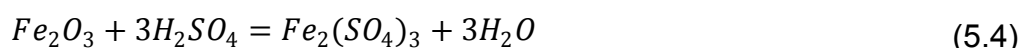
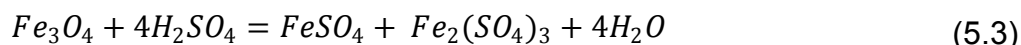
Urychlení procesu moření lze dosáhnout např. pohybem předmětů, změnou koncentrace mořidla nebo jeho prouděním či ohřevem lázně.

a) Moření oceli (viz. obr. 5.3.3) slouží k odstranění oxidů železa, které tvoří okuje a rez (především oxid železnatý FeO , oxid železnato-železitý Fe_3O_4 , oxid železitý Fe_2O_3). Při moření dochází k rozpouštění spodní vrstvy okují FeO a pronikání kyseliny jeho trhlinami a póry na rozhraní s povrchem základního materiálu, kde tlak od vznikajícího vodíku podporuje odtrhávání zbylé oxidické vrstvy od základního materiálu (urychluje proces moření). Zbylá vrstva oxidů se v kyselinách nerozpouští tak důkladně jako FeO a zbytky tedy padají na dno lázně.



a - H_2SO_4 odleptávání, b - H_2SO_4 odlupování, c - HCl odleptávání,
d - HCl rozpouštění vysokoteplotních okují, e - HCl rozpouštění nízkoteplotních okují.

Nejčastěji se používá H_2SO_4 kyselina sírová, HCl kyselina chlorovodíková (tzv. solná) a H_3PO_4 fosforečná. Při moření v **kyselině sírové** dochází k následujícím reakcím:

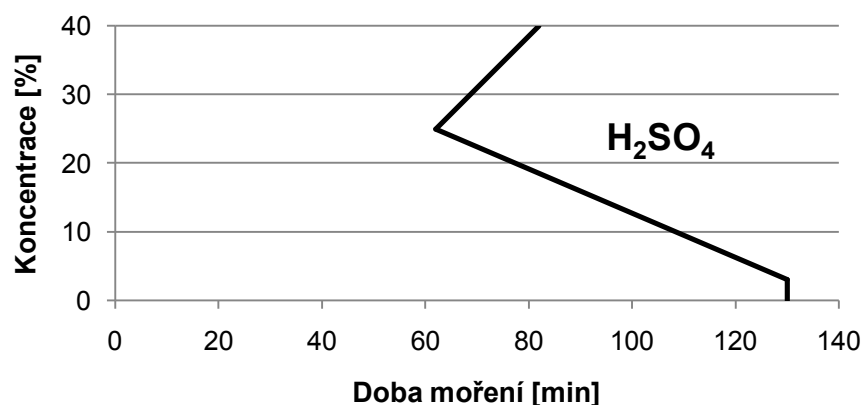


Použití kyseliny sírové je v praxi nejčastější a má čtyři hlavní výhody: nízkou pořizovací cenu, vysokou účinnost (malou spotřebu), nízkou exhalaci pracovního okolí a snadnou dostupnost na trhu. Vyvíjející se vodík během procesu moření má nepříznivý vliv na povrch materiálu, protože může difundovat do materiálu a tím se zvyšuje nebezpečí vodíkové křehkosti. Potlačení difuze umožňují organické inhibitory (dibenzylsulfoxid), které snižují rychlost rozpouštění oceli, ale rychlost rozpouštění oxidů téměř neovlivňují. Základní pracovní parametry při procesu moření v H_2SO_4 jsou uvedeny v tab. 5.3.3.

Tab. 5.3.3 Moření oceli a jejich slitin v kyselině sírové.²⁵

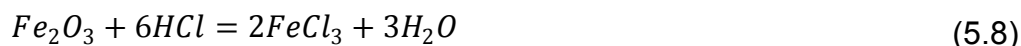
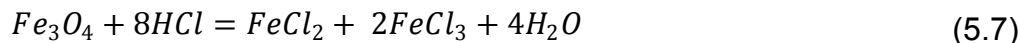
Materiál	Roztok H_2SO_4 [%]	Teplota [°C]	Čas odmašťování [min]	Prvky obsažené v mořicí lázni
Ocel, slitiny oceli	8 ÷ 14	60 ÷ 80	5 ÷ 10	H_2SO_4 , H_2O

Během moření postupně vzrůstá obsah železa v lázni právě rozpouštěním oxidů i základního kovu. Při dosažení koncentrace železa v lázni $50 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ účinek moření klesá. Proto je nutné stav lázně sledovat a případně včas zajistit její výměnu. Moření v kyselině sírové se nazývá také jako úběrové moření, protože z 1 m^2 základního materiálu dojde během procesu k úběru $25 \div 40 \text{ g}$ jeho hmotnosti. Závislost doby moření na koncentraci mořidla je uvedena na obr. 5.3.4.

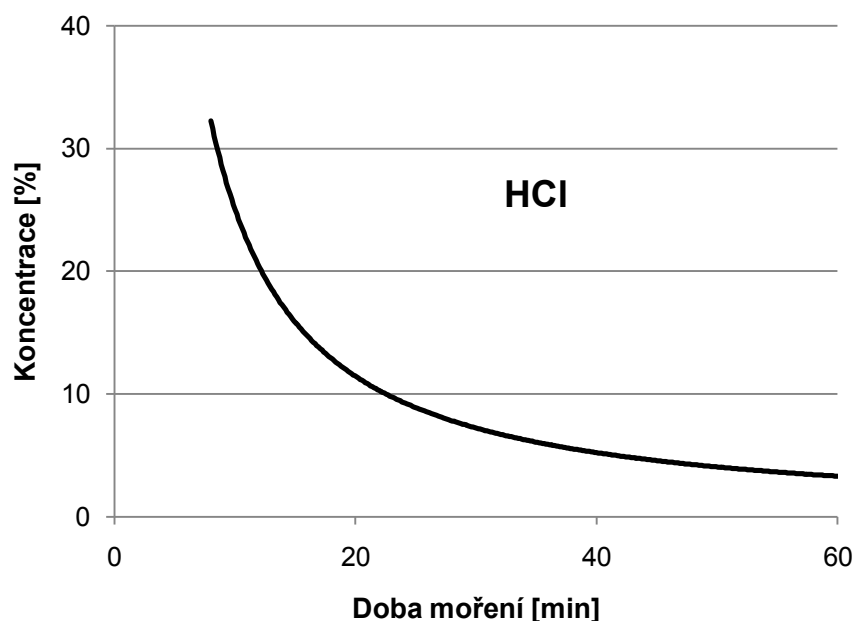


Obr. 5.3.4 Vliv koncentrace mořidla na rychlost moření.²⁹

Při moření v **kyselině chlorovodíkové** dochází k následujícím reakcím:



Ve srovnání s mořením v kyselině sírové probíhá rozpouštění oxidů v kyselině chlorovodíkové rychleji a rovnoměrněji, jak je patrné z obr. 5.3.5. Ovšem doba moření je velice závislá na množství Fe_2O_3 (hematitu), který je obsažen v oxidických vrstvách, protože samotný oxid železitý se rozpouští nejpomaleji (nejdéle).



Obr. 5.3.5 Vliv koncentrace mořidla na rychlost moření.²⁹

Naopak rozpouštění kovu (základního materiálu) a vývoj vodíku je pomalejší. Nevýhodou moření v HCl jsou silné korozní účinky na zařízení mořící lázně (vana, potrubí, čerpadlo), pracovního prostředí (dokonalejší odvětrávací systém) a celkově je ekonomicky nákladnější. Základní pracovní parametry při procesu moření v HCl jsou uvedeny v tab. 5.3.4.

Tab. 5.3.4 Moření oceli a jejich slitin v kyselině chlorovodíkové.²⁵

Materiál	Roztok HCl [%]	Teplota [°C]	Čas odmašťování [min]	Prvky obsažené v mořící lázni
Ocel, slitiny oceli	10 ÷ 20	~20	10 ÷ 50	H ₂ SO ₄ , H ₂ O

b) Moření hliníku a jeho slitin spočívá především v odstranění vrstvy oxidu hlinitého (Al_2O_3), která nedovoluje provedení finální povrchové úpravy (např. pokovování) a která vzniká působením atmosférického prostředí. Pro následné např. organické povrchové úpravy je záměrné i lehké naleptání materiálu.

Pro moření hliníku a jeho slitin se využívá *kyselin* (H_2SO_4 kyselina sírová, HCl kyselina chlorovodíková, H_3PO_4 kyselina fosforečná), kdy vzniká velmi čistý a jen mírně naleptaný povrch (musí předcházet operace odmašťování). Parametry pro moření hliníku v kyselých lázních jsou uvedeny v tab. 5.3.5.

Tab. 5.3.5 Moření hliníku a jeho slitin v kyselých lázních.³¹

Materiál	Roztok H_2SO_4 [%]	Teplota [°C]	Čas odmašťování [min]	Prvky obsažené v mořicí lázni
Hliník a jeho slitiny	~ 25	60 ÷ 70	0,5 ÷ 2	H_2SO_4 , CrO_3 , H_2O

Druhou a v praxi častější variantou je použití *alkalických roztoků* (např. NaOH hydroxid sodný), které zároveň povrch odmašťují. V praxi se nejčastěji moří v roztoku hydroxidu sodného NaOH (10÷15 % roztok), který působí přibližně 20 - krát rychleji než neoxidující kyseliny (kyselina chlorovodíková, fosforečná, fluorovodíková) při stejné koncentraci. Parametry pro moření hliníku v kyselých lázních jsou uvedeny v tab. 5.3.6.

Tab. 5.3.6 Moření hliníku a jeho slitin v alkalických lázních.³¹

Materiál	Roztok NaOH [%]	Teplota [°C]	Čas odmašťování [min]	Prvky obsažené v mořicí lázni
Hliník a jeho slitiny	10 ÷ 15	60 ÷ 80	~ 2	NaOH , NaCl_2 , H_2O

Na rychlost moření má největší vliv teplota použitého roztoku. Se zvyšující se teplotou roste rychlost rozpouštění oxidů. Během procesu moření dochází k rostoucímu vzniku vodíku, po dosažení jeho rovnoměrného vývinu se proces ukončí. Přimoření slitin hliníku obsahujících měď, nikl, mangan, křemík atd. vznikají na povrchu následně šedé až černé povlaky (soli těchto prvků), které se odstraňují (rozpuštějí) krátkodobým ponořením do 35÷40 % roztoku kyseliny dusičné HNO_3 (tzv. vyjasňování).

Dekapování (tzv. aktivace povrchu) je zpravidla poslední operací před finální (galvanickou i chemickou) povrchovou úpravou. Slouží k odstranění pasivních oxidických vrstev z povrchu součástí (po procesu odmašťování nebo moření). Na dekapování se používají lázně s roztoky 3÷15 % kyseliny chlorovodíkové nebo 3÷40 % kyseliny sírové o pokojové teplotě.

3.) Oplachování hraje důležitou roli mezi jednotlivými operacemi (ať už odmašťování nebo moření) respektive na závěr celé technologie. Při přenosu předmětů mezi jednotlivými lázněmi vznikají ztráty vynesáním roztoku ulpěním na povrchu předmětu, popř. v jeho dutinách a pórech, také hrozí sekundární znečištění plovoucími nečistotami na hladině lázně. Od tohoto problému hrozí další znehodnocování následujících lázní. Proto na dokonalý výsledný efekt použité technologie ale i na celkovou ekonomii provozu mají oplachy velký vliv. Součástí každého technologického procesu chemické předúpravy povrchu musí být tedy i návrh oplachových operací.

Podle teploty použité vody se dělí oplachy na *studené* a *teplé* (dodávají předmětu teplo, díky kterému se poté rychleji vysuší).

Dle způsobu uspořádání se může oplach uskutečňovat těmito způsoby:

- postřikem, který je ale nevhodný, spotřebuje mnoho vody a je nečistý, používá se u rozměrných výrobků,
- ponorem ve vaně s občasnou výměnou vody, oplach není dokonalý a dochází k obohacení vody o použité roztoky a jejímu poměrně brzkému znehodnocení,
- ponorem ve vaně s jednoduchou výměnou vody, jejíž cirkulace je zajištěna čerpadlem, bývá používán nejčastěji,
- dvoustupňovým oplachem s protiproudovou výměnou vody, jedná se o nejvhodnější typ oplachu.

6 CHEMICKÉ NIKLOVÁNÍ OPTICKÝCH ZRCADEL

6.1 Chemické pokovení součástí

Proces chemického pokovení materiálů nalezl využití ve zhotovování zejména funkčních a dekorativních povlaků spíše menších tloušťek. Kromě niklových povlaků se jedná o povlaky z mědi, stříbra, zlata, chromu a jiných slitin především v mikroelektronice, optice a zbrojním průmyslu.

Jde o elektrochemický proces, při kterém dochází k vylučování kovů (kovových povlaků) bez použití vnějšího zdroje proudu. Podstatou procesu je vylučování ušlechtilějšího kovu na povrchu méně ušlechtilého kovu, během kterého dochází vlivem rozdílného elektrochemického potenciálu (pokovovaného materiálu a roztoku solí vylučovaného kovu) ke vzniku proudu.

Výhodou bezproudového pokovení je jednoduchost zařízení, technologického postupu a výrazná účinnost lázně na členitých součástech. Nevýhodou jsou v porovnání s galvanickým pokovením poměrně malé tloušťky povlaků za stejnou jednotku času.

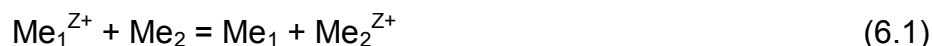
Praktická metodika provedení pokovení materiálu bezproudou chemickou cestou může být následující:

- ponořením do roztoku solí vylučovaného kovu, proces trvá jen několik vteřin a vzniklý povlak je velmi tenký;
- ponořením při vyšších teplotách, povlak má velmi dobrou přilnavost;
- kontaktním pokovením (kontaktním kovem je Al, Zn);
- redukcí solí vylučovaného kovu.

V technické praxi se nejčastěji využívá tří základních principů chemického pokovování:

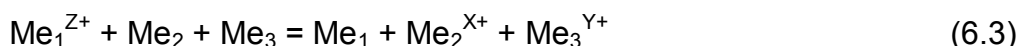
- iontové výměny,
- kontaktu s pomocným elektronegativním kovem,
- redukce.

A) Pokovení pomocí principu iontové výměny je založeno na teoretickém vysvětlení chování dvou kovů s rozdílným elektrochemickým potenciálem, mezi kterými vzniká proudový tok. Z tohoto poznatku plyne, že kov s kladnější hodnotou potenciálu se vylučuje ve formě povlaku na kov, který má vzhledem k němu potenciál záporný. Zhotovování povlaku je založeno na reakci dle rovnice 6.1. Příklad s konkrétními chemickými prvky je uveden v rovnici 6.2. Kov Me_1 je vylučovaný kov a Me_2 je kov podkladový (s nižším potenciálem vzhledem k Me_1).



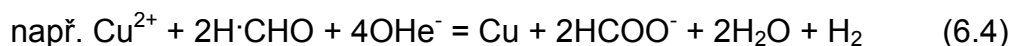
Celý proces významně ovlivňuje hodnota rozdílu potenciálů obou kovů. Čím je tento rozdíl větší, tím probíhá chemická reakce s vyšší rychlostí a účinností. Právě rychlost pokovení je snižována řadou činitelů. Mezi nejdůležitější patří prostředí, ve kterém celý proces probíhá. Dále je nutno zmínit, že s rostoucí tloušťkou povlaku se rychlost pokovení výrazně snižuje. Proto je tento způsob vhodný zejména pro malé tloušťky povlaků.

B) Kontaktní pokovování s pomocným elektronegativním kovem je určitou principiální analogií iontové výměny. Této metody lze využít, pokud je rozdíl potenciálů podkladového kovu Me_2 a nanášeného kovu Me_1 tak malý, že by nedocházelo k chemickému vylučování jednoho kovu na druhém, popř. rychlost celého procesu by byla velmi nízká a tedy nevhodná. Princip je založen na poznatku, že při kontaktu základního (podkladového) kovu Me_2 s pomocným kovem Me_3 , který má vysoce záporný potenciál, vzniká větší celkový rozdíl potenciálů kovů Me_2 a Me_1 . Tímto tedy dochází k vylučování kovu Me_1 na základním Me_2 i na pomocném Me_3 dle rovnice 6.3., kde součet počtu nábojů $X + Y = Z$



C) Princip redukce (což znamená snížení oxidačního čísla) patří mezi nejrozšířenější metody bezproudového zhotovování kovových povlaků. Tato metoda nachází stále větší průmyslové uplatnění a jejímu mechanismu i kinetice je v poslední době věnována mimořádná pozornost.

Redukovanou složkou je z roztoku vylučovaný kov Me_1 ve formě molekul a redukčním činidlem řada chemických látek (jako např. formaldehyd). Základním mechanismem procesu je selektivní vylučování kovu Me_1 na katalyticky působícím povrchu pokovovaného kovu Me_2 (viz. rovnice 6.4). Tato metoda je využívána především pro zhotovování niklových, měděných a stříbrných povlaků.



6.2 Niklové povlaky vyloučené chemicky

Niklové povlaky se zpravidla používají jako dekorativní, ochranné, funkční či pro dosažení povrchu s vysokou reflektivitou spíše pro součásti menších rozměrů z oceli, litiny, hliníku, mosazi, mědi, stříbra a jejich slitin. Naopak nelze utvořit na zinku, olovu, cínu nebo na povrchu s obsahem těchto kovů. V některých případech lze tento problém vyřešit vytvořením měděné mezivrstvy. Předností niklového povlaku je odolnost proti atmosférické korozi, ovšem za podmínky, že není pórovitý.

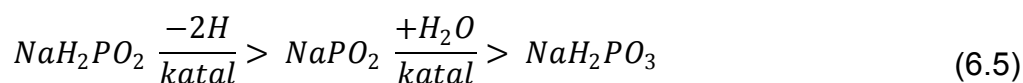
Dekorativní, ochranné a funkční niklové povlaky jsou používány v energetickém (ventily, čerpadla, turbíny, hřídele aj.), elektrotechnickém, elektrickém, potravinářském a chemickém průmyslu (kde rychlost koroze je menší jako $2,5 \mu\text{m}\cdot\text{rok}^{-1}$) a také na vytvoření mechanicky a tepelně odolného povlaku (tloušťky $25\div 75 \mu\text{m}$).

Na výsledné vlastnosti niklového povlaku mají vliv především podmínky zhotovování, tedy druh a složení lázně, její teplota, doba pokovování atd. Tyto podmínky ovlivňují přilnavost povlaku k podkladovému kovu, jeho krystalickou strukturu, pórovitost a tloušťku. K vylučování dochází na všech místech povrchu součásti, tedy i v dutinách.

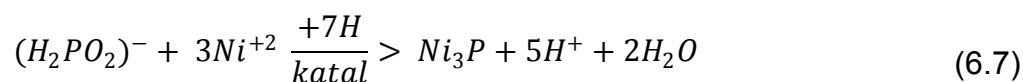
Podstatou chemického niklování je **katalytická redukce niklu** z vodných roztoků obsahujících:

- ionty Ni, které vznikly disociací (štěpením) niklových solí,
- redukční činidlo (fosforan sodný - fosforanové ionty).

Redukce niklu probíhá nascentním vodíkem, který se uvolní při katalytické přeměně fosforanu dehydrogenací (eliminaci vodíku z organické látky) a adicí (zánikem násobných vazeb) vody dle rovnice 6.5 a 6.6.



Sekundárními reakcemi mezi fosforanovými ionty, nascentním vodíkem a ionty Ni^{+2} vzniká také dle rovnice 6.7 fosfid niklu.



Z rovnice 5.7 plyne, že chemicky vyloučený niklový povlak je metastabilní tepelně vytvrditelná (především zvýšení tvrdosti a odolnosti proti otěru) slitina nikl-fosfor. Obsah fosforu je závislý od pH lázně a bývá v rozmezí 3÷10 %. Čím vyšší pH lázně, tím rychleji dochází k tvorbě fosfidu a tím i obsah fosforu ve výsledném povlaku.

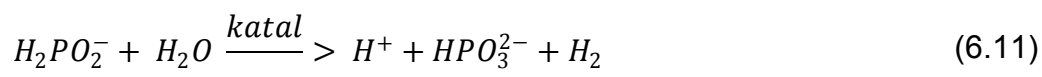
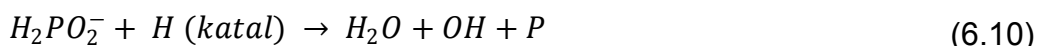
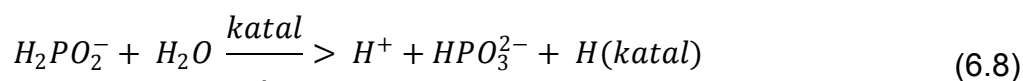
Lázně na chemické niklování se rozdělují podle použitého redukčního činidla. Mezi nejčastěji používané redukční činidla patří:

- fosforan sodný $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
- hydrazin $\text{H}_2\text{N} \cdot \text{NH}_2$
- dimethylaminoboran $(\text{CH}_3)_2\text{NH} \cdot \text{BH}_3$
- dietylamínoboran $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{NH} \cdot \text{BH}_3$
- boran sodný NaBH_4

6.2.1 Fosforanové redukční lázně

Fosforan sodný $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ je prakticky nepoužívanějším a nejsilnějším redukčním činidlem. Kromě fosforanu sodného lze také použít fosforan vápenatý nebo nikelnatý, jejichž výhoda spočívá v tom, že se lázeň neobohacuje o balastní ionty (váží na sebe molekuly H_2O). Podle výsledného pH se fosforanové lázně rozdělují na kyselé a zásadité.

a) Kyselé lázně mají řadu předností jako např. vyšší vylučovací rychlost niklu, větší stabilitu (rovnoměrnost) procesu, jednoduchou kontrolu vyčerpání a lepší výsledné vlastnosti povlaku. Reakce, které probíhají v lázni, jsou uvedeny v rovnici 6.8, 6.9, 6.10 a 6.11.



Uvolněné vodíkové kationy se dle rovnice 6.8 vylučují na povrchu katalyticky působícího povrchu součásti a zbytek se spojuje do molekul a uniká ve formě bublinek plynu z lázně do ovzduší dle rovnice 6.11. Dle této rovnice se výtěžnosti niklu z těchto redukčních lázní dosahuje přibližně jen 38 %. Atomy ulpělé na povrchu katalyzátoru redukují nikelnaté kationy za vzniku nulvalentního kovu (viz. rce 6.9). Současně se malá část fosforanových iontů katalyticky redukuje za vzniku fosforu, vody a aniontů OH (viz. rovnice 6.10). Rychlost vylučování niklu závisí na teplotě, pH, koncentraci redukčního činidla, urychlovače a stabilizátoru.

Nejdůležitějším faktorem je teplota. Kyselé lázně obvykle pracují při teplotě 90÷98 °C. Pokud se lázeň dostane do varu, nastává rychlý rozklad redukčního činidla, který provází silný vývoj vodíku. S rostoucí teplotou ale klesá obsah fosforu v povlaku.

b) Zásadité lázně vylučují nikl stejným mechanismem jako lázně kyselé. Ovšem mají nižší vylučovací rychlost a výsledné povlaky mají větší pórovitost a nižší odolnost proti korozi. Jejich výhodou je však dosažení vyššího lesku a díky lepší rozpustnosti fosforitanu v zásaditém prostředí zvyšuje stabilitu celého procesu. Stejně jako u kyselých lázní i u zásaditých platí, že s rostoucí teplotou roste i rychlost vylučování povlaku.

6.2.2 Hydrazinové redukční lázně

Hydrazinové činidla způsobují vylučování tmavě šedých až hnědé povlaky s vysokým vnitřním napětím a výslednou pórovitostí. Ovšem tyto povlaky se chemickým složením blíží téměř čistému niklu, proto jsou tato činidla používána především pro pokovení elektronických součástí.

6.2.3 Boranové redukční lázně

Boran sodný a jeho deriváty je silným redukčním činidlem. Nejčastěji se používá dimethylaminoboran a dietylaminooboran, které mají ještě silnější redukční schopnost než fosfornany, což umožňuje vylučování niklu při nižších teplotách (řádově redukce probíhá již při pokojové teplotě).

6.2.4 Složení niklovací lázně

Nejčastěji se pro chemické niklování používá chloridová nebo síranová lázeň, jejichž údaje o chemickém složení jsou uvedeny v tab. 6.2.1. Pro niklování hliníku se používá alkalické lázně s roztoky, které jsou zdrojem iontů Ni (síran nikelnatý, uhličitan nikelnatý).

Tab. 6.2.1 Složení niklovací lázně.³¹

Druh lázně	Chemické složení
Chloridová	chlorid nikelnatý ($40 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$), fosfornan sodný ($10 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$), citran sodný terciální ($30 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$) - tzv. mléčnan vápenatý
Síranová	síran nikelnatý ($50 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$), fosfornan sodný ($10 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$), citran sodný terciální ($30 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$) - tzv. mléčnan vápenatý

Kompletní lázeň na chemické niklování obsahuje nikelnatou sůl ($\text{NiSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$), komplexotvorné složky (komplexon, octan, citran, mléčnan), látky na úpravu pH (NaOH , NH_4OH), redukční činidlo (fosfornan, hydrazen a deriváty boranu), smáčedlo (tenzidy), stabilizační přísady (organické sloučeniny obsahující síru) a popř. urychlovače (fluoridy, kyselinu jantarovou, malonovou či propionovou). Pokud má povrch pokovované součásti slabší katalytické účinky, musí se před celým procesem aktivovat pomocí SnCl_2 nebo PdCl_2 .

Celý proces probíhá přibližně za těchto pracovních podmínek:³¹

- teplota lázně 95 ± 5 °C, při poklesu teploty o 10 °C se sníží pokovovací rychlost o 50 % (při 50÷60 °C proces prakticky neprobíhá),
- při dodržení optimálních podmínek se vyloučí 10÷12 μm·hod⁻¹,
- v 1l lázně je možno pokovovat 100÷200 mm² výrobků,
- odpařenou vodu je možno za procesu doplňovat teplou vodou,
- během niklování dochází k vyčerpání lázně a je potřebné ji doplňovat, tzv. regenerace.

Nevýhodou chemického niklování je pracovní teplota (90 °C), která způsobuje energetickou náročnost procesu. Při těchto teplotách také dochází k rychlému odpařování vody a její pára poté silně korozně napadá celé zařízení. Další nevýhodou je omezená životnost elektrolytu (lázně), která vyplývá z podstaty metody a jehož schopnost redukční činnosti se během procesu snižuje (vyčerpává). Dle rovnic 6.6, 6.7, 6.8, 6.9 a 6.11 dochází během procesu také k vývinu vodíku. Tato problematiku bude probrána v kapitole 8.

Nově vyvinuté elektrolyty s obsahem fosforu, jsou schopny katalytické reakce a vytváření nikl-fosforových povlaků již při 50 °C. Celý proces tedy probíhá při téměř o polovinu nižší teplotě, což kromě snížení nákladů na elektrickou energii snižuje i zbytková napětí v povlaku.

6.3 Proces chemického niklování optických zrcadel

Pokovovací lázeň je v průběhu procesu míchána a filtrována, čímž v ní vznikají relativně silné proudy. Během niklování je tedy bezpodmínečně nutné zaručit, aby nedošlo k vzájemnému dotyku jakýchkoli ploch zrcadel. Při dotyku ploch by se vytvářené povlaky spojily dohromady a po následném oddělení zrcadel by byly oba znehodnoceny (nerovnoměrná vrstva nebo odtrhnutí povlaku od základního materiálu). Technologický postup celého procesu je uveden v tab. 6.3.1.

Tab. 6.3.1 Technologický postup chemického niklování optického zrcadla.⁴²

Č. op.	Popis operace	Přípravek, roztok	Čas operace	Teplota	Poznámka
10	Chemické odmaštění	Rogal 19	10÷25 min	50÷60 °C	Dle stupně znečištění
20	Oplach ponorem / postřikem	Demi-voda	1 min / 30 s		
30	Dekapování	20÷30 % HNO ₃	10 s		Do vyjasnění
40	Oplach ponorem / postřikem	Demi-voda	1 min / 30 s		
50	Moření	Rogal 18	30 s ÷ 2 min	60÷80 °C	Nutno sledovat vzhled součásti, v případě potřeby se proces opakuje. Lepší výsledky pohybu lázně.
60	Oplach ponorem / postřikem	Demi-voda	1 min / 30 s		
70	Dekapování	20÷30 % HNO ₃	min 30 s		Až do úplného vyjasnění.
80	Oplach ponorem / postřikem	Demi-voda	1 min / 30 s		
90	Zinkátové moření	Alumon EN	min 30 s	20÷45 °C	Dojde k vytvoření tenké zinkátové vrstvičky.
100	Studený oplach ponorem / postřikem	Demi-voda			Nutný velmi důkladný.
110	Dekapování	HNO ₃	15 s		Poměr HNO ₃ a vody 1:1
120	Oplach ponorem / postřikem	Demi-voda	1 min / 30 s		
130	Zinkátové moření	Alumon EN	min 30 s	20÷45 °C	
140	Oplach ponorem / postřikem	Demi-voda	1 min / 30 s		
150	Předniklování	Enplate Al-100	3÷6 min	35÷43 °C	
160	Oplach ponorem / postřikem	Demi-voda	1 min / 30 s		
170	Chemické niklování	Slotmit 30-1	~60 min	85÷92 °C	Tloušťka 14 μm
180	Dvoustupňový oplach	Demi-voda			
190	Očištění stlač. vzduchem				
200	Sušení				

Základní charakteristika roztoků a pomocných přípravků včetně předepsaných pracovních podmínek je uvedena v tab. 6.3.2. Některé procesy je možno pro dosažení optimálního výsledku dané operace několikrát opakovat (např. odmaštění, moření či zinkátování). Nejlepších výsledků se zpravidla dosahuje při tzv. pohybu lázně, tedy je-li lázeň míchána mechanicky nebo proudí pomocí čerpadel. Možnou variantou je i pohyb pokovovanými součástmi, což by ovšem pro případ pokovení zrcadel bylo velice riskantní a kontraproduktivní.

Tab. 6.3.2 Základní charakteristika použitých chemických roztoků.⁴²

Rogal 19	Odmašťovací lázeň určená pro hliník a jeho slitiny bez narušení povrchu a poškození rozměrů součásti, využívá účinku alkalických solí s biologicky odbouratelným tenzidem a speciálních přísad. Proces je možno provádět ponorem nebo postřikem.	Pracovní podmínky: Koncentrace: 20÷40 g·l ⁻¹ Provozní teplota: 60 °C Doba: 1÷2 min
Rogal 18	Odmašťovací lázeň s mořícím efektem vhodná pro hliník a jeho slitiny kdy mořící efekt umožňuje odmaštění a zároveň odstranění oxidických vrstev z povrchu součásti.	Pracovní podmínky: Koncentrace: 200 g·l ⁻¹ Provozní teplota: 60÷80 °C Doba: 2÷3 min
ALUMON EN	Bezkyanidová zinkátová mořící lázeň vyvinutá pro předúpravu před vylučováním chemického niklu na hliníku.	Pracovní podmínky: Koncentrace: 280 g·l ⁻¹ Provozní teplota: 20÷45 °C Doba: 2 min
ENPLATE AI-100	Alkalický přípravek pro vytvoření velmi tenkých stejnoměrných niklových mezivrstev na hliníku a jeho slitinách před dalším chemickým či galvanickým pokovováním.	Pracovní podmínky: Koncentrace: 150 g·l ⁻¹ Provozní teplota: 20÷43 °C Doba: 3÷10 min pH lázně: 9,6÷11,5
SLOTONIP 30-1	Chemická lázeň pro vytváření povlaků nikl-fosfor na kovech a nevodičích. Vyloučené povlaky jsou světlé až lesklé a obsahují 8,5÷10 % fosforu. Při průběžném doplňování lze dosáhnout obratu niklu až 70 g·l ⁻¹ při vylučovací rychlosti 15-18 μm·h ⁻¹ .	Pracovní podmínky: Koncentrace: 355 g·l ⁻¹ Provozní teplota: 85÷92 °C Doba: dle tl. povlaku pH lázně: 4,4÷4,5
Smáčedlo SLOTONIP AP 11	Neobsahuje perfluoroktansulfonáty (PFOS) a je přednostně určeno pro použití v chemických niklovacích lázních k zabránění tvorby pórů ve vylučovaných povlacích. Vhodné pro tloušťky povlaků do 30 μm.	

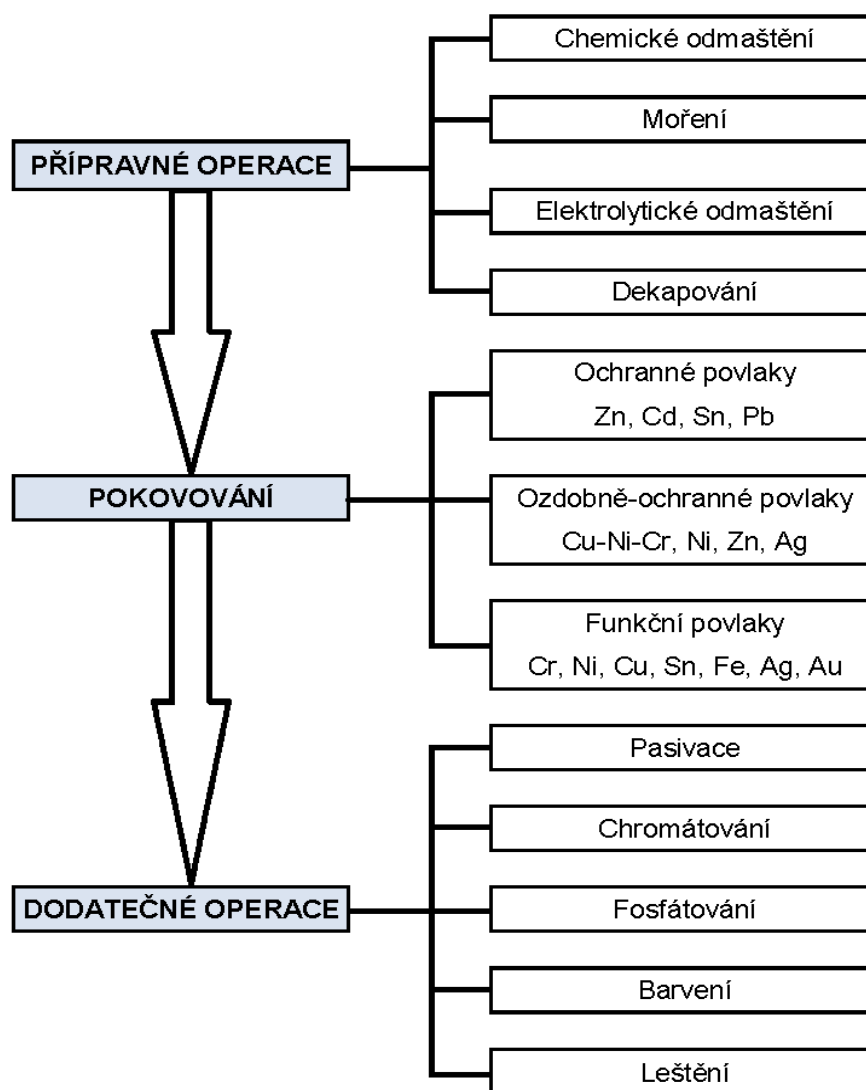
7 GALVANICKÉ ZLACENÍ OPTICKÝCH ZRCADEL

7.1 Galvanické (elektrochemické) pokovení součástí

Technologie galvanického vylučování kovů a jejich slitin na povrchu kovového materiálu je známa již řadu desetiletí. Galvanoplastika se zabývá vytvářením povlaků na součástech složitých tvarů, kdežto galvanostegie je zaměřena na tenké ochranné povlaky (především proti korozi). Proces galvanického pokovení se řídí všeobecnými elektrochemickými zákonitostmi, zejména principy elektrolýzy. Mezi nejčastěji vylučované povlaky patří Cu, Ni, Cr, Zn, Cd, Sn, Pb, Fe a jejich kombinace, především Cu-Ni-Cr a Ni-Cr.

Hlavním účelem technologie galvanického pokovení je (viz obr. 7.1.1):

- optimálně připravit základní materiál pro dosažení požadované kvality kovového povlaku,
- vytvořit kovový resp. slitinový povlak,
- upravit užitnou hodnotu povlaku (korozní odolnost, lesk, vzhled).



Obr. 7.1.1 Schéma technologického postupu při galvanickém pokovování.²⁵

Proces je založen na rozpouštění (elektrolytické disociaci) anorganických solí (NaCl , CuSO_4) ve vodě, kdy záporně nabitě ionty nesou přebytečné elektrony (Cl^- , SO_4^{2-}) a kladně nabitě ionty (Na^+ , Cu^{2+}) mají elektronů nedostatek. Po přivedení stejnosměrného proudu z vnějšího zdroje do lázně pomocí elektrod se začnou záporně nabitě ionty (Cl^- , SO_4^{2-}) vylučovat na kladné elektrodě (anodě), kde dochází k jejich oxidaci (zvyšování kladného mocenství) tj. přechod neboli odevzdání elektronů. Kladně nabitě ionty (Na^+ , Cu^{2+}) se vylučují na záporné elektrodě (katodě), kde nastává jejich redukce (přijímání elektronů).

Pokud by tento proces (elektrolýza roztoku) probíhal mezi dvěma nerozpustnými elektrodami (Au nebo Pt), došlo by k vyčerpání složek soli z roztoku až by se odporem vody průchod proudu zastavil. K obnovení elektrolýzy může v takovém případě dojít jedině přidáním a rozpuštěním dalšího množství soli. Ovšem tímto postupem je jen těžce možné zaručit konstantní průběh vylučování povlaku a koncentraci lázně.

Vhodnější a nejčastější variantou je použití rozpustné anody většinou ze stejného materiálu, jako má být vylučován. Po zapojení vnějšího zdroje proudu (tedy při průchodu proudu) se anoda začne rozpouštět a do roztoku z ní přecházejí kladně nabitě částice požadovaného kovu. Přechodem kladně nabitých částic kovu do roztoku zůstává v anodě určité množství záporných elektronů, které se prakticky ihned spotřebovávají k vybití kationtů (kladně nabitých částic). Zjednodušeně řečeno, vychází-li se z určité počáteční koncentrace kovové soli v roztoku, nedochází v průběhu elektrolýzy ke snížení její koncentrace, protože vyloučené množství kovu ze soli je ihned doplňováno příslušným množstvím kovu z rozpouštěné anody.

Praktickým problémem je však současné vylučování kovu a především vodíku na katodě. Z elektrochemického hlediska je vodík považován za kov s nulovým potenciálem. Porovnání potenciálů kovů vzhledem k vodíku je uvedeno v tab. 7.1.1.

Tab. 7.1.1 Standardní elektrodové potenciály vybraných kovů²³.

Kov	Chemické označení	Potenciál [V]	Kov	Chemické označení	Potenciál [V]
Zlato	Au	+1,36	Kobalt	Co	-0,29
Stříbro	Ag	+0,80	Kadmium	Cd	-0,40
Měď	Cu	+0,34	Železo	Fe	-0,44
Antimon	Sb	+0,20	Chrom	Cr	-0,56
Vodík	H	0,00	Zinek	Zn	-0,76
Olovo	Pb	-0,12	Hliník	Al	-1,33
Cín	Sn	-0,14	Hořčík	Mg	-1,55
Nikl	Ni	-0,23	Sodík	Na	-2,71

Jsou-li v lázni rozpuštěny soli různých kovů, pak se jako první vylučuje kov s nekladnějším potenciálem a až poté postupně kovy s méně ušlechtilými potenciály. Z těchto poznatků plyne, že by bylo možné z roztoků vylučovat pouze kovy elektropozitivnější (s kladnějším potenciálem), než má vodík. Protože jinak by se nejprve vyloučil všechny vodík obsažený v lázni, došlo by tedy k úplnému rozkladu vody (znemožnění další elektrolytické reakce) a další kovy by se již nevyloučily. Ve skutečnosti k tomuto jevu však nedochází, protože potenciály, při nichž se vodík vylučuje na jednotlivých kovech, jsou mnohem zápornější, než je teoretický nulový. Rozdíl mezi teoretickým a skutečným potenciálem, při nichž se vodík vylučuje, se nazývá vodíkové přepětí. Je-li toto přepětí zápornější než potenciál vlastního vylučovaného kovu, vylučuje se z vodného roztoku pouze tento kov. Tento případ je pro galvanické pokovování ideálním. Jsou-li si oba potenciály blízké a přitom potenciál vodíku kladnější, dochází k vylučování jak vodíku, tak i požadovaného kovu. Tento případ je v praxi nejčastější.

Vztah mezi množstvím vyloučeného a z anody rozpuštěného kovu při elektrochemickém procesu pokovení vyjadřují dva Faradayovy zákony, které lze po matematických úpravách vyjádřit dle rovnice 7.1.

$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{n \cdot F} \text{ [g]} \quad (7.1)$$

m - množství látek vyloučených účinkem el. proudu [g],

M - molární hmotnost kovu [$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$],

I - elektrický proud [A],

t - čas [s],

n - počet vyměněných el. nábojů při elektrolýze (mocensví),

F - Faradayova konstanta $96\,487 \text{ [C} \cdot \text{mol}^{-1}]$.

Kromě hlavních elektrochemických reakcí na elektrodách probíhají i vedlejší reakce, které způsobují, že dodané množství proudu není zcela spotřebováno na rozpouštění a vylučování kovu. Skutečné množství elektrického proudu, který je spotřebován na vyloučení nebo rozpouštění kovu se nazývá proudovým výtěžkem, vyjádřeným v rovnici 7.2.

$$r_{\text{kat. (anod.)}} = \frac{m_{\text{SKUT.}}}{m_{\text{TEORET.}}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (7.2)$$

$r_{\text{kat. (anod.)}}$ - skutečné množství spotřebovaného proudu

$m_{\text{SKUT.}}$ - skuteč. množství rozpuštěného (vyloučeného) kovu [g],

$m_{\text{TEORET.}}$ - teoretické množství kovu dle Faradayova zákona [g].

Katodický proudový výtěžek obvykle snižuje vznik volného vodíku. U kyanidových lázní bývá 60÷90 %, u slabě kyselých 95÷98 % a u chromových (s kyselinou sírovou) pouze 10÷20 %. Vylučování vodíku nezhoršuje jen výkonnost lázně, ale působí negativně také na povlak a základní materiál (vodíková křehkost). Anodický proudový výtěžek je většinou vyšší než 100 %, což je způsobeno čistě chemickým rozpouštěním anod v lázni. Podle proudové účinnosti lze posuzovat hospodárnost procesu pokovování, jak je uvedeno v rovnici 7.3 a 7.4

$$h \cdot s \cdot c = A_e \cdot I \cdot t \cdot r \quad (7.3)$$

$$t = \frac{h \cdot s \cdot c}{A_e \cdot I \cdot r} [s] \quad (7.4)$$

- h - tloušťka povlaku [mm],
 s - měrná hmotnost kovu [g·mm⁻³],
 c - plocha pokovované součásti [mm²],
 A_e - elektrochemický potenciál [g·A⁻¹·s⁻¹],
 I - proud [A],
 t - čas pokovování [s],
 r - proudový výtěžek [%].

Obecně platí, že složení pokovovacích lázní musí být co nejstálejší po celou dobu procesu, tzn., že nesmí nastat samovolný rozpad složek lázně. Základem úspěšného a kvalitního procesu galvanického pokovení je současné dodržení všech pracovních a technologických podmínek. Tyto podmínky jsou uvedeny v tab. 7.1.2. Stálost lázně i vlastnosti výsledného povlaku přímo ovlivňuje hodnota pH, která určuje kyselost nebo alkalitu lázně, ve které zůstává kovová sůl trvale rozpuštěna, nebo v níž se dosahuje nejlepších vlastností povlaku.

Tab. 7.1.2 Významné provozní parametry při galvanickém pokovování²³.

Pracovní podmínky:	<u>Tepelně-technické:</u>	Technologické podmínky:	<u>Složení lázně:</u>
	<ul style="list-style-type: none"> -teplota -tlak -výška hladiny -účinnost míchání 		<ul style="list-style-type: none"> -obsah základních složek -obsah přísad -obsah nečistot -vylučovací rychlost -proudový výtěžek -hloubková účinnost -vyrovnávací schopnost
	<u>Elektrické:</u>		
	<ul style="list-style-type: none"> -proud -napětí -proudová hustota -polarita 		

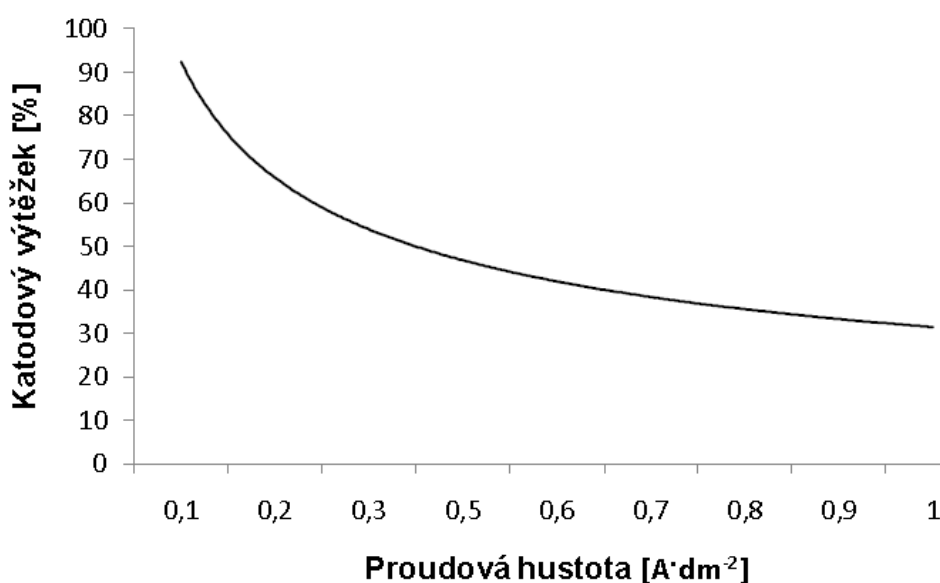
Podle hodnoty pH se tedy lázně dělí na kyselé nebo alkalické. Pro udržení přechodové oblasti hodnoty pH se do lázní přidávají pomocné chemické látky (např. kyselina boritá). Kyselé lázně pracují velmi rychle, s vysokou proudovou katodovou účinností ale s malou hloubkovou účinností (vyloučené povlaky jsou hrubozrnné a nestejněměrné). Alkalické lázně naopak pracují pomaleji, ale kov se vylučuje stejnoměrně s jemnozrnnou strukturou. Složení lázní musí po celou dobu procesu zaručovat neměnný potenciál vylučování požadovaného kovu a především dokonalou rozpustnost anody i kovové soli.

Pojmem hloubková účinnost se rozumí schopnost galvanické lázně vyloučit povlaky o stejné tloušťce na všech místech součásti. Nejlepší hloubkové účinnosti se dosahuje při použití lázně kyanidové a nejhorší u chromovacích. Ostatní lázně z roztoků jednoduchých kovových solí vylučují povlaky v nestejněměrné tloušťce. Na hranách nebo na výstupcích součásti se tak usazuje povlak s větší tloušťkou než na rovinných plochách. Nepříznivou vlastností galvanických povlaků je jejich pórovitost a zbytkové vnitřní napětí, které je probráno v kapitole 8.1.

7.2 Zlaté povlaky

Zlaté povlaky se všeobecně používají především pro bižuterii a šperky. Další Technické využití nacházejí hlavně v elektrotechnickém, optickém průmyslu. Vzhledem k ceně zlata se vytváří povlaky malých tlouštěk. Např. v bižuterii se používá vrstva $0,025 \pm 1 \mu\text{m}$ silná. Pro speciální technické účely je to až $20 \mu\text{m}$. Norma ČSN EN ISO 27847 uvádí jako dostatečnou vrstvu pro důležité el. kontakty $5 \mu\text{m Au}$. Menší součásti se zlatí kvůli úsporám chemicky. Mosazné díly se zlatí po mezivrstvě Cu popř. v elektrotechnice se používá i vrstva Ni ($1 \pm 2 \mu\text{m}$), která slouží jako bariéra proti difuzi molekul základního materiálu do povlaku (Zn negativně ovlivňuje pájitelnost). Na ocelových se nejdříve vytváří mezivrstva např. z Cu či mosazi. Pro zvýšení korozní odolnosti a trvanlivosti se používá průhledných nátěrů, které zároveň vyplní póry povlaku.

Pro zlcení se používá kyanidových a chloridových (pro větší tloušťky) lázní s přísadou fosforečnanu a ferrokyanidu. Kyanidové lázně z kyanidu zlatnodraselného KAu(CN)_2 s obsahem $1 \pm 5 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ zlata pro šperkovnictví a pro technické účely až $12 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$. Ovšem od jejich používání se v posledních desetiletích značně ustupuje kvůli environmentálním aspektům. Teplota zlatících lázní se pohybuje v rozmezí $60 \pm 70 \text{ }^\circ\text{C}$ a optimální proudová hustota $0,1 \pm 1,5 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ při svorkovém napětí $2 \pm 3,5 \text{ V}$. Doba zlcení je závislá na požadované tloušťce povlaku a určení proudového katodového výtěžku je zřejmý z obrázku 7.2.1. Při proudové hustotě $0,3 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ se vyloučí zlatý povlak o tloušťce $1 \mu\text{m}$ za 15 ± 20 minut. Povlaky určené k ozdobným účelům (přibližně do $0,5 \mu\text{m}$) se zlatí po dobu několika sekund. Po poslední operaci se zlatý povlak leští hedvábným nebo flanelovým kotoučem.



Obr. 7.2.1 Vliv proudové hustoty na katodový výtěžek.²⁶

Výsledné zbarvení zlatého povlaku závisí na použité proudové hustotě a na obsahu jiných kovů v lázni (nečistot). Při menší proudové hustotě než je optimální, se vylučují světle žluté povlaky, kdežto při vyšší proudové hustotě povlaky zbarvené do červena. Obsah olova v lázni způsobí vyloučení černého a nepřilnavého povlaku. Při galvanickém zlcení se rozeznávají tyto typy základních barevných odstínů, které ovlivňují prvky uvedené v závorce:

- žlutá (optimální stav pracovních podmínek a čistoty lázně),
- bílá (způsobuje nikl a zinek),
- zelená (způsobuje stříbro a kadmium),
- červená (způsobuje měď).

Pro vylučování povlaků silnějších než přibližně 10 μm se používá chloridové zlatí lázně, ve které je zlato obsaženo ve formě kyseliny chlorzlatité $AuCl_3 \cdot HCl \cdot 4H_2O$. Tato kyselina se připraví rozpuštěním chloridu zlatitého v kyselině solné. Přebytečný rozpustný alkalický chlorid zlatitý ($AuCl_3$) nebo kyselina chlorovodíková (HCl) zlepšují vodivost lázně a pozitivně ovlivňují i rozpouštění anod. Množství v lázni obsaženého zlata se pohybuje v rozmezí $16 \div 30 g \cdot l^{-1}$ a kyseliny chlorovodíkové $90 \div 150 g \cdot l^{-1}$. Obvykle se zlatí bez ohřevu lázně, tedy při pokojové teplotě s proudovou hustotou $0,5 A \cdot dm^2$ a napětí $2 \div 3 V$. Dosahuje se vysokého proudového výtěžku ale hloubková účinnost je mnohem horší než v kyanidových lázních. Proto je nutno lázeň obohacovat o přídavné prvky, které hloubkovou účinnost příznivě ovlivňují.

7.3 Proces galvanického zlacení optických zrcadel

V tabulce 7.3.1 je uveden technologický postup pro galvanické zlacení optických zrcadel se všemi dostupnými informacemi.

Tab. 7.3.1 Technologický postup galvanického zlacení optického zrcadla.³⁸

Č. op.	Popis operace	Přípravek, roztok	Čas operace	Teplota	Proudová hustota	Poznámka
10	Chemické odmaštění	Pragolod 65	1÷3 min	60 °C	5÷10 A·dm ²	Zrcadlo je anodou
20	Oplach ponorem	Demi-voda	30 s			
30	Aktivace	Ni - strike	30÷60 s		2÷5 A·dm ²	Zrcadlo je katodou
40	Vícestupňový oplach	Demi-voda	1 min			
50	Zlacení	Aurigal R	80÷90 min	30÷40 °C	0,1÷0,4 A·dm ²	Zrcadlo je katodou
60	Dvoustupňový oplach	Demi-voda	1 min			
70	Sušení			80÷90 °C		Horkovzdušná trouba

Ostatní informace o pomocných chemických přísadách a koncentracích jednotlivých roztoků jsou vlastněny jako know-how firmou provádějící tuto operaci. Proto nemohou být v této práci zveřejněny.

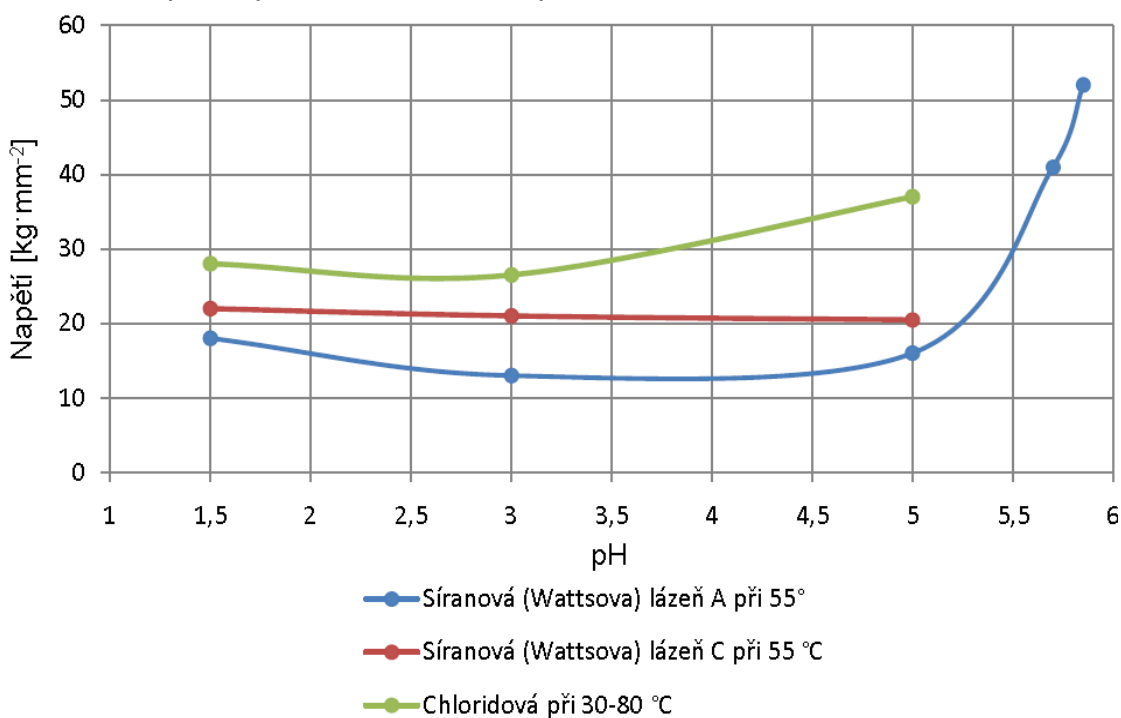
8 VLIV VAD NA VÝSLEDNOU JAKOST POVRCHU

Na výslednou jakost povrchu má největší vliv předchozí zpracování, zejména odmašťování, moření, velice důkladné oplachy a také čistota lázní při jednotlivých úpravách. Jsou li tyto operace provedeny nesprávně, může po ponoření povlakovaného předmětu do niklovací lázně dojít např. k uvolnění nečistot až ke konci procesu a tím k ovlivnění soudržnosti a tloušťky povlaku v daném místě. V případě čistoty lázní, je třeba udržovat určitý standart čistoty, pomocí filtračních jednotek či přídavných roztoků, které na sebe vážou nečistoty vznikající nebo uvolňující se během daného procesu. Obecně platí, že je třeba dodržovat, sledovat a měřit, v průběhu komplexního procesu vytváření povlakových vrstev, parametry předepsané výrobcem chemických roztoků (teplota, koncentrace, proudění aj.) a kvalitu odvedené práce např. při oplachování a manipulaci.

8.1 Zbytková napětí v povlaku

Vnitřní zbytkové napětí v povlaku může způsobit jeho praskání, odlupování či může dojít až k rozměrovým změnám povlakované součásti, protože jeho velikost může dosáhnout až $50 \text{ kg}\cdot\text{mm}^{-2}$.²⁷ Vnitřní napětí v povlaku vzniká deformací jeho krystalové mřížky během procesu i po jeho bezprostředním ukončení (chladnutí). Činitelé ovlivňující vnitřní napětí povlaku jsou:

- velikost obsahu vodíku v povlaku,
- koloidní látky a nečistoty ulpělé v povlaku,
- teplota, proudová hustota a pH lázně.



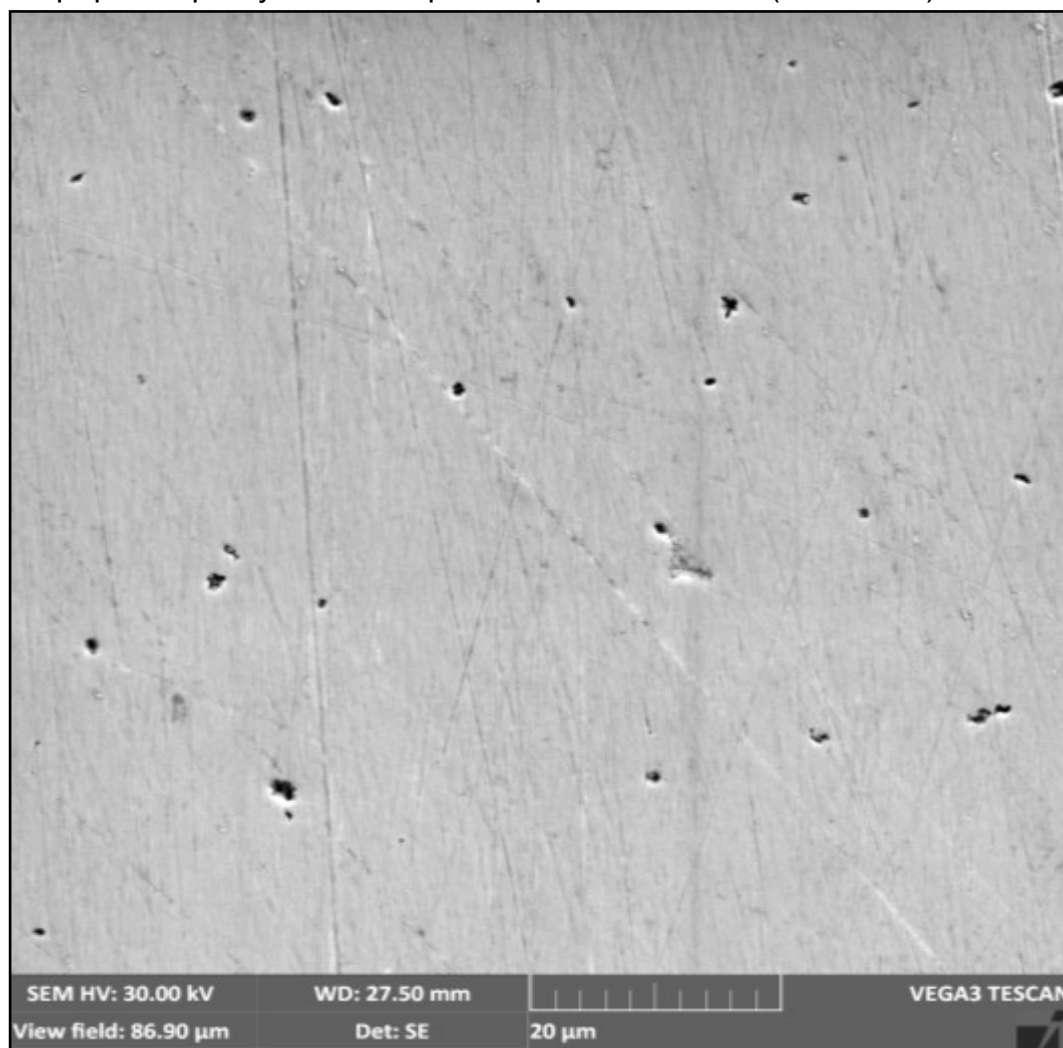
Obr. 8.1.1 Závislost vnitřního napětí na pH lázně.²⁷

Z výše zmiňovaných je nejvýznamnější právě pH lázně při galvanickém povlakování. Dle obr. 8.1.1 je patrné, že se zvyšujícím se pH lázně roste velmi rychle i hodnota zbytkových napětí v povlaku. Proto je v praxi velice důležité pravidelně kontrolovat pH lázně a popř. provádět jeho úpravu.

Pro součásti, které budou po povlakování dále ještě upravovány, např. další vrstvou jiného povlaku nebo mechanicky zpracovávané, je vhodné pokovovat při nižším pH (přibližně pH 3÷4), i když lesklost povlaku nebude taková, jak při vyšším pH.

8.2 Vodíkový pitting

I přes dodržení těchto všeobecných pravidel, dochází především při tvorbě niklového povlaku v tvorbě tzv. vodíkového pittingu, který je patrný na obr. 8.2.1. Tento jev je na součásti viditelný zpravidla pouhým lidským okem. Jde o drobné důlky často i s charakteristickým závojem (obr. 8.4.2), který se směrem od důlku zužuje. Při pozorování pod mikroskopem je patrné, že je povlak v tomto místě nerovný, nemusí splňovat stanovenou jakost povrchu a v případě optických zrcadel právě optické vlastnosti (odrazivost).



Obr. 8.2.1 Vodíkový pitting na niklovém povlaku.⁴¹

Původní teorie, že četnost pittingu je ovlivněna množstvím vylučovaného vodíku během procesu, nebyla potvrzena. Např. při vytváření zinkových či kadmiových povlaků je množství vznikajícího vodíku vyšší, ale k tvorbě pittingu nedochází.

Vznik tohoto jevu je ovlivněn velikostí stykového (povrchové) napětí na hranici kovu (slitiny), vznikajícího vodíku (H_2) a roztoku lázně (elektrolytu). Vysoké stykové napětí na povrchu kovu drží ulpělou vodíkovou bublinku velkou silou. Vylučovaný niklový povlak se pak usazuje na pokovovanou součást a obrůstá i kolem bublinky vodíku. K odtržení vodíku dochází teprve tehdy, je-li stykového napětí menší než síly působící proti němu (vztlak bublinky, tlak rozpouštějícího se vodíku v lázni atd.). Po přerušení vazeb způsobí především vztlaková síla odtržení vodíku z povrchu součásti a jeho přesun k hladině, kdy zároveň vzniká i jeho charakteristický závoj (stopa trajektorie).

Z předchozího tedy vyplývá jednoznačná odpověď, jak předejít vzniku pittingového efektu. Je třeba potlačit vznik plynného vodíku a dojde-li již k jeho vyloučení, snížit dobu jeho ulpění na povrchu součásti na minimum aniž by se snížilo povrchové napětí součásti (kvůli přilnavosti povlaku), tedy zajistit mechanické odtržení bublinek od povrchu (pohyb součásti, proudění lázně) nebo snížit povrchové napětí celé lázně (elektrolytu) přidávanými chemickými prvky (smáčedly).

Zamezení tvorby plynného vodíku je vzhledem k probíhajícím chemickým reakcím (viz. rovnice 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 a 5.11) téměř neuskutečnitelné. Proto se pro splnění tohoto požadavku používá přidavných oxidačních látek (např. H_2O_2), které vyvíjející se vodík ihned oxidují na vodu dle rovnice 8.1. Peroxid vodíku se však v lázních s vyšší teplotou velmi rychle spotřebovává.



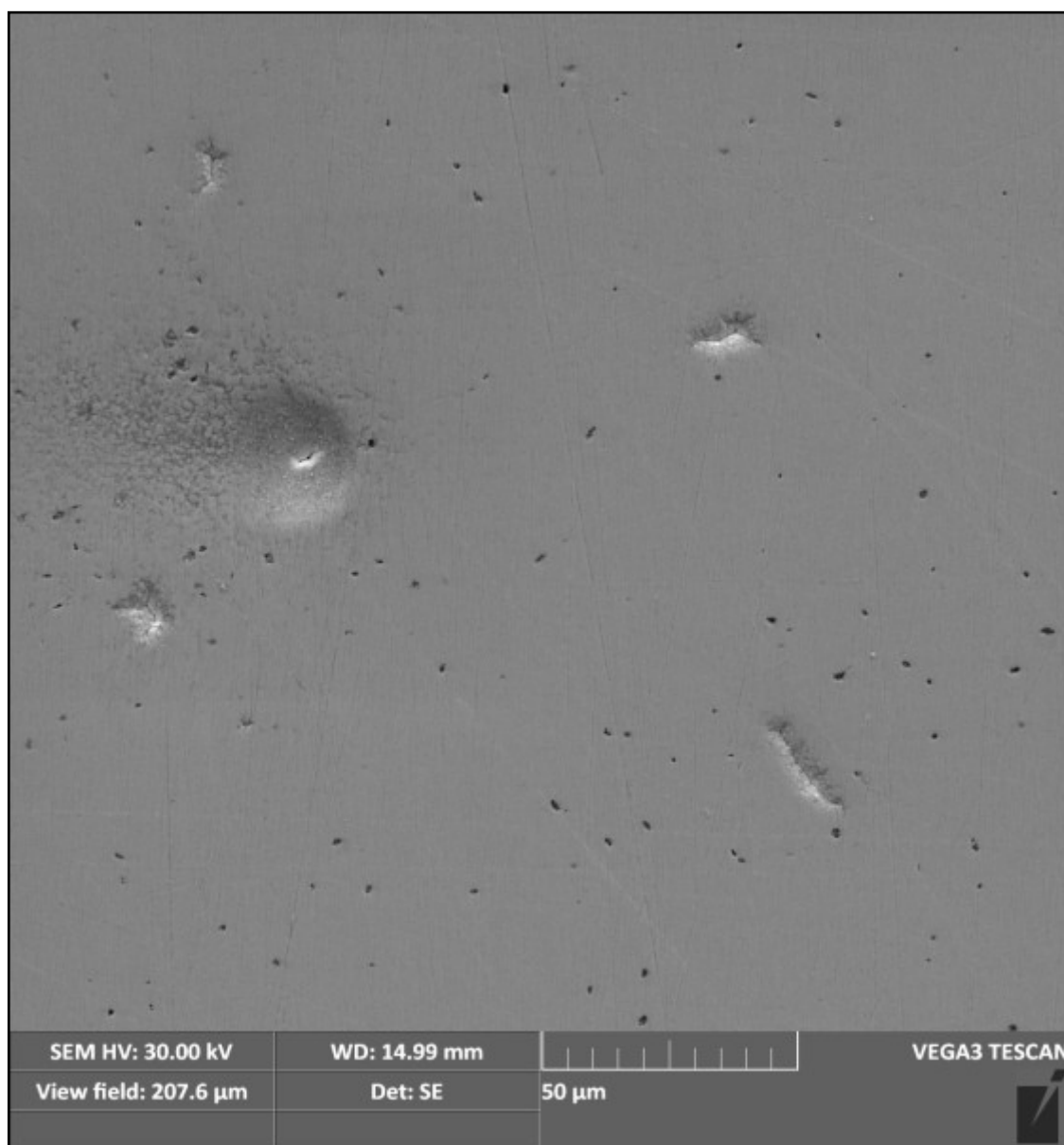
Další možnou příčinou vzniku pittingu je obsah organických koloidních nečistot v lázni. Pokud zůstávají v lázni rozpuštěny, četnost pittingu neovlivňují, ale dojde-li k jejich koagulaci (shlukování do větších molekul), mohou být mechanismem adsorpce (mezipovrchovými přitažlivými silami) vylučovány na povrch součásti a tím zvýšit její povrchové napětí. Proto se do lázní přidávají látky stabilizující koloidní sloučeniny (chloridy, ionty K^+ a Na^+).

Nejjednodušší metodou ke snížení povrchového napětí pokovované součásti je použití smáčedel, kterými bývají nejčastěji deriváty solí. Proto jsou tyto smáčedla přidávány do každé niklovací lázně a to zejména do lázní pro vylučování lesklého niklového povlaku, na kterém je z hlediska jeho funkce pitting téměř nepřipustný.

8.3 Vady po chemickém niklování optických zrcadel

Operace chemického niklování je nejkritičtější operací celého výrobního procesu. Právě vodíkový pitting vznikající během chemického niklování (obr. 8.3.1) často způsobuje vznik povlaku o nevhodné jakosti. Dochází tedy výrobě nevhodného kusu. V tomto případě musí následovat proces chemického odstranění niklového povlaku. Tím se ovšem rapidně prodlužuje čas celé operace včetně nákladů na pokovení.

Požadavek zadavatele zní, aby funkční plocha zrcadla ve svém středu, tedy v oblasti o průměru přibližně 60 mm, nebyla pittingem ovlivněna. Z čehož tedy plyne, že na zbylé funkční ploše zrcadla je do určité míry tento jev přípustný. Z pochopitelných designových požadavků je však snaha o maximální možné omezení pittingu.

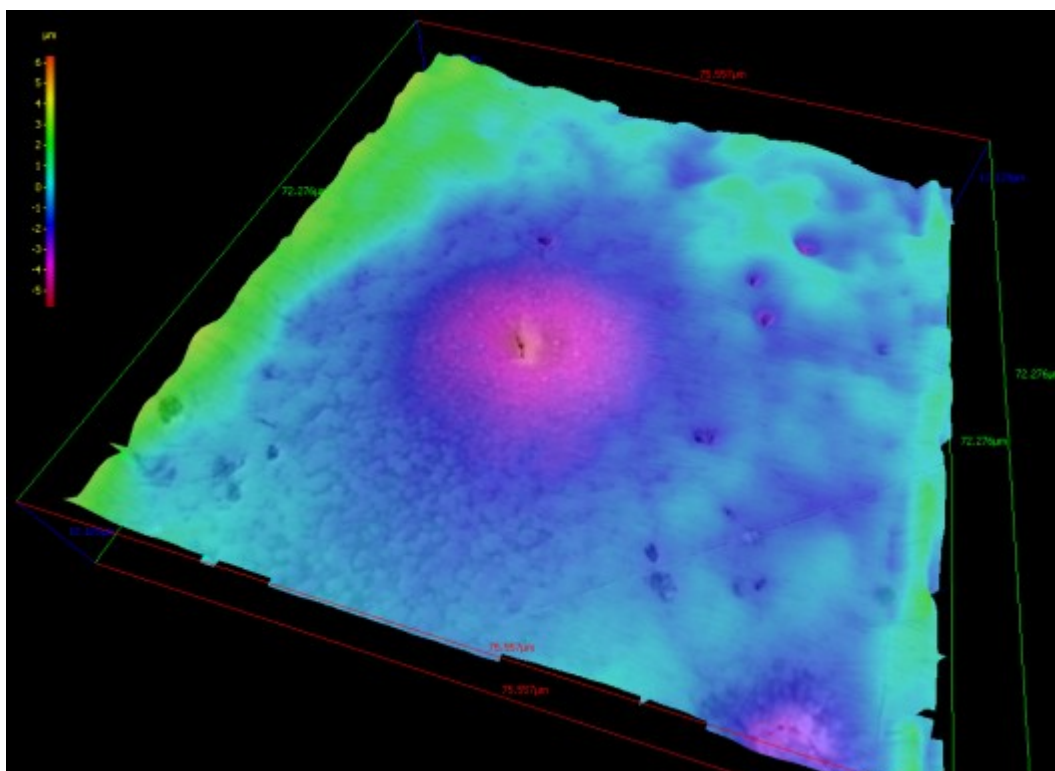
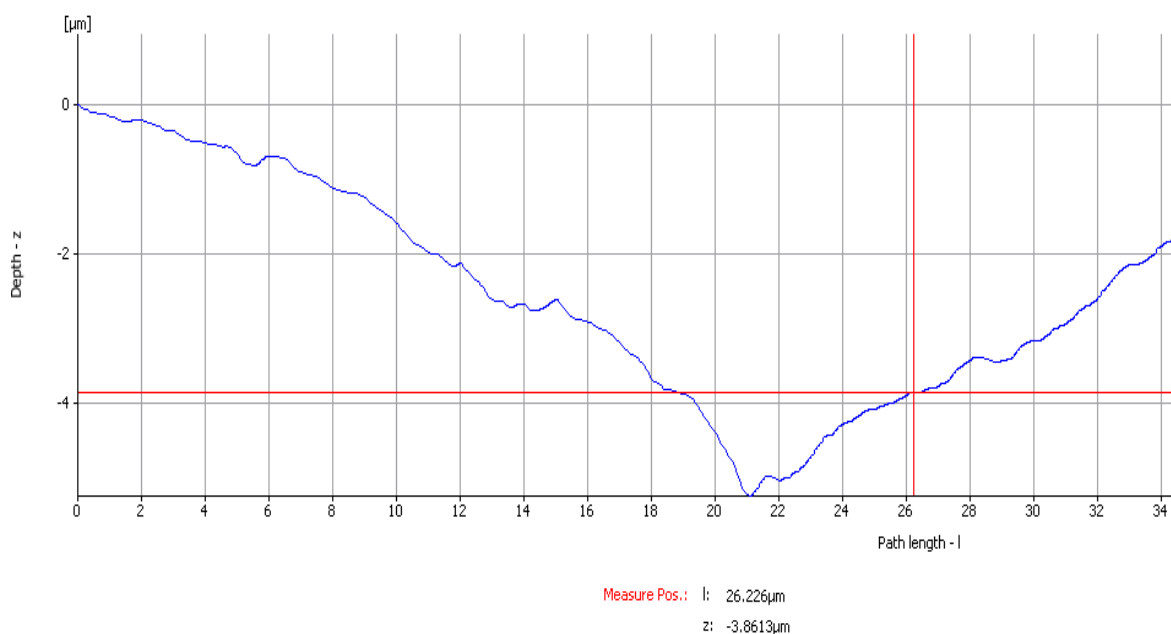


Obr. 8.3.1 Vodíkový pitting na povrchu optického zrcadla.⁴¹

Protože k pittingu během výroby dochází poměrně často a pokud se tedy vyskytuje jen v okrajových oblastech funkční plochy, vyvstala otázka, zda vzniklý kráter po ulpělé vodíkové molekule zasahuje až k základnímu materiálu. Pokud by se tak stalo, byl by základní materiál v určitém místě přímo vystaven koroznímu prostředí, což je z provozního hlediska nepřijatelné. Proto tedy byly pomocí elektronového mikroskopu provedeny testy právě na hloubku kráteru, které jsou zobrazeny na obr. 8.3.2, 8.3.3 a 8.3.4.



Obr. 8.3.2 Detail povrchového kráteru po molekule vodíku.⁴¹

Obr. 8.3.3 3D model povrchu zrcadla.⁴¹Obr. 8.3.4 Graf průběhu hloubky kráteru po vodíkové molekule.⁴¹

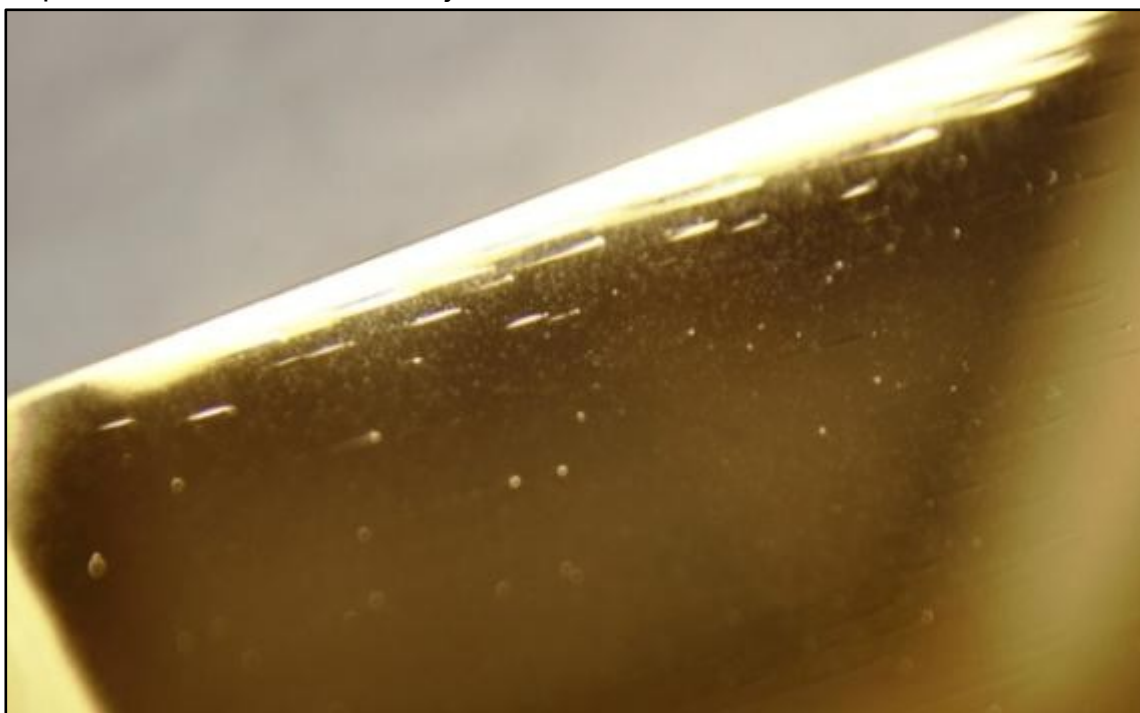
Dle výsledného grafu na obr. 8.3.4 dosahuje maximální hloubka kráteru 5 μm . Tloušťka niklového povlaku nanesená na zrcadle je 14 μm . Závěrem tedy je, že vodíkový pitting nezpůsobuje narušení povlaku až k základnímu materiálu.

8.4 Vady po galvanickém zlacení optických zrcadel

Všeobecně je známo, že se poniklovaný povrch obtížně aktivuje. V případě vysoce leštěného povrchu se tento problém ještě násobí. Proto bylo nutné laborovat s použitým aktivátorem, protože při špatné aktivaci by zlatý povlak k niklovému podkladu nepřilnul. Správnou volbou aktivátoru a pracovních podmínek bylo dosaženo zlatého povlaku s výbornou přilnavostí.

Na leštěných plochách některých zrcadel se občas objevovaly matné plochy, kde byl povlak hrubší. Tento jev byl zcela nahodilý a nesouvisel s typem zrcadla ani s typem podkladového materiálu (výskyt i u jiných výrobků). Hledání, ve kterém kroku pokovení se tyto změny projevují při zachování stejného technologického postupu, vedlo až na počátek celého procesu, tedy k předúpravám. Již při předúpravách (tj. při odmašťování a aktivaci povrchu) se u některých zrcadel projevilo tzv. šumení (únik bublinek vodíku) a to lokálně, na různých místech zrcadla s rozličnou velikostí této oblasti.

Pravděpodobným důvodem tohoto jevu je poréznost podkladové vrstvy (v tomto případě niklového povlaku). Odmašťovací a aktivací roztoky se póry a mikrotrhlinami dostanou až na povrch základního materiálu (tedy na slitinu Al-Mg-Si), kde dochází k jeho rozpouštění (rozpouští se v kyselinách i zásadách). Postupnou úpravou pracovních parametrů při pokovení (proudová hustota, čas), bylo dosaženo pokovení s požadovanou přilnavostí vzhledem k co nejmenšímu namáhání základního materiálu.³⁷



Obr. 8.4.1 Detail pittingu po galvanickém zlacení.

Při galvanickém zlacení dochází stejně jako u niklování k tvorbě pittingu. Tento je v detailu vidět na obr. 8.4.1. Na obr. 8.4.2 je zobrazen pohled na celé zrcadlo, kde je po celé levé části jasně viditelný pitting. Pro funkci zrcadel je nejdůležitější plocha v nejbližším okolí středu elipsoidu nebo hyperboloidu. Proto pitting na obr. 8.4.2 nepředstavuje překážku pro jeho použití v parabolické anténě. Pokud dojde ke znehodnocení pittingem v blízkosti středu nebo ve větší míře po celé ploše zrcadla, je nutné zlatý povlak odstranit (odzlatit) zapojením zrcadla jako anody a celý proces zlacení poté opakovat se zapojením zrcadla jako katody.



Obr. 8.4.1 Pitting po galvanickém zlacení.

K odstranění nebo alespoň ke zmírnění vývoje vodíku je třeba experimentálně nalézt ideální soulad jednotlivých parametrů, proudové hustoty, doby pokovování, použitých roztoků a proudění a filtrování lázně.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce je komplexní rozbor problematiky výroby eliptických a hyperbolických optických zrcadel pro vysokofrekvenční antény k projektu ALMA, které vyrábí brněnská firma Frentech Aeospace s.r.o. K objasnění příčin a následků jednotlivých problémů bylo použito dostupné literatury i praktických zkušeností jednotlivých firem, které se na výrobě podílejí formou kooperace.

Teoretický rozbor hliníkových slitin slouží jako obecný přehled neznámějších druhů slitin určených ke tváření nebo odlévání včetně popisu jejich základních technologických vlastností a značení dle platných norem. Seznamuje také s výhodami a nevýhodami jejich použití a s možností dalšího tepelného, mechanického či chemického zpracování. Protože jsou optická zrcadla vyráběna ze slitiny Al-Mg-Si, je těmto hliníkovým slitinám podrobně věnována značná část této kapitoly.

Zbytková napětí vznikající v součásti během jednotlivých operací frézování mají značný negativní vliv především na náklady celého výrobního procesu a prodlužují jeho celkový čas. K jejich odstranění je nutno do technologického postupu zařadit žíhání na odstranění vnitřního napětí, které probíhá při 180 °C po dobu 4 hodin s následným ochlazením v peci na 60 °C. Kapitola pojednává také o příčinách vzniku zbytkových napětí a uvádí přehled základních druhů a způsobů jejich měření.

Část věnující se technologičnosti výroby popisuje charakteristiku materiálu vyráběných zrcadel, technologický postup, použitý stroj a nástroje pro frézování výsledného tvaru, obsahuje i ukázky programů pro tvarové frézování řádkováním spolu se simulací a reálnou dokumentací jednotlivých operací.

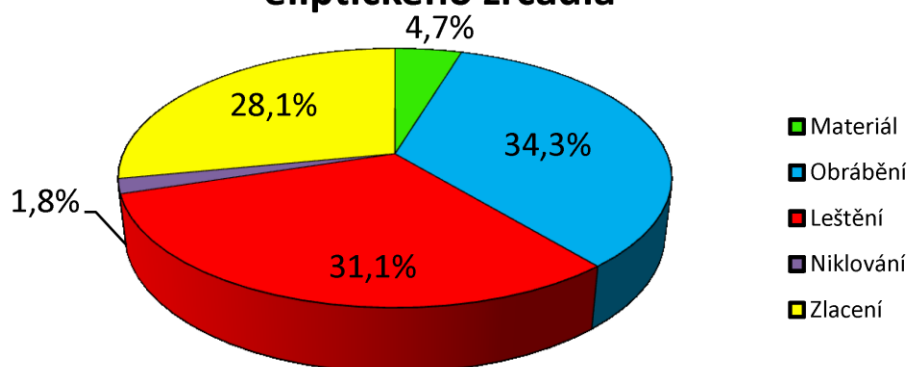
Leštění funkčních eliptických a hyperbolických ploch zrcadel prováděné z důvodu sjednocení geometrie povrchu je realizováno formou kooperace u specializované firmy. Pro pochopení náročnosti leštění této hliníkové slitiny byly provedeny rozborů mikrostruktury po obrábění pomocí elektronového mikroskopu. Ve struktuře se vylučují tvrdé precipitáty, které při leštění způsobují vymílání měkkých složek slitiny a tím dochází naopak ke zhoršení mikrogeometrie povrchu tvorbou tzv. kráterů. Dalším problémem je provedení eliptické nebo hyperbolické trajektorie při dodržení daného přídávku na leštění a také ustálené geometrické polohy nástroje vůči všem bodům povrchu. Celý tento proces je chráněn jako know-how dané firmy, proto k němu v této práci nejsou uvedeny bližší informace.

Závěr práce je věnován povrchovým úpravám, seznámení s principy jednotlivých druhů povrchových předúprav a technologií pro vytváření kovových povlaků. Detailně pak rozebírá technologii chemického niklování

a galvanického zlcení dílů z hliníkových slitin po teoretické i praktické stránce s uvedením technologických postupů a použitých chemických sloučenin. Niklování a zlcení tvoří dokončovací výrobní operace optických zrcadel. U obou těchto technologií dochází při procesu pokovení k tzv. pittingu, což je ulpívání molekul vodíku na povrchu pokovované plochy, tedy ke vzniku nedokonalé geometrie povlaku i k narušení jeho funkčnosti. V jednotlivých kapitolách je uvedeno seznámení s tímto jevem, s principy vzniku a s možnostmi jeho eliminace během procesu pokovování. Práce obsahuje dokumentaci pittingu přímo na povrchu zrcadel, včetně laboratorního měření pro určení hloubky vznikajících kráterů v povlaku. Byla řešena otázka, zda tyto krátery zasahují až k základnímu materiálu, čímž by mohlo dojít až k jeho následné provozní korozní degradaci.

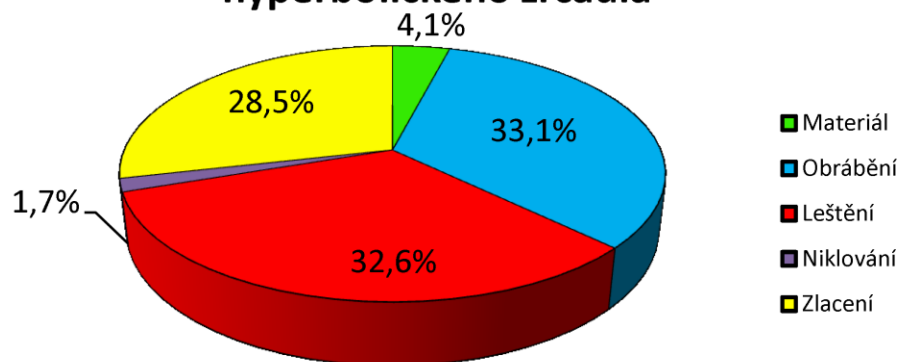
Nejkritičtějším místem celého výrobního procesu jsou právě povrchové úpravy, zejména kvůli pittingu. Nevyhovující povlak musí být nejdříve odstraněn a poté znovu vytvořen. To způsobuje časové prodlevy a zvýšení nákladů na výrobu. Náklady na výrobu jednoho kusu jsou na obr. 4 a 5.

Náklady na výrobu jednoho kusu eliptického zrcadla



Obr. 4 Náklady na výrobu jednoho kusu eliptického optického zrcadla.

Náklady na výrobu jednoho kusu hyperbolického zrcadla



Obr. 5 Náklady na výrobu jednoho kusu hyperbolického optického zrcadla.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *ALMA Observatory* [online]. c2011.02.03 [cit. 2011-04-01]. ALMA for the Public. Dostupné z WWW: <<http://www.almaobservatory.org/en/>>.
2. PÍŠKA, M. a kol. *Speciální technologie obrábění*. 1. vydání. Brno: CERM, 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
3. PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu I*. 1. vyd. Brno: CERM, 2001. 516 s. ISBN 80-7204-193-2.
4. KOCMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
5. VALÁŠEK, P. *Jakost povrchové vrstvy titanových slitin po obrábění: Diplomová práce*. Brno: VUT v Brně, FSI, ÚST, červen 2004. 68 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc.
6. MICHNA, Š., LUKÁČ, I., OČENÁŠEK, V. a kol. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin s.r.o., 2005, 720 s. ISBN 80-89041-88-4.
7. SOSNOVÁ, M. *Kluzné vrstvy a metody hodnocení adhezivně-kohezivního a tribologického chování*. Plzeň: ZČU, 2006, 68 s. FRVŠ 1230/2006.
8. HRUBÝ, V., TULKA, J., KADLEC, J. *Povrchové technologie*. Vojenská akademie v Brně, 1995, 120 s. S-283.
9. FIALA, J., KRAUS, I. *Povrchy a rozhraní*. Česká technika, ČVUT v Praze, 2009, 299 s.
10. DVOŘÁK, M. a kol. *Technologie II*. 2. vydání. Brno: CERM, 2004, 237 s. ISBN 80-214-2683-7.
11. VOJTĚCH, D. *Kovové materiály*. První vydání. Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha, 2006. 185 s. ISBN 80-7080-600-1.
12. MACEK, K., ZUNA, P. *Strojírenské materiály*. První vydání. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2003. 204 s. ISBN 80-01-02798-8.
13. JANOVEC, J., CEJP, J., STEIDL, J. *Perspektivní materiály*. Třetí přepracované vydání. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008. 143 s. ISBN 978-80-01-04167-3.
14. MACHEK, V., SODOMKA, J. *Speciální kovové materiály*. Vydání první. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008. 118 s. ISBN 978-80-01-04212-0.
15. HLUCHÝ, M., MODRÁČEK, O., PAŇÁK, R. *Strojírenská technologie 1 : Metalografie a tepelné zpracování 2. díl. 3. přepracované vydání*. Praha: Scientia, 2002. 173 s. ISBN 80-7183-265-0.
16. *Fakulta priemyselných technológií: Hliník* [online]. 2010 [cit. 2011-05-20]. Nauka o materiálu. Dostupné z WWW: <http://www.fpt.tnuni.sk/kfim/predmety/rocnik1/nauka_o_materiali/prezentacie_powerpoint/hlinik.ppt>.
17. *Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně* [online]. c2007 [cit. 2011-05-3]. Ústav materiálových věd a inženýrství. Dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/Files/Vyuka/BUM/08-BUM.ppt>>.
18. HLUCHÝ, M., KOLOUCH, J. *Strojírenská technologie 1. 1. díl: Nauka o materiálu*. Praha: Scientia, 2002. 266 s. ISBN ISBN: 80-7183-262-6.

19. *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze: Hliník* [online]. c2009 [cit. 2011-05-20]. Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství. Dostupné z WWW: <<http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/struktur/hlinik/>>.
20. *Nauka o materiálu Návrhy na opakování* [online]. c2005, [cit. 2011-12-05]. <http://www.ateam.zcu.cz/Nauka_opak.pdf>.
21. MACEK, K., ZUNA, P., JANOVEC, J. *Tepelné zpracování kovových materiálů*. První vydání. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008. 133 s. ISBN 978-80-01-04186-4.
22. KRAUS, V. *Povrchy a jejich úpravy*. 1. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2000. 218 s. ISBN 80-7082-668-1.
23. KREIBICH, V. *Teorie a technologie povrchových úprav*. 1. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. 89 s. ISBN 80-01-01472-X.
24. CHOVANCOVÁ, M., FELLNER, P., ŠPIRK, E. *Základy korózie a povrchové úpravy kovových materiálů*. 1. vydání. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2002. 269 s. ISBN 80-227-1688-X.
25. PODJUKLOVÁ, J. *Speciální technologie povrchových úprav I.*, dotisk. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1997. 76 s. ISBN 80-7078-235-8.
26. BARTL, O., MUDROCH, O. *Technologie chemických a elektrochemických povrchových úprav II*. První vydání. Brno: Státní nakladatelství technické literatury, 1957. 392 s. T. č. 13-E1-3-III/3233.
27. BARTL, O., MUDROCH, O. *Technologie chemických a elektrochemických povrchových úprav*. První vydání. Brno: Státní nakladatelství technické literatury, 1957. 448 s. T. č. 13-E1-3-III/3232.
28. HLÁVKA, J. *Základy fyziky povrchů pevných látek*. První vydání. Brno: Státní pedagogické nakladatelství, 1988. 114 s. Č. p. 1112-5784.
29. DORAZIL, E., HRSTKA, J. *Strojírenské materiály a povrchové úpravy*. Druhé vydání. Gottwaldov: Moravské tiskařské závody, 1988. 330 s. Č. p. 1489.
30. PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu II*. 2. opravené a rozš. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
31. MOHYLA, M. *Technologie povrchových úprav kovů*. 2. vydání. Ostrava: VŠB TU, 2000. 150 s. ISBN 80-7078-953-0.
32. *Frentech Aerospace s.r.o.: Technologie* [online]. 2010 [cit. 2011-05-18]. Výroba a technologie. Dostupné z WWW: <http://www.frentech.eu/index_c.php?id=14>.
33. *Nedal Aluminium* [online]. 2005 [cit. 2011-05-29]. Alloy. Dostupné z WWW: <http://www.nedal.nl/Downloads/Data_6061.pdf>.
34. *Metra: The spirit of innovation* [online]. c2006 [cit. 2011-05-18]. Industria. Dostupné z WWW: <http://www.metra.it/inglese/prodotti_industriali/tabellaLeghe/tabellaCatalogo6061eng.pdf>.
35. BUMBÁLEK, B. *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci*. Kvalita a geometrické specifikace produktů [online]. 2005, Vydání č. 11, [cit. 2011-05-20]. Dostupný z WWW:<http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf>.

36. BUMBÁLEK, L. *Vlastnosti povrchové vrstvy a jejich vliv na únavu*. První. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 261 s. ISBN 80-7204-373-0.
37. KŘÍŽ, A. *Vliv povrchu na užité vlastnosti výrobku*. Čtvrtý ročník konference, Strojírenská technologie - Plzeň 2011 [online]. Plzeň: 2011 [cit. 2011-05-20]. Dostupné z WWW: <http://www.ateam.zcu.cz/download/kriz_prispevek_technologie_2011.pdf>.
38. Podklady firmy TESLA Jihlava a.s., Jihlava.
39. AB SANDVIK COROMAT-SANDVIK CZ, s.r.o. *Příručka obrábění-kniha pro praxi*. Přel. KUDELA, M. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting-A Practical Handbook. ISBN 91-972299-4-6.
40. KOPEC, B. a kol. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: Nauka o materiálu IV*. Vydání první. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
41. Podklady firmy Frentech Aerospace s.r.o., Brno.
42. Podklady firmy Z-Precis s.r.o., Vsetín.
43. KRAUS, V. *Tepelné zpracování a slinování*. 2. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2000. 274 s. ISBN 80-7082-582-0.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka / Symbol	Jednotka	Popis
A	%	Tažnost.
A _e	g.A ⁻¹ .s ⁻¹	Elektrochemický potenciál.
α	/	Stabilní tuhý roztok hliníku.
α'	/	Nestabilní přesycený tuhý roztok hliníku.
ALMA	/	Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array
AN	/	Atomoc Number (Z).
Atom	at. %	Atomic percent.
c	mm ²	Plocha pokovované součásti.
CNC	/	Computer Numeric Control.
CVD	/	Chemical Vapour Deposition
č. op.	/	Číslo operace.
ČSN	/	Česká stání norma.
ČSN EN	/	Převzatá evropská norma.
DIN	/	Deutsche Industrie-Norm.
E	Gpa	Modul pružnosti v tahu.
EI	/	Element.
Error	%	Chyba měření (sigma 1).
ESA	/	European Space Agency.
ESO	/	European Southern Observatory
F	C.mol ⁻¹	Faradayova konstanta.
G	GPa	Modul pružnosti ve smyku.
h	mm	Tloušťka povlaku.
HB	/	Tvrдость podle Brinella.
I	A	Elektrický proud.
IAI	/	International Aluminium Institute
katal	/	Katalytická reakce
KOOP	/	Kooperace.
L	at. %	Chemické složení.
m	g	Množství látek vyloučených účinkem el. proudu
M	g.mol ⁻¹	Molární hmotnost kovu.
M _{e1}	/	Vylučovaný kov
M _{e2}	/	Podkladový kov
M _{e3}	/	Pomocný kov
m _{skut}	g	Skutečné množství rozpuštěného kovu.

Zkratka / Symbol	Jednotka	Popis
m_{teoret}	g	Teoretické množství kovu dle Faradayova zákona.
n		Počet vyměněných el. Nábojů při elektrolýze.
Net		Net counts.
Norm	hm. %	Normalized weight.
PAL	/	Povrchově aktivní látky.
pH	/	Kyselost roztoku.
PÚ	/	Povrchové úpravy.
PVD		Physical Vapour Deposition.
R	mm	Poloměr.
r	%	Proudový výtěžek
Ra	μm	Střední aritmetická úchylka profilu.
$\Gamma_{\text{kat (anod)}}$	%	Skutečné množství spotřebovaného proudu
Rm	MPa	Pevnost v tahu
Rp0,2	MPa	Smluvní mez kluzu.
Rt	μm	Celková výška profilu.
RTG	/	Rentgenové záření.
Rz	μm	Maximální výška profilu.
s	$\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$	Měrná hmotnost kovu.
t	s	Čas
TPZ	/	Tepelné zpracování.
Unn	hm. %	Unnormalized weight.

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Měřicí protokol pro optická zrcadla⁴¹
- Příloha 2 Zpráva z rozborů struktury pomocí elektronového mikroskopu⁴¹
- Příloha 3 Protokol o měření funkčnosti parabolických antén⁴¹
- Příloha 4 Výkres eliptického a hyperbolického zrcadla⁴¹
- Příloha 5 Výkres sestavy zrcadel⁴¹