

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F2

Fakulta strojní

Vliv mikrostruktury polotovaru na vlastnosti kované slitiny AlMgSi

Bc. Martin Vojna

Školitel: Ing. Jakub Horník, Ph.D.
Červen 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vojna** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **419959**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv mikrostruktury polotovaru na vlastnosti kované slitiny AlMgSi

Název diplomové práce anglicky:

Influence of semiproduct microstructure on properties of forged AlMgSi alloy

Pokyny pro vypracování:

Literární rešerše v oblasti mikrostruktury a vlastností slitin AlMgSi
Návrh a příprava experimentu
Provedení experimentu - vyhodnocení vlivu deformace na mikrostrukturu (rekrytalizaci) vybraných polotovarů
Diskuse výsledků a závěry

Seznam doporučené literatury:

- [1] Aluminium and Aluminium alloys ASM handbook. Materials Park, Ohio: ASM International, 2004. ISBN 9780871707062
- [2] MICHNA, Š.: Encyklopedie hliníku. Děčín, Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 8089041884
- [3] SEDLÁČEK, V. a kol.: Zotavení a rekrytalizace. Academia, Praha, 1985

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:


Ing. Jakub Horník, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS

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


Datum zadání diplomové práce: **03.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **30.07.2018**

Platnost zadání diplomové práce: _____


Ing. Jakub Horník, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

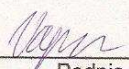

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

16.4.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Poděkování

Děkuji Ing. Jakubu Horníkovi, Ph.D za cenné rady a připomínky bez nichž by tato práce nemohla vzniknout.

Zvláštní poděkování patří Ing. Janu Krčilovi a Ing. Vladimíru Márovi za velkou pomoc při zacházení s chemikáliemi a zařízeními v laboratoři.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 3. 6. 2018

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá vlivem mikrostruktury polotovaru na mechanické vlastnosti slitin AlMgSi vyrobených lisováním nebo horizontálním kontinuálním litím HCM. Význam těchto slitin roste s tlakem na snižování hmotnosti konstrukcí, zejména v automobilovém průmyslu. V práci byla stanovena velikost zrna slitin EN AW-6082 a EN AW-6110A v podélném řezu. Dále byla stanovena velikost zrna slitiny EN AW-6082 ve třech stavech s úzkou vazbou na jejich využití v praxi. Za účelem ověření mechanických vlastností byly změřeny průběhy mikrotvrdosti polotovarů.

Klíčová slova: AlMgSi, EN AW-6082, EN AW-6110A, HCM, protlačování, mikrostruktura, velikost zrna, mikrotvrdost

Školitel: Ing. Jakub Horník, Ph.D.

Abstract

This thesis investigates influence of microstructure on mechanical properties of AlMgSi alloys that were fabricated by extrusion or horizontal casting method HCM. Importance of these alloys is rising with increasing efforts to lower weight of assemblies, especially in the automotive industry. Grain size of alloys EN AW-6082 and EN AW-6110A in longitudinal cut has been established. Furthermore, grain size of the EN AW-6082 alloy, in three conditions tightly connected to processing parameters, has been measured. Lastly, microhardness of the semiproducts has been measured, in order to verify their mechanical properties.

Keywords: AlMgSi, EN AW-6082, EN AW-6110A, HCM, extrusion, microstructure, grain size, microhardness

Title translation: Influence of semiproduct microstructure on properties of forged AlMgSi alloy

Obsah

Úvod	1		
Část I			
Teoretická část			
1 Horizontální kontinuální lití HCM	4		
2 Průtlačné lisování hliníku a jeho slitin za tepla	6		
2.1 Přímé lisování	6		
2.2 Nepřímé lisování	7		
3 Jevy provázející tváření materiálu	8		
3.1 Deformace	8		
3.1.1 Charakteristiky plasticky deformovaného kovu	9		
3.1.2 Zpevnění	9		
3.2 Odpevňovací mechanismy	9		
3.2.1 Zotavení	10		
3.2.2 Rekrytalizace	10		
3.2.3 Dynamické odpevňování	12		
4 Čistý hliník	13		
4.1 Vlastnosti hliníku	13		
4.1.1 Fyzikálně - chemické vlastnosti	13		
4.1.2 Mechanické a technologické vlastnosti	13		
5 Slitiny hliníku a jejich vlastnosti	15		
5.1 Vliv prvků na vlastnosti hliníkových slitin	15		
5.1.1 Bor	15		
5.1.2 Cín	15		
5.1.3 Hořčík	16		
5.1.4 Chrom	16		
5.1.5 Křemík	16		
5.1.6 Mangan	16		
5.1.7 Měď	17		
5.1.8 Nikl	17		
5.1.9 Olovo	17		
5.1.10 Titan	17		
5.1.11 Vodík	17		
5.1.12 Zinek	17		
5.1.13 Zirkon	18		
5.1.14 Železo	18		
5.2 Mechanické vlastnosti slitin hliníku	18		
5.3 Technologické vlastnosti slitin hliníku	21		
5.3.1 Tvařitelnost slitin hliníku	21		
5.3.2 Slévateľnost slitin hliníku	22		
5.3.3 Obrobitelnost slitin hliníku	22		
5.3.4 Svařitelnost slitin hliníku	22		
5.4 Chemické vlastnosti slitin hliníku	22		
5.5 Značení slitin hliníku	23		
5.5.1 Tvářené slitiny podle ČSN EN 573-1 až 3	23		
5.5.2 Slévárenské slitiny podle ČSN EN 1706	23		
6 Přehled slitin hliníku	24		
6.1 Tvářené	24		
6.1.1 Slitiny třídy 1xxx	24		
6.1.2 Slitiny třídy 2xxx	24		
6.1.3 Slitiny třídy 3xxx	24		
6.1.4 Slitiny třídy 4xxx	24		
6.1.5 Slitiny třídy 5xxx	25		
6.1.6 Slitiny třídy 6xxx	25		
6.1.7 Slitiny třídy 7xxx	27		
6.1.8 Slitiny třídy 8xxx	27		
6.1.9 Slitiny třídy 9xxx	27		
6.2 Slévárenské slitiny hliníku	27		
6.2.1 Slitiny Al-Cu	27		
6.2.2 Slitiny Al-Cu-Si	28		
6.2.3 Slitiny Al-Si	28		
6.2.4 Slitiny Al-Mg	29		
6.2.5 Slitiny Al-Zn-Mg	29		
6.2.6 Slitiny Al-Sn	30		
7 Tepelné zpracování slitin hliníku	31		
7.1 Žihání	31		
7.1.1 Rekrytalizační žihání	31		
7.1.2 Stabilizační žihání	31		
7.1.3 Žihání ke snížení pnutí	32		
7.1.4 Homogenizační žihání	32		
7.1.5 Rozpouštěcí žihání	32		
7.2 Precipitační zpevnění – vytvrzování	32		
8 Slitiny EN AW-6082 a EN AW-6110A	35		
8.1 Slitina EN AW-6082	35		
8.1.1 Vytvrzování slitiny EN AW-6082	36		
8.2 Slitina EN AW-6110A	37		
Část II			

Experimentální část	
9 Cíle a rozsah experimentální části	40
9.1 Dodaný materiál.....	40
10 Příprava vzorků	42
10.1 Dělení vzorků	42
10.2 Fixace vzorků	43
10.3 Broušení.....	43
10.4 Leštění	43
10.5 Leptání.....	43
10.5.1 Leptání litých vzorků	43
10.5.2 Leptání tvářených vzorků ..	44
11 Mikrostruktura vzorků	45
11.1 Lité polotovary	45
11.1.1 HCM EN AW-6082 1. dávka	45
11.1.2 HCM EN AW-6110A 1. dávka	46
11.1.3 HCM EN AW-6082 2. dávka	
výchozí stav	47
11.1.4 HCM EN AW-6082 po ohřevu	48
11.1.5 HCM EN AW-6082 po	
deformaci.....	49
11.2 Lisované polotovary	51
11.2.1 EN AW-6082 1. dávka	51
11.2.2 EN AW-6110A 1. dávka ...	52
11.2.3 EN AW-6082 výchozí stav..	53
11.2.4 EN AW-6082 po ohřevu....	55
11.2.5 EN AW-6082 po deformaci	
30%	57
12 Měření velikosti zrna	60
12.1 Způsob měření velikosti zrna ..	60
12.1.1 Lité polotovary	60
12.1.2 Lisované polotovary	60
12.2 Výsledky měření.....	61
12.2.1 Histogramy	61
12.2.2 Číselné výsledky	62
12.3 Vyhodnocení měření velikosti	
zrna.....	63
13 Měření mikrotvrdosti	66
13.1 Způsob měření mikrotvrdosti ..	66
13.2 Výsledky měření mikrotvrdosti	66
13.3 Vyhodnocení měření	
mikrotvrdosti	69
14 Závěr	70
Literatura	72
Přílohy	
A Snímky mikrostruktur vzorků	76
A.1 Lité polotovary	76
A.1.1 HCM EN AW-6082 1. dávka	76
A.1.2 HCM EN AW-6110A 1. dávka	77
A.1.3 HCM EN AW-6082 2.dávka	
výchozí stav	78
A.1.4 HCM EN AW-6082 po ohřevu	80
A.1.5 HCM EN AW-6082 po	
deformaci.....	82
A.2 Lisované polotovary	84
A.2.1 EN AW-6082 1. dávka	84
A.2.2 EN AW-6110A 1. dávka	85
A.2.3 EN AW-6082 2.dávka výchozí	
stav.....	86
A.2.4 EN AW-6082 po ohřevu	88
A.2.5 EN AW-6082 po deformaci .	90
B Histogramy HCM slitin	92
C Průběhy mikrotvrdosti	96
C.1 Lité polotovary	96
C.1.1 HCM EN AW-6082 1. dávka	96
C.1.2 HCM EN AW-6110A 1. dávka	97
C.1.3 HCM EN AW-6082 výchozí	
stav.....	98
C.1.4 HCM EN AW-6082 po	
ohřevu	100
C.1.5 HCM EN AW-6082 po	
deformaci 30 %.....	102
C.2 Lisované polotovary	104
C.2.1 EN AW-6082 výchozí stav .	104
C.2.2 EN AW-6082 po ohřevu ...	107
C.2.3 EN AW-6082 po deformaci 30	
%.....	109

Obrázky

1.1 Schéma HCM [4]	4	11.2 Struktura HCM slitiny EN AW-6082 na povrchu	46
2.1 Schéma přímého lisování [5]	7	11.3 Struktura HCM slitiny EN AW-6110A na povrchu	46
2.2 Schéma nepřímého lisování [5] ...	7	11.4 Struktura v oblasti povrchu HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)	47
3.1 Schématické znázornění některých deformačních mechanismů [7]	8	11.5 Struktura v oblasti povrchu HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (podélný řez)	47
3.2 Znázornění procesu polygonizace [5]	10	11.6 Struktura HCM v oblasti povrchu slitiny EN AW-6082 po ohřevu (příčný řez)	48
3.3 Znázornění změny mechanických vlastností v průběhu zotavení a rekrytalizace [7]	11	11.7 Struktura v oblasti povrchu HCM slitiny EN AW-6082 po ohřevu (podélný řez)	48
5.1 Pevnost a tažnost Al slitin v porovnání s ocelmi [11]	19	11.8 Struktura v oblasti povrchu HCM slitiny po deformaci (příčný řez) ..	49
5.2 Mez pevnosti některých slitin hliníku [5]	20	11.9 Struktura v oblasti jádra HCM slitiny po deformaci v oblasti (příčný řez)	49
5.3 Mez pevnosti při tečení v závislosti na teplotě; plech ze slitiny AlMg5 v měkkém stavu [5]	21	11.10 Struktura v oblasti povrchu HCM slitiny po deformaci (podélný řez)	50
6.1 Část diagramu Al-Mg ₂ Si [5]	25	11.11 Struktura v oblasti jádra HCM slitiny po deformaci v oblasti (podélný řez)	50
6.2 Projekce povrchu likvidu u systému Al-Mg-Si (koncentrace v at. %) [5]	26	11.12 Struktura lisované slitiny EN AW-6082 v jádře	51
6.3 Rovnovážný diagram Al-Si [5] ..	29	11.13 Detail struktury lisované slitiny EN AW-6082 v jádře	52
7.1 „C” křivky různých hliníkových slitin [5]	33	11.14 Struktura lisované slitiny EN AW-6110A v jádře	53
7.2 Křivka kinetiky rozpadu slitiny EN AW-6262 pro přirozené stárnutí [5]	33	11.15 Detail struktury lisované slitiny EN AW-6110A v jádře	53
7.3 Křivka kinetiky rozpadu slitiny EN AW-6262 pro umělé stárnutí [5] ...	34	11.16 Struktura v oblasti povrchu lisované slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)	54
8.1 Vliv teploty rozpouštěcího žíhání na tvrdost slitiny EN AW-6082 [20]	36	11.17 Struktura v oblasti povrchu lisované slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (podélný řez)	55
8.2 Vliv doby stárnutí na mez kluzu slitiny EN AW-6082 za různých teplot [20]	37	11.18 Struktura v oblasti povrchu lisované slitiny EN AW-6082 po ohřevu (příčný řez)	56
9.1 Typové fotografie dodaných polotovarů	40		
10.1 Schéma řezání tyčových polotovarů	42		
10.2 Schéma řezání polotovarů po deformaci 30 %	42		
11.1 Znázornění měřených oblastí vzorků	45		

11.19	Struktura v oblasti povrchu lisované slitiny EN AW-6082 po ohřevu (podélný řez)	57	A.5	Struktura v přechodové oblasti HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)	78
11.20	Struktura v oblasti povrchu lisované slitiny EN AW-6082 po deformaci (příčný řez)	58	A.6	Struktura v jádře HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)	79
11.21	Struktura v oblasti povrchu lisované slitiny EN AW-6082 po deformaci (podélný řez)	59	A.7	Struktura v přechodové oblasti HCM slitiny EN AW-6082 (podélný řez)	79
12.1	Histogram velikosti zrna v povrchové vrstvě HCM slitiny EN AW-6082 (podélný řez)	61	A.8	Struktura v jádře HCM slitiny EN AW-6082 (podélný řez)	80
12.2	Histogram velikosti zrna v přechodové oblasti slitiny HCM EN AW-6082 (podélný řez)	61	A.9	Struktura v přechodové oblasti HCM slitiny EN AW-6082 po ohřevu (příčný řez)	80
12.3	Histogram velikosti zrna v jádře HCM slitiny EN AW-6082 (podélný řez)	62	A.10	Struktura v jádře HCM slitiny EN AW-6082 po ohřevu (příčný řez)	81
12.4	Srovnání velikosti zrna měřených polotovarů (příčný řez)	64	A.11	Struktura v přechodové oblasti HCM slitiny EN AW-6082 po ohřevu (podélný řez)	81
12.5	Srovnání velikosti zrna měřených polotovarů (podélný řez)	65	A.12	Struktura v jádře HCM slitiny EN AW-6082 po ohřevu (podélný řez)	82
13.1	Průběh mikrotvrdosti slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)	66	A.13	Struktura v přechodové oblasti HCM slitiny EN AW-6082 po deformaci (příčný řez)	82
13.2	Průběh mikrotvrdosti slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)	67	A.14	Struktura v jádře HCM slitiny EN AW-6082 po deformaci (příčný řez)	83
13.3	Srovnání velikosti zrna měřených polotovarů (příčný řez)	68	A.15	Struktura v přechodové oblasti HCM slitiny EN AW-6082 po deformaci (podélný řez)	83
13.4	Srovnání mikrotvrdosti měřených polotovarů (příčný řez)	68	A.16	Struktura v jádře HCM slitiny EN AW-6082 po deformaci (podélný řez)	84
13.5	Srovnání velikosti zrna měřených polotovarů (podélný řez)	69	A.17	Struktura slitiny EN AW-6082 v přechodové oblasti	84
13.6	Srovnání mikrotvrdosti měřených polotovarů (podélný řez)	69	A.18	Struktura slitiny EN AW-6082 v jádře	85
A.1	Struktura HCM slitiny EN AW-6082 v přechodové oblasti	76	A.19	Struktura slitiny EN AW-6110A v přechodové oblasti	85
A.2	Struktura HCM slitiny EN AW-6082 v jádře	77	A.20	Struktura v přechodové oblasti slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)	86
A.3	Struktura HCM slitiny EN AW-6110A v přechodové oblasti	77	A.21	Struktura v jádře slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)	86
A.4	Struktura HCM slitiny EN AW-6110A v jádře	78			

A.22	Struktura v přechodové oblasti slitiny EN AW-6082 (podélný řez)	87	B.7	Histogram velikosti zrna v povrchové vrstvě HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (podélný řez)	94
A.23	Struktura v jádře slitiny EN AW-6082 (podélný řez)	87	B.8	Histogram velikosti zrna v přechodové oblasti slitiny HCM EN AW-6082 ve výchozím stavu (podélný řez)	95
A.24	Struktura v přechodové oblasti slitiny EN AW-6082 po ohřevu (příčný řez)	88	B.9	Histogram velikosti zrna v jádře HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (podélný řez)	95
A.25	Struktura v jádře slitiny EN AW-6082 po ohřevu (příčný řez)	88	C.1	Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu HCM slitiny EN AW-6082 (podélný řez)	96
A.26	Struktura v přechodové oblasti slitiny EN AW-6082 po ohřevu (podélný řez)	89	C.2	Průběh mikrotvrdosti HCM slitiny EN AW-6082 (podélný řez)	97
A.27	Struktura v jádře slitiny EN AW-6082 po ohřevu (podélný řez)	89	C.3	Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu HCM slitiny EN AW-6110A (podélný řez)	97
A.28	Struktura v přechodové oblasti slitiny EN AW-6082 po deformaci (příčný řez)	90	C.4	Průběh mikrotvrdosti HCM slitiny EN AW-6110A (podélný řez)	98
A.29	Struktura v jádře slitiny EN AW-6082 po deformaci (příčný řez)	90	C.5	Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)	98
A.30	Struktura v přechodové oblasti slitiny EN AW-6082 po deformaci (podélný řez)	91	C.6	Průběh mikrotvrdosti HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)	99
A.31	Struktura v jádře slitiny EN AW-6082 po deformaci (podélný řez)	91	C.7	Průběh mikrotvrdosti HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (podélný řez)	99
B.1	Histogram velikosti zrna v povrchové vrstvě HCM slitiny EN AW-6110A (podélný řez)	92	C.8	Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (podélný řez)	100
B.2	Histogram velikosti zrna v přechodové oblasti HCM slitiny EN AW-6110A (podélný řez)	92	C.9	Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu HCM slitiny EN AW-6082 po ohřevu (příčný řez)	100
B.3	Histogram velikosti zrna v jádře HCM slitiny EN AW-6110A (podélný řez)	93	C.10	Průběh mikrotvrdosti HCM slitiny EN AW-6082 po ohřevu (příčný řez)	101
B.4	Histogram velikosti zrna v povrchové vrstvě HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)	93	C.11	Průběh mikrotvrdosti HCM slitiny EN AW-6082 po ohřevu (podélný řez)	101
B.5	Histogram velikosti zrna v přechodové oblasti slitiny HCM EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)	93	C.12	Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu HCM slitiny EN AW-6082 po ohřevu (podélný řez)	102
B.6	Histogram velikosti zrna v jádře HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)	94			

C.13 Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu HCM slitiny EN AW-6082 po deformaci (příčný řez)	102
C.14 Průběh mikrotvrdosti HCM slitiny EN AW-6082 po deformaci (příčný řez)	103
C.15 Průběh mikrotvrdosti HCM slitiny EN AW-6082 po deformaci (podélný řez)	103
C.16 Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu HCM slitiny EN AW-6082 po deformaci (podélný řez)	104
C.17 Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)	104
C.18 Průběh mikrotvrdosti slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)	105
C.19 Průběh mikrotvrdosti slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (podélný řez)	105
C.20 Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (podélný řez)	106
C.21 Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu slitiny EN AW-6082 po ohřevu (příčný řez)	107
C.22 Průběh mikrotvrdosti slitiny EN AW-6082 po ohřevu (příčný řez)	107
C.23 Průběh mikrotvrdosti slitiny EN AW-6082 po ohřevu (podélný řez)	108
C.24 Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu slitiny EN AW-6082 po ohřevu (podélný řez)	108
C.25 Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu slitiny EN AW-6082 po deformaci (příčný řez)	109
C.26 Průběh mikrotvrdosti slitiny EN AW-6082 po deformaci (příčný řez)	109
C.27 Průběh mikrotvrdosti slitiny EN AW-6082 po deformaci (podélný řez)	110
C.28 Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu slitiny EN AW-6082 po deformaci (podélný řez)	110

Tabulky

4.1 Stručný přehled základních vlastností hliníku [5, 9]	14
5.1 Číselné značení tvářených slitin hliníku [5]	23
8.1 Chemické složení EN AW-6082 v hm. % [24]	35
8.2 Mechanické vlastnosti EN AW-6082 v závislosti na tepelném zpracování. (Tyče průměru do 80 mm.) [25]	35
8.3 Chemické složení EN AW-6110A v hm. % [24]	37
8.4 Mechanické vlastnosti EN AW-6110A v závislosti na tepelném zpracování. [25]	38
10.1 Pořadí a zrnitost použitých brusných papírů	43
12.1 Výsledky měření velikosti zrna (příčný řez)	62
12.2 Výsledky měření velikosti zrna (podélný řez)	63
13.1 Mikrotvrdost polotovarů v příčném řezu	67
13.2 Mikrotvrdost polotovarů v podélném řezu	67

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Jednotka	Význam
HCM	-	Horizontal Casting Module - horizontální kontinuální lití
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
HBW	[-]	Tvrдость podle Brinella
HV	[-]	Tvrдость podle Vickerse
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
$R_{p0,2}$	[MPa]	Mez kluzu
A	[%]	Tažnost
T_T	[K]	Teplota tání
R_{mT}	[MPa]	Mez pevnosti v tečení
MIG	-	Metoda obloukového svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře
TIG	-	Metoda obloukového svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře
\bar{a}	[mm ²]	Střední plocha zrna
\bar{d}	[mm]	Střední průměr zrna
l_{rov}	[mm]	Pr. délka úseku zrna ve směru rovno. se směrem deformace
l_{kol}	[mm]	Pr. délka úseku zrna ve směru kolmém na směr deformace
HBF ₄	-	Kyselina tetrafluoroboritá



Úvod

Od objevu hliníku uplynulo téměř dvě stě let, a přesto se jedná o perspektivní materiál. V dnešní době možná více než kdy dřív. Dochází k vývoji nových slitin a rozšiřování hliníku a jeho slitin do nových odvětví. Tvrdý konkurenční boj a stav životního prostředí mají za následek snahu o snižování spotřeby dopravních prostředků. Toho lze dosáhnout snížením jejich hmotnosti. Snižování hmotnosti konstrukcí se stalo velkým trendem dnešní doby. Z toho důvodu hliníkové slitiny částečně nahrazují slitiny železa, a to zejména v leteckém a automobilovém průmyslu. V automobilovém průmyslu jsou to nejčastěji slitiny AlMgSi.

Při volbě polotovaru pro výrobu je kromě materiálu důležitý také způsob jeho výroby. Ten se projeví na vlastnostech výsledného výrobku a také na jeho ceně. Pro většinu výrobků to znamená výběr mezi polotovarem odlévaným, nebo tvářeným.

Tato práce je výsledkem spolupráce se společností Strojmetal Aluminium Forging s.r.o. a částečně navazuje na diplomovou práci Ing. Jana Kružíka. V jeho práci byla vyhodnocena mikrostruktura hliníkových slitin EN AW-6082 a EN AW-6110A, vyráběných horizontálním přetlakovým litím (HCM) a průtláčným lisováním, v příčném řezu.

Cílem této diplomové práce je charakterizace mikrostruktury výše zmíněných slitin v podélném řezu a dále také slitiny EN AW-6082 ve třech stavech úzce spjatých s výrobním postupem v praxi. Jde o výchozí stav polotovaru (bez tepelného zpracování), stav po ohřevu na tvářecí teplotu, a nakonec stav po deformaci 30 %. Cílem bylo vyhodnotit všechny tyto stavy také pro oba způsoby výroby zmíněné výše. Za účelem kvantifikace a srovnání mikrostruktury vzorků byla změřena velikost zrna ve třech oblastech.

Zatímco pro charakteristiku mikrostruktury materiálu byla použita velikost zrna, pro charakteristiku mechanických vlastností byla vybrána tvrdost jako běžně užívaná mechanická vlastnost materiálu. Dalším cílem práce je tedy vyhodnocení tvrdosti slitiny EN AW-6082 vyrobené dvěma způsoby výroby ve třech stavech.

Hlavním cílem této diplomové práce je popsat vztah mezi mikrostrukturou a mechanickými vlastnostmi vybraných slitin hliníku.



Část I

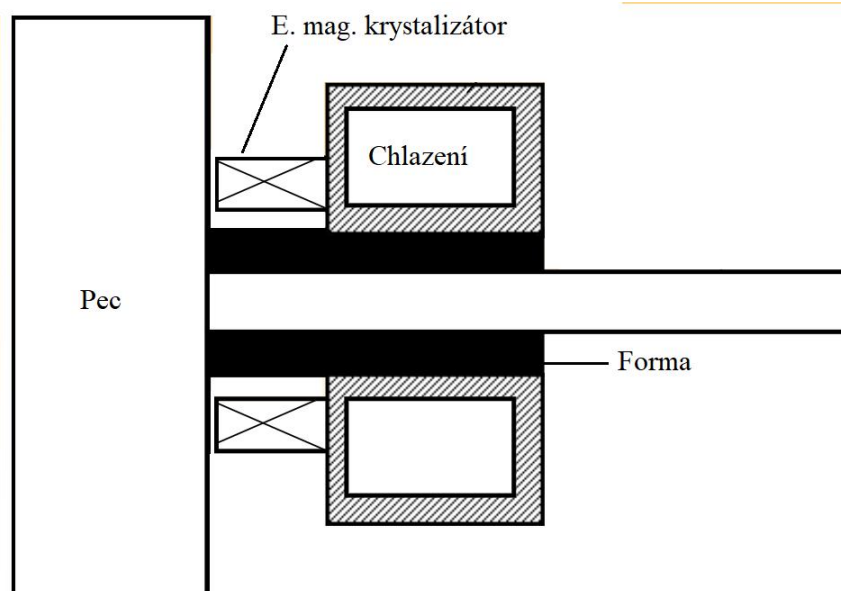
Teoretická část

Kapitola 1

Horizontální kontinuální lití HCM

Horizontální kontinuální lití jako takové se datuje až do 19. století, ale více se rozšířilo až v 70. letech 20. století. Ve světě je více vertikálních zařízení, ale horizontální lití je široce využíváno ve středních a menších podnicích. Metoda HCM je nová, a proto málo rozšířená, technologie. Podobná metoda je známá u slitin železa, ale u slitin hliníku nebyla do nedávné doby s úspěchem realizována. [1, 2, 3]

Tento způsob výroby se skládá z několika částí. Jednoduché schéma je na obr. 1.1. Tekutý kov vstupuje z mezipánve otvorem ve spodní části do ochlazované formy. Používá se několik způsobů chlazení. Nejčastější jsou jednoduché ochlazování proudem vody, nebo vodou chlazeným měděným pláštěm. Nejdůležitější částí procesu je tažení materiálu skrze elektromagnetického pole. Jde o kritickou část procesu, která dříve působila značné problémy, neboť docházelo k trhlinám na povrchu materiálu. [1, 2, 3]



Obrázek 1.1: Schéma HCM [4]

Horizontální kontinuální lití tímto postupem produkuje jemnozrnné a izotropické polotovary. HCM je také ekonomičtější díky menší energetické náročnosti a větší automatizaci procesu. [1, 2, 3]

Kapitola 2

Průtlačné lisování hliníku a jeho slitin za tepla

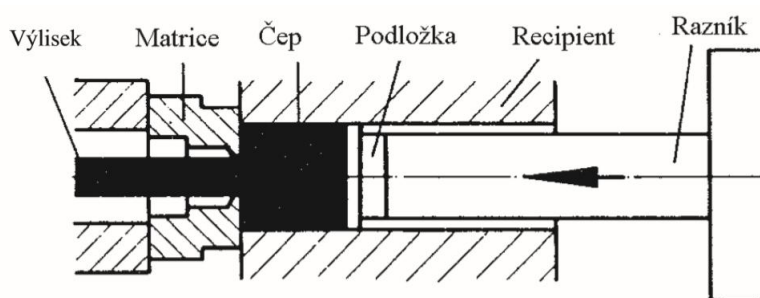
Průtlačné lisování je jednou z nejběžnějších metod tváření hliníku a jeho slitin. Jak lze odvodit z názvu, principem je protlačení materiálu otvorem, který udává konečný tvar výlisku. Polotovary pro lisování jsou polokontinuálně lité čepy nařezané z tyčí na potřebnou délku. Za účelem snížení přetvárného odporu se čepy a recipient lisu předehřívají na požadovanou teplotu. Tato teplota se volí co nejvyšší, ale aby již nedocházelo k trhlinám a povrchovým vadám. Čep je zasunut do recipientu s mírně větším vnitřním průměrem než průměr čepu. Razník poté protlačí materiál čepu přes lisovací matici. Na výlisku se vždy vyskytuje nevylišovaná část, kterou je nutné odstranit. [5, 6]

Průtlačným lisováním lze na relativně malý počet operací vyrobit různé typy výlisků jednoduchých i složitých tvarů. Výlisky mají přesné rozměry a kvalitní povrch. Nevýhody tohoto způsobu výroby jsou nižší životnost lisů, větší předváha a omezená délka výlisků. Široká řada slitin hliníku, a tedy i široké rozpětí technologických a mechanických vlastností způsobuje, že zdaleka ne všechny slitiny se hodí pro jeden výrobní postup. Z toho důvodu existuje několik způsobů průtlačného lisování. Jednotlivé způsoby se liší formou deformačního procesu, konstrukcí nástrojů a následnými operacemi. Podle uspořádání a vzájemného pohybu razníku a nástroje se lisování dělí na přímé a nepřímé. [5, 6]

2.1 Přímé lisování

Z uvedených způsobů lisování je nejběžnější způsob přímý. Jeho schéma je na obr. 2.1. Lisovací nástroj (matrice) je při tomto uspořádání pevně uložen. Razník s předsazenou podložkou tlačí na čep proti matici, která na výstupu uzavírá recipient. Vystupující materiál se tak pohybuje stejně jako razník. Naproti tomu recipient zůstává v klidu. [5, 6]

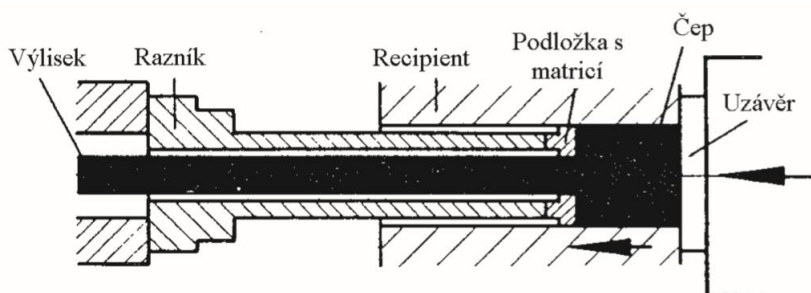
Výhodou tohoto způsobu je jeho jednoduchost a krátká vzdálenost mezi výstupem z matrice a místem, kde lze výlisek ochlazovat. [5, 6]



Obrázek 2.1: Schéma přímého lisování [5]

2.2 Nepřímé lisování

Zde je lisovací matrice upevněna do dutého a pevného držáku razníku. Čep je opět tlačena na matici, ale tentokrát je směr pohybu materiálu výlisku vůči razníku opačný viz obr. 2.2. Předností tohoto způsobu je značně nižší tření při lisování. To znamená menší požadavky na sílu lisu a menší namáhání. Za stejných podmínek lze dosáhnout o 20 až 30 % menší síly. [5, 6]



Obrázek 2.2: Schéma nepřímého lisování [5]

Při nepřímém lisování je oproti lisování přímému odlišný tok materiálu před maticí. Nedochází k relativnímu pohybu vnějších vrstev čepu vůči materiálu v ose. Z toho důvodu není lisovací tlak závislý na délce čepu. Délka čepu tak není omezena silovou kapacitou lisu. Je omezena pouze konstrukcí dutého razníku a jeho tuhostí. [5, 6]

Výhodou nepřímého lisování oproti přímému je, že materiál je lépe protvářen. Díky tomu se tvoří menší množství vad a povrchových rekrystalizovaných vrstev. Tloušťka nedolisku je menší, což znamená větší využití materiálu. [5, 6]

Nepřímé lisování má však i své nedostatky. Asi největším je přenesení vad z povrchu lisovaného čepu do výlisku. Tomu lze předejít používáním obrobekých čepů a jejich kontrolou. Za zmínku také stojí, že vnitřní průměr razníku limituje rozměr výlisku. [5, 6]

Kapitola 3

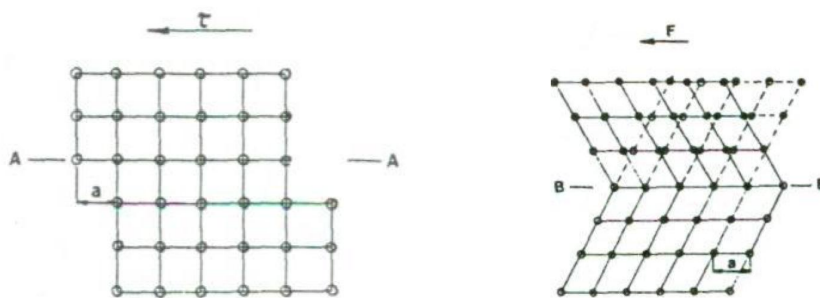
Jevy provázející tváření materiálu

Tato kapitola se ve stručnosti zabývá jevy, které provázejí deformaci materiálu za studena a za tepla. Důraz je kladem především na plastickou deformaci, zpevnění, zotavení a rekrytalizaci. Toto by mělo zajistit teoretický základ pro objasnění výsledků měření této práce.

3.1 Deformace

Deformací se rozumí změna tvaru tělesa způsobená působením vnějších sil. Může se jednat o deformaci elastickou nebo plastickou. Elastická deformace se vyznačuje tím, že těleso se po odlehčení vrací do původního tvaru. Pro tuto práci je relevantní deformace plastická, která po odlehčení zůstává. [7]

K plastické deformaci dojde při zatížení tělesa nad platnost Hookeova zákona resp. nad mez kluzu. Existuje několik mechanismů plastické deformace. Nejběžnějším je skluz. Zejména při vysokých rychlostech deformace a nízkých teplotách se uplatňuje dvojčatění. Grafické znázornění těchto mechanismů je na následujícím obrázku. Za teplot přesahujících $0,3 T_T$ se uplatňují navíc pokluzu po hranicích zrn a dále také difúzní a dislokační tečení. [7]



(a) : Znázornění skluzu

(b) : Znázornění dvojčatění

Obrázek 3.1: Schématické znázornění některých deformačních mechanismů [7]

Aplikace jednotlivých mechanismů plastické deformace záleží na vnitřní stavbě materiálu, jeho mikrostruktúře a vnějších podmínkách deformace (způsob, rychlost, teplota). Nicméně v reálných kovových materiálech se plastická deformace vždy realizuje pohybem dislokací. [7]

■ 3.1.1 Charakteristiky plasticky deformovaného kovu

Na prvním místě je zvýšená hustota dislokací. Vzniká tzv. deformační textura. Ta se projevuje natočením a protažením zrn ve směru deformace. Díky tomu získává materiál odlišné vlastnosti ve směru tváření a ve směru kolmém na tváření. [7]

Změny ve struktuře se projeví na změně vlastností materiálu. Výrazně se zvyšuje pevnost, tažnost a houževnatost klesají. Kromě mechanických se mění i fyzikální a chemické vlastnosti. Roste elektrický odpor a hustota. Mění se magnetické vlastnosti. Klesá odolnost vůči korozi. [7]

■ 3.1.2 Zpevnění

Deformační zpevnění je růst odporu kovu proti pohybu dislokací. To je způsobeno především nárůstem hustoty dislokací, jejich vzájemnou interakcí pohybujících a interakcí dislokací s překážkami. Mezi účinné překážky patří dislokační sítě, hranové dislokační smyčky, hranice zrn a subzrn, atomy příměsí a jejich shluky, precipitáty a disperzní částice. Základní zpevňovací mechanismy kovových materiálů pak odpovídají interakcím pohybujících se dislokací s těmito překážkami. Jde o dislokační zpevnění, zpevnění hranicemi zrn a subzrn, zpevnění legováním a zpevnění cizími částicemi. [7]

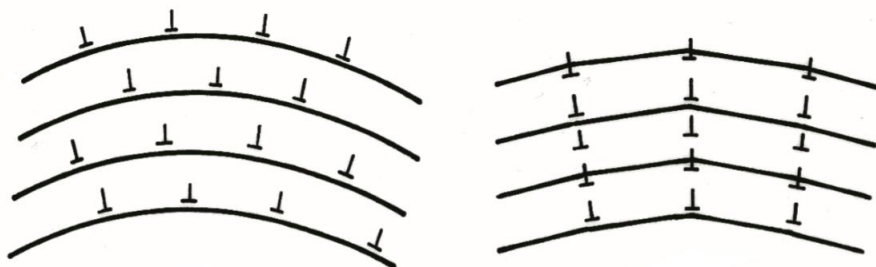
■ 3.2 Odpevňovací mechanismy

Část energie dodané tvářením zůstává v kovu ve formě tzv. uložené energie. Tato energie zvyšuje vnitřní energii. Kov se tak dostává do stavu termodynamické nerovnováhy. Při žíhání tvářeného kovu se uložená energie uvolňuje a je hnací silou odpevňovacích mechanismů - zotavení a rekrytalizace. [7]

Průběh odpevňování závisí na intenzitě jednotlivých dílčích dějů a jejich vzájemném ovlivnění. Výraznou měrou ovlivňují odpevnění i další děje probíhající paralelně s rekrytalizačními pochody jako precipitace, fázové přeměny apod. Velmi důležitou je i skutečnost, zda odpevňovací pochody probíhají při následném ohřevu za studena tvářeného kovu - staticky, nebo pod napětím (během tváření za tepla) neboli dynamicky, či s malým zpožděním - postdynamicky. [7]

3.2.1 Zotavení

Při zotavení dochází k odstraňování nadbytečných bodových poruch. Dále se také částečně snižuje hustota dislokací a mění se jejich uspořádání. Zotavení probíhá v rozmezí 0,25 až 0,30 T_T . Zotavení lze rozdělit do dílčích stádií, přičemž nejvyšším stádiem je polygonizace. Průběh polygonizace je naznačen na obr. 3.2. [7]



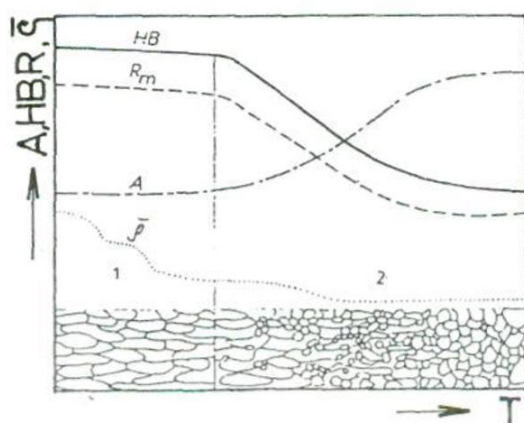
Obrázek 3.2: Znázornění procesu polygonizace [5]

Polygonizace vytváří uvnitř zrn substrukturu rozčleněnou do subzrn oddělených malouhlovými hranicemi. V závěrečné fázi polygonizace může dojít i k pohybu malouhlových hranic a spojování subzrn. Tím mohou vznikat rekrytalizační zárodky a polygonizace se tak může stát přípravnou fází rekrytalizace. Současně však polygonizace výrazně snižuje uloženou energii a tím i hnací sílu následné rekrytalizace. [7]

Velikost odpevnění při zotavení závisí především na typu materiálu respektive energii vrstevné chyby. Například u hliníku, který má vysokou energii vrstevné chyby, představuje odpevnění polygonizací až 40 %. Dalším faktorem je teplota. S rostoucí teplotou roste pravděpodobnost uplatnění polygonizace a její intenzita. [5, 7]

3.2.2 Rekrytalizace

K rekrytalizaci dochází při ohřevu na 0,35 až 0,45 T_T . Při rekrytalizaci dochází v převážné většině případů ke vzniku nových rostoucích zrn a vždy k migraci velkouhlových hranic zrn. Tento proces je provázen výrazným snižováním dislokační hustoty. Na rozdíl od zotavení dochází při rekrytalizaci k výraznějším změnám mechanických vlastností. Jde o pokles pevnosti a tvrdosti, nárůst tažnosti a houževnatosti viz obr. 3.3.



Obrázek 3.3: Znárodnění změny mechanických vlastností v průběhu zotavení a rekrytalizace [7]

Po ukončení rekrytalizace se vlastnosti kovu blíží vlastnostem, které měl před plastickou deformací. Deformovaná struktura se mění na polyedrickou. Rekrytalizaci obvykle dělíme na primární rekrytalizaci, růst zrna a následné procesy, které nazýváme sekundární, případně terciální rekrytalizaci. [5, 7]

■ Primární rekrytalizace (nukleace)

Nejčastěji se realizuje vznikem a růstem zárodků nových zrn (též krystalické mřížky). Po velmi malých plastických deformacích nemusí nové zárodky vznikat a rekrytalizace se realizuje migrací původních velkoúhlových hranic zrn nebo jejich částí. V obou těchto případech hovoříme o diskontinuální rekrytalizaci. [5, 7]

Zvláštním případem je tzv. kontinuální rekrytalizace, kdy odpevňující procesy probíhají současně v celém objemu. K tomu dochází, když brzdící síly vlivem segregace a precipitace převyšují hnací síly rekrytalizace. U tohoto procesu je klíčová tvorba a rozložení precipitátu. [7]

■ Sekundární rekrytalizace (hrubnutí zrna)

Tato fáze rekrytalizace nenastává vždy. Vyskytuje se pouze u některých typů kovů a slitin a je obvykle nežádoucím jevem. Jak je naznačeno výše, dochází k růstu některých zrn na úkor jejich sousedů. Výsledkem je lokální zhrubnutí zrna. Hnací silou tohoto procesu je snižování celkové energie hranic zrn. [5, 7]

■ 3.2.3 Dynamické odpevňování

Dynamické odpevňování se skládá z dynamického zotavení a dynamické rekrytalizace. O míře uplatnění těchto dějů při určitém způsobu tváření rozhoduje především rychlost a teplota deformace. Dynamické zotavení je výsledkem současně probíhajících procesů zpevňování a odpevňování. Hnací silou dynamického zotavení je vnitřní a vnější napětí. Dynamické zotavení lze přednostně pozorovat u kovů s vysokou energií vrstevné chyby. [7]

Dynamická rekrytalizace probíhá podobně jako statická, tj. nukleací a růstem rekrytalizačních zárodků. Rozdílem je, že rekrytalovaná zrna rostou pouze do určité velikosti. Deformace vyvolaná působícím napětím totiž zvyšuje hustotu dislokací, čímž se snižuje hnací síla pro růst zrn. Naopak v okolní nerekrystalizované matici se vytvářejí vhodné podmínky pro novou nukleaci. Omezený růst zrn a opakovaná nukleace jsou typické pro dynamickou rekrytalizaci. Teplota a stupeň deformace, potřebné pro uskutečnění dynamické rekrytalizace, jsou vyšší než při rekrytalizaci statické. Dynamická rekrytalizace se uplatní spíše u kovů s nízkou energií vrstevné chyby. [7]

Kapitola 4

Čistý hliník

Technicky čistý hliník má obsah hliníku 99 % a výše. Mechanické vlastnosti hliníku nejsou dostatečné pro drtivou většinu konstrukčních aplikací, a proto se používají jeho slitiny, které dosahují podstatně lepších vlastností. Hliník nicméně disponuje výbornou tvařitelností, vodivostí a korozní odolností. Proto se čistý hliník používá především v energetickém průmyslu na vodiče a součásti elektrických instalací. Používá se také jako obalová fólie, protože není toxický a již zmíněná tvařitelnost umožňuje výrobu fólií. Hliník lze také použít k plátování jako formu korozní ochrany a používá se také pro málo namáhané součásti kvůli atraktivnímu vzhledu. [8]

4.1 Vlastnosti hliníku

4.1.1 Fyzikálně - chemické vlastnosti

V praxi nejdůležitějšími jsou nízká hustota, dobrá vodivost a korozní odolnost. Ta je způsobena vytvářením vrstvy Al_2O_3 , která chrání čistý kov před další oxidací. Tato vrstva poměrně dobře chrání před mořskou vodou a slabými kyselinami, avšak neodolá zásadám. Přestože má hliník dobrou korozní odolnost, má záporný standardní elektrodový potenciál, čili je to kov neušlechtilý. Hliník je nepolymorfní kov s krystalovou mřížkou kubickou plošně středěnou (FCC) a není feromagnetický. Za zmínku stojí také vysoká měrná tepelná kapacita. [5, 8]

4.1.2 Mechanické a technologické vlastnosti

Pevnost hliníku závisí na jeho čistotě a zpracování, ale obecně je velmi nízká. Stejně tak je nízká i tvrdost. Povrch výrobků z hliníku je tak snadno poškoditelný. Na druhou stranu je hliník snadno tvařitelný, za tepla i za studena, a dobře svařitelný. Obrobitelnost čistého hliníku je na rozdíl od většiny jeho slitin velmi špatná. [5, 8]

Tabulka 4.1: Stručný přehled základních vlastností hliníku [5, 9]

Vlastnost	Hodnota
Krystalová mřížka	Kubická plošně středěná (FCC)
Hustota (pevné skup.) [kg.m ⁻³]	2699
Hustota (kapalné skup.) [kg.m ⁻³]	2350
Modul pružnosti v tahu [GPa]	70,7
Modul pružnosti ve smyku [GPa]	26,4
Mez pevnosti [MPa]	45
Teplota tání [°C]	660,3
Měrná tepelná kapacita [J.g ⁻¹ .K ⁻¹]	0,9
Standardní elektrodový potenciál E ⁰ (Al ³⁺ + 3e ⁻ ↔ Al) [V]	-1,662

Kapitola 5

Slitiny hliníku a jejich vlastnosti

Slitiny hliníku jsou především charakterizovány jejich rozmanitostí. V praxi se používá více než 300 slitin hliníku s dalšími prvky. Díky tomu nabízejí slitiny hliníku pestrou škálu fyzikálních, mechanických, technologických a chemických vlastností. [5, 8]

Vlastnosti hliníkových slitin se samozřejmě odvíjí především od hliníku samotného. Obecná charakteristika vlastností hliníkových slitin se proto značně překrývá s čistým hliníkem. Jedná se zejména o nízkou hustotu, dobrou korozní odolnost, tepelnou a elektrickou vodivost. Velké rozdíly mezi čistým hliníkem a jeho slitinami je především u mechanických a technologických vlastností. [5, 8]

5.1 Vliv prvků na vlastnosti hliníkových slitin

Vliv jednotlivých prvků na vlastnosti slitin hliníku je uveden pro přehlednost v abecedním pořadí.

5.1.1 Bor

Nízký obsah boru se s úspěchem používá ke zjemnění zrna. Lze ho použít samostatně v koncentraci od 0,005 do 0,1 %, ale efektivnější je jeho použití spolu s přebytkem titanu. Bor se také používá ke zlepšení vodivosti slitin precipitací prvků, které vodivost zhoršují (např. vanad, titan nebo chrom). [8]

5.1.2 Cín

Cín se používá v širokém rozpětí koncentrací. Do tvářených slitin se přidává v řádu setin procenta. U slitin určených ke slévání to může být až 25 %. Například 0,05 % ve slitinách Al-Cu značně zvyšuje účinnost umělého stárnutí. Dochází jak ke zvýšení pevnosti, tak i ke zlepšení korozní odolnosti. Přítomnost cínu se může projevit také negativně. Již 0,01 % cínu způsobí pokles korozní odolnosti u komerčních tvářených slitin hliníku. Měď tomuto

jevu brání. [8]

Cín se spolu s dalšími prvky používá k výrobě slitin určených pro namáhaná ložiska. Zatímco ostatní přísady jako křemík, měď a nikl zvyšují mechanické vlastnosti, cín zde zlepšuje vlastnosti kluzné. [8]

■ 5.1.3 Hořčík

Hořčík je hlavním přísadovým prvkem slitin třídy 5xxx. Ve tvářených slitinách se vyskytuje většinou do 5,5 %. Slévárenské slitiny obsahují od 4 do 10 % hořčíku. Nad 7 % je lze vytvrzovat. Hořčík se používá s křemíkem ve slitinách AlMgSi. Přísada tohoto prvku zvyšuje pevnost bez značného poklesu houževnatosti. Dobrá je také korozní odolnost a svařitelnost. [8]

■ 5.1.4 Chrom

Chrom je běžným přidavným prvkem u řady slitin AlMgSi a AlMgZn. Chrom se používá jako regulátor růstu zrna, neboť tvoří jemné fáze, které růstu zrna brání. Vedlejším efektem je také malý nárůst pevnosti. Obsah chromu nepřesahuje 0,35 %. U některých slitin zlepšuje odolnost proti korozi. [8]

■ 5.1.5 Křemík

Tvářené slitiny mohou obsahovat až 12 % křemíku. Většinou je ale jeho množství menší. Křemík se totiž nejčastěji používá spolu s hořčíkem ve slitinách třídy 6xxx. [8]

Tento prvek je velmi významný u slitin určených ke slévání. Zde notně zlepšuje slévárenské vlastnosti. Zejména tekutost, náchylnost ke vzniku trhlin a zabíhavost. Binární slitiny Al-Si mohou obsahovat až 25 % křemíku. [8]

■ 5.1.6 Mangan

Obsah manganu se pohybuje obvykle do 1,7 %. Je hlavním legujícím prvkem skupiny 3xxx. Zvyšuje pevnost a to jak v tuhém roztoku, tak ve formě jemných intermetalických fází. Ty také brání růstu zrna. Tento prvek se dále přidává za účelem zvýšení rekrytalizační teploty. U slitin určených ke slévání je mangan považován za nečistotu. [8]

■ 5.1.7 Měď

Měď se v hliníkových slitinách vyskytuje od 2 do 10 %. Nejčastěji se přidává spolu s dalšími prvky. Měď zvyšuje účinnost stárnutí a zvyšuje tak pevnost a tvrdost. To platí jak pro tvářené, tak pro odlévané polotovary. [8]

Měď má také negativní efekty na vlastnosti hliníkových slitin. Obecně snižuje odolnost vůči korozi. Negativně působí také při slévání, kdy zvyšuje náchylnost ke tvorbě trhlin a zhoršuje slévatelnost. [8]

■ 5.1.8 Nikl

Nikl se přidává do slitin Al-Cu a Al-Si, kde zvyšuje pevnost a tvrdost za zvýšených teplot. Další funkcí niklu je snížení koeficientu tepelné roztažnosti. [8]

■ 5.1.9 Olovo

Olovo se přidává do některých slitin (v množství do 0,5 %) za účelem zlepšení obrobitelnosti. Vznikají tzv. automatové slitiny. Olovo může způsobovat problémy při výrobě polotovarů a je jedovaté. Z toho důvodu se od jeho užívání upouští. [8]

■ 5.1.10 Titan

Titan se používá především ke zjemnění zrna spolu s borem, jak bylo uvedeno výše. Používá se především u odlitků, ale často se přidává také do svařovacích drátů. [8]

■ 5.1.11 Vodík

Vodík způsobuje pórovitost v odlitcích. Tvoří se póry a puchýře. To je způsobeno větší rozpustností vodíku v likvidu než v solidu při teplotě tání. Vodík se vytváří redukcí vodní páry a rozkladem uhlovodíků. Přítomnost vodíku v tavenině zvyšují některé prvky, jako třeba síra. Měď, cín a křemík naopak přítomnosti vodíku brání. [8]

■ 5.1.12 Zinek

Zinek je spolu s mědí nebo hořčíkem přísadou ve tvářených hliníkových slitinách nejvyšší pevnosti. Samotná přísada zinku nemá význam. Při výrobě se vyskytují problémy s trhlinami. U tvářených slitin dochází ke korozi pod

napětím. [8]

■ 5.1.13 Zirkon

Používá se k ovládní struktury, zejména ve slitinách AlMgZn. V množství od 0,1 do 0,3 % tvoří jemný precipitát, který brání zotavení a rekrystalizaci. [8]

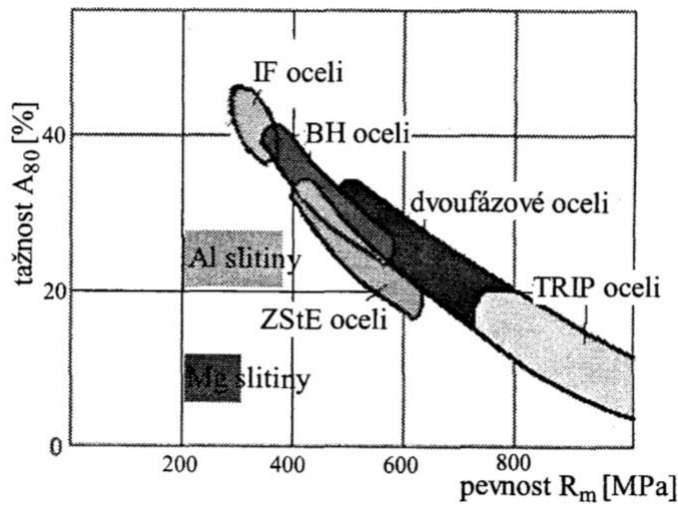
■ 5.1.14 Železo

Jde o nejběžnější nečistotu v hliníku. Obvykle se vyskytuje do 1 %. Má velmi nízkou rozpustnost v tuhém roztoku, a proto se většinou nachází v sekundárních fázích. Ve tvářených slitinách zjemňuje železo zrna. Ve slitinách určených ke tváření zvyšuje odolnost proti trhlinám. Železo tvoří řadu v podstatě nerozpustných fází, které zvyšují pevnost, zejména za zvýšených teplot. Zvýšený obsah železa má negativní vliv na tekutost a zabíhavost. [8]

■ 5.2 Mechanické vlastnosti slitin hliníku

Mechanické vlastnosti jsou zásadní pro správnou volbu konstrukčního materiálu. Základní jsou zjišťovány zkouškou tahem, tedy především mez kluzu, mez pevnosti a tažnost. Z hlediska bezpečnosti a životnosti konstrukce jsou důležité také lomové vlastnosti. U součástí cyklicky namáhaných nás bude zajímat odolnost proti únavě. Je potřeba si uvědomit, že všechny tyto vlastnosti se mění s teplotou. [5, 8]

Nejzajímavější mechanické vlastnosti jako pevnost a mez kluzu jsou u hliníkových slitin spíše menší až střední. 450 MPa lze považovat za vysokou pevnost mezi hliníkovými slitinami. Maximální dosažitelná pevnost u komerčních slitin se blíží 600 MPa. U meze kluzu je to potom 500 MPa. To je srovnatelné s nelegovanými, nebo některými nízkolegovanými oceli. Názorné srovnání hliníkových slitin s některými druhy ocelí je na obr. 5.1. [5, 8, 10]

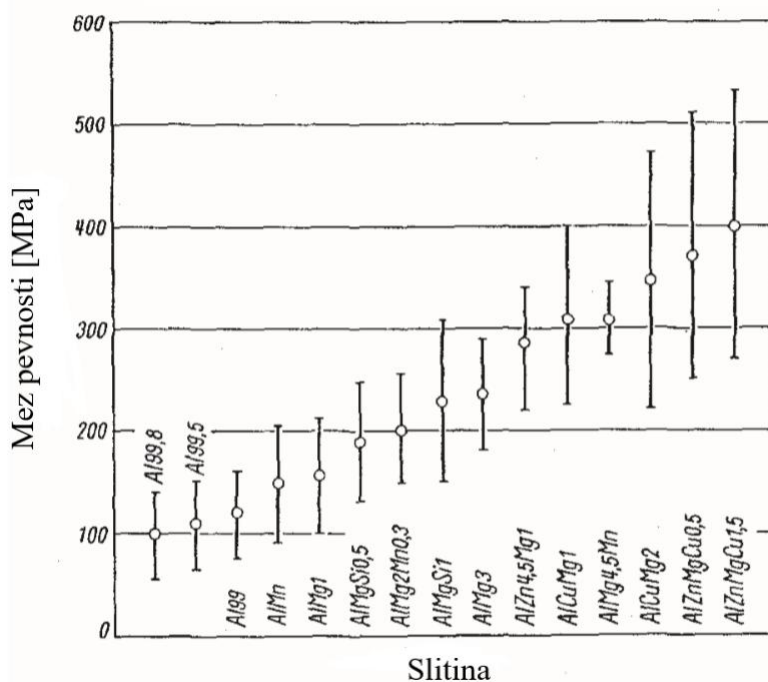


Obrázek 5.1: Pevnost a tažnost Al slitin v porovnání s oceli [11]

Nejnižší pevnost mají slitiny třídy 1xxx, protože obsahují více jak 99 % hliníku. Naopak nejvyšší pevnost mají slitiny třídy 7xxx. Srovnání meze pevnosti některých hliníkových slitin je na obr. 5.2. Logicky u tažnosti je situace opačná. Nejvyšší má třída 1xxx a to až 70 %. [5, 8]

Další důležitou vlastností u slitin hliníku je tvrdost. Všeobecně je tvrdost hliníkových slitin nízká a jejich povrch lze tedy snadno poškodit. Tvrdost hliníkových slitin může dosáhnout až 150 HBW. [5, 8]

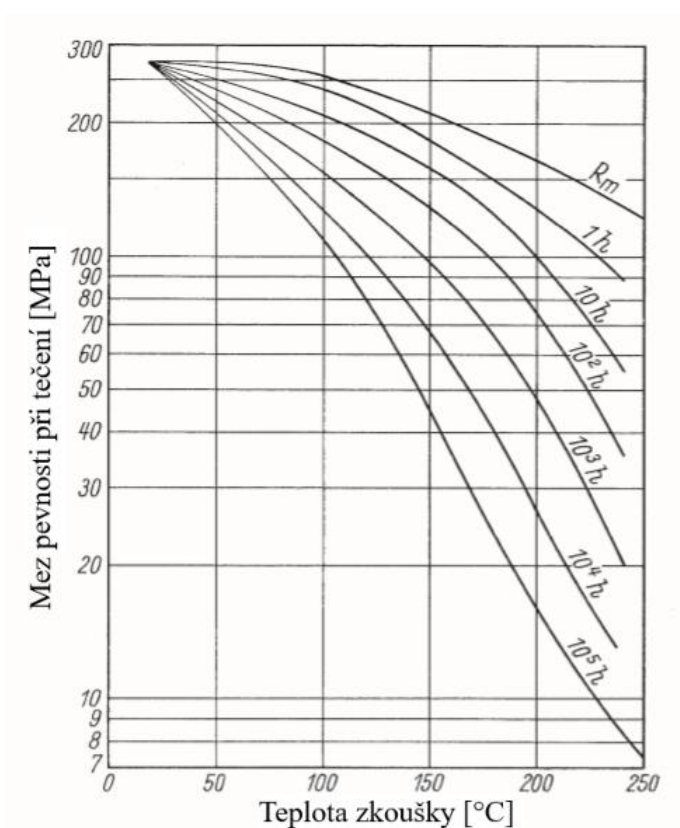
Únavové vlastnosti slitin hliníku závisí na chemickém složení, tepelném zpracování, způsobu výroby, charakteru namáhání, kvalitě povrchu a dalších faktorech. Hliníkové slitiny jsou obvykle heterogenní a mohou obsahovat řadu hrubozrnných ostrahraných fází, které se mohou projevit jako koncentrátoři napětí. Slitiny hliníku, na rozdíl od ocelí, nevykazují při cyklickém namáhání mez únavy. Z toho důvodu se určuje pro zvolený počet cyklů (obvykle 10^8). Výjimku z tohoto pravidla mohou tvořit nevytvrzovatelné slitiny. [5, 8]



Obrázek 5.2: Mez pevnosti některých slitin hliníku [5]

Jak bylo zmíněno výše, některé vlastnosti slitin hliníku závisí také na teplotě. Za nízkých teplot mírně roste pevnost. Při velmi nízkých teplotách je nárůst výraznější, nicméně se jedná o teploty, se kterými se nelze v praxi setkat. Z praktického hlediska je mnohem zajímavější změna mechanických vlastností za zvýšených teplot. Obecně platí, že s rostoucí teplotou poměrně rychle klesá mez pevnosti, mez kluzu a tvrdost, zatímco tažnost a kontrakce se obvykle zvyšují. [5, 8, 12]

Pro stanovení schopnosti slitiny dlouhodobě pracovat za zvýšených teplot je důležité znát také vliv doby namáhání za těchto teplot na mechanické vlastnosti. Ukázkový příklad je na obr. 5.3. Pro zjištění těchto hodnot se provádějí finančně náročné zkoušky tečení. K deformačním procesům závislým na čase dochází při dlouhodobém používání již od teplot nad 100 °C. Mezi jednotlivými slitinami jsou velké rozdíly. S jistotou lze říci, že vytržovatelné slitiny se nepoužívají blízko teploty umělého stárnutí. Dochází k přestárnutí a mechanické vlastnosti se rychle začnou blížit měkkému stavu. Nejvyšší možná provozní teplota hliníkových slitin je asi 350 °C. [5, 8, 12]



Obrázek 5.3: Mez pevnosti při tečení v závislosti na teplotě; plech ze slitiny AlMg5 v měkkém stavu [5]

5.3 Technologické vlastnosti slitin hliníku

Technologické vlastnosti slouží k posouzení vhodnosti materiálu pro zpracování danou technologií. Hrají důležitou roli při volbě materiálu a mají zásadní vliv na volbu výrobní technologie. [5]

5.3.1 Tvařitelnost slitin hliníku

Tvařitelnost hliníkových slitin je obecně dobrá, ale výrazně se liší mezi třídami. Celkově se hliníkové slitiny považují za hůře tvařitelné, než některé oceli (zejména uhlíkové), nicméně jsou podstatně lépe tvařitelné při tváření za teploty více jak 540°C. Výkovky z hliníkových slitin mohou být složitější oproti ocelovým, a to zejména při zápusťkovém kování. Velká variabilita vlastností a složení hliníkových slitin také znamená velkou variabilitu pracovních podmínek. Používá se velmi široká škála tvářecích technologií. [5, 8, 13]

Lze tvářet i vytvrzovatelné slitiny. Žíhaný stav poskytuje nejlepší tvařitelnost, ale další zpracování způsobuje tvarové a rozměrové změny s kterými

je nutno počítat. Další možností je tvářet ihned po ochlazení, protože tvářitelnost je téměř stejná jako v žíhaném stavu. Po přirozeném stárnutí lze provádět pouze jednoduché operace (např. ohýbání) s konzervativními parametry. Uměle stárnuté slitiny (T6) jsou ke tváření nevhodné. [8]

5.3.2 Slévateľnost slitin hliníku

Tato vlastnost se liší dle konkrétní třídy hliníkových slitin. Oproti jiným slitinám mají v kontextu slévání hliníkové slitiny řadu výhod. Mezi hlavní patří nižší střední teplota tavení, malý interval krystalizace a chemická stabilita. Problémy působí pouze vodík, který lze relativně snadno odstranit. Vakuum nebo ochranná atmosféra se u slitin hliníku v podstatě nepoužívá. Široká škála slévárenských slitin znamená také širokou škálu výrobních postupů. U slitin hliníku je však nutné zmínit použití nízkotlakého nebo vysokotlakého lití. [2, 5]

5.3.3 Obrobitelnost slitin hliníku

Obrobitelnost hliníkových slitin je velmi dobrá. Je důležité zmínit, že to neplatí pro čistý hliník, který je naopak špatně obrobitelný. Obrobitelnost značně závisí na chemickém složení slitiny. Nejhorší obrobitelné jsou slitiny obsahující více jak 10 % křemíku, protože tvrdé částice křemíku způsobují opotřebení nástrojů. Problémy mohou nastat také při obrábění měkčích hliníkových slitin, neboť často dochází ke tvorbě nárůstků. [8, 14]

5.3.4 Svařitelnost slitin hliníku

Hliníkové slitiny lze svařovat téměř všemi metodami. Nejčastěji jde o tavné svařování metodami MIG a TIG. Používá se také frikční, odporové svařování, nebo moderní metody svařování laserem nebo elektronovým paprskem. Jak již bylo uvedeno, tvoří se na povrchu hliníku a jeho slitin tenká vrstva oxidů. Tu je nutno před svařováním odstranit a v průběhu svařování je důležité zabránit jejímu opětovnému vytvoření. [5, 8]

Obecně lze říci, že tavným svařováním jsou dobře svařitelné všechny nevytvrzovatelné slitiny. Dobře svařitelné jsou i některé vytvrzovatelné slitiny. Jde o AlMgSi a AlZnMg. Naopak nevhodné pro tavné svařování jsou slitiny AlMgCu a AlZnMgCu. U nich dochází natavením k nevratným změnám struktury a ke vzniku trhlin za tepla. Slévárenské slitiny hliníku jsou obecně dobře svařitelné. [5, 8]

5.4 Chemické vlastnosti slitin hliníku

Z chemických vlastností je v tomto textu zmíněna pouze odolnost proti korozi jako v praxi nejdůležitější pro většinu strojírenských aplikací. Odolnost

slitin hliníku proti korozi na vzduchu i ve vodě je nižší než odolnost čistého hliníku. Korozní odolnost snižují zejména přísady zinku a mědi. Nejlepší korozní odolnost mají slitiny hliníku s manganem a hořčíkem. Ty jsou následovány slitinami s křemíkem. Horší korozní odolnost mají slitiny, kde je hlavní přísadou zinek (Al-Zn-Mg a Al-Zn-Mg-Cu). Nejhorší z hlediska odolnosti vůči korozi jsou slitiny ve kterých je hlavním přísadovým prvkem měď. [5]

Hliníkové slitiny se rozpouštějí v neoxidujících kyselinách, a to rychleji než čistý hliník. V oxidujících kyselinách dochází k pasivaci a koroze probíhá pomalu. Slitiny hliníku se rozpouští kromě kyselin také v zásadách. [5]

5.5 Značení slitin hliníku

5.5.1 Tvářené slitiny podle ČSN EN 573-1 až 3

Značení začíná písmeny EN označující evropskou normu. Za mezerou je AW, což znamená hliník (A); tvářený (W). Následuje pomlčka a za ní čtyři číslice z nichž první určuje třídu slitiny podle hlavních legujících prvků viz tab. 5.1. K tomuto označení lze připojit také chemické označení takovýmto způsobem: EN AW-2007 [Cu4PbMgMn]. [5, 15]

Tabulka 5.1: Číselné značení tvářených slitin hliníku [5]

Třída	1xxx	2xxx	3xxx	4xxx	5xxx	6xxx	7xxx	8xxx
Slitina	≤ 99% Al	AlCu	AlMn	AlSi	AlMg	AlMgSi	AlZn	Různé

5.5.2 Slévárenské slitiny podle ČSN EN 1706

Princip je podobný jako u tvářených slitin. První rozdíl je v tom, že písmeno W je nahrazeno písmenem C. Po pomlčce následuje pět číslic. První číslice označuje slitinu stejně jako v případě tvářených slitin. Další dvě číslice udávají podskupiny a poslední dvě číslice jsou vždy nula. Např. EN AC-42200 odpovídá AlSi7Mg0.6. U slévárenských slitin lze číselné označení doplnit o chemické označení stejně jako u slitin tvářených. [5, 15]

Kapitola 6

Přehled slitin hliníku

6.1 Tvářené

6.1.1 Slitiny třídy 1xxx

Obsahují více než 99 % hliníku. Z toho důvodu se vyznačují excelentní korozní odolností, vysokou vodivostí, dobrou tvařitelností, ale nízkými mechanickými vlastnostmi. Využívají se především v chemickém a elektrickém průmyslu. Jde hlavně o výměníky tepla, vodiče a kondenzátory. [5, 8, 10]

6.1.2 Slitiny třídy 2xxx

Hlavním legujícím prvkem těchto slitin je měď. Častá je také kombinace s menším množstvím hořčíku. Tepelné zpracování je nutné pro dosažení optimálních mechanických vlastností. Používá se rozpouštěcí žíhání a stárnutí. To způsobí zvýšení meze kluzu a v menší míře zvýšení meze pevnosti. Korozní odolnost je nižší. Za určitých podmínek dochází k mezikrystalové korozi. Z toho důvodu se často povlakuje hliníkem, slitinami s větší korozní odolností, nebo vrstvou oxidu hlinitého. [5, 8, 15]

6.1.3 Slitiny třídy 3xxx

Slitiny třídy 3xxx jsou slitiny hliníku a manganu. Patří sem jen několik slitin, protože v hliníku lze efektivně rozpustit pouze kolem 1,5 % manganu. Většinou nejsou vhodné na tepelné zpracování. Také z toho důvodu je pevnost těchto slitin vyšší pouze o 20 % oproti slitinám 1xxx. Na druhou stranu mají tyto slitiny dobrou tvařitelnost a také výbornou korozivzdornost. Díky tomu našly některé slitiny široké uplatnění například při výrobě plechovek, kuchyňského nádobí, nábytku, výměníků tepla. [8, 16]

6.1.4 Slitiny třídy 4xxx

Do této třídy patří slitiny legované především křemíkem, a to až do 12 %. Většinou nejsou vytvrzovatelné. Křemík snižuje teplotu tání při zachování houževnatosti. Díky tomu se tyto materiály používají při spojování hliníku

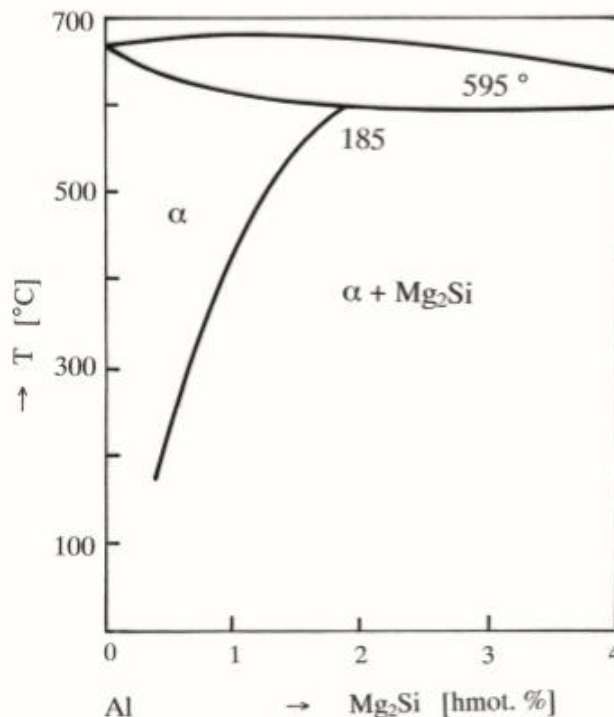
například na svařovací drát. Některé slitiny se používají také ve stavebnictví, nebo na výrobu pístů. [8, 16]

6.1.5 Slitiny třídy 5xxx

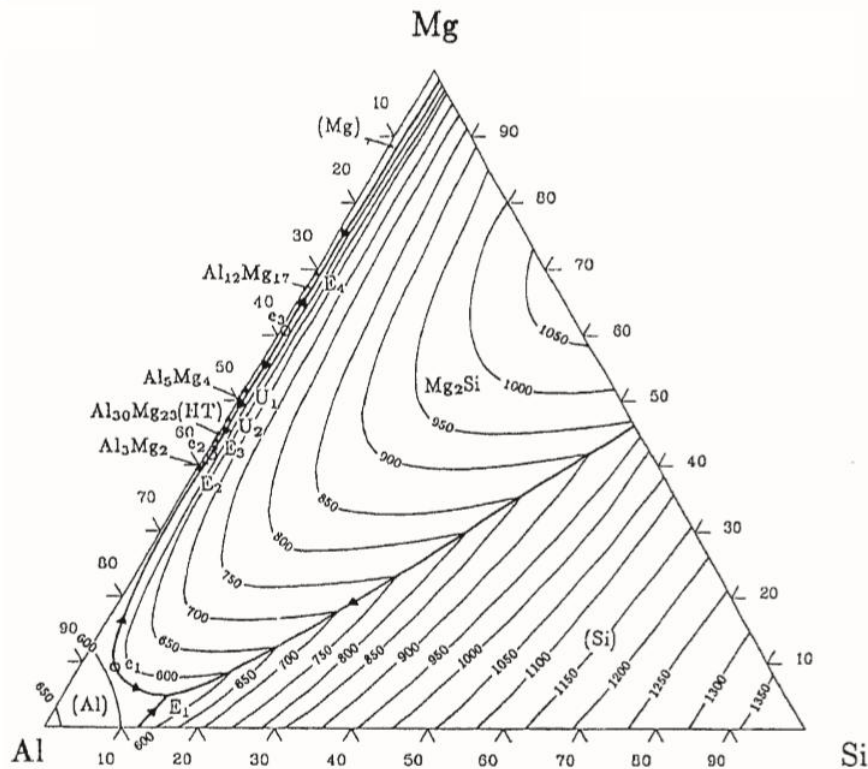
Hlavním legujícím prvkem těchto slitin je hořčík. Někdy se přidává také mangan. Oba případy produkují vytvrzovatelné slitiny střední až vysoké pevnosti. Použití těchto legur znamená také dobrou korozní odolnost. Další výhodou těchto slitin je dobrá svařitelnost. Na druhou stranu je třeba opatrnosti při tvářením za studena. Materiály této třídy s obsahem hořčíku přes 3,5 % mají za teplot přes 65 °C tendenci praskat z důvodu koroze pod napětím. Tyto slitiny se používají ve stavebnictví, na výrobu plechovek, lodí, domácích spotřebičů a v automobilovém průmyslu. [5, 8, 10]

6.1.6 Slitiny třídy 6xxx

Vzhledem k zaměření práce jsou tyto slitiny zpracovány podrobněji. Jde o tvářené slitiny skupiny 6xxx obsahující až 1,5 % hořčíku a křemíku v přibližném poměru 1,73:1, aby mohla vzniknout fáze Mg_2Si . Maximální rozpustnost Mg_2Si je 1,85 % a mění se s teplotou viz obr. 6.1. Tyto slitiny jsou tedy vytvrzovatelné. [5, 8, 17]



Obrázek 6.1: Část diagramu Al-Mg₂Si [5]



Obrázek 6.2: Projekce povrchu likvidu u systému Al–Mg–Si (koncentrace v at. %) [5]

Zvýšení mechanických vlastností po vytvrzení je v porovnání s jinými slitinami hliníku vysoké. Výsledná pevnost není tak vysoká jako v případě slitin 2xxx nebo 7xxx. Střední pevnost spolu s dobrou tvařitelností, svařitelností, obrobiteľností a korozní odolností dělá z těchto slitin ideální volbu pro řadu středně namáhaných částí, na volné a zápustkové výkovky složitěho tvaru, nebo u letadel na přechody křídlo-trup. [5, 8, 17, 18]

Slitiny AlMgSi lze rozdělit do tří skupin podle obsahu hořčíku a křemíku; respektive podle přebývajících množství těchto prvků po vytvoření Mg_2Si . [8]

■ Slitiny s obsahem Mg a Si do 1,5 %

Oba prvky bývají zastoupeny v přibližně stejném poměru, nebo s malým přebytkem křemíku. Pro tuto skupinu je typická slitina 6063. Po umělém stárnutí má střední pevnost a výbornou korozní odolnost. Nachází uplatnění především ve stavebnictví. [8]

■ Slitiny s přebytkem Mg

Do těchto slitin se přidávají další prvky jako měď, chrom a zirkon. Měď zvyšuje pevnost po vytvrzení, chrom a zirkon zjemňují strukturu. Obecně

dosahují asi o 70 MPa vyšší pevnosti než předešlé slitiny. Pro dosažení nejlepších vlastností se používá umělé stárnutí. Výhodou těchto slitin je především korozní odolnost a samokalitelnost. [5, 8]

■ Slitiny s přebytkem Si

Přebytek křemíku zvyšuje pevnost těchto slitin. Při přebytku vyšším než 0,2 % je nárůst pevnosti méně výrazný. Při vyšším přebytku křemíku je nutné kalit ve vodě. Segregace křemíku na hranicích zrn zvyšuje riziko lomu po rekrytalizaci. Tomuto jevu se zabráňuje přidáním manganu, chromu, nebo zirkonu, čímž se zabrání rekrytalizaci. Tyto slitiny mají oproti slitinám s přebytkem hořčíku vyšší pevnost a lepší tvařitelnost, ale horší korozní odolnost a svařitelnost. [5, 8]

■ 6.1.7 Slitiny třídy 7xxx

Hlavním legujícím prvkem těchto slitin je zinek. Obsah zinku se pohybuje mezi 1 a 8 %. Zinek bývá doplněn malým množstvím hořčíku, mědi nebo chromu. Tyto slitiny jsou vytvrzovatelné a dosahují nejvyšší pevnosti ze všech tříd. Jejich nevýhodou je sklon ke korozi pod napětím a pokles pevnosti za zvýšených teplot. Vzhledem k dosažitelné pevnosti se používají na nejvíce namáhané součásti - rámy, žebra, výztuhy. [5, 8, 10]

■ 6.1.8 Slitiny třídy 8xxx

Tato třída je vyhrazena ostatním slitinám hliníku. Zajímavé jsou zejména slitiny Al-Li. Přidáním lithia se snižuje hustota, ale tyto slitiny mají také dobré mechanické vlastnosti. Byly vyvinuty speciálně pro letectví a kosmonautiku. Nevýhodou je praskání při korozi pod napětím a vysoká cena. [5, 8, 10]

■ 6.1.9 Slitiny třídy 9xxx

Tato třída je zatím neobsazena. [5]

■ 6.2 Slévárenské slitiny hliníku

Nejběžnější slévárenské slitiny lze rozdělit na následujících šest kategorií. Toto rozdělení odpovídá Americkému systému značení. [8]

■ 6.2.1 Slitiny Al-Cu

Slévárenské slitiny hliníku a mědi většinou obsahují mezi 4 a 5 % mědi. V malé míře se používají také slitiny s obsahem mědi až 11 %. Dále obsahují obvyklé prvky - železo, křemík a někdy i malé množství hořčíku. Tyto slitiny jsou vytvrzovatelné a dosahují poměrně vysoké pevnosti, a to až do teploty 300 °C. Negativní vlastnosti těchto materiálů jsou nízká korozní odolnost a

horší slévárenské vlastnosti. [5, 8, 12]

Na rozdíl od křemíkových slitin neobsahují slitiny s mědí druhou fázi, která je déle tekutá. Proto je třeba zajistit správný směr tuhnutí tak, aby nevznikaly staženiny a vysoká pnutí. Lze očekávat také zvýšenou pórovitost [8, 12]

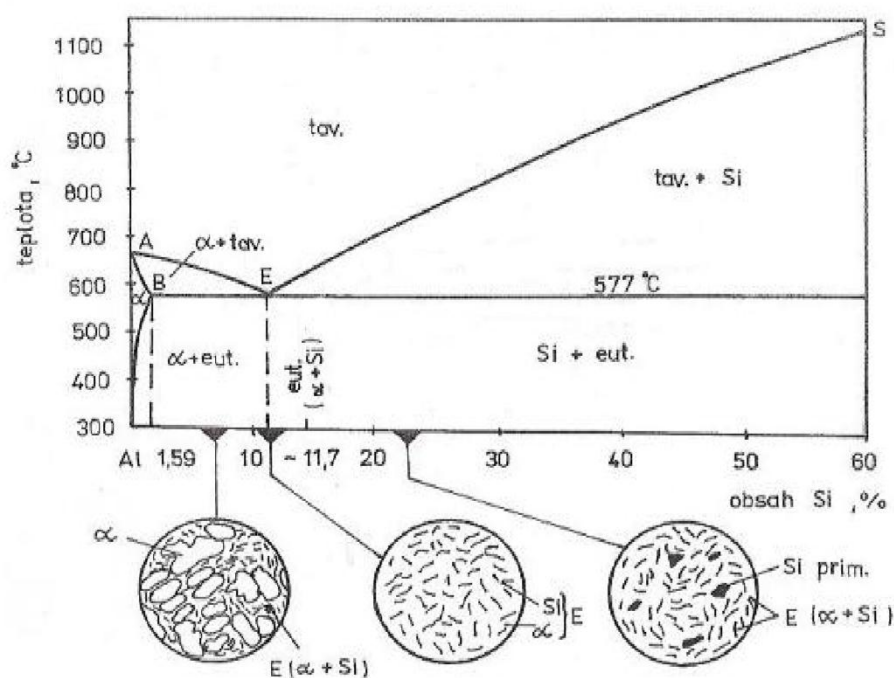
Slitiny Al-Cu jsou vhodné na menší, jednoduché odlitky, pracující za vyšších teplot. Například slitiny s obsahem mědi 9 až 11 % se používají na hlavy válců leteckých motorů, nebo na písty diesellových motorů v automobilech. [8, 12]

■ 6.2.2 Slitiny Al-Cu-Si

Jde o jednu z nejvíce používaných slévárenských slitin hliníku. Přidáním křemíku se docílí lepších slévárenských vlastností. Množství mědi a křemíku se různí podle optimálního poměru mezi pevnostními a slévárenskými vlastnostmi. Tyto slitiny jsou vytvrzovatelné, pokud obsahují alespoň 3 % mědi, ale většinou se vytvrzují pouze pokud obsahují také hořčík. Díky hořčíku je změna vlastností po tepelném zpracování výraznější. Ze slitin Al-Cu-Si se vyrábí písty a bloky motorů automobilů. [8, 12]

■ 6.2.3 Slitiny Al-Si

Hlavním přísadovým prvkem těchto slitin je křemík. Někdy se označují také jako „siluminy.“ Obsah křemíku se obvykle pohybuje mezi 5 a 13 %. Rozdělují se podle pozice vůči eutektickému bodu v rovnovážném diagramu na podeutektické, eutektické a nadeutektické. Přesné procentuální hodnoty křemíku jsou vidět na rovnovážném diagramu Al-Si viz obr. 6.3. Nicméně obvykle se za eutektický bod považuje 12 %. [5, 8, 12]



Obrázek 6.3: Rovnovázný diagram Al-Si [5]

Tyto slitiny mají výborné slévárenské vlastnosti a korozní odolnost. Siluminy jsou vytvrzovatelné pouze s příměsí hořčíku. Mechanické vlastnosti lze dále zlepšit modifikací nebo očkováním. Tyto materiály najdou uplatnění především v letectví. [8, 12]

6.2.4 Slitiny Al-Mg

Střední až vysoká pevnost, dobrá tvárnost a výborná korozní odolnost jsou hlavními výhodami těchto slitin. Tyto materiály zdatně odolávají i slané vodě. Pro dosažení nejlepší odolnosti proti korozi je nutné použít velmi čistou vsázku a dodržovat přísný režim při odlévání. Svařitelnost a obrobitelnost jsou dobré, ale slévárenské vlastnosti jsou horší. Využití těchto slitin v praxi souvisí především s jejich odolností proti korozi. Jde hlavně o automobilový průmysl a stavebnictví. [5, 8, 12]

6.2.5 Slitiny Al-Zn-Mg

Tato skupina materiálů dosahuje střední až vysokou pevností a dobrou korozní odolností. Většina těchto slitin přirozeně stárne i bez předchozího tepelného zpracování. Takto lze dosáhnout dostatečných mechanických vlastností. Pokud jsou požadavky přísnější, lze použít rozpouštěcí žhánání, prudké ochlazení a umělé stárnutí. Obrobitelnost a svařitelnost jsou dobré, ale slévárenské vlastnosti nejsou ideální. Snadno dochází ke staženinám a trhlinám.

[5, 8, 12]

■ 6.2.6 Slitiny Al-Sn

Jedná se o slitiny hliníku s cínem obsahující asi 6 % cínu a malé množství mědi a niklu pro zvýšení pevnosti. Tyto slitiny byly vyvinuty pro výrobu ložisek. Tato ložiska mají delší životnost díky lepším kluzným vlastnostem.
[5, 8, 12]

Kapitola 7

Tepelné zpracování slitin hliníku

Tepelné zpracování lze definovat jako pochod, při kterém jsou výrobek nebo jeho část v tuhém stavu podrobeny jednomu nebo více žíhacím cyklům za účelem dosažení požadované struktury vlastností. Žíhací cyklus je definován jako změna teploty výrobku v určitém rozmezí v závislosti na čase. Velká většina slitin hliníku je vhodná k tepelnému zpracování. Tepelné zpracování slitin hliníku lze rozdělit na žíhání a vytvrzování. [5]

7.1 Žíhání

Žíhání je v principu jednoduchá forma tepelného zpracování, která se skládá z ohřevu, výdrže (prodlevy) na teplotě a ochlazení. Následuje stručná charakteristika některých nejčastějších postupů. [5, 19]

7.1.1 Rekrystalizační žíhání

Jak název napovídá, dochází při tomto žíhání k rekrystalizaci. Dojde k odstranění zpevnění způsobeného předešlou deformací za studena. Snižuje se pevnost, roste houževnatost. Teplota procesu závisí na velikosti deformace za studena (s rostoucí deformací klesá), a na čistotě hliníku. Se snižující se čistotou hliníku, je nutné teplotu zvyšovat. Prakticky se uvádějí teploty 250 až 500 °C. Poslední částí žíhání je vždy ochlazení. Vytvrzovatelné slitiny je nutno ochlazovat pomalu, aby nedošlo k částečnému přesycení tuhého roztoku a zvýšení mechanických vlastností. Nevytvřovatelné slitiny hliníku lze ochlazovat na vzduchu. [5, 19]

7.1.2 Stabilizační žíhání

Slouží ke stabilizaci struktury, mechanických, fyzikálních, chemických vlastností a také rozměrů výrobků. Toto tepelné zpracování se používá většinou na výrobky, které budou pracovat za zvýšených teplot, nebo pokud v provozu

dochází k ohřevu součásti. Teplota žíhání se pohybuje od 240 do 350 °C. [5, 19]

■ 7.1.3 Žíhání ke snížení pnutí

Toto žíhání se používá ke snížení vnitřních pnutí po předchozí operaci (např. svařování). Probíhá za teplot výdrže 300 až 400 °C po dobu až osmi hodin. Pro dosažení optimálních vlastností se volí řízené ochlazování. [5, 19]

■ 7.1.4 Homogenizační žíhání

Homogenizační žíhání umožňuje zmenšit chemickou heterogenitu materiálu. Teplota a výdrž se volí na míru každé slitině, ale obecně lze říci, že volené teploty jsou vysoké. [5, 19]

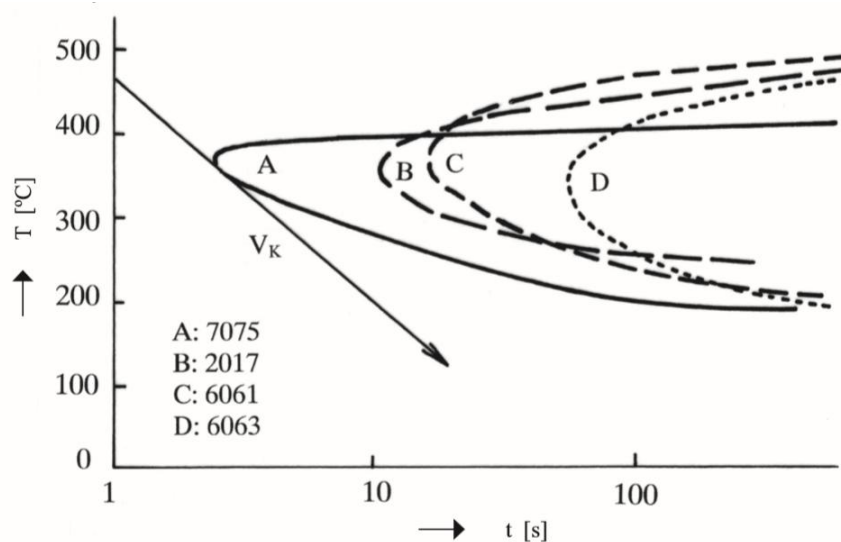
■ 7.1.5 Rozpouštěcí žíhání

Toto žíhání je součástí tepelného zpracování hliníkových slitin, které se nazývá vytvrzování. Vytvrzování se věnuje následující část textu.

■ 7.2 Precipitační zpevnění – vytvrzování

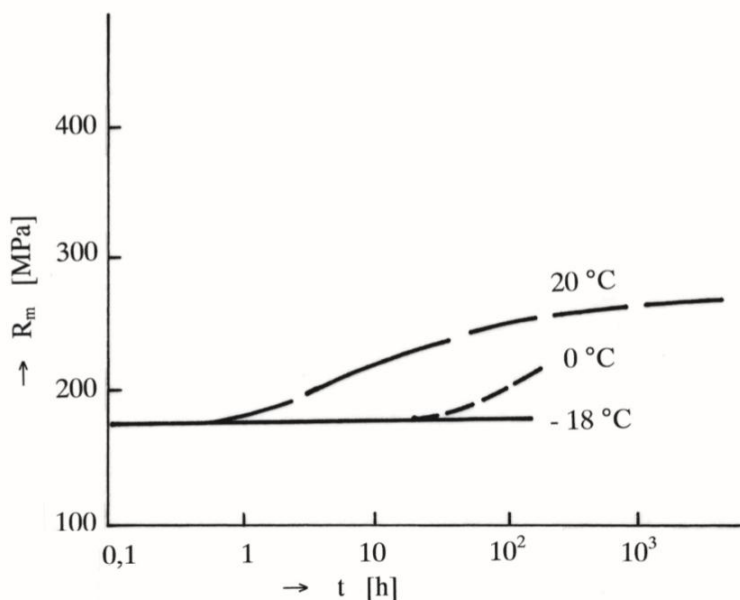
Tato forma tepelného zpracování hliníkových slitin se používá především ke zvýšení pevnosti. Při tomto procesu dochází ke změně i dalších vlastností. Ne všechny slitiny hliníku jsou vhodné pro toto tepelné zpracování. Slitina musí disponovat výraznou změnou rozpustnosti legujícího prvku nebo prvků na teplotě dle rovnovážného diagramu, aby mohlo dojít ke vzniku přesyceného tuhého roztoku α' . Těto podmínce vyhovuje většina binárních slitin hliníku, ale ne u všech dochází k dostatečnému nárůstu pevnosti pro praktické využití tohoto postupu. [5, 19]

Vytvrzování se skládá z rozpouštěcího žíhání, prudkého ochlazení a následného stárnutí. Teplota rozpouštěcího žíhání se volí vysoká (asi 50 °C pod teplotu solidu). Výdrž na této teplotě je po dobu nutnou k převedení jedné nebo více intermetalických fází do tuhého roztoku. Následným prudkým ochlazením se zabrání vyloučení rozpuštěného prvku, čímž je získán přesycený tuhý roztok. Nejmenší rychlost ochlazování, z rozpouštěcí teploty, při které nenastává rozpad přesyceného tuhého roztoku, se nazývá kritická. Různé slitiny mají různou kritickou rychlost ochlazování viz obr. 7.1. Poslední, ale zásadní, částí vytvrzování, je stárnutí, při kterém dochází k zásadním a finálním změnám vlastností materiálu. [5, 19]

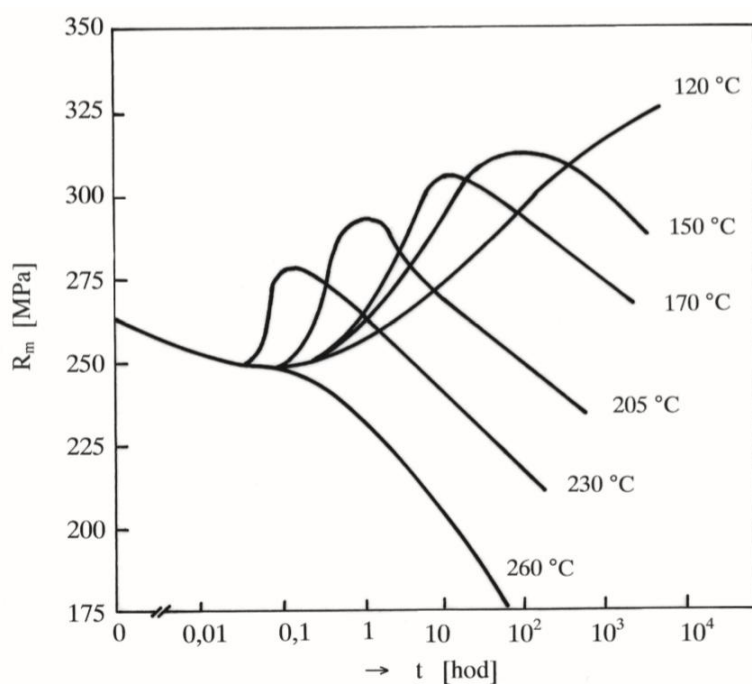


Obrázek 7.1: „C” křivky různých hliníkových slitin [5]

Stárnutí probíhá buď na vzduchu (přirozené), nebo za zvýšených teplot (umělé). V této části procesu se docílí konečných vlastností výrobku. Dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku. Po celou dobu tohoto děje se mění mechanické, technologické, fyzikální i chemické vlastnosti. Tyto změny se znázorňují pomocí tzv. křivek kinetiky rozpadu. Na obr. 7.2 a 7.3 jsou pro ukázkou tyto křivky slitiny EN AW-6262. Znalost těchto křivek pro konkrétní slitinu umožňuje optimální volbu technologických parametrů. Jde o dobu stárnutí a v případě umělého stárnutí také o teplotu stárnutí. [5, 19]



Obrázek 7.2: Křivka kinetiky rozpadu slitiny EN AW-6262 pro přirozené stárnutí [5]



Obrázek 7.3: Křivka kinetiky rozpadu slitiny EN AW-6262 pro umělé stárnutí [5]

Tyto křivky také demonstrují zákonitosti, které platí obecně pro všechny hliníkové slitiny:

„čím je vyšší teplota umělého stárnutí, tím dříve se dosáhnou maximální pevnostní vlastnosti při této konstantní teplotě, čím je nižší teplota umělého stárnutí, tím později se dosáhnou maximální pevnostní vlastnosti při této konstantní teplotě, čím je teplota umělého stárnutí vyšší, tím jsou maximální dosažitelné pevnostní vlastnosti nižší.“ [5]

Kapitola 8

Slitiny EN AW-6082 a EN AW-6110A

Snaha o snížení spotřeby a emisí způsobuje strojů vede ke snahám o snížení jejich hmotnosti. Jedním z důsledků tohoto snažení je, že ocel je na mnoha místech nahrazována hliníkovými slitinami. V běžném životě se s tímto trendem můžeme setkat nejspíše v automobilovém průmyslu. Z tohoto důvodu je následující část textu věnována charakteristice slitin EN AW-6082 a EN AW-6110A, neboť se jedná o jedny z nejběžnějších slitin pro výrobu podvozkových dílů automobilů.

8.1 Slitina EN AW-6082

Jde o slitinu třídy 6xxx. Hlavními legujícími prvky jsou hořčík a křemík. Konkrétní chemické složení je v tabulce 8.1. [8]

Tabulka 8.1: Chemické složení EN AW-6082 v hm. % [24]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Jiné	Al
0,7-1,3	0,50	0,10	0,4-1,0	0,6-1,2	0,25	0,20	0,10	0,15	Zbytek

Pevnost této slitiny je největší ze slitin skupiny 6xxx. Mechanické vlastnosti se liší podle tepelného zpracování. Díky přítomnosti hořčíku a křemíku je tato slitina vytvrzovatelná. Nejčastěji se tato slitina dodává ve stavu žíhaném (0), nebo po přirozeném (T4) či umělém (T6) stárnutí. Lze říci, že nejvýše se dosahuje pevnosti v tahu 310 MPa zpracováním T6, ale výsledky se mohou lišit. Mechanické vlastnosti pro jednotlivé stavy dle materiálového listu jsou v tabulce 8.2. [8, 20]

Tabulka 8.2: Mechanické vlastnosti EN AW-6082 v závislosti na tepelném zpracování. (Tyče průměru do 80 mm.) [25]

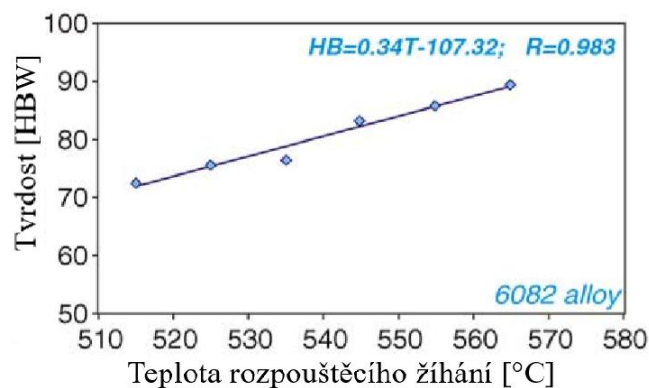
Stav	0	T4	T6
$R_{p0,2}$ [MPa]	max. 110	110	255
R_m [MPa]	max. 160	205	310
A [%]	13 (15)	12 (14)	9

Za zmínku stojí také technologické vlastnosti slitiny. Tento materiál je velmi dobře svařitelný a obrobitelný. Je také vhodný k eloxování. Velkou výhodou je velmi dobrá korozní odolnost. Kombinace dobré svařitelnosti a korozní odolnosti předurčuje tuto slitinu pro výrobu vnějších částí automobilů, lodí, vlaků a letadel. [8]

8.1.1 Vytvrzování slitiny EN AW-6082

Vytvrzování je nejdůležitějším tepelným zpracováním této slitiny a z toho důvodu je mu věnováno několik následujících řádků. Hlavními legujícími prvky této hliníkové slitiny jsou hořčík a křemík. Tyto prvky jsou z části rozpuštěny v matici fáze α a z části ve formě intermetalických fází. Pro vytvrzení a dosažení vyšší pevnosti je klíčová tvorba fáze β Mg_2Si . [8, ?]

Jak již bylo zmíněno, vytvrzování se skládá z rozpouštěcího žíhání, prudkého ochlazení a následného stárnutí. Na výsledné vlastnosti má vliv hlavně teplota rozpouštěcího žíhání, kalící médium, teplota a doba stárnutí. Tvrdost roste s teplotou rozpouštěcího žíhání viz obr. 8.1. To je způsobeno tím, že množství rozpuštěného křemíku a hořčíku v přesyceném roztoku roste. Pro dosažení nejvyšší tvrdosti je vhodné ochlazení ve vodě. [8, 20, 21, 22, 23]



Obrázek 8.1: Vliv teploty rozpouštěcího žíhání na tvrdost slitiny EN AW-6082 [20]

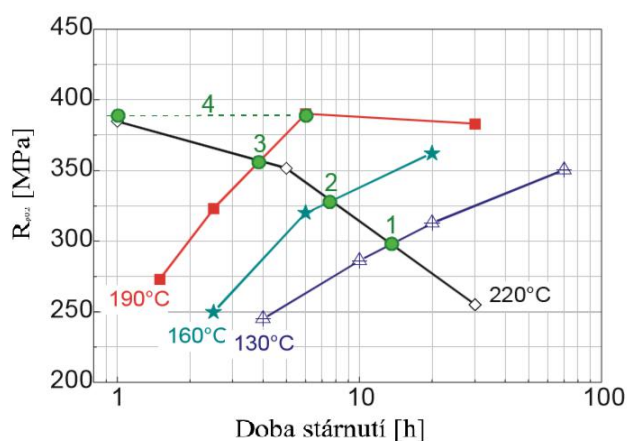
Počáteční zvýšení pevnosti je způsobeno precipitací Guinier-Prestonových (GP) zón a formováním velmi jemných jehlicovitých částic fází β' a β'' (GPII) při stárnutí. Postup celého procesu stárnutí vypadá takto:



kde: GPI - jsou neuspořádané zóny jehlicovitého tvaru,
 GPII - jsou uspořádané zóny jehlicovitého tvaru,
 β' - částečně koherentní intermetalická fáze blízká Mg_2Si ,

β - nekoherentní intermetalická fáze Mg_2Si . [5]

Pokud je doba stárnutí příliš dlouhá dojde ke spojování fází β' a β'' , což má za následek pokles mechanických vlastností. O tomto stavu se hovoří jako o přestárnutí. Skupina výzkumníků z Polska ve své práci [20] určila jako nejlepší podmínky stárnutí 6 h za teploty 190 °C. Za těchto podmínek se jim podařilo dosáhnout meze pevnosti 440 MPa při zachování dostatečné houževnatosti. Vliv doby stárnutí na mechanické vlastnosti ukazuje obrázek 8.2. [20, 23]



Obrázek 8.2: Vliv doby stárnutí na mez kluzu slitiny EN AW-6082 za různých teplot [20]

8.2 Slitina EN AW-6110A

Slitina EN AW-6110A je patří do třídy 6xxx. Chemické složení této slitiny je v tab. 8.3. Podobně jako slitina 6082 se používá především v automobilovém průmyslu. Vyznačuje se především zvýšenou pevností a mezí únavy. Oproti slitině 6082 má ale horší korozivzdornost. Tyto vlastnosti jsou způsobeny především zvýšeným obsahem mědi. Při zvýšení obsahu železa dochází také ke zvýšení pevnosti a zjemnění zrna. [5]

Tabulka 8.3: Chemické složení EN AW-6110A v hm. % [24]

Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Jiné	Al
Min [%]	0,7	0	0,2	0,2	0,5	0,04	0	0	94,8
Max [%]	1,5	0,8	0,7	0,7	1,1	0,25	0,3	0,15	98

Pokud jde o výrobní technologie, je tento materiál vhodný pro tvářeni i obrábění. Tato slitina je vytvrzovatelná. V žíhaném stavu se v podstatě nepoužívá, obvykle se dodává po tepelném zpracování T4, T5 nebo T6. Mechanické vlastnosti dosažitelné tímto zpracováním jsou v tabulce 8.4. [5, 24]

Tabulka 8.4: Mechanické vlastnosti EN AW-6110A v závislosti na tepelném zpracování. [25]

Stav	T4	T5	T6
$R_{p0,2}$ [MPa]	250	410	430
R_m [MPa]	360	430	470
A [%]	18	11	11



Část II

Experimentální část

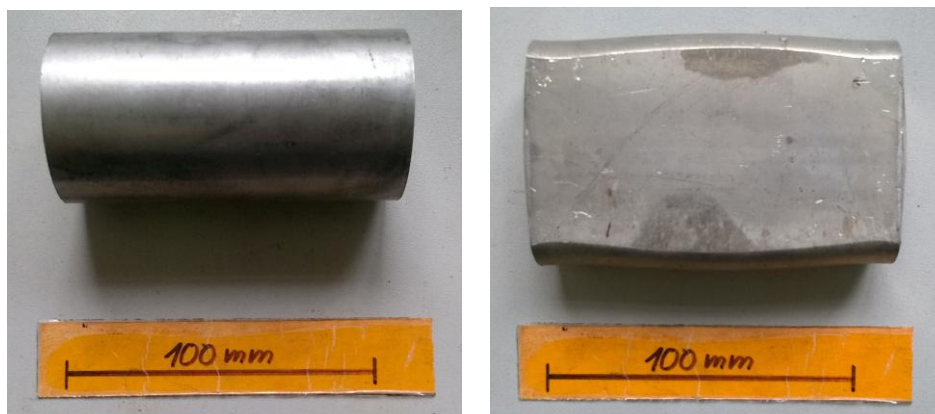
Kapitola 9

Cíle a rozsah experimentální části

Hlavním cílem této diplomové práce jako takové je popsání vztahu mezi mikrostrukturou polotovaru a jeho mechanickými vlastnostmi. Prvním krokem tak bylo pořízení fotografií mikrostruktury polotovarů na světelném mikroskopu. Dalším krokem bylo vyhodnocení velikosti zrna zvolených slitin. Posledním krokem experimentální části bylo změření tvrdosti dodaných polotovarů.

9.1 Dodaný materiál

Všechny měřené polotovary byly dodány ve dvou variantách. Jedny byly vyrobeny metodou HCM, druhé byly vyrobeny lisováním za tepla. Pro tuto práci byly použity dvě dávky polotovarů. Jedny (dále označeny jako 1. dávka) byly tyčové polotovary slitin EN AW-6082 a EN AW-6110A ve výchozím stavu (bez tepelného zpracování). Tyto polotovary byly analyzovány v návaznosti na práci Ing. Kružíka.



(a) : Tyčový polotovar

(b) : Polotovar po deformaci 30 %

Obrázek 9.1: Typové fotografie dodaných polotovarů

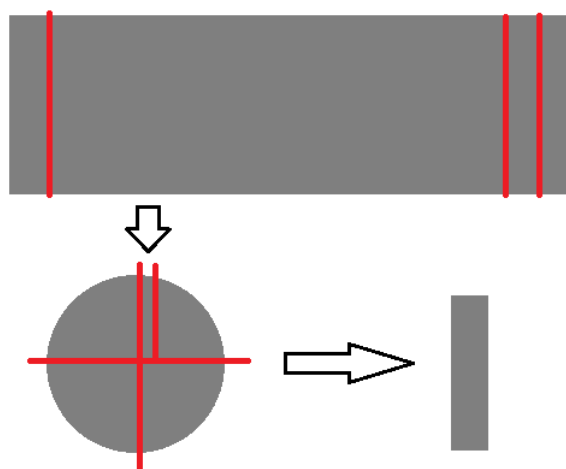
Druhá dávka polotovarů od jiného dodavatele se skládala z tyčí slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (bez tepelného zpracování), po ohřevu na tvářecí teplotu (530 °C) a ochlazení do vody, a nakonec materiálu po 30% deformaci (tvářecí teplota 530 °C, teplota nástroje min. 160 °C) a ochlazení na vzduchu. Průměr tyčí byl 50 mm. Na obr. 9.1 jsou fotografie dodaných materiálů.

Kapitola 10

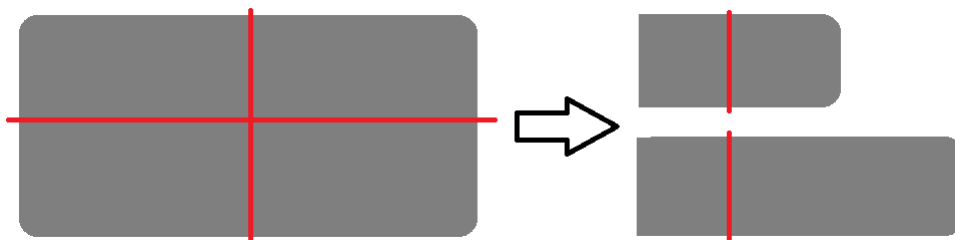
Příprava vzorků

10.1 Dělení vzorků

Pro dělení vzorků bylo zvoleno rozbrušování kotoučovou pilou. Byla použita pila LECO MSX255 s kotoučem 811-077-010 pro neželezné kovy. Při rozbrušování byla použita řezná kapalina. Z každého polotovaru první dávky byly vyrobeny tři vzorky, které byly odebrány z různých míst. Pro větší průkaznost měření byly vzorky odebrány z obou stran tyče. Způsob odebrání vzorků je obr. 10.1 a 10.2. Vzorky zdeformovaných polotovarů byly odebrány z prostřed polotovaru.



Obrázek 10.1: Schéma řezání tyčových polotovarů



Obrázek 10.2: Schéma řezání polotovarů po deformaci 30 %

10.2 Fixace vzorků

Pro usnadnění manipulace se vzorky a pro automatizaci leštění byly vzorky zalisovány do bakelitu. Byl použit stroj LECO PR 4X.

Parametry lisování: Prášek – Black Bakelit Powder, teplota 160 °C, tlak 20 MPa, doba lisování - 3,5 min. Ochlazení vodou na 65 °C.

10.3 Broušení

Broušení bylo prováděno na brusce/leštičce LECO GPX 300. Bylo postupně použito několik brusných papírů s různou drsností; od nejhrubšího po nejjemnější viz tab. 10.1. Volba finální zrnitosti není náhodná. Vzorky broušené hrubším papírem špatně reagovaly na leptání. Vzorky broušené jemnějším papírem byly poškrábané. Pracovní podmínky: 200 ot./min, chlazení vodou.

Tabulka 10.1: Pořadí a zrnitost použitých brusných papírů

Pořadí	Zrnitost
1.	P280
2.	P600
3.	P1000
4.	P2500

10.4 Leštění

Pro leštění byl použit stejný stroj jako pro broušení. Otáčky byly nastaveny na 150 ot./min a přítlačná síla 27 N. Brusný papír byl vyměněn za leštící kotouč. Nejlepších výsledků bylo dosaženo leštěním se suspenzí Al₂O₃.

10.5 Leptání

10.5.1 Leptání litých vzorků

Na leptání litých vzorků byla použita metoda elektrolytického leptání. Napětí bylo nastaveno na 20 V. Hodnota elektrického proudu byla volena podle velikosti vzorku - 0,2 A na cm². Elektrolytem byl roztok 5 ml 48% HBF₄ ve 200 ml H₂O (v Anglosaské literatuře označován jako Barkerovo činidlo).

Vzorky byly ponořeny v elektrolytu za působení proudu po dobu 30 s, Jak bude vidět na obrázcích v dalších kapitolách, byl tento způsob leptání úspěšný. Ne vždy se podařilo vzorky naleptat zcela rovnoměrně, nicméně bylo možno pořídit dostatek použitelných snímků pro vyhodnocování.

10.5.2 Leptání tvářených vzorků

Leptání tvářených vzorků bylo podstatně problematičtější než leptání vzorků litých. Bylo vyzkoušeno několik postupů, které jsou níže zmíněny, ale přesto nebylo vždy dosaženo ideálních výsledků.

Nejprve byl vyzkoušen stejný postup jako u předchozích polotovarů. I přes experimentování s parametry byly výsledky velmi špatné a hranice zrn nebyly téměř patrné.

Z toho důvodu byl vyměněn elektrolyt za roztok 90 ml destilované vody a 10 ml 85% kyseliny fosforečné. Výsledky byly lepší, ale stále velmi slabé. Vzhledem ke špatným výsledkům bylo upuštěno od elektrolytického leptání a bylo vyzkoušeno leptání v roztoku kyseliny dusičné, nicméně ani tento postup se neosvědčil.

Další možností bylo použití Kellerova a Weckova leptadla. Nejlepších výsledků bylo dosaženo leptáním jednu minutu ve Weckově a následně několik sekund v Kellerově leptadle. Někdy byl použit také postup Keller-Weck-Keller. Výsledné vzorky umožňovaly pořízení snímků dostatečných pro měření velikosti zrna. Povrchová vrstva vzorků 1. dávky nereagovala na žádné leptadlo.

ASM Handbook dále doporučoval leptání v roztoku hydroxidu sodného. Kompletní výčet vyzkoušených parametrů by zabral příliš prostoru. Byly vyzkoušeny malé až velké koncentrace, doby leptání od sekund po minuty, leptání postupně, nebo jednorázově, ale v žádném případě nebyly vidět hranice zrn. Slabé obrysy se objevily pouze sporadicky.

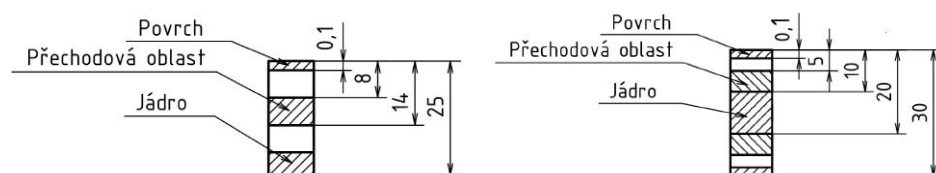
Hydroxid sodný byl také použit jako elektrolyt při elektrolytickém leptání, ale výsledky byly stejně špatné jako v předchozím případě.

Posledním vyzkoušeným leptadlem byla kombinace 30 ml glycerolu, 20 ml kyseliny fluorovodíkové a 10 ml kyseliny dusičné. Opět přes vyzkoušení různých časů leptání nedošlo k zvýraznění hranic zrn. Tím byla vyčerpána dostupná literatura. Nejlepších výsledků bylo tedy dosaženo postupem Keller-Weck.

Kapitola 11

Mikrostruktura vzorků

K pořízení snímků za účelem stanovení velikosti zrna byl použit světelný mikroskop a software NIS – Elements AR. Pro úplný přehled o struktuře byly pořízeny snímky u povrchu materiálu, v přechodové oblasti a v jádře. Poloha těchto oblastí vůči povrchu je na obr. 11.1, kde jsou zvýrazněny šrafováním.



(a) : Vzorky ve vých. stavu a po ohřevu

(b) : Deformované vzorky

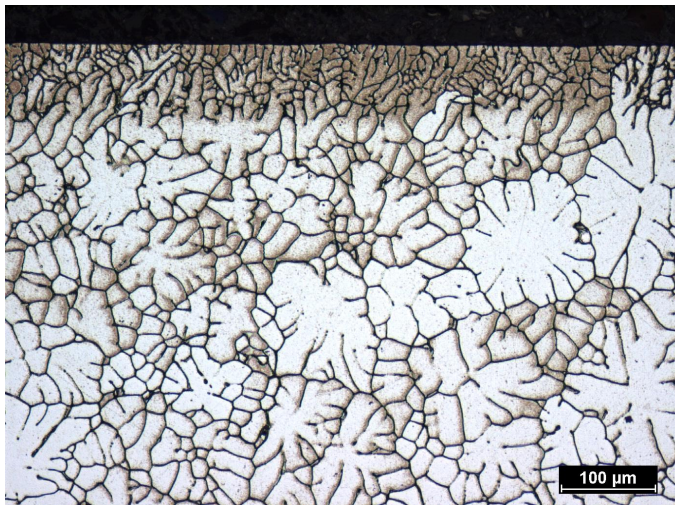
Obrázek 11.1: Znázornění měřených oblastí vzorků

11.1 Lité polotovary

11.1.1 HCM EN AW-6082 1. dávka

Podélné řezy

Na obr. 11.2 je jasně zřetelný dendritický tvar zrn. Velikost zrn se mění se vzdáleností od povrchu. Na povrchu polotovaru je jemnozrná vrstva. Pod povrchem je oblast obsahující směs jemných a velmi hrubých zrn. Za ní následuje hrubozrná přechodová oblast. Poté následuje jemnější zrno až do jádra polotovaru.

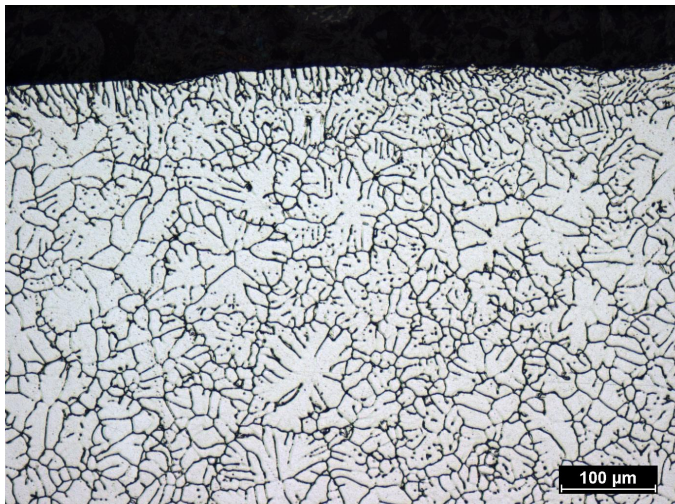


Obrázek 11.2: Struktura HCM slitiny EN AW-6082 na povrchu

■ 11.1.2 HCM EN AW-6110A 1. dávka

■ Podélné řezy

Z obr. 11.3 vyplývá, že struktura HCM slitiny EN AW-6110A je velmi podobná struktuře slitiny EN AW-6082. Jemnozrná vrstva na povrchu následovaná smíšenou strukturou. Následně hrubozrná přechodová oblast a jemnější jádro.

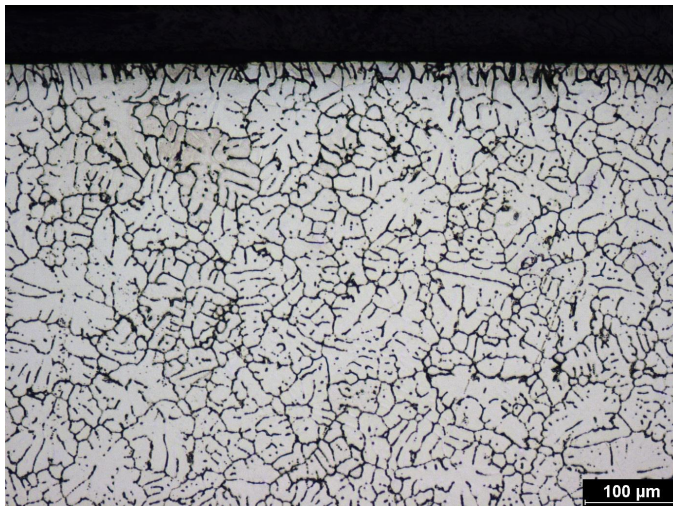


Obrázek 11.3: Struktura HCM slitiny EN AW-6110A na povrchu

■ 11.1.3 HCM EN AW-6082 2. dávka výchozí stav

■ Příčné řezy

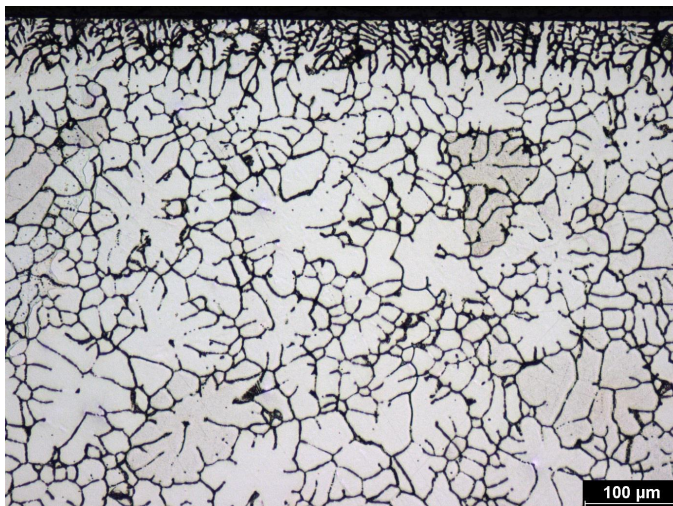
Na obr. 11.4 je pozorovatelná v podstatě stejná struktura jako u slitin z první dávky a to v celém průřezu. Povrchová vrstva v příčném řezu je menší (přibližně 20 μm).



Obrázek 11.4: Struktura v oblasti povrchu HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)

■ Podélné řezy

Struktura v podélném řezu se téměř neliší od struktury v řezu příčném viz obr. 11.5. Povrchová vrstva v tomto řezu dosahuje přibližně 40 μm .

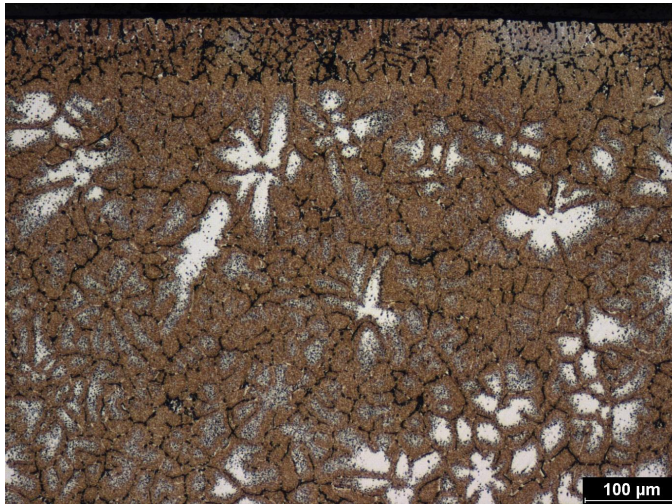


Obrázek 11.5: Struktura v oblasti povrchu HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (podélný řez)

■ 11.1.4 HCM EN AW-6082 po ohřevu

■ Příčné řezy

Z obr. 11.6 vyplývá, že po ohřevu na tvářecí teplotu se mikrostruktura slitiny dramaticky nezměnila. Na povrchu je stále relativně slabá jemnozrnná vrstva přecházející v hrubozrnnou přechodovou oblast, která dále přechází v jemnější strukturu v jádře.



Obrázek 11.6: Struktura HCM v oblasti povrchu slitiny EN AW-6082 po ohřevu (příčný řez)

■ Podélné řezy

Struktura v podélném řezu se téměř neliší od struktury v řezu příčném viz obr. 11.7.

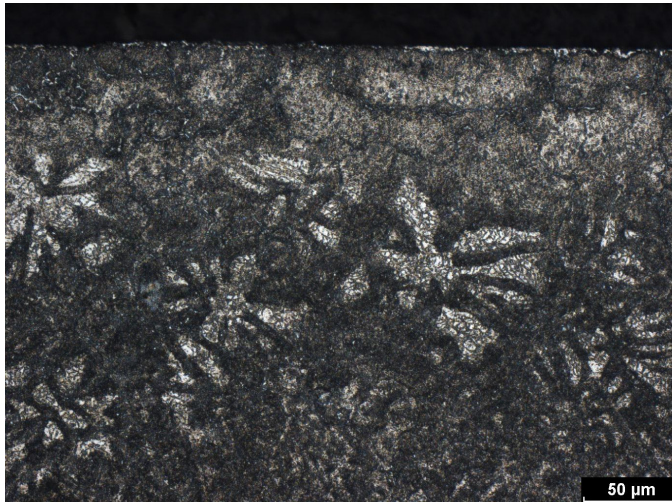


Obrázek 11.7: Struktura v oblasti povrchu HCM slitiny EN AW-6082 po ohřevu (podélný řez)

■ 11.1.5 HCM EN AW-6082 po deformaci

■ Příčné řezy

Na smínku struktury u povrchu (viz obr. 11.8) je evidentní, že velká dendritická zrna pod povrchem se rozpadla na malé útvary. V oblastech dále od povrchu jsou dendrity zdeformovány a také došlo k jejich rozpadu. Zrno je jemné ve všech oblastech. Na základě těchto pozorování lze usoudit, že v materiálu došlo k rekrystalizaci



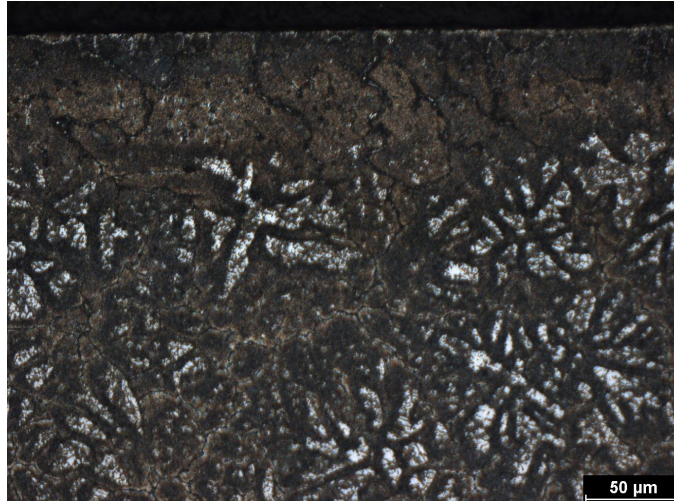
Obrázek 11.8: Struktura v oblasti povrchu HCM slitiny po deformaci (příčný řez)



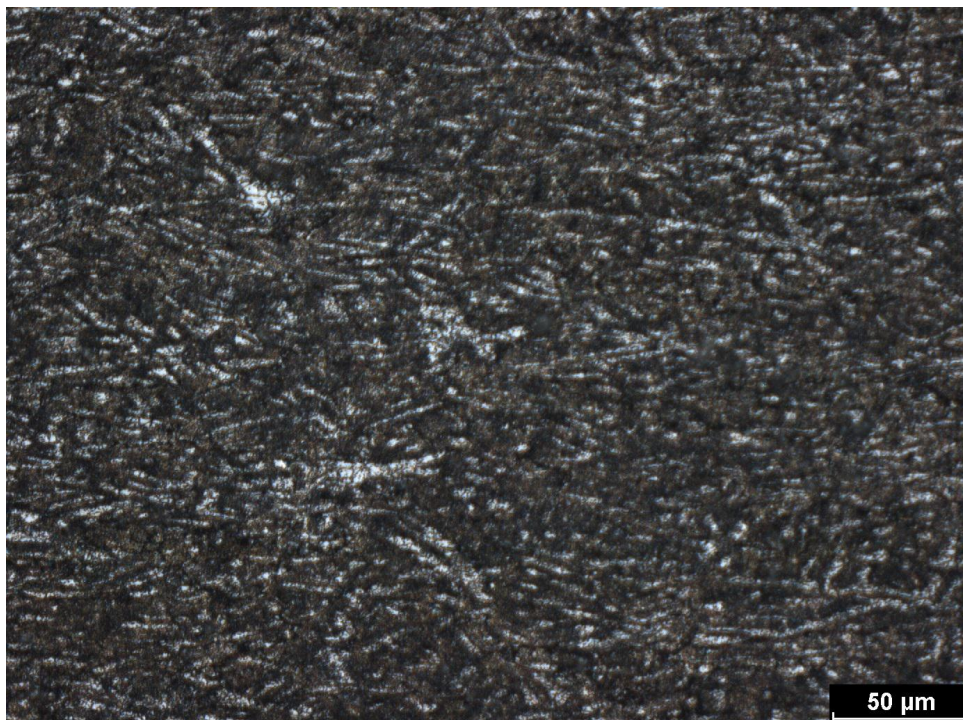
Obrázek 11.9: Struktura v oblasti jádra HCM slitiny po deformaci v oblasti (příčný řez)

■ Podélné řezy

Struktura v podélném řezu se téměř neliší od struktury v řezu příčném viz obr. 11.10 a 11.11.



Obrázek 11.10: Struktura v oblasti povrchu HCM slitiny po deformaci (podélný řez)



Obrázek 11.11: Struktura v oblasti jádra HCM slitiny po deformaci v oblasti (podélný řez)

11.2 Lisované polotovary

11.2.1 EN AW-6082 1. dávka

Podélné řezy

Na obr. 11.12 a obr. 11.13 je vidět, že část zrn je zdeformována ve směru tváření. Malá zrna přibližně kruhového tvaru pravděpodobně rekrystalizovala. Ve struktuře se vyskytují velmi jemná, ale také hrubá a velmi dlouhá zrna. Dále lze vidět tmavé útvary vměstků nebo precipitátů. Velikost zrna se nemění se vzdáleností od povrchu



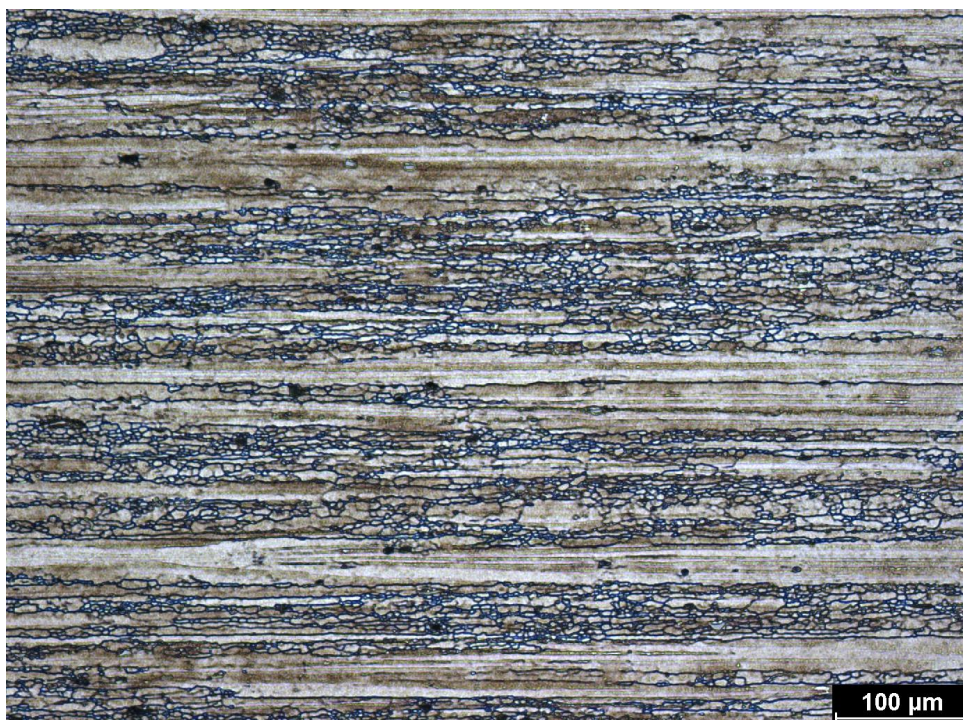
Obrázek 11.12: Struktura lisované slitiny EN AW-6082 v jádře



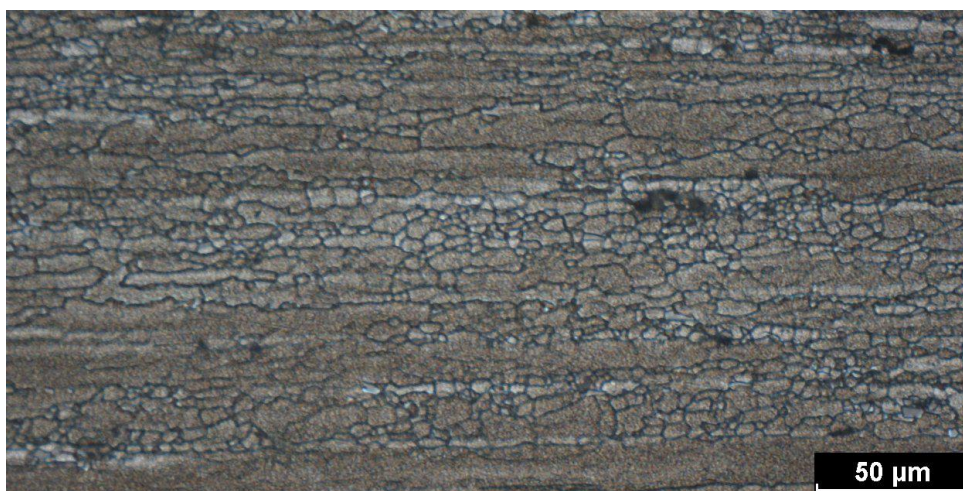
Obrázek 11.13: Detail struktury lisované slitiny EN AW-6082 v jádře

11.2.2 EN AW-6110A 1. dávka

Mikrostruktura této slitiny na obr. 11.14 je velmi podobná mikrostruktuře slitiny EN AW-6082. Jedná se o extrémně dlouhá zrna v jinak jemnozrnné struktuře ve všech oblastech. Pro následné vyhodnocení velikosti zrna byly pořízeny snímky s větším zvětšením viz obr. 11.15.



Obrázek 11.14: Struktura lisované slitiny EN AW-6110A v jádře



Obrázek 11.15: Detail struktury lisované slitiny EN AW-6110A v jádře

■ 11.2.3 EN AW-6082 výchozí stav

■ Příčné řezy

Na obr. 11.16 je evidentní povrchová vrstva o velikosti cca 50 μm. Vzhledem k tomu, že se jedná o lisovaný polotovar lze předpokládat, že tato vrstva je hrubozrnná. Mikrostruktura této slitiny v dalších oblastech odpovídá mikrostruktuře slitiny 1. dávky s tím rozdílem, že zrna mají symetričtější

tvar, neboť se jedná o příčný řez. Zrno je velmi jemné a výrazně se nemění se vzdáleností od povrchu.



Obrázek 11.16: Struktura v oblasti povrchu lisované slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)

■ Podélné řezy

Mikrostruktura na obr. 11.17 je opět velmi podobná snímku 1. dávky. Zrna jsou vesměs jemná a zdeformovaná ve směru lisování. Povrchová vrstva je i na tomto snímku patrná.

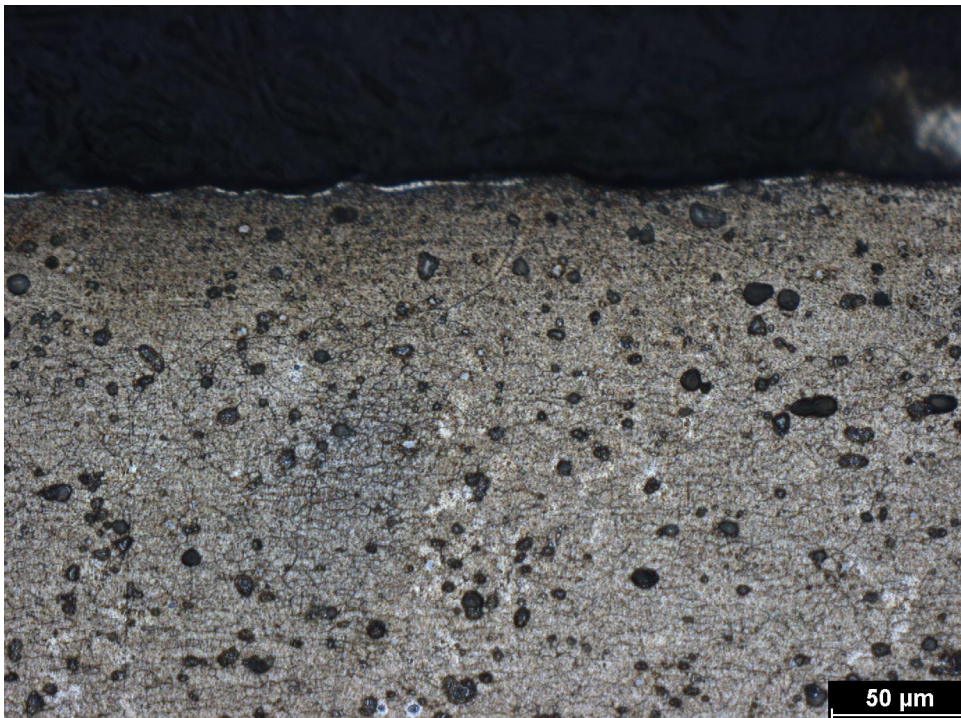


Obrázek 11.17: Struktura v oblasti povrchu lisované slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (podélný řez)

■ 11.2.4 EN AW-6082 po ohřevu

■ Příčné řezy

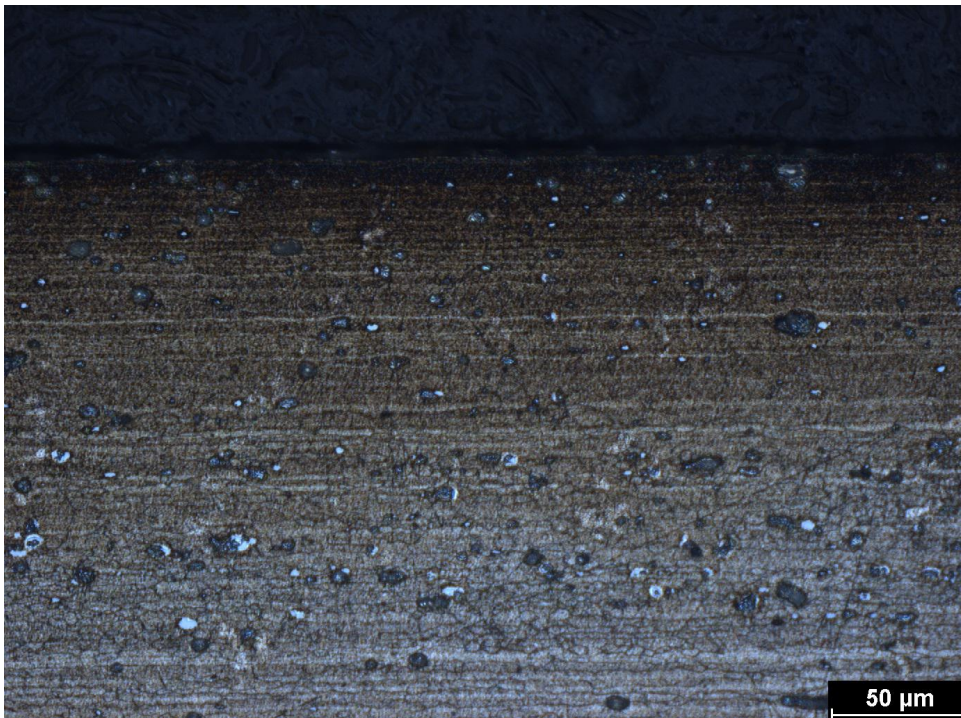
Na obr. 11.18 je vidět, že velikost zrna se oproti předchozímu stavu v podstatě nezměnila. Tmavá místa vzorku jsou pravděpodobně vypadlé částice při přípravě vzorku. Na snímku je zřetelná povrchová vrstva o velikosti 70 μm .



Obrázek 11.18: Struktura v oblasti povrchu lisované slitiny EN AW-6082 po ohřevu (příčný řez)

■ Podélné řezy

Pro strukturu v podélném řezu platí to samé co bylo řečeno o struktuře v příčném řezu s tím rozdílem, že zrna mají asymetrický tvar (viz obr. 11.19).



Obrázek 11.19: Struktura v oblasti povrchu lisované slitiny EN AW-6082 po ohřevu (podélný řez)

■ 11.2.5 EN AW-6082 po deformaci 30%

■ Příčné řezy

Struktura slitiny po deformaci v příčném řezu je jemnozrnná, polyedrická a to v celém průřezu kromě povrchové vrstvy. Na obr. 11.20 je zřetelná povrchová vrstva o velikosti $45\ \mu\text{m}$. Velikost zrna v tomto případě nelze z fotografie odhadnout.



Obrázek 11.20: Struktura v oblasti povrchu lisované slitiny EN AW-6082 po deformaci (příčný řez)

■ Podélné řezy

Na obr. 11.21 je vidět, že došlo k „rozpadu“ dlouhých zrn na menší. Zrna tak mají v tomto řezu podstatně symetričtější tvar než v předchozích případech. Povrchová vrstva je zvýrazněna i v tomto řezu



Obrázek 11.21: Struktura v oblasti povrchu lisované slitiny EN AW-6082 po deformaci (podélný řez)

Kapitola 12

Měření velikosti zrna

Velikost zrna je jednou ze základních kvantifikovatelných charakteristik mikrostruktury materiálu a může ovlivňovat jeho mechanické vlastnosti.

12.1 Způsob měření velikosti zrna

12.1.1 Lité polotovary

Velikost zrna litých polotovarů ve výchozím stavu byla vyhodnocována pomocí programu NIS Elements AR. Ten umožňuje automaticky detekovat hranice zrn a následně vypočte jejich ekvivalentní průměr. Automatická detekce zrn není dokonalá, ale vše lze následně ručně upravit. Využití počítačového programu pak usnadnilo manipulaci s daty. Analýza litých polotovarů je značně náročná, neboť je obtížné určit, které dendrity patří kterému zrn.

Velikost zrna ostatních HCM polotovarů byla vyhodnocena planimetrickou metodou podle normy ČSN 42 0462, protože hranice zrn nebyly pro počítačový program dostatečně kontrastní.

Snímky byly pořízeny se zvětšením mikroskopu 100 nebo 200x. Měření probíhalo v oblasti povrchové vrstvy, přechodové oblasti a v jádře. Přibližná vzdálenost těchto oblastí od povrchu byla zmíněna v kapitole 10. Výsledky měření jsou uvedeny ve formě histogramů, středního průměru zrna a střední plochy zrna.

12.1.2 Lisované polotovary

Vzhledem k menšímu zvýraznění hranic zrn u tvářených vzorků nebylo použití programu NIS Elements AR možné. Z toho důvodu byla pro vyhodnocení velikosti zrna použita planimetrická metoda podle normy ČSN 42 0462. Vzhledem k tomu, že nezanedbatelné množství zrn bylo zdeformováno, byla použita také průsečiková metoda podle normy. Vzhledem ke tvaru zrn některých vzorků byla průměrná délka přímkového úseku určena vždy ve směru rovnoběžném a kolmém na směr deformace. Tyto hodnoty tak lépe

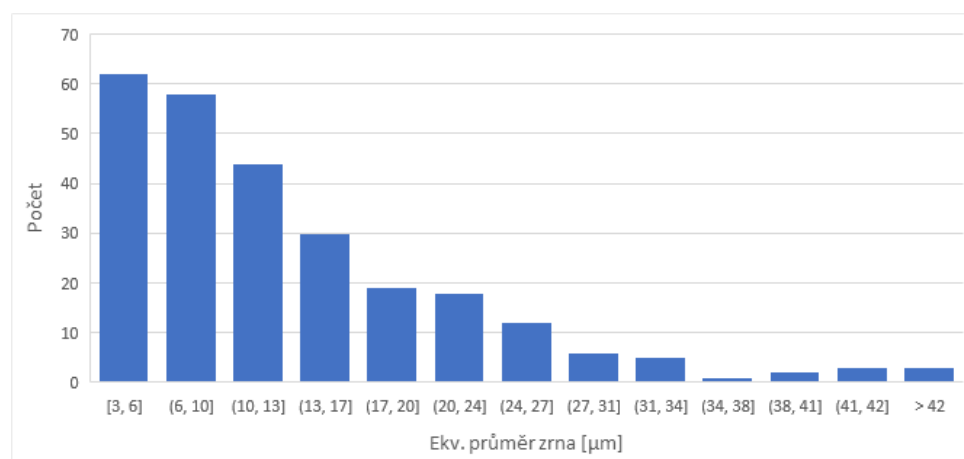
charakterizují tvar zrna. Za účelem srovnání jsou výsledky uvedeny v podobě střední plochy zrna. Střední průměr zrna není uveden, protože špatně charakterizuje tvar zdeformovaných zrn. Měřené oblasti byly zvoleny stejně jako u litých vzorků viz obr. 11.1. Vyhodnocení velikosti zrna v oblasti povrchové vrstvy nebylo kvůli problematickému leptání možné.

12.2 Výsledky měření

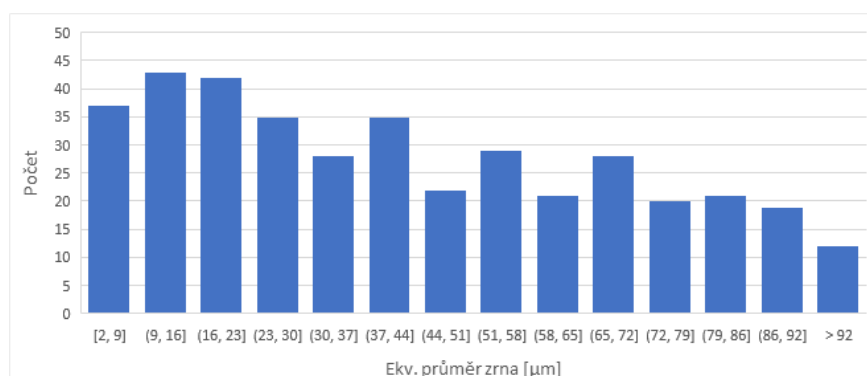
12.2.1 Histogramy

Vzhledem k množství změřených vzorků by všechny histogramy zabíraly příliš místa. Z toho důvodu je zde uveden pouze jeden reprezentativní příklad ukazující distribuci velikostí zrn. Ostatní histogramy je možné najít v příloze B: Histogramy HCM slitin.

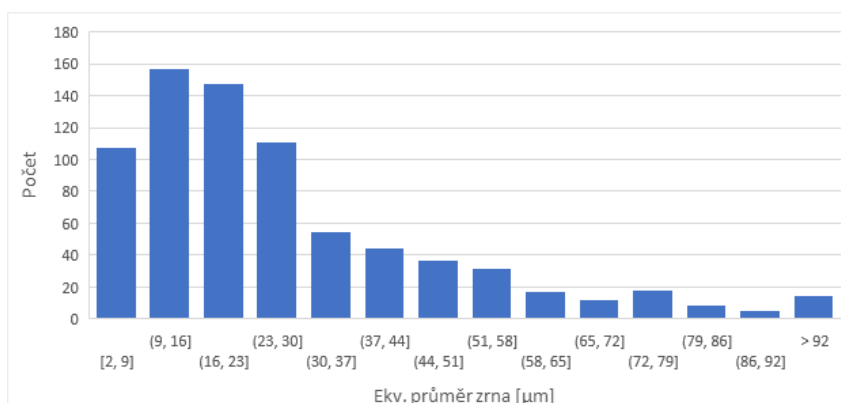
HCM EN AW-6082 1. dávka



Obrázek 12.1: Histogram velikosti zrna v povrchové vrstvě HCM slitiny EN AW-6082 (podélný řez)



Obrázek 12.2: Histogram velikosti zrna v přechodové oblasti slitiny HCM EN AW-6082 (podélný řez)



Obrázek 12.3: Histogram velikosti zrna v jádře HCM slitiny EN AW-6082 (podélný řez)

12.2.2 Číselné výsledky

Tabulka 12.1: Výsledky měření velikosti zrna (příčný řez)

Povrch						
HCM			Lisované			
Slitina	\bar{a} [mm ²]	\bar{d} [mm]	Slitina	\bar{a} [mm ²]	l_{rov} [mm]	l_{kol} [mm]
6082 výchozí	0,000244	0,00132	6082 výchozí	-	-	-
6082 ohřev	0,00303	0,0173	6082 ohřev	-	-	-
6082 po def.	0,000059	0,0077	6082 po def.	-	-	-
Přechodová oblast						
HCM			Lisované			
Slitina	\bar{a} [mm ²]	\bar{d} [mm]	Slitina	\bar{a} [mm ²]	l_{rov} [mm]	l_{kol} [mm]
6082 výchozí	0,00104	0,0266	6082 výchozí	0,000033	0,00583	0,00588
6082 ohřev	0,00096	0,0311	6082 ohřev	0,000050	0,00549	0,00538
6082 po def.	0,000058	0,0076	6082 po def.	0,000051	0,00575	0,00541
Jádro						
HCM			Lisované			
Slitina	\bar{a} [mm ²]	\bar{d} [mm]	Slitina	\bar{a} [mm ²]	l_{rov} [mm]	l_{kol} [mm]
6082 výchozí	0,00103	0,0275	6082 výchozí	0,000039	0,00541	0,00594
6082 ohřev	0,00083	0,0288	6082 ohřev	0,000055	0,00543	0,00562
6082 po def.	0,000051	0,0071	6082 po def.	0,000055	0,00521	0,00568

Tabulka 12.2: Výsledky měření velikosti zrna (podélný řez)

Povrch						
HCM			Lisované			
Slitina	\bar{a} [mm ²]	\bar{d} [mm]	Slitina	\bar{a} [mm ²]	l_{rov} [mm]	l_{kol} [mm]
6082 1. dávka	0,000208	0,0133	6082 1. dávka	-	-	-
6110A 1. dávka	0,000164	0,0113	6110A 1. dávka	-	-	-
6082 výchozí	0,000063	0,0077	6082 výchozí	-	-	-
6082 ohřev	0,000202	0,0141	6082 ohřev	-	-	-
6082 po def.	0,000049	0,0070	6082 po def.	-	-	-
Přechodová oblast						
HCM			Lisované			
Slitina	\bar{a} [mm ²]	\bar{d} [mm]	Slitina	\bar{a} [mm ²]	l_{rov} [mm]	l_{kol} [mm]
6082 1. dávka	0,00201	0,0426	6082 1. dávka	0,000036	0,00595	0,00278
6110A 1. dávka	0,00150	0,0355	6110A 1. dávka	0,000047	0,00683	0,00385
6082 výchozí	0,00152	0,0354	6082 výchozí	0,000038	0,00694	0,00463
6082 ohřev	0,00094	0,0304	6082 ohřev	0,000036	0,00610	0,00562
6082 po def.	0,000047	0,0068	6082 po def.	0,000042	0,00543	0,00490
Jádro						
HCM			Lisované			
Slitina	\bar{a} [mm ²]	\bar{d} [mm]	Slitina	\bar{a} [mm ²]	l_{rov} [mm]	l_{kol} [mm]
6082 1. dávka	0,00099	0,0281	6082 1. dávka	0,000037	0,00625	0,00333
6110A 1. dávka	0,00070	0,0212	6110A 1. dávka	0,000042	0,00646	0,00397
6082 výchozí	0,00133	0,0324	6082 výchozí	0,000044	0,00667	0,00455
6082 ohřev	0,00075	0,0273	6082 ohřev	0,000043	0,00699	0,00490
6082 po def.	0,000038	0,0061	6082 po def.	0,000035	0,00467	0,00394

12.3 Vyhodnocení měření velikosti zrna

Polotovary HCM 1. dávky slitin 6082 a 6110A mají stejný průběh velikosti zrna. Na povrchu je jemnozrnná vrstva o velikosti přibližně 60 μm (místy až 100 μm). Tato vrstva přechází v hrubozrnnou přechodovou oblast. Střední průměr zrna je zde třikrát vyšší. V jádře je zrno jemnější (dvakrát hrubší než na povrchu).

Lisované polotovary slitin 1. dávky mají velmi jemné zrno přibližně stejné velikosti ve všech vyhodnotitelných oblastech. Zrna jsou v porovnání s povrchovou vrstvou polotovarů HCM téměř poloviční. Různé hodnoty průměrných délek úseku ve směru rovnoběžném a kolmém na směr deformace číselně dokládají zdeformovaný tvar zrn.

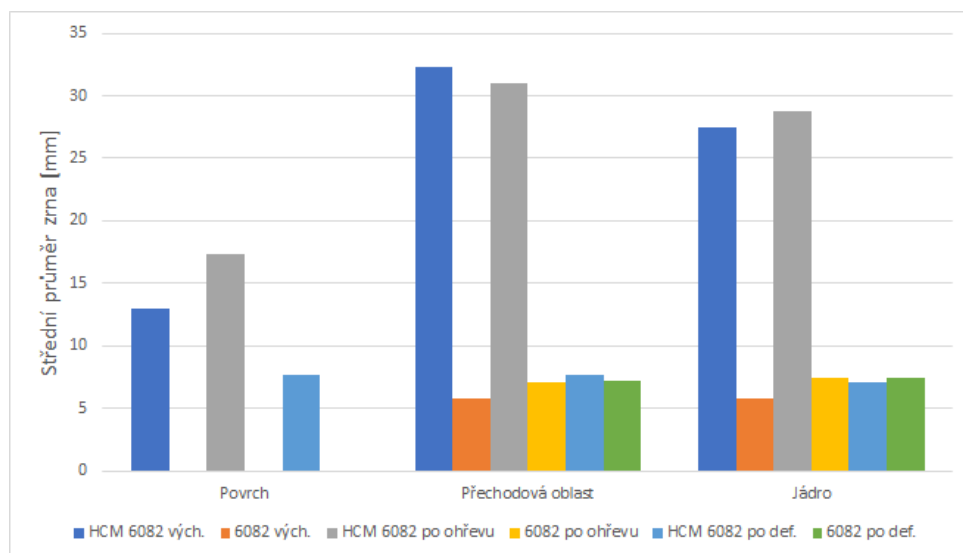
Velikost zrna HCM polotvaru slitiny EN AW-6082 2. dávky (jiný dodavatel) ve výchozím stavu se výrazněji liší od HCM slitin 1. dávky pouze v jádře. Zatímco u polotvarů první dávky bylo zrno v jádře jemnější než v přechodové oblasti, u druhé dávky je velikost zrna v obou oblastech téměř totožná. Střední průměr zrna HCM slitiny 6082 2. dávky je v podélném řezu přibližně o $5 \mu\text{m}$ vyšší než v řezu příčném.

Lisované polotovary 2. dávky mají téměř totožnou velikost zrna jako lisované polotovary 1. dávky.

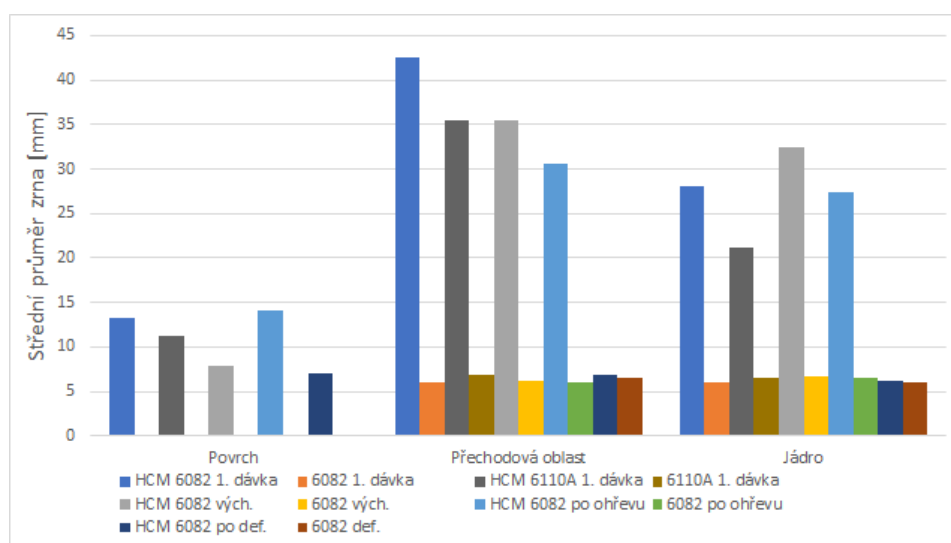
Po ohřevu se velikost zrna litých i lisovaných polotovarů v podstatě nezměnila.

Po 30% deformaci bylo naměřeno velmi jemné zrno u polotovarů vyráběných oběma metodami ve všech oblastech. HCM polotovary mají marginálně hrubší zrno.

Přesné naměřené hodnoty jsou v tab. 12.1 a 12.2. Srovnání jednotlivých vzorků v grafické podobě je na obr. 12.4 a 12.5. Pro tyto účely byly všechny hodnoty převedeny na střední průměr zrna.



Obrázek 12.4: Srovnání velikosti zrna měřených polotovarů (příčný řez)



Obrázek 12.5: Srovnání velikosti zrna měřených polotovarů (podélný řez)

Kapitola 13

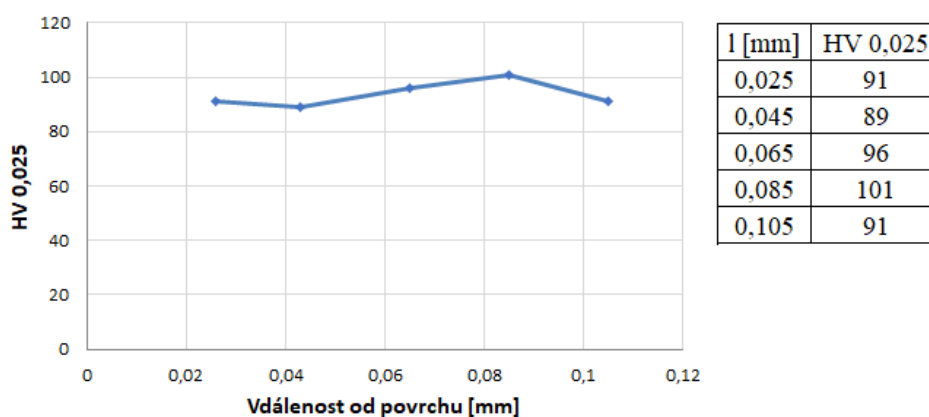
Měření mikrotvrdosti

13.1 Způsob měření mikrotvrdosti

Mikrotvrdost byla změřena pomocí mikrotvrdoměru LECO LM-248AT. Na tomto stroji byla provedena zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse při zatížení 100 g. Pro měření tenkých povrchových vrstev bylo použito menší zatížení 25 g. Tato zatížení byla zvolena s ohledem na dostatečný rozměr vtisku. Pro srovnání byly všechny vzorky druhé dávky změřeny v příčném i podélném řezu. Měření probíhalo v celém průřezu.¹

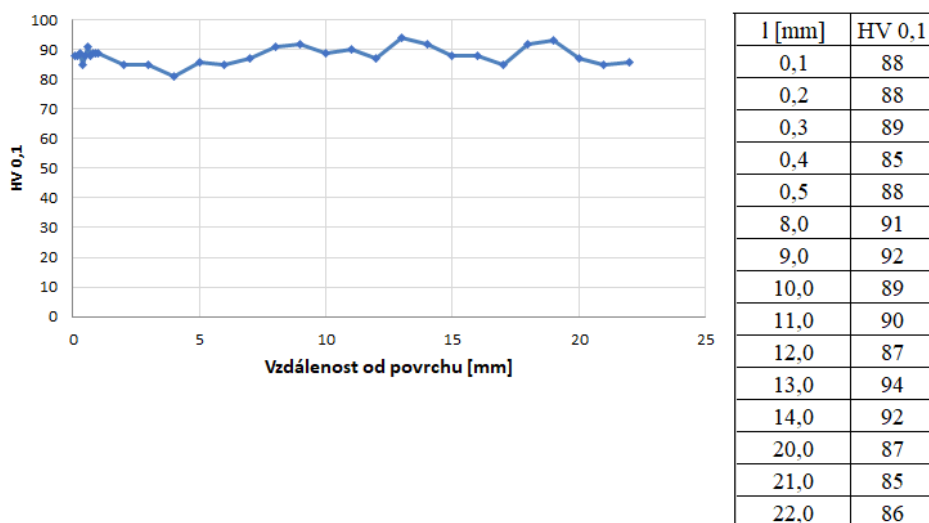
13.2 Výsledky měření mikrotvrdosti

V zájmu lepší čitelnosti práce je zde opět uveden pouze jeden průběh měření v grafické podobě. Zbylé výsledky jsou v příloze C: Průběhy mikrotvrdosti. Číselné výsledky jsou v tab. 13.1 a 13.2. Jde o průměrné hodnoty za měřenou oblast, vždy minimálně 5 měření (v jádře minimálně 3, podle rozměru vzorku). Obr. 13.3, 13.4, 13.5, 13.6 jsou zahrnuty pro lepší vizualizaci dat a snažší ověření vztahu mezi velikostí zrna a mikrotvrdostí.



Obrázek 13.1: Průběh mikrotvrdosti slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)

¹Povrchová vrstva HCM EN AW-6082 ve výchozím stavu v příčném řezu byla nevyhodnotitelná, protože měřila pouze 20 μm .



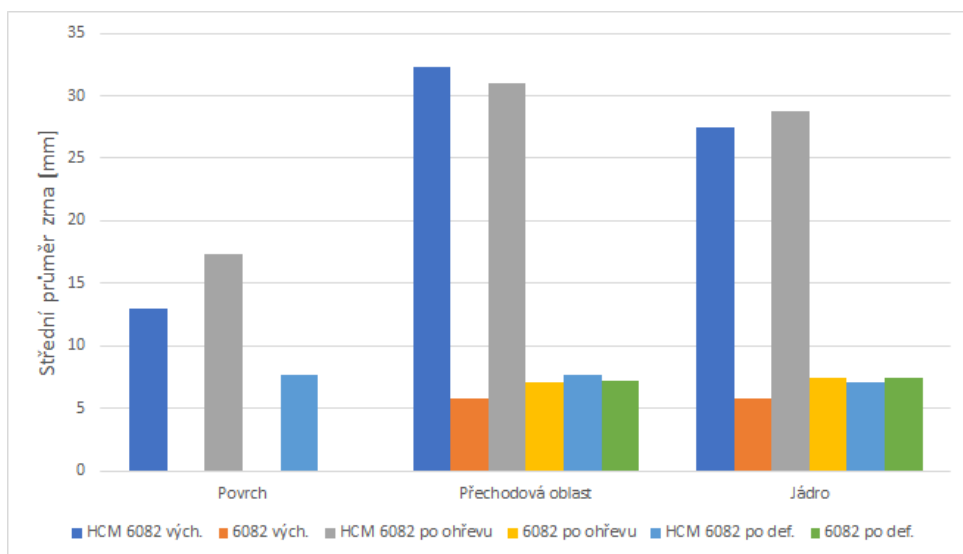
Obrázek 13.2: Průběh mikrotvrdomosti slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)

Tabulka 13.1: Mikrotvrdomost polotovarů v příčném řezu

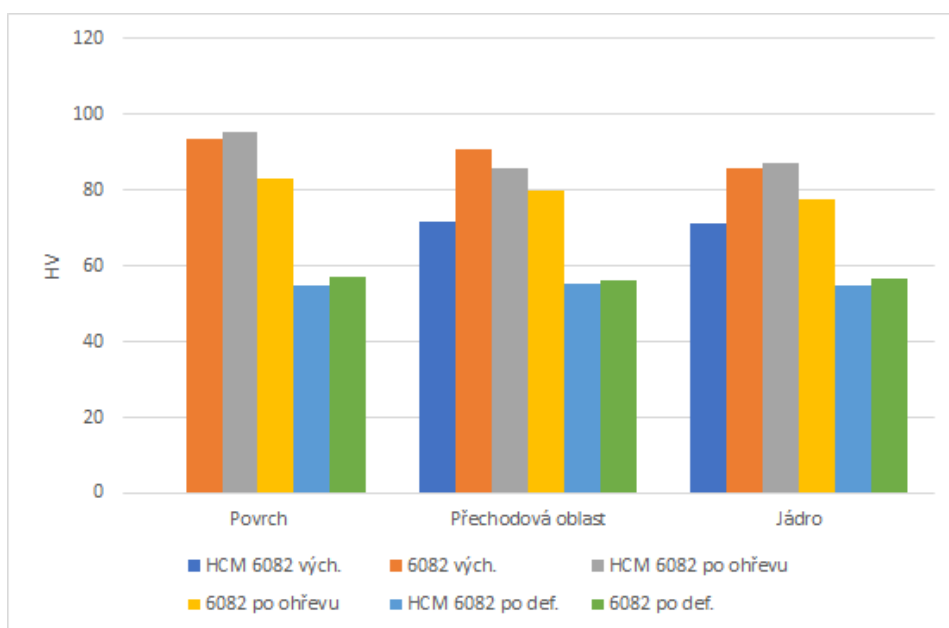
Tvrdomost	HV 0,025		HV 0,1		HV 0,1	
	Povrch		Přech. obl.		Jádro	
Slitina	HCM	Lis.	HCM	Lis.	HCM	Lis.
EN AW-6082 výchozí stav 2. dávka	-	94	72	91	71	86
EN AW-6082 po ohřevu	95	83	86	80	87	78
EN AW-6082 po deformaci	55	57	55	56	55	57

Tabulka 13.2: Mikrotvrdomost polotovarů v podélném řezu

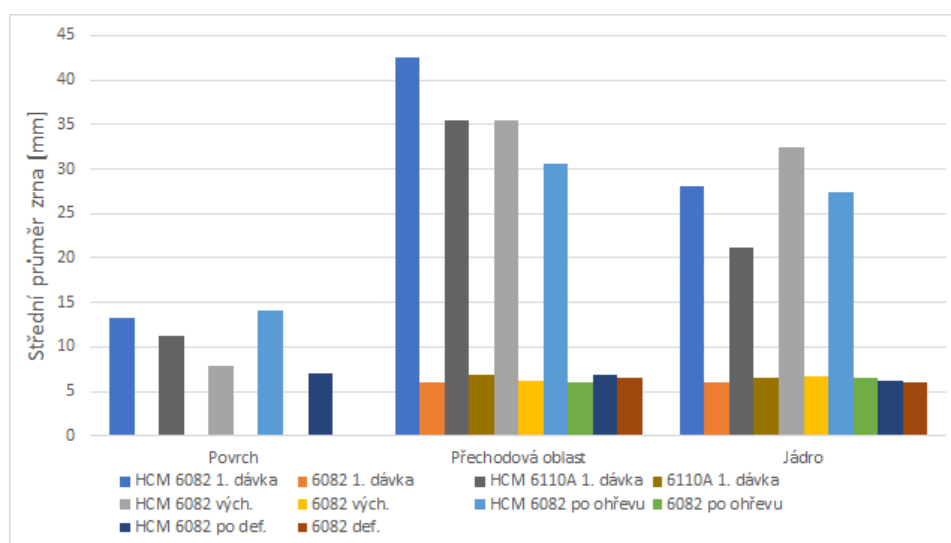
Tvrdomost	HV 0,025		HV 0,1		HV 0,1	
	Povrch		Přech. obl.		Jádro	
Slitina	HCM	Lis.	HCM	Lis.	HCM	Lis.
EN AW-6082 výchozí stav 1. dávka	82	-	67	72	70	73
EN AW-6110A výchozí stav 1. dávka	89	-	72	89	73	88
EN AW-6082 výchozí stav 2. dávka	77	83	68	87	73	89
EN AW-6082 po ohřevu	88	88	83	83	85	85
EN AW-6082 po deformaci	52	47	54	50	54	50



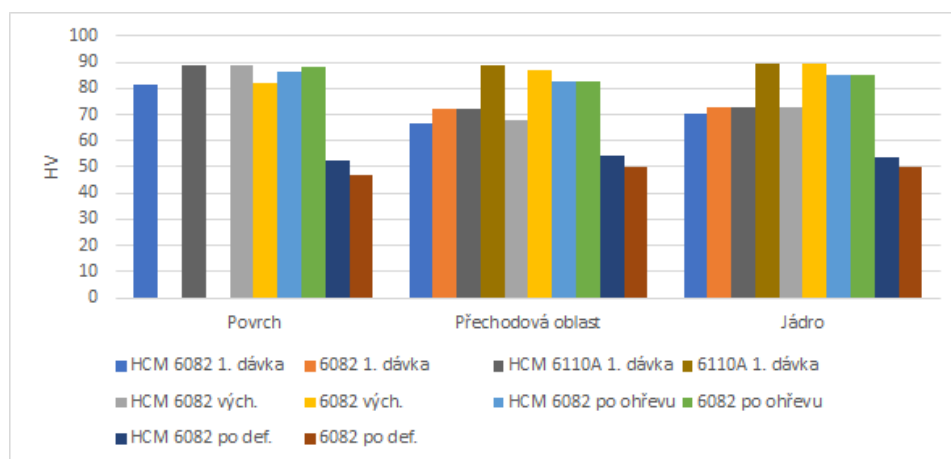
Obrázek 13.3: Srovnání velikosti zrna měřených polotovarů (příčný řez)



Obrázek 13.4: Srovnání mikrotvrdosti měřených polotovarů (příčný řez)



Obrázek 13.5: Srovnání velikosti zrna měřených polotovarů (podélný řez)



Obrázek 13.6: Srovnání mikrotvrdosti měřených polotovarů (podélný řez)

13.3 Vyhodnocení měření mikrotvrdosti

HCM polotovary ve výchozím stavu mají na povrchu tvrdší vrstvu. Tvrdost je zde přibližně o 12 HV 0,025 vyšší než v ostatních měřených oblastech. Pod povrchovou vrstvou se tvrdost se vzdáleností od povrchu výrazně nemění. Lisované polotovary ve výchozím stavu dosahovaly mimo povrch vyšší tvrdosti než jejich HCM ekvivalenty a to přibližně o 20 HV 0,1. Srovnání slitin EN AW-6082 a 6110A nevykazuje evidentní trend.

Po ohřevu mají všechny vzorky přibližně stejnou tvrdost (cca 83 HV 0,1). Stejně tak po 30% deformaci mají polotovary podobnou tvrdost, byť menší (cca 51 HV 0,1). Tvrdost se v příčném a podélném řezu výrazně neliší.

Kapitola 14

Závěr

Z výsledků měření vyplývá, že způsob výroby polotovaru má vliv na jeho mikrostrukturu a mechanické vlastnosti. U slitin vyrobených metodou HCM se mění velikost zrna se vzdáleností od povrchu. Na povrchu je jemnozrná vrstva o síle mezi 50 a 60 μm , ale její velikost značně kolísá. Tato vrstva byla u polotovarů 1. dávky tvrdší než vnitřní část polotovaru o 10 až 20 HV 0,1. U slitin druhé dávky byl rozdíl v tvrdosti menší - cca 5 HV 0,1.

Tenká vrstva jemného zrna u HCM polotovarů postupně přechází do hrubozrné přechodové oblasti mezi jádrem a povrchem. V jádře je pak zrno jemnější, avšak hrubší než na povrchu. Ve všech oblastech je struktura dendritická. Mezi mikrostrukturou ve výchozím stavu a po ohřevu nebyl zaznamenán měřitelný rozdíl. Ke změně mikrostruktury však došlo u HCM vzorků po 30% deformaci. U těchto vzorků byla dendritická struktura v přechodové oblasti a jádře zdeformována. Struktura je jemnozrná, polyedrická, což svědčí o proběhnutí rekrystalizace.

Slitina HCM EN AW-6110A 1. dávky byla ve všech oblastech jemnozrnější než HCM EN AW-6082.

Rozdíl ve velikosti zrna slitin vyráběných metodou HCM byl mezi příčnými a podélnými řezy zanedbatelný. Polotovary se tedy v tomto ohledu jeví homogenní a jejich vlastnosti budou izotropní.

V případě lisovaných polotovarů se vyskytuje povrchová vrstva velikosti 50 μm (po ohřevu 70 μm). Vzhledem k problematickému leptání zde nebylo možné velikost zrna vyhodnotit. U těchto lisovaných polotovarů zde lze očekávat hrubozrnou strukturu. Měření mikrotvrdosti neprokázalo rozdíl mezi povrchem a zbylou částí materiálu.

Velikost zrna ve vyhodnotitelných částech polotovarů se s vzdáleností od povrchu téměř nemění. Zrno je velmi jemné u všech vzorků. Ve výchozím stavu a stavu po ohřevu byl v podélných řezech jasně zřetelný směr deformace při lisování. Ve struktuře se ojediněle vyskytovala zrna dlouhá i více jak desetinásobek průměrné délky. U lisovaných polotovarů po 30% deformaci se

tato zrna rozpadla a získala symetričtější tvar. Z toho lze usuzovat, že zde proběhla rekrytalizace.

Obecně lze říci, že lisované polotovary mají homogenní zrno asymetrického tvaru. Velikost zrna polotvarů HCM se v průřezu mění, ale zrna jsou symetričtější.

Naměřené hodnoty mikrotvrdomosti dokumentují rozdíl ve výrobě polotovarů. Lisované polotovary výchozího stavu vykazovaly ve většině případů o 20 HV 0,1 vyšší tvrdost. Tento rozdíl byl u polotovarů po ohřevu zanedbatelný. Tvrdost HCM i lisovaných vzorků po ohřevu se pohybuje okolo 85 HV 0,1. Měření mikrotvrdomosti dále potvrzuje, že u deformovaných polotovarů došlo k rekrytalizaci. Bez ohledu na způsob výroby nebo měřenou oblast byla naměřena tvrdost cca 53 HV 0,1.

Tvrdost vzorků v podélném a příčném řezu se zásadně neliší.

Závěrem lze říci, že mikrostruktura má vliv na mechanické vlastnosti polotovaru vybraných slitin AlMgSi, ale velikost zrna nelze brát jako jediný indikátor výsledných mechanických vlastností, a to zejména u tepelně zpracovaných materiálů.

Vzhledem k praktickému významu tepelného zpracování by bylo vhodné navázat na tuto práci analýzou polotovarů po vytvrzování. Pro komplexnější ověření mechanických vlastností lze doporučit zkoušku tahem.



Literatura

- [1] STEVE, Bettcher. *Flextrème Caster*. Spokane Valley, WA 99216 USA, 2017. Dostupné také z: <http://2gjjon1sdeu33dnmvp1qwsdx.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2017/09/Flextrème-Flyer.pdf>
- [2] *Metals handbook*. 9th ed. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1989. ISBN 0-87170-007-7.
- [3] YOU, B. S., C. D. YIM a S. H. KIM. Solidification of AZ31 magnesium alloy plate in a horizontal continuous casting process. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2005, **413-414**, 139-143 [cit. 2018-03-19]. DOI: 10.1016/j.msea.2005.08.183. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092150930501004X>
- [4] Li T., T. Wang , X. Zhang, Z. Cao, B. Wen, Q. Zhang a J. Jin. *EPM Activities in Dalian University of Technology* [online]. School of Materials Science and Engineering Liaoning Key Laboratory of Special Processing of Raw Materials Dalian University of Technology, Dalian 116024, Čína, [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: <http://slideplayer.com/slide/8378155/#>
- [5] *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 8089041884.
- [6] LENFELD, P. Technologie objemového tváření – protlačování. *Katedra tváření kovů a plastů - Skripta* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008 [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/05.htm
- [7] JANOVEC, J., K. MACEK a P. ZUNA. *Fyzikální metalurgie*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 9788001029350.
- [8] PREPARED UNDER THE DIRECTION OF THE ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. *Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials*. 10th ed. Materials Park, OH: ASM International, 1990. ISBN 9780871703781.
- [9] HATCH, John E. *Aluminum: properties and physical metallurgy*. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1984. ISBN 0871701766.

- [10] DONALD R. ASKELAND, PRADEEP P. FULAY a WENDELIN J. WRIGHT. *The science and engineering of materials*. 6th ed. Stamford, CT: Cengage Learning, 2011. ISBN 9780495296027.
- [11] JANOVEC, J., J. CEJP a J. STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [12] ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [13] MILLER, W.S, L ZHUANG, J BOTTEMA, A.J WITTEBROOD, P DE SMET, A HASZLER a A VIEREGGE. *Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. Materials Science and Engineering: A* [online]. 2000, **280**(1), 37-49 [cit. 2018-03-05]. DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00653-X. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092150939900653X>
- [14] JOSEPH R. DAVIS a STEVEN R. LAMPMAN ... *Machining*. 9. ed. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1989. ISBN 0871700220.
- [15] ALTERA, D. *Vliv technologie výroby na strukturu vybrané Al slitiny*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.
- [16] POKOVÁ, M. *Mikrostruktura nerovnovážných tuhých roztoků na bázi Al-Mn*. Praha, 2010. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze.
- [17] KOLAR, M., K. O. PEDERSEN, S. GULBRANDSEN-DAHL a K. MARTHINSEN. Combined effect of deformation and artificial aging on mechanical properties of Al–Mg–Si Alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [online]. 2012, **22**(8), 1824-1830 [cit. 2018-03-07]. DOI: 10.1016/S1003-6326(11)61393-9. ISSN 10036326. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1003632611613939>
- [18] MARIOARA, C. D., S. J. ANDERSEN, H. W. ZANDBERGEN a R. HOLMESTAD. The influence of alloy composition on precipitates of the Al-Mg-Si system. *Metallurgical and Materials Transactions A* [online]. 2005, **36**(3), 691-702 [cit. 2018-03-07]. DOI: 10.1007/s11661-005-0185-1. ISSN 1073-5623. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11661-005-0185-1>
- [19] PREPARED UNDER THE DIRECTION OF THE ASM HANDBOOK COMMITTEE. *ASM handbook, Volume 4: Heat Treating*. 9th ed. Materials Park, Ohio: American Society for Metals, 1991. ISBN 9780871703798.
- [20] MRÓWKA-NOWOTNIK, G., J. SIENIAWSKI a A. NOWOTNIK. Tensile properties and fracture toughness of heat treated 6082 alloy. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* [online]. 2006, **17**(1-2), 105-108 [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_amme06/164.pdf

- [21] MRÓWKA-NOWOTNIK, G. a J. SIENIAWSKI. Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminium alloys. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2005, **162-163**, 367-372 [cit. 2018-03-07]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.115. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013605002207>
- [22] SHANG, B.C., Z.M. YIN, G. WANG, B. LIU a Z.Q. HUANG. Investigation of quench sensitivity and transformation kinetics during isothermal treatment in 6082 aluminum alloy. *Materials & Design* [online]. 2011, **32**(7), 3818-3822 [cit. 2018-03-07]. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.03.016. ISSN 02613069. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306911001725>
- [23] ANDERSEN, S.J., H.W. ZANDBERGEN, J. JANSEN, C. TRÆHOLT, U. TUNDAL a O. REISO. The crystal structure of the β'' phase in Al-Mg-Si alloys. *Acta Materialia* [online]. 1998, **46**(9), 3283-3298 [cit. 2018-03-07]. DOI: 10.1016/S1359-6454(97)00493-X. ISSN 13596454. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S135964549700493X>
- [24] ČSN EN 573-3. *Hliník a slitiny hliníku - Chemické složení a druhy tvářených výrobků - Část 3: Chemické složení a druhy výrobků*. 5. vyd. Praha: ÚNMZ, květen 2014.
- [25] ČSN EN 485-2. *Hliník a slitiny hliníku - Plechy, pásy a desky - Část 2: Mechanické vlastnosti*. 7. vyd. Praha: ÚNMZ, 2017.
- [26] KRAUS, I. Kvantitativní metalografická analýza jako součást komplexního studia fyzikálních vlastností materiálů. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*. 1968, 13(2), 83-99.



Přílohy

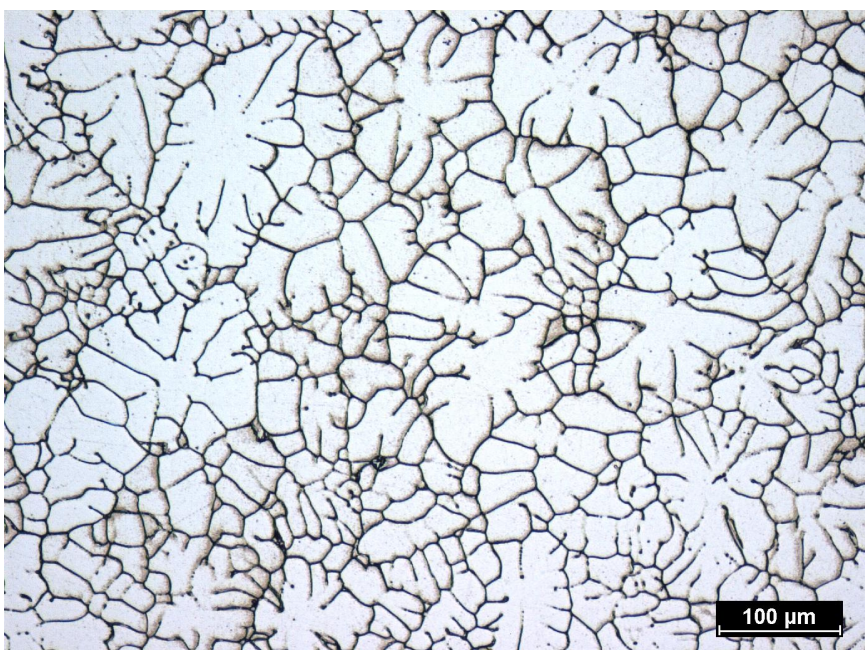
Příloha A

Snímky mikrostruktur vzorků

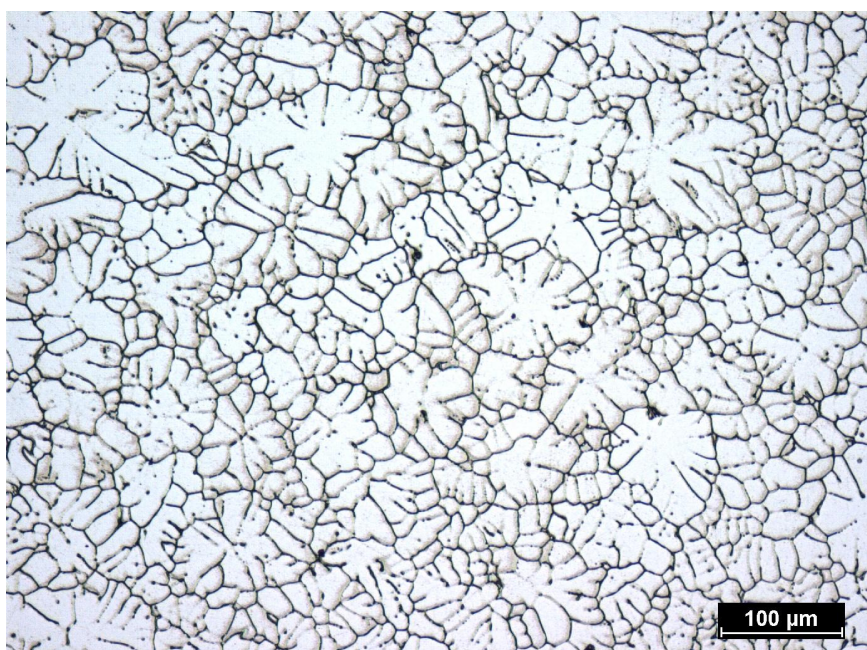
A.1 Lité polotovary

A.1.1 HCM EN AW-6082 1. dávka

Podélné řezy



Obrázek A.1: Struktura HCM slitiny EN AW-6082 v přechodové oblasti

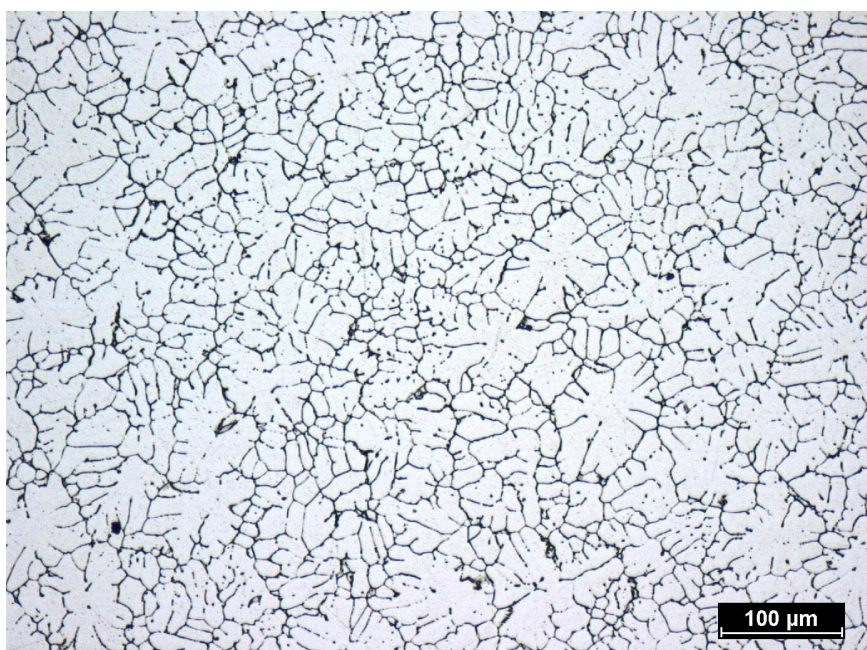


Obrázek A.2: Struktura HCM slitiny EN AW-6082 v jádře

■ A.1.2 HCM EN AW-6110A 1. dávka



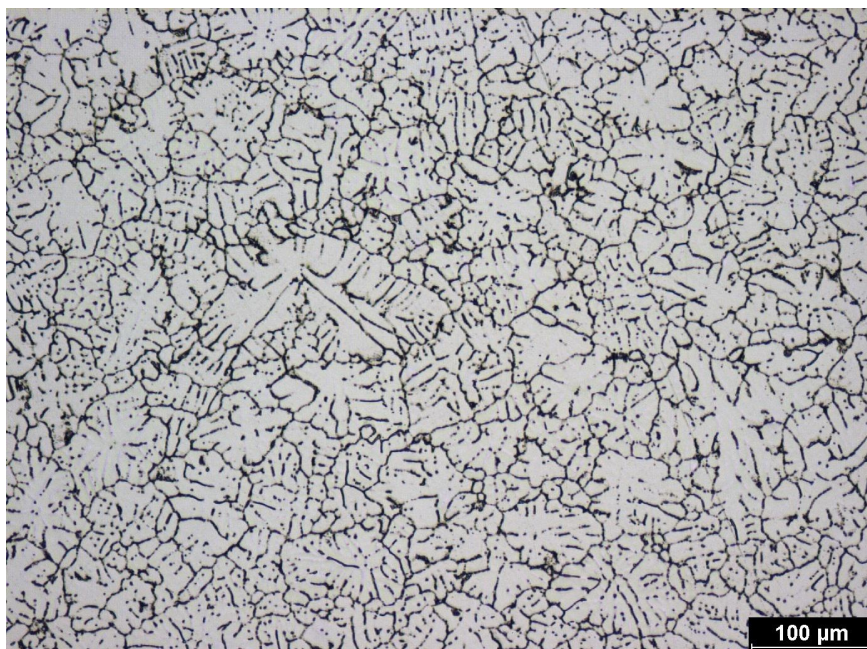
Obrázek A.3: Struktura HCM slitiny EN AW-6110A v přechodové oblasti



Obrázek A.4: Struktura HCM slitiny EN AW-6110A v jádře

■ A.1.3 HCM EN AW-6082 2.dávka výchozí stav

■ Příčné řezy

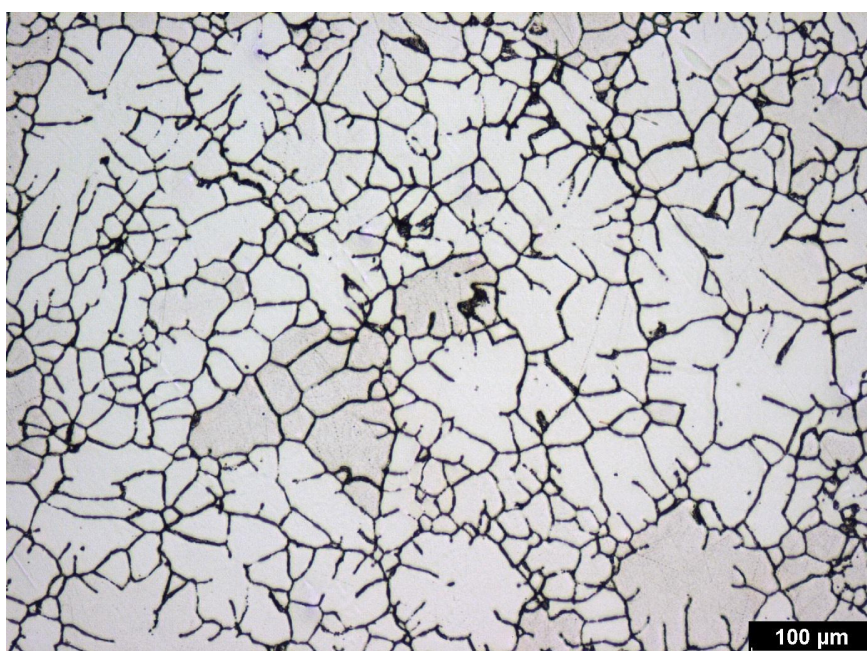


Obrázek A.5: Struktura v přechodové oblasti HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)



Obrázek A.6: Struktura v jádře HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)

■ Podélné řezy



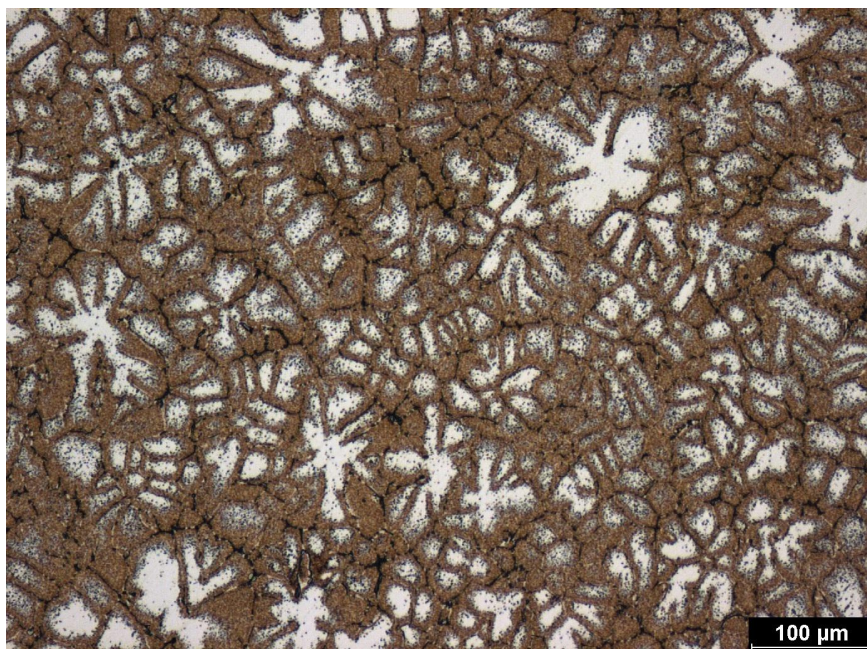
Obrázek A.7: Struktura v přechodové oblasti HCM slitiny EN AW-6082 (podélný řez)



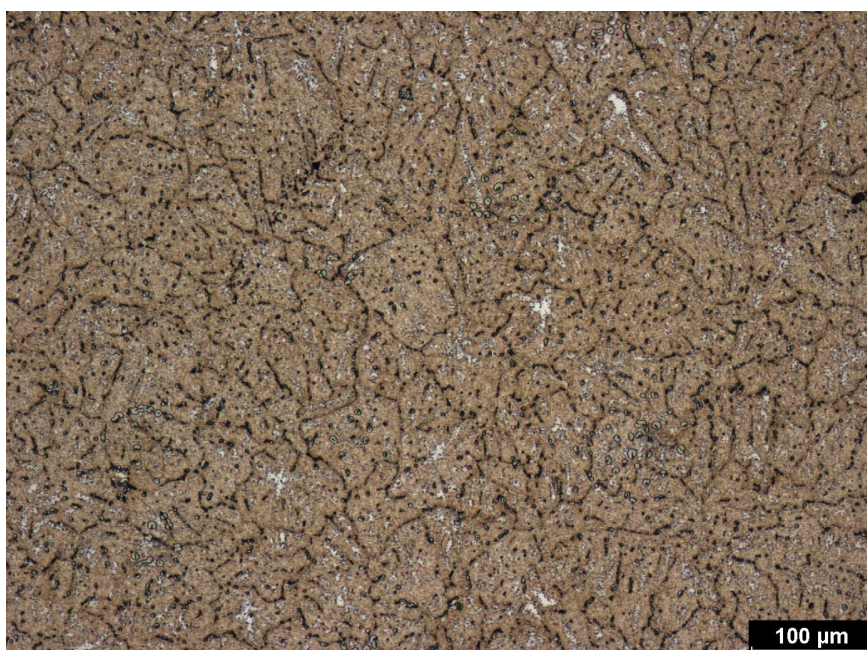
Obrázek A.8: Struktura v jádře HCM slitiny EN AW-6082 (podélný řez)

■ A.1.4 HCM EN AW-6082 po ohřevu

■ Příčné řezy

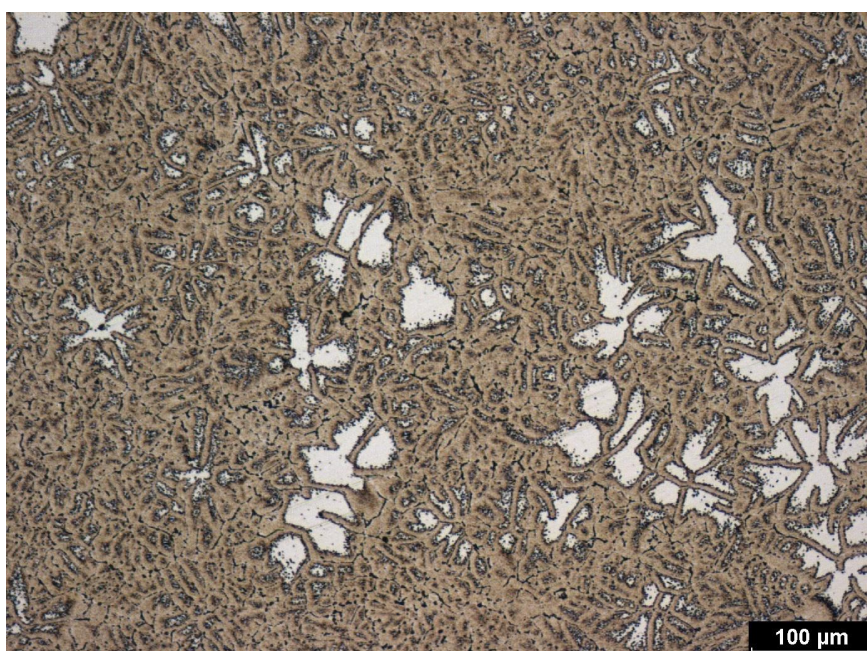


Obrázek A.9: Struktura v přechodové oblasti HCM slitiny EN AW-6082 po ohřevu (příčný řez)

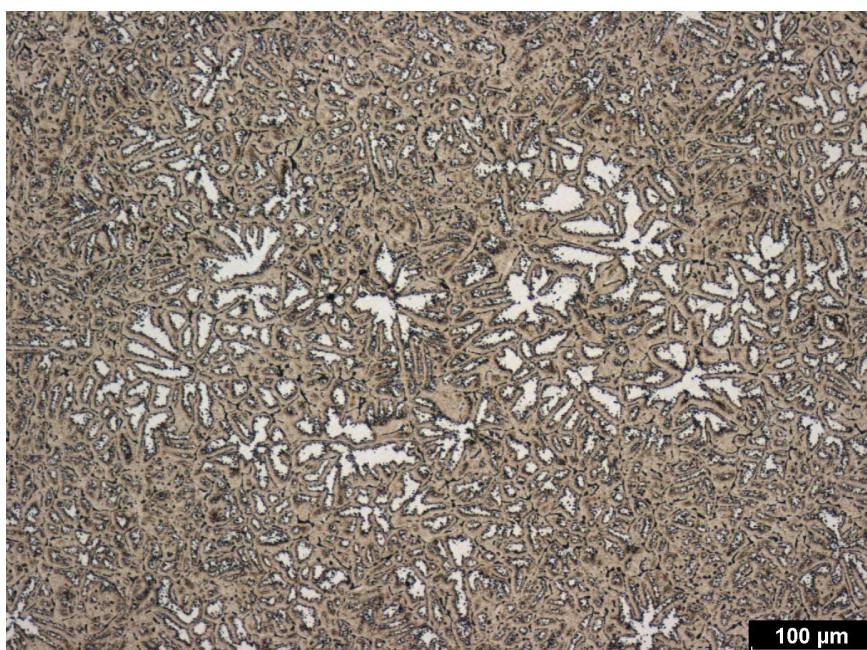


Obrázek A.10: Struktura v jádře HCM slitiny EN AW-6082 po ohřevu (příčný řez)

■ Podélné řezy



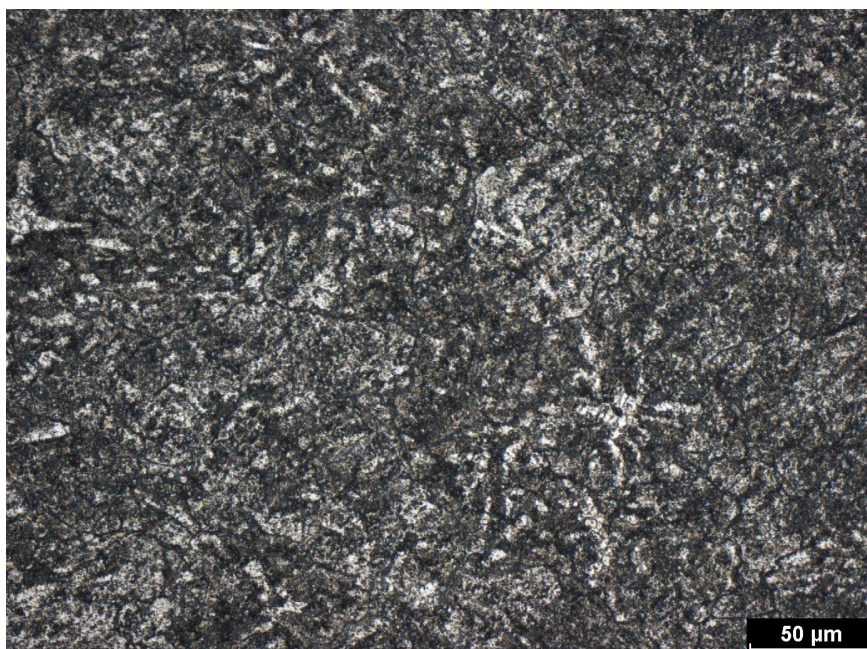
Obrázek A.11: Struktura v přechodové oblasti HCM slitiny EN AW-6082 po ohřevu (podélný řez)



Obrázek A.12: Struktura v jádře HCM slitiny EN AW-6082 po ohřevu (podélný řez)

■ A.1.5 HCM EN AW-6082 po deformaci

■ Příčné řezy

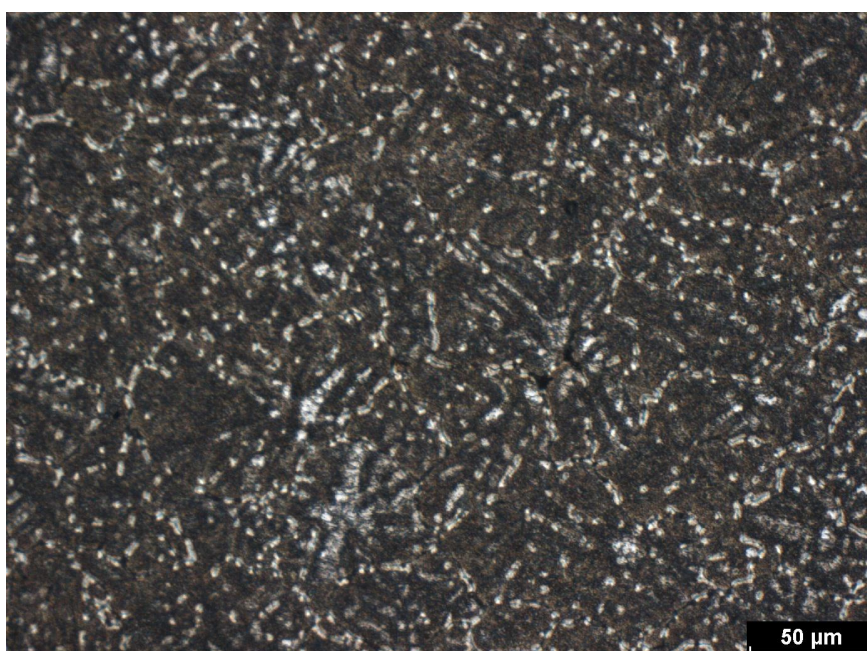


Obrázek A.13: Struktura v přechodové oblasti HCM slitiny EN AW-6082 po deformaci (příčný řez)

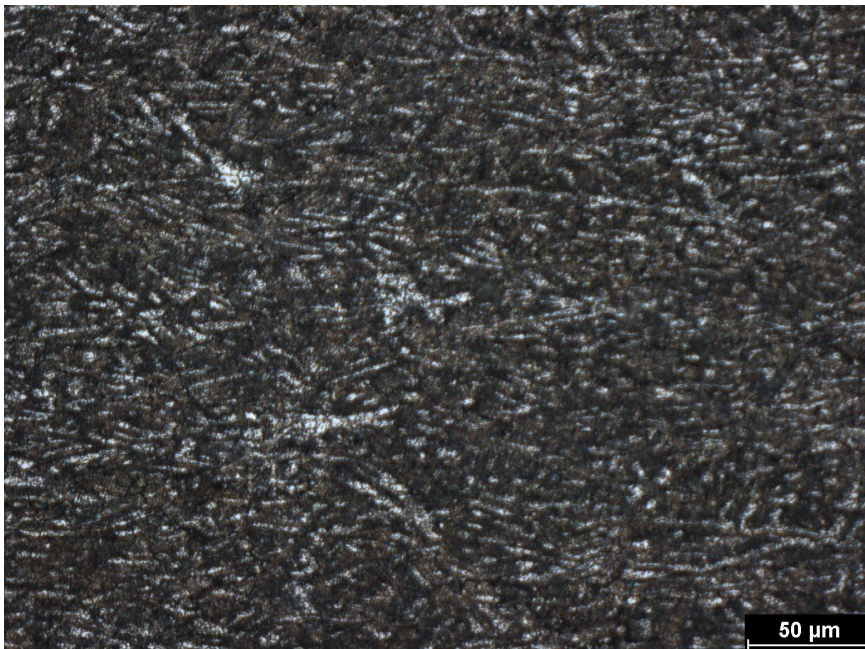


Obrázek A.14: Struktura v jádře HCM slitiny EN AW-6082 po deformaci (příčný řez)

■ Podélné řezy



Obrázek A.15: Struktura v přechodové oblasti HCM slitiny EN AW-6082 po deformaci (podélný řez)



Obrázek A.16: Struktura v jádře HCM slitiny EN AW-6082 po deformaci (podélný řez)

■ A.2 Lisované polotovary

■ A.2.1 EN AW-6082 1. dávka

■ Podélné řezy

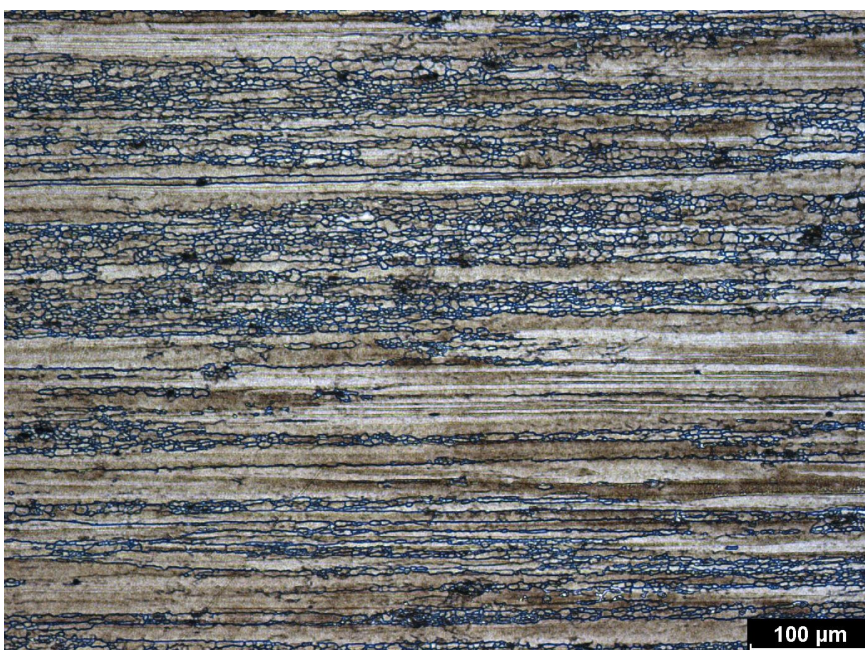


Obrázek A.17: Struktura slitiny EN AW-6082 v přechodové oblasti



Obrázek A.18: Struktura slitiny EN AW-6082 v jádře

■ A.2.2 EN AW-6110A 1. dávka



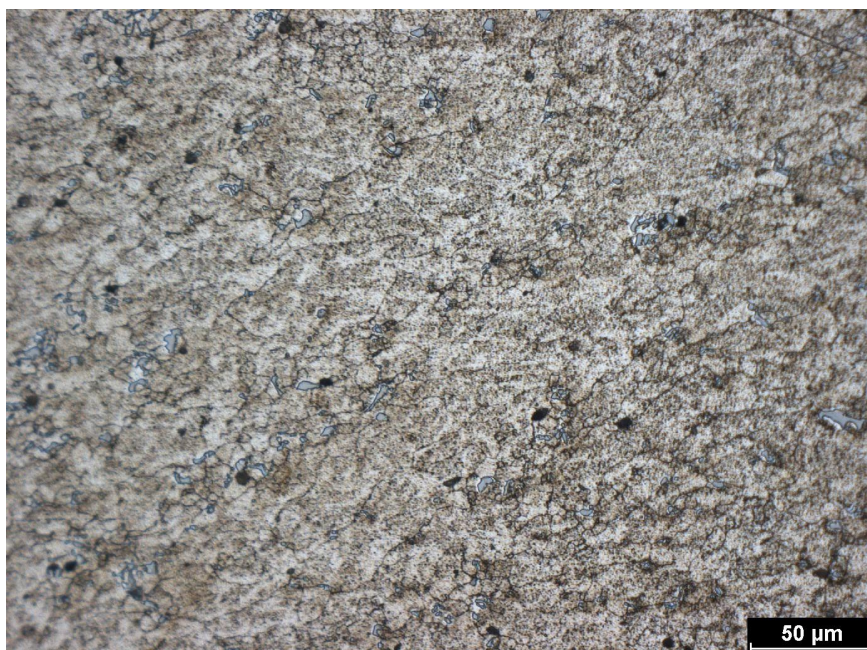
Obrázek A.19: Struktura slitiny EN AW-6110A v přechodové oblasti

■ A.2.3 EN AW-6082 2.dávka výchozí stav

■ Příčné řezy



Obrázek A.20: Struktura v přechodové oblasti slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)

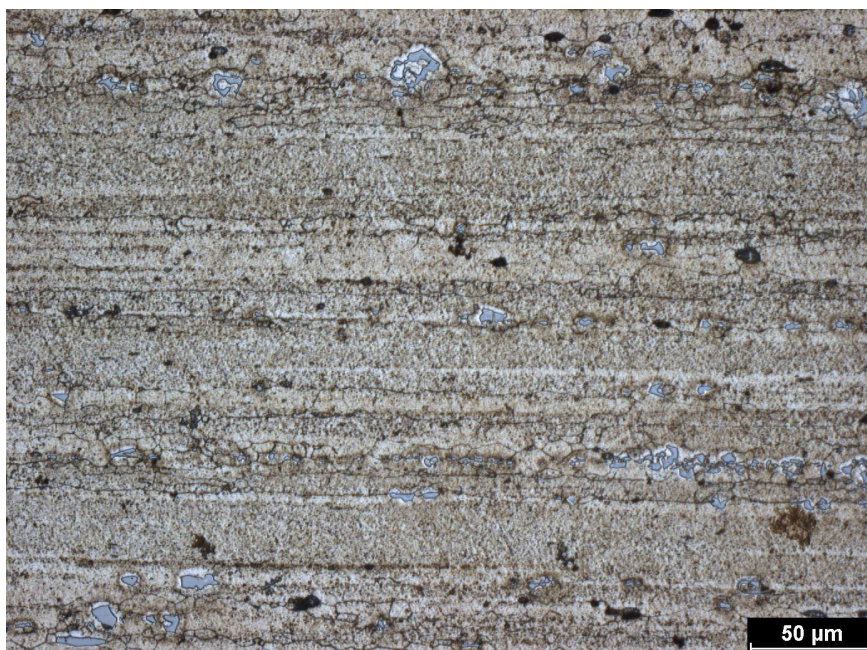


Obrázek A.21: Struktura v jádře slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)

■ Podélné řezy



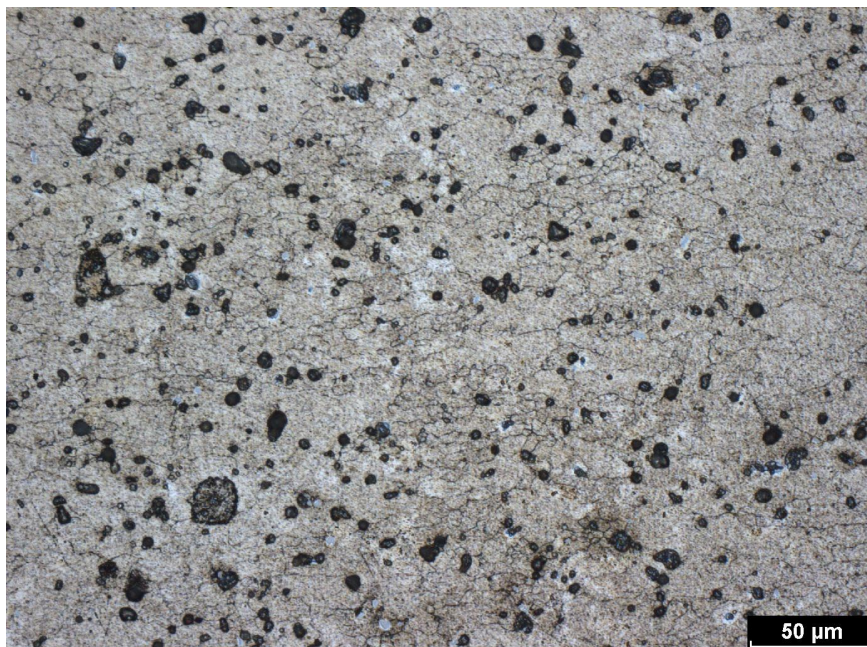
Obrázek A.22: Struktura v přechodové oblasti slitiny EN AW-6082 (podélný řez)



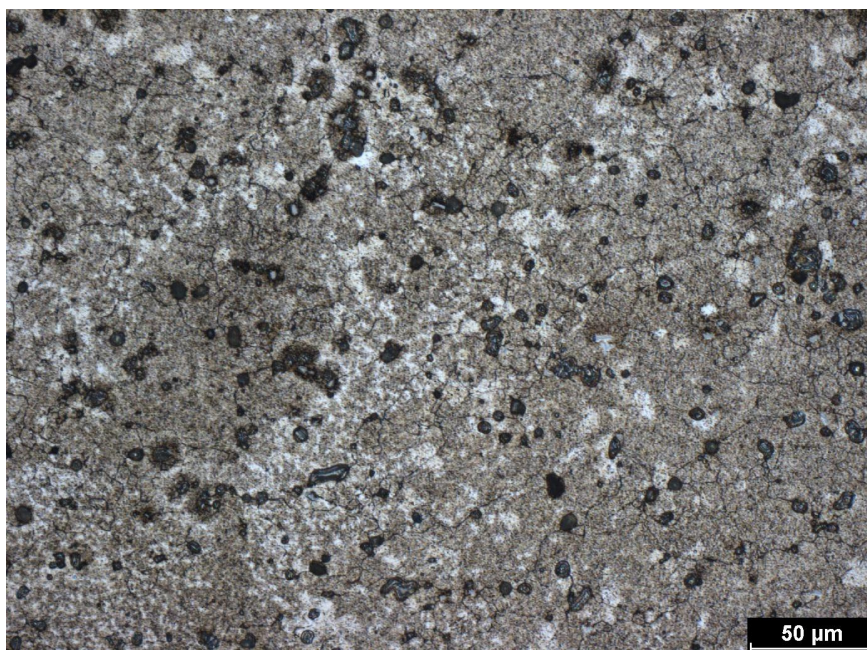
Obrázek A.23: Struktura v jádře slitiny EN AW-6082 (podélný řez)

■ A.2.4 EN AW-6082 po ohřevu

■ Příčné řezy

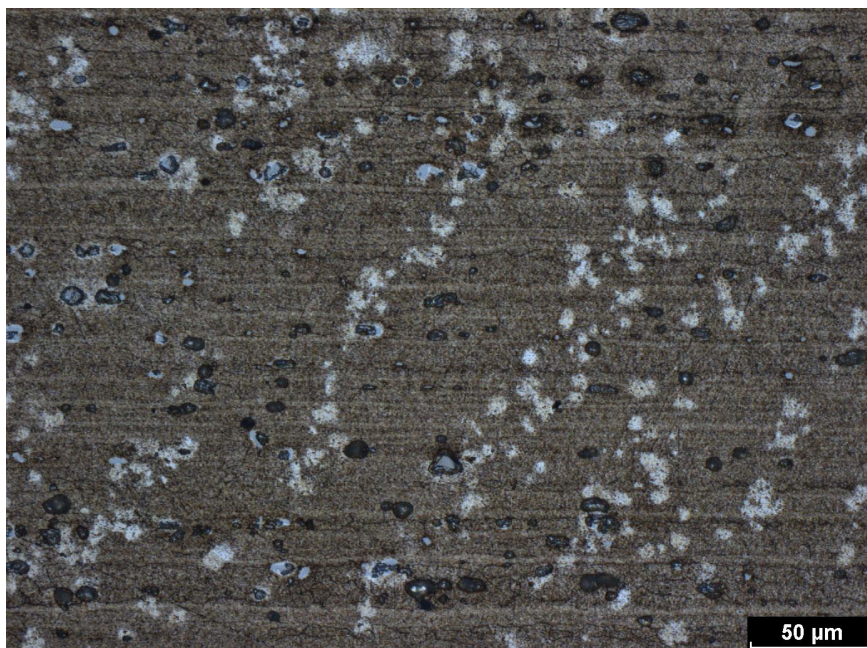


Obrázek A.24: Struktura v přechodové oblasti slitiny EN AW-6082 po ohřevu (příčný řez)

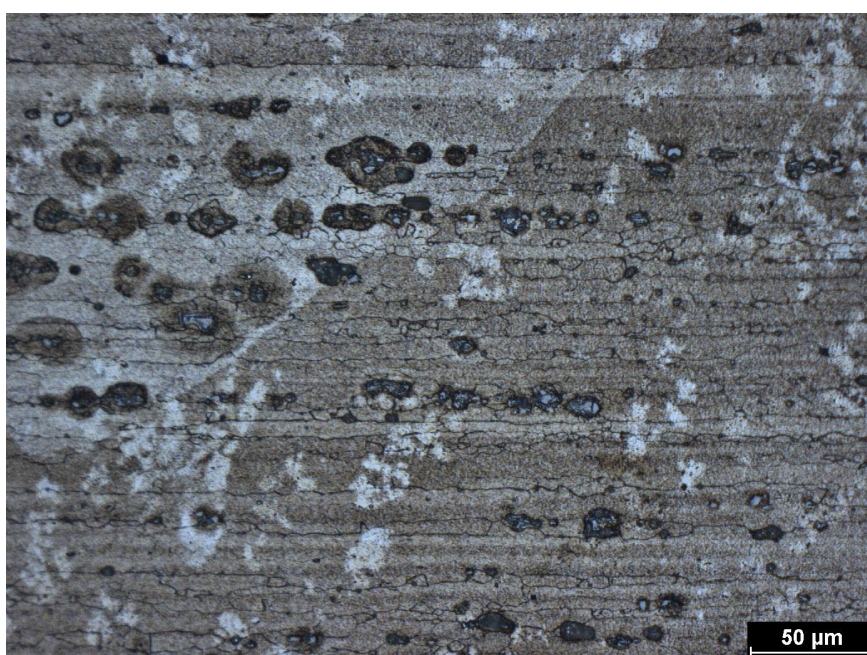


Obrázek A.25: Struktura v jádře slitiny EN AW-6082 po ohřevu (příčný řez)

■ Podélné řezy



Obrázek A.26: Struktura v přechodové oblasti slitiny EN AW-6082 po ohřevu (podélný řez)



Obrázek A.27: Struktura v jádře slitiny EN AW-6082 po ohřevu (podélný řez)

■ A.2.5 EN AW-6082 po deformaci

■ Příčné řezy

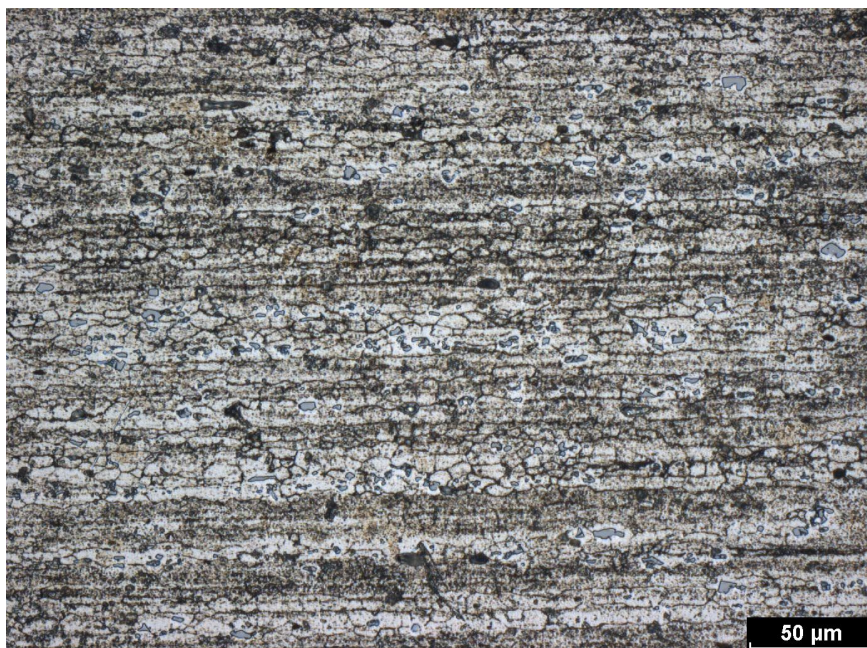


Obrázek A.28: Struktura v přechodové oblasti slitiny EN AW-6082 po deformaci (příčný řez)

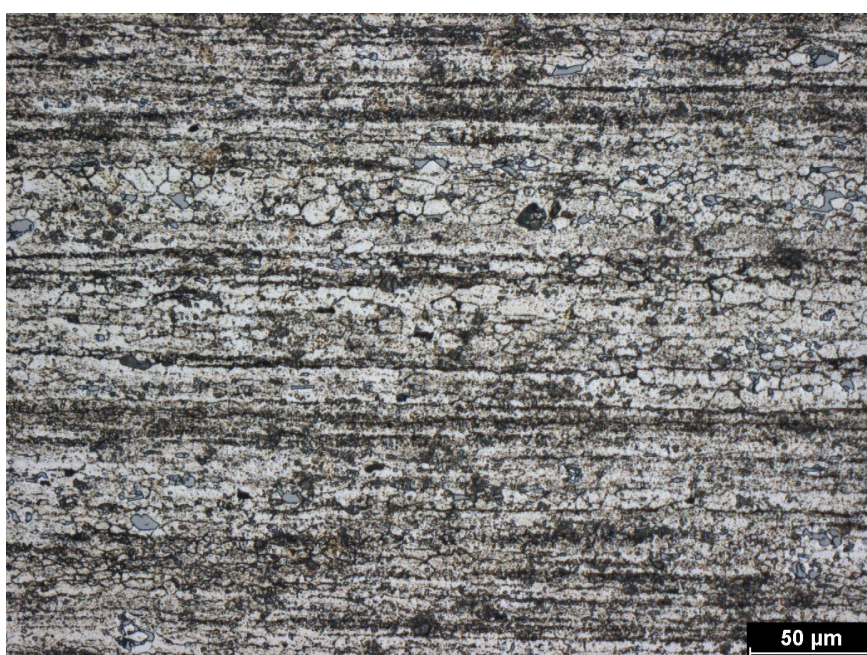


Obrázek A.29: Struktura v jádře slitiny EN AW-6082 po deformaci (příčný řez)

■ Podélné řezy



Obrázek A.30: Struktura v přechodové oblasti slitiny EN AW-6082 po deformaci (podélný řez)

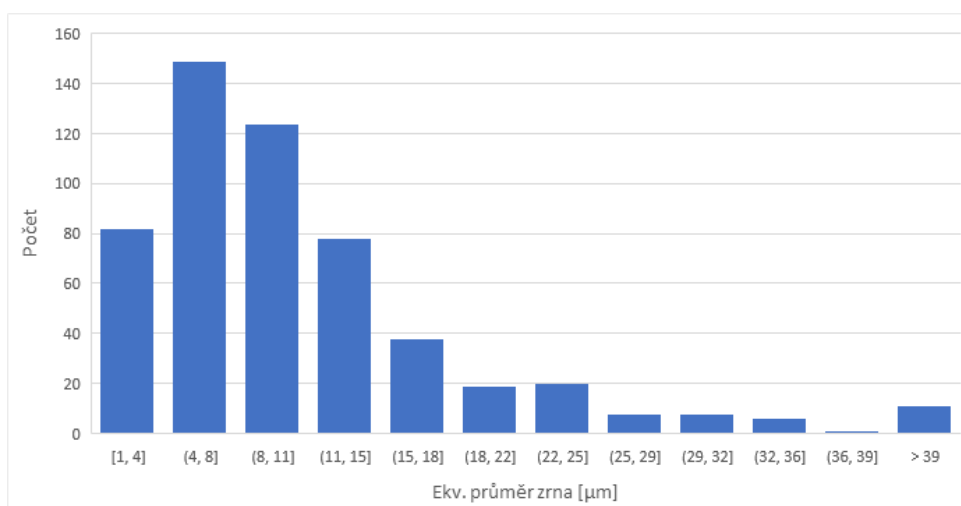


Obrázek A.31: Struktura v jádře slitiny EN AW-6082 po deformaci (podélný řez)

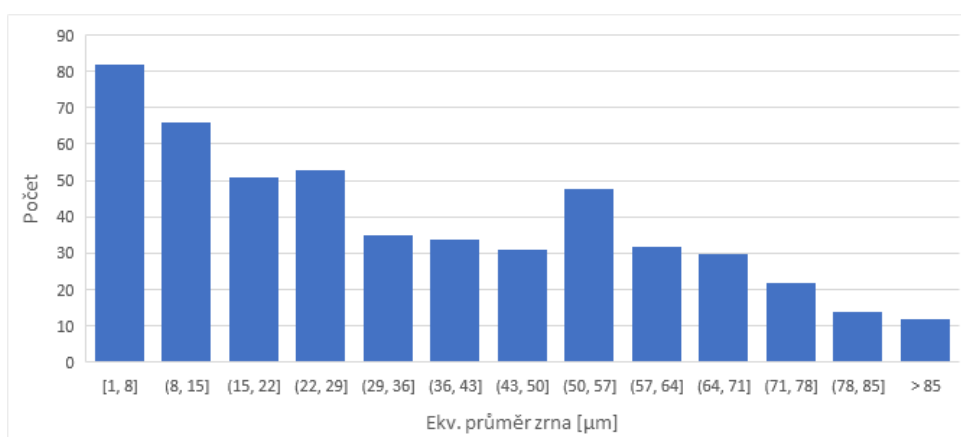
Příloha B

Histogramy HCM slitin

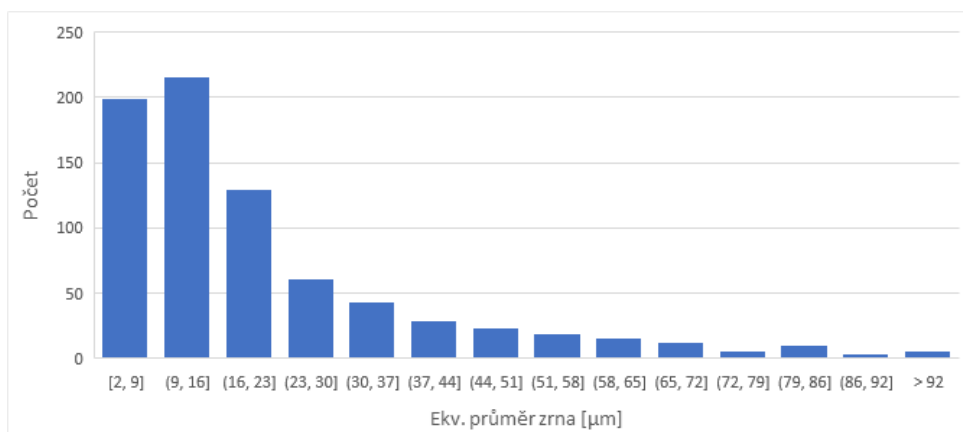
HCM EN AW-6110A 1.dávka



Obrázek B.1: Histogram velikosti zrna v povrchové vrstvě HCM slitiny EN AW-6110A (podélný řez)

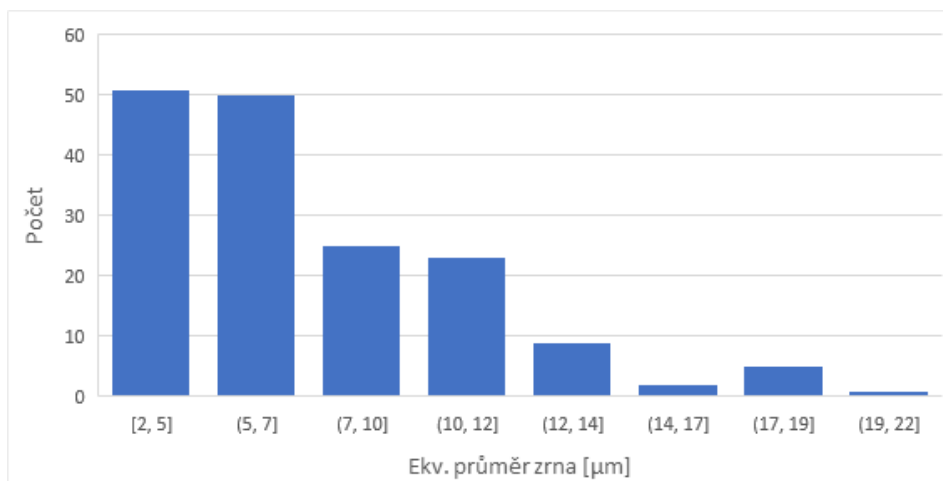


Obrázek B.2: Histogram velikosti zrna v přechodové oblasti HCM slitiny EN AW-6110A (podélný řez)

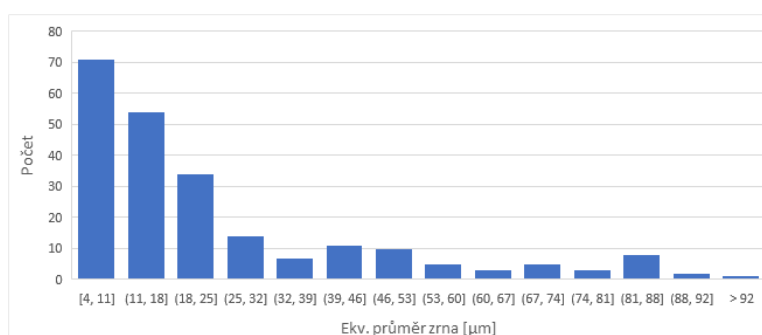


Obrázek B.3: Histogram velikosti zrna v jádře HCM slitiny EN AW-6110A (podélný řez)

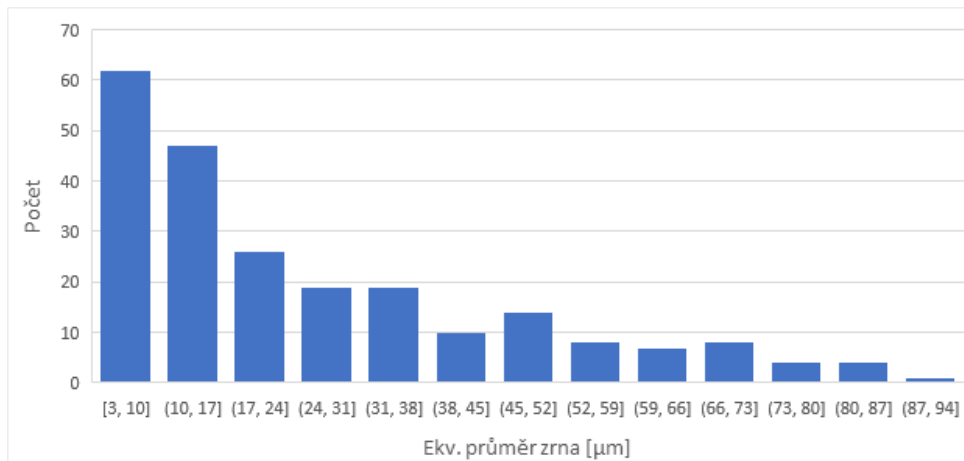
HCM EN AW-6082 výchozí stav příčné řezy



Obrázek B.4: Histogram velikosti zrna v povrchové vrstvě HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)

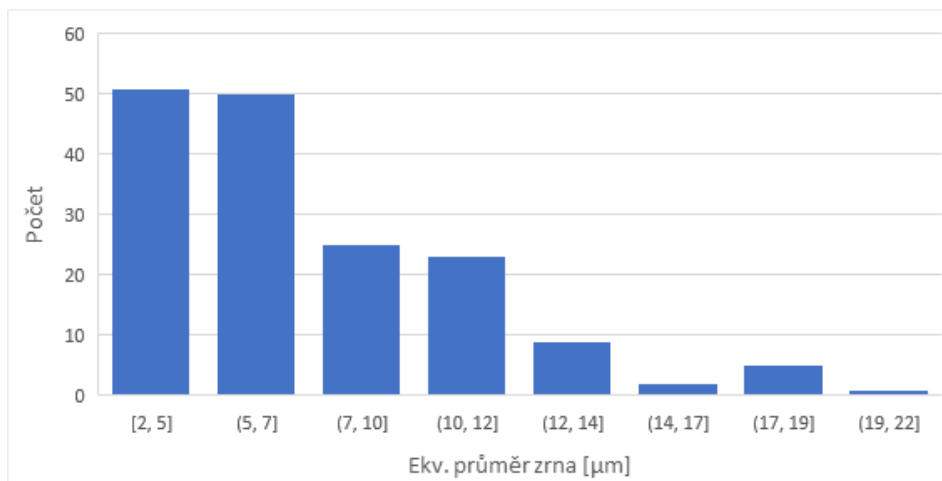


Obrázek B.5: Histogram velikosti zrna v přechodové oblasti slitiny HCM EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)

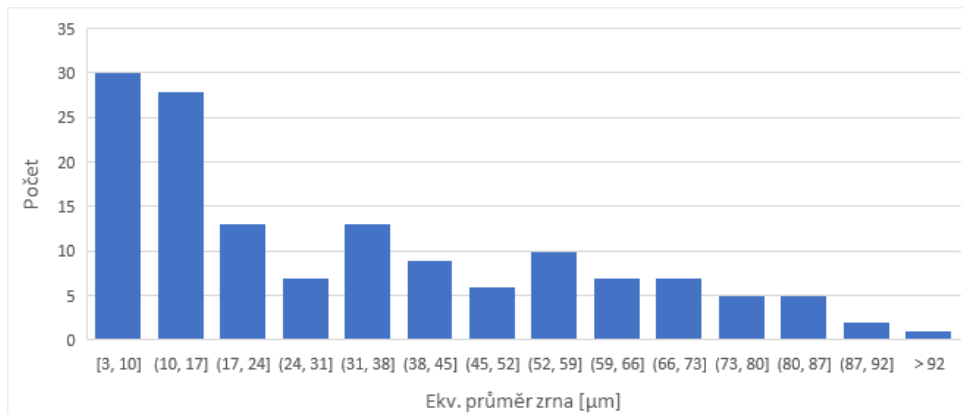


Obrázek B.6: Histogram velikosti zrna v jádře HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)

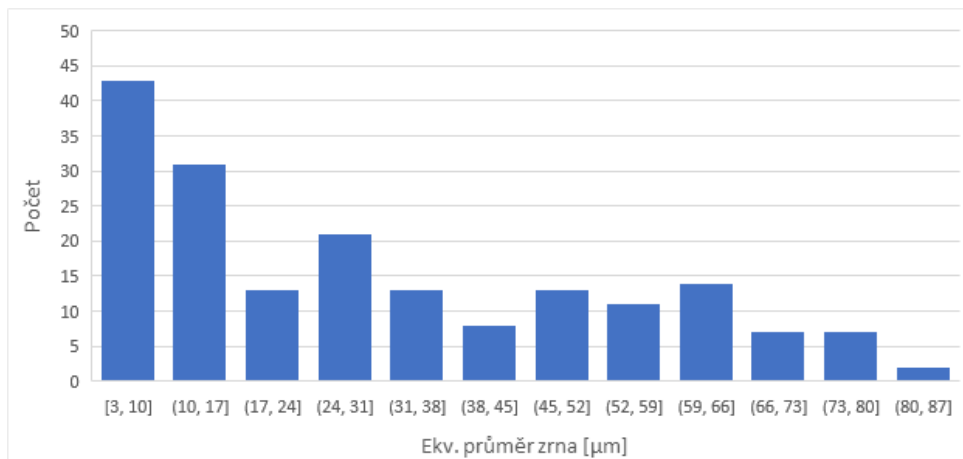
■ HCM EN AW-6082 výchozí stav podélné řezy



Obrázek B.7: Histogram velikosti zrna v povrchové vrstvě HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (podélný řez)



Obrázek B.8: Histogram velikosti zrna v přechodové oblasti slitiny HCM EN AW-6082 ve výchozím stavu (podélný řez)



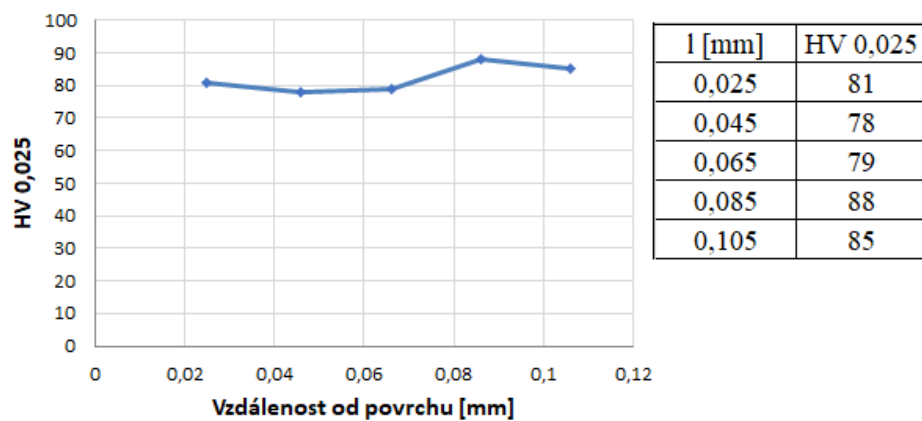
Obrázek B.9: Histogram velikosti zrna v jádře HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (podélný řez)

Příloha C

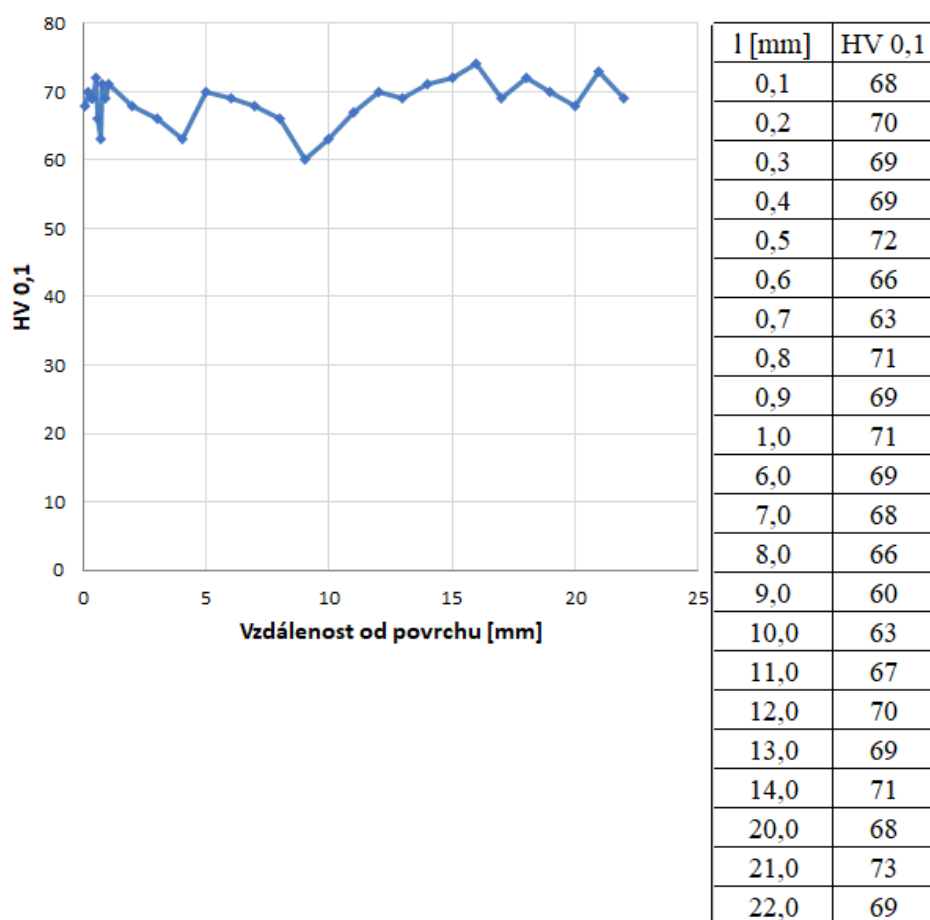
Průběhy mikrotvrdosti

C.1 Lité polotovary

C.1.1 HCM EN AW-6082 1. dávka

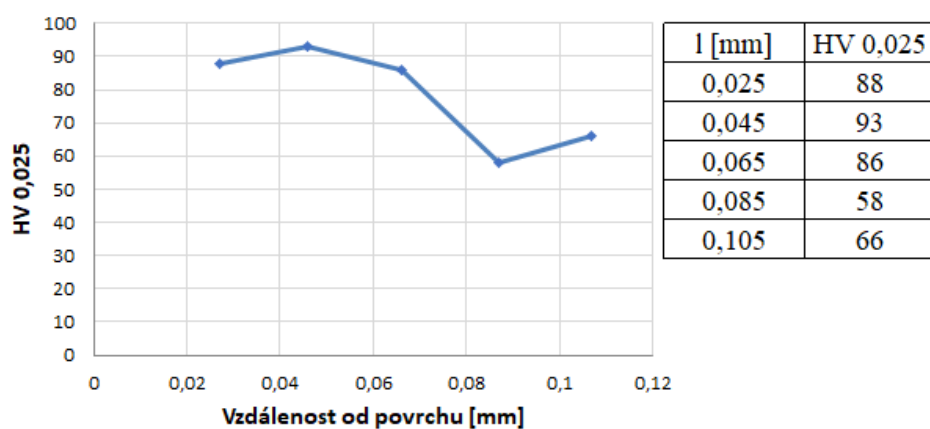


Obrázek C.1: Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu HCM slitiny EN AW-6082 (podélný řez)

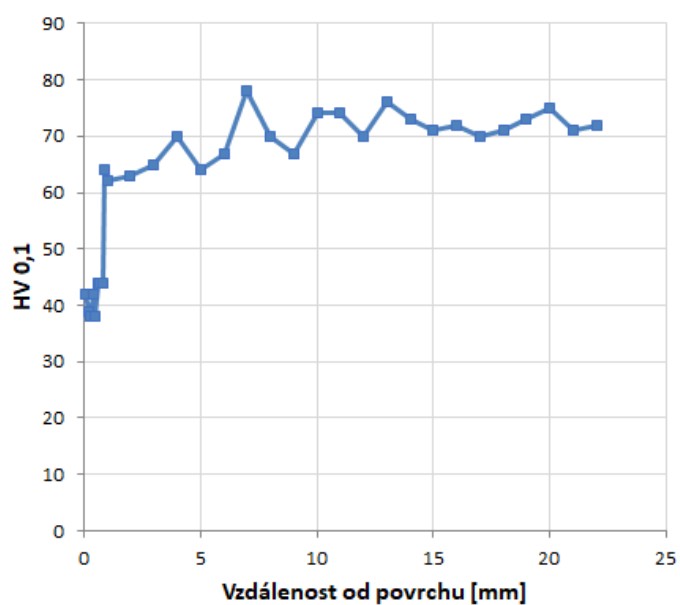


Obrázek C.2: Průběh mikrotvrdosti HCM slitiny EN AW-6082 (podélný řez)

■ C.1.2 HCM EN AW-6110A 1. dávka



Obrázek C.3: Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu HCM slitiny EN AW-6110A (podélný řez)

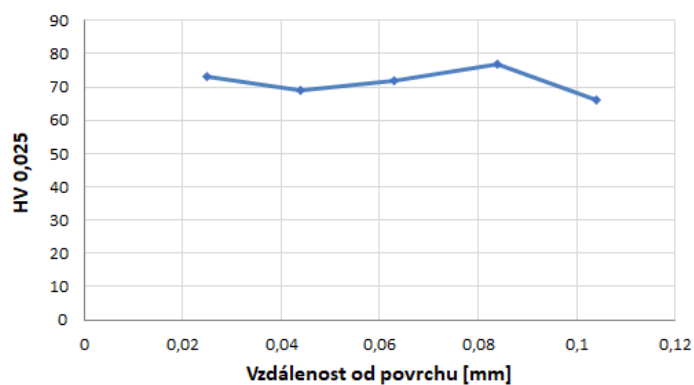


l [mm]	HV 0,1
0,1	89
0,2	94
0,3	92
0,4	92
0,5	88
0,6	87
0,7	91
0,8	90
0,9	93
1,0	94
6,0	67
7,0	78
8,0	70
9,0	67
10,0	74
11,0	74
12,0	70
13,0	76
14,0	73
20,0	75
21,0	71
22,0	72

Obrázek C.4: Průběh mikrotvrlosti HCM slitiny EN AW-6110A (podélný řez)

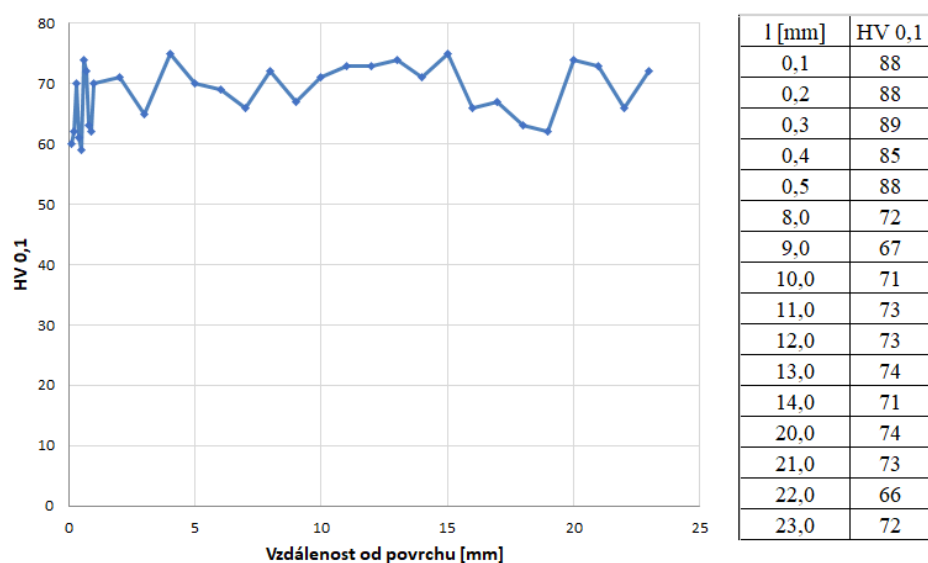
■ C.1.3 HCM EN AW-6082 výchozí stav

■ Příčný řez



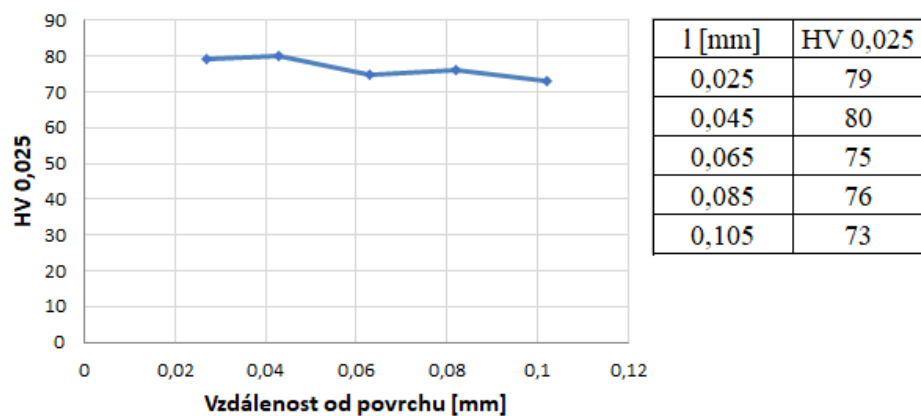
l [mm]	HV 0,025
0,025	73
0,045	69
0,065	72
0,085	77
0,105	66

Obrázek C.5: Průběh mikrotvrlosti v oblasti povrchu HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)

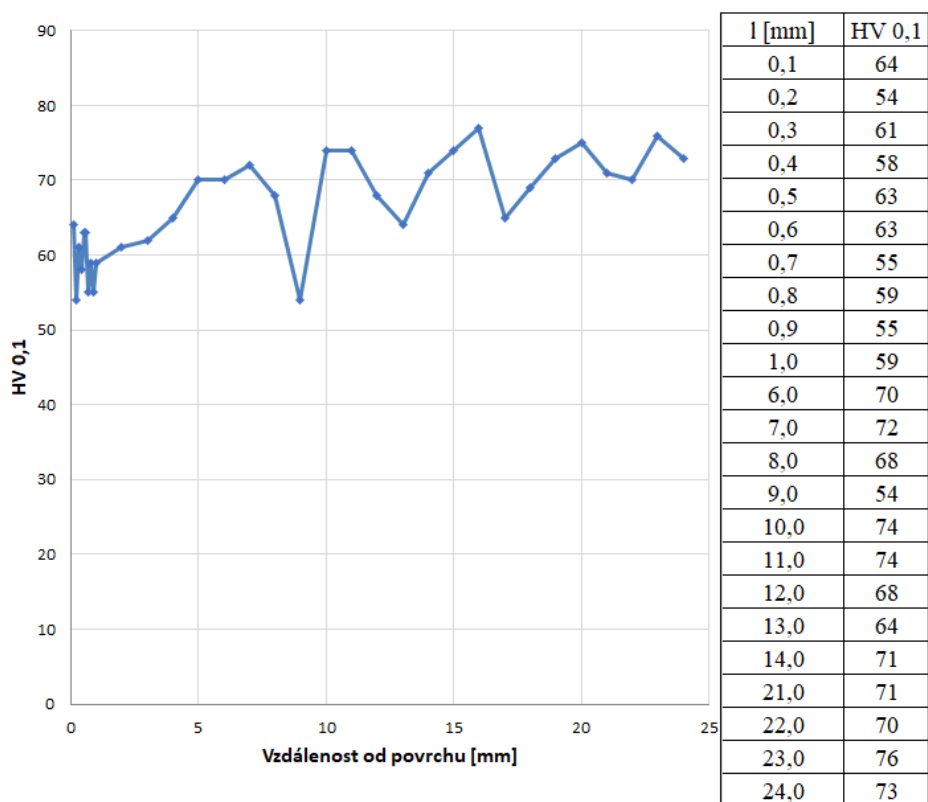


Obrázek C.6: Průběh mikrotvrdosti HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)

■ Podélný řez



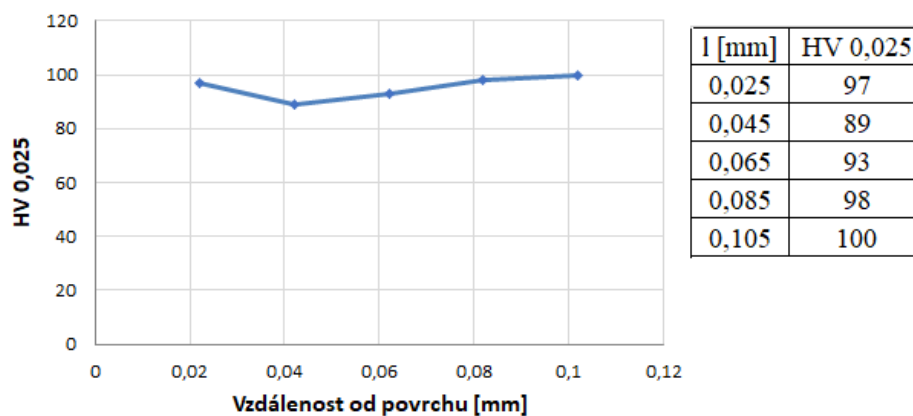
Obrázek C.7: Průběh mikrotvrdosti HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (podélný řez)



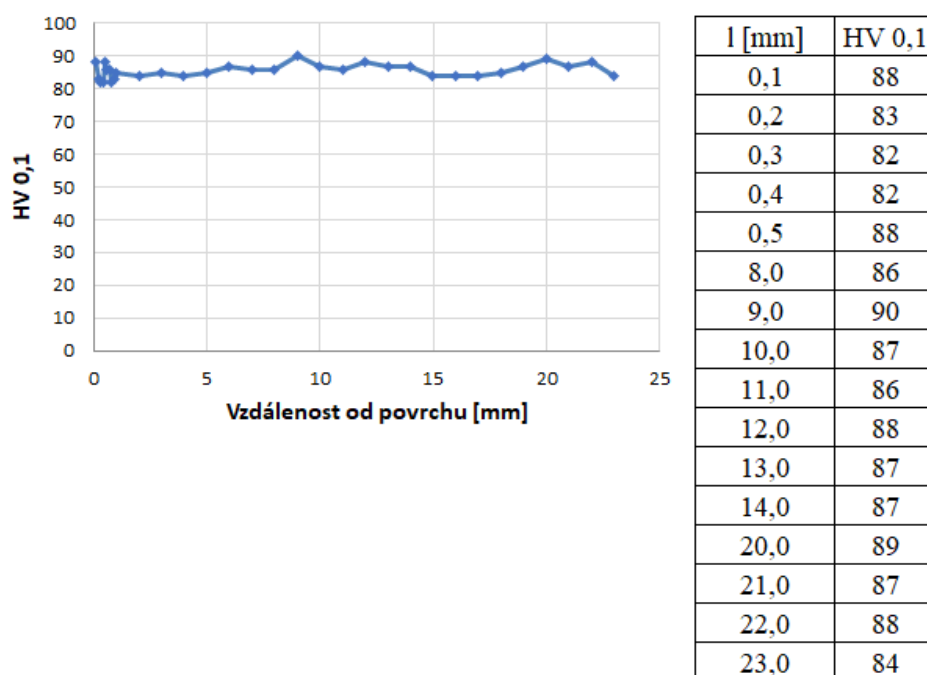
Obrázek C.8: Průběh mikrotvrlosti v oblasti povrchu HCM slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (podélný řez)

■ C.1.4 HCM EN AW-6082 po ohřevu

■ Příčný řez

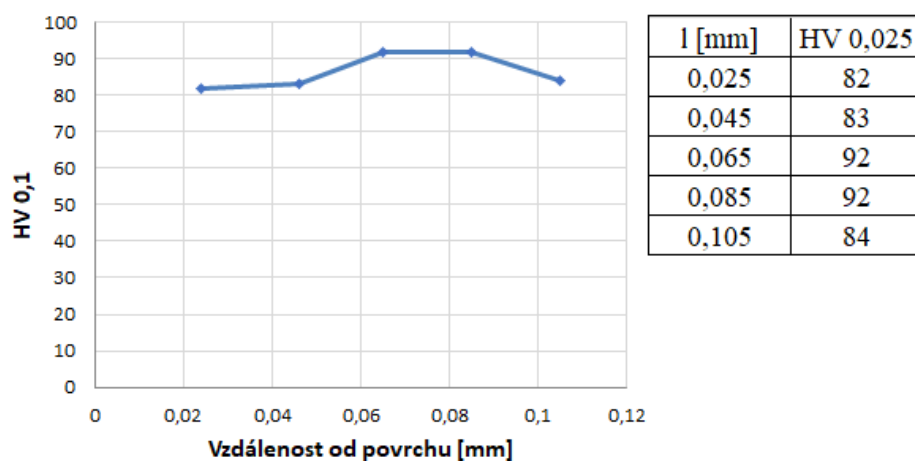


Obrázek C.9: Průběh mikrotvrlosti v oblasti povrchu HCM slitiny EN AW-6082 po ohřevu (příčný řez)

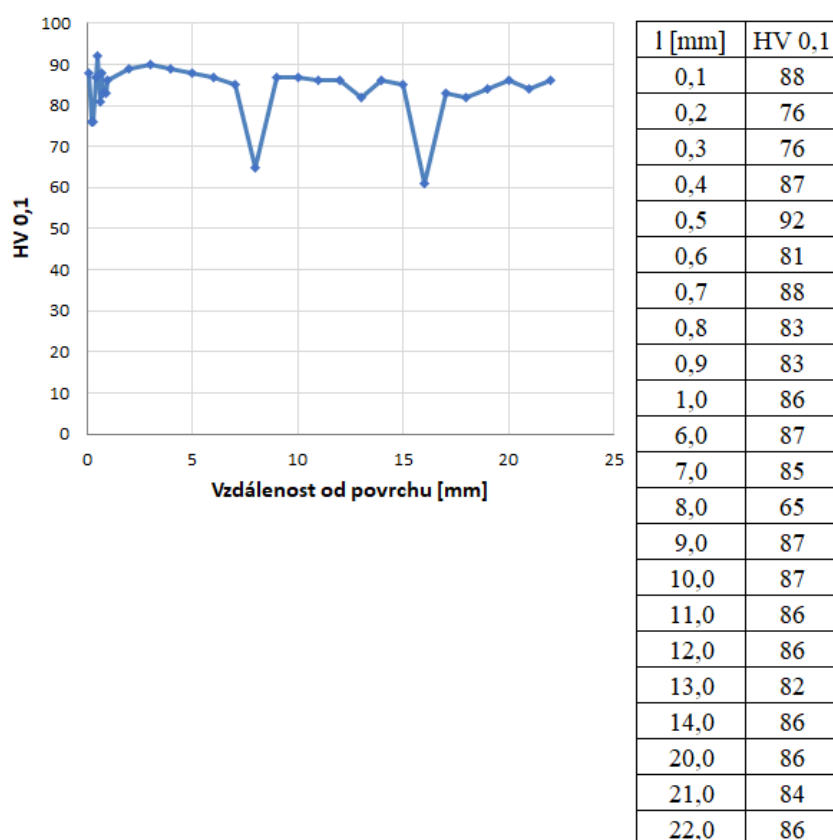


Obrázek C.10: Průběh mikrotvrdosti HCM slitiny EN AW-6082 po ohřevu (příčný řez)

■ Podélný řez



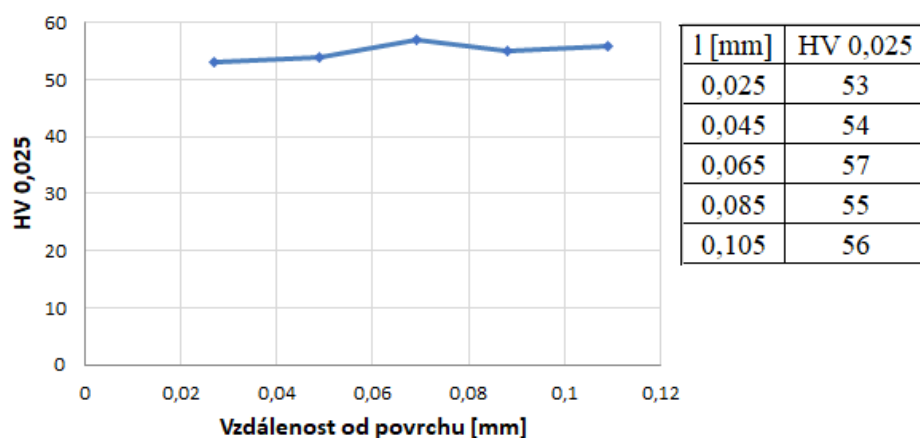
Obrázek C.11: Průběh mikrotvrdosti HCM slitiny EN AW-6082 po ohřevu (podélný řez)



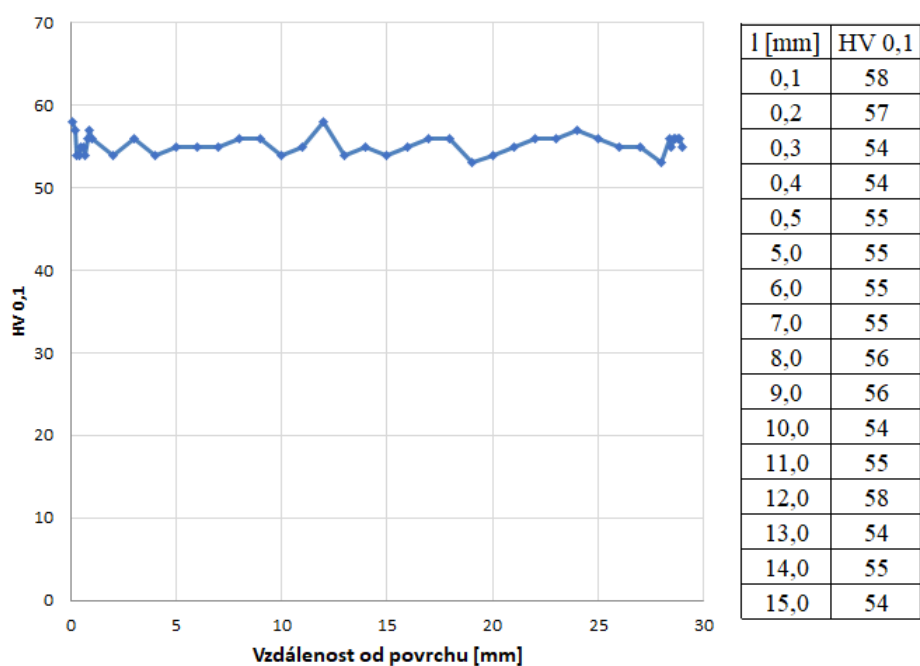
Obrázek C.12: Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu HCM slitiny EN AW-6082 po ohřevu (podélný řez)

■ C.1.5 HCM EN AW-6082 po deformaci 30 %

■ Příčný řez

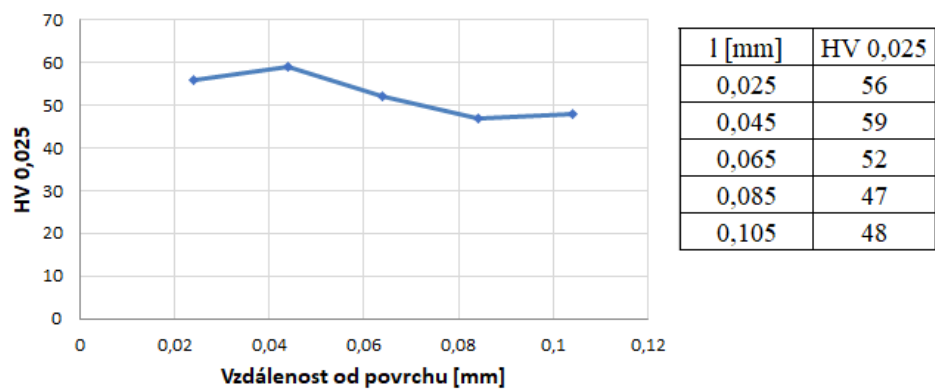


Obrázek C.13: Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu HCM slitiny EN AW-6082 po deformaci (příčný řez)

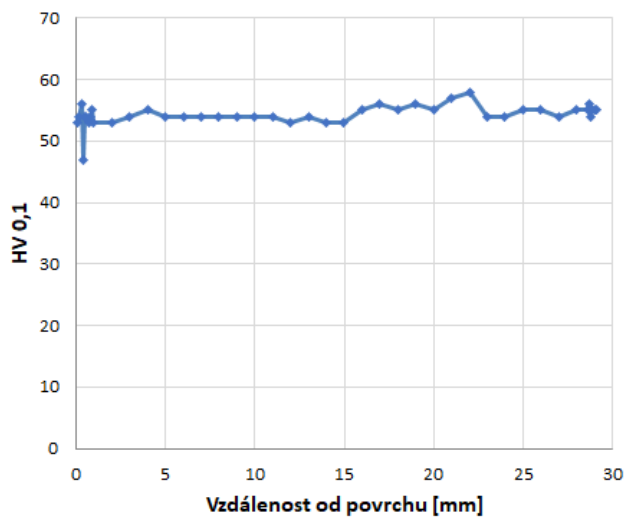


Obrázek C.14: Průběh mikrotvrdosti HCM slitiny EN AW-6082 po deformaci (příčný řez)

■ Podélný řez



Obrázek C.15: Průběh mikrotvrdosti HCM slitiny EN AW-6082 po deformaci (podélný řez)



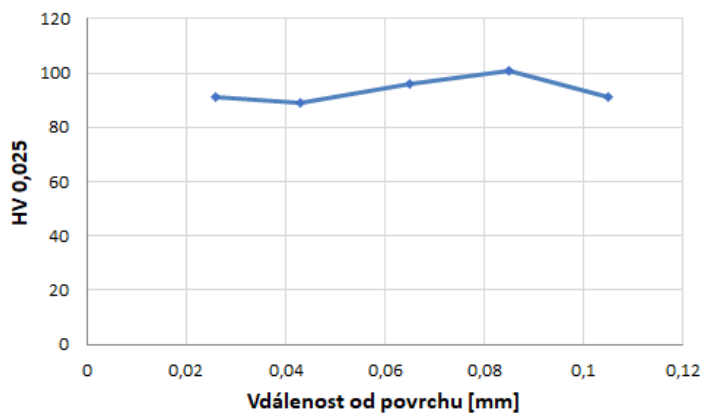
l [mm]	HV 0,1
0,1	53
0,2	54
0,3	56
0,4	47
0,5	54
5,0	54
6,0	54
7,0	54
8,0	54
9,0	54
10,0	54
11,0	54
12,0	53
13,0	54
14,0	53
15,0	53

Obrázek C.16: Průběh mikrotvrlosti v oblasti povrchu HCM slitiny EN AW-6082 po deformaci (podélný řez)

C.2 Lisované polotovary

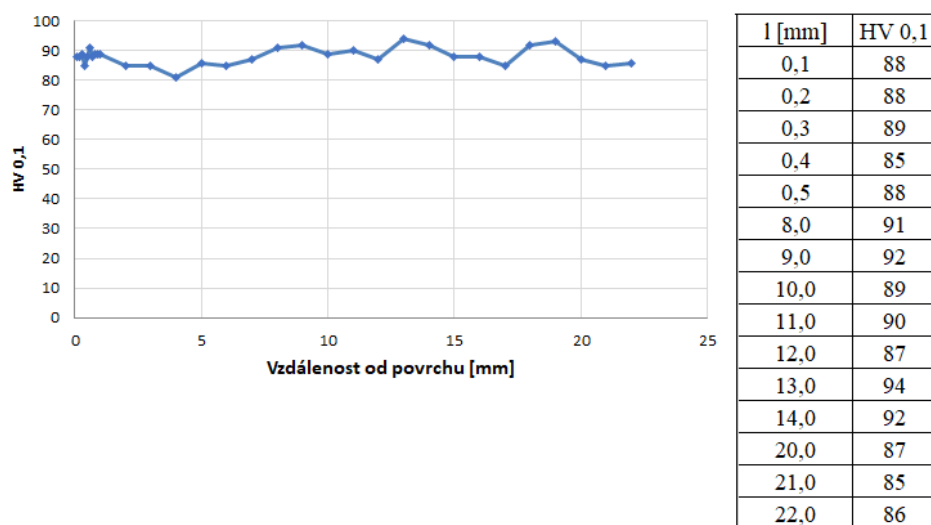
C.2.1 EN AW-6082 výchozí stav

Příčný řez



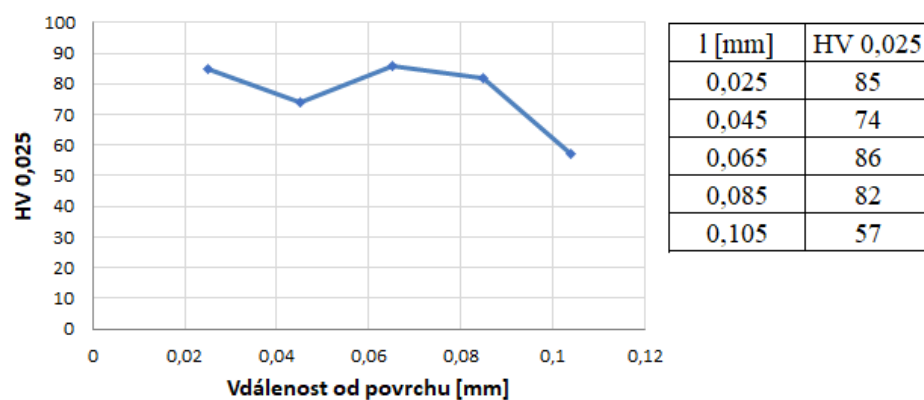
l [mm]	HV 0,025
0,025	91
0,045	89
0,065	96
0,085	101
0,105	91

Obrázek C.17: Průběh mikrotvrlosti v oblasti povrchu slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)

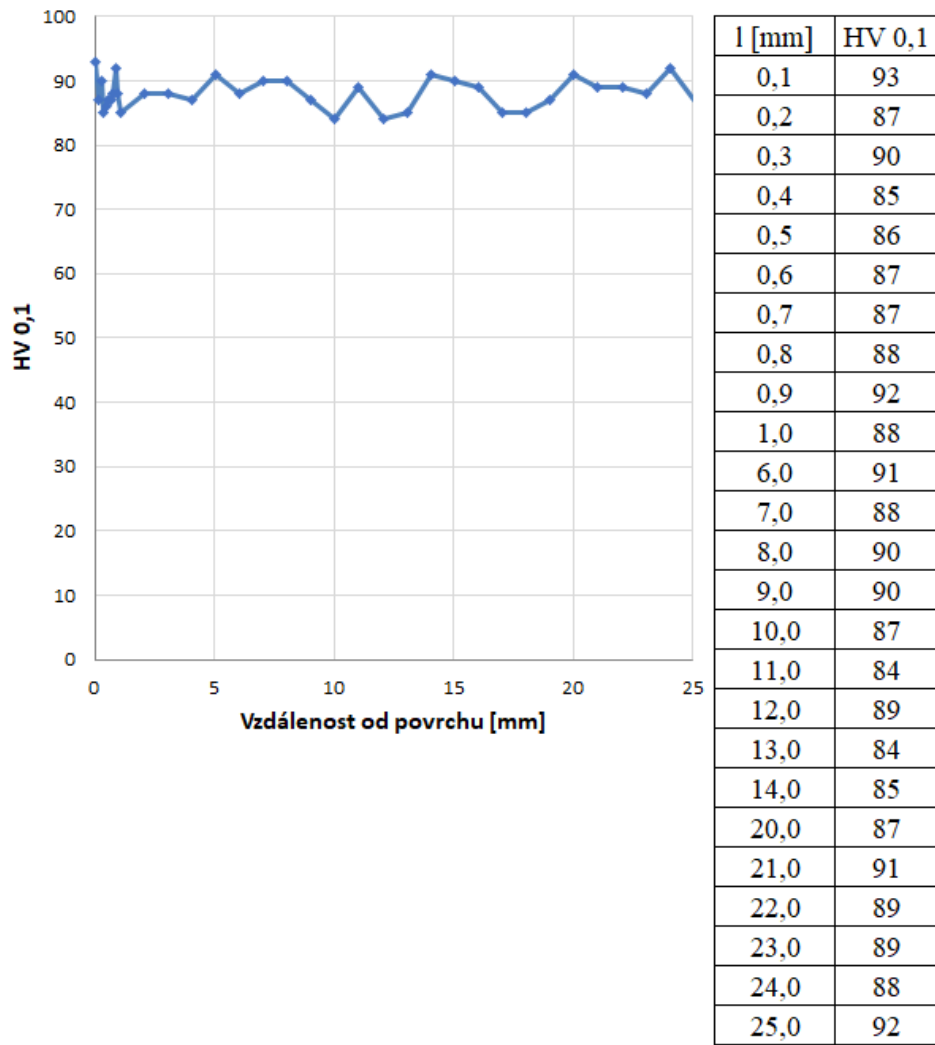


Obrázek C.18: Průběh mikrotvrdomosti slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (příčný řez)

■ Podélný řez



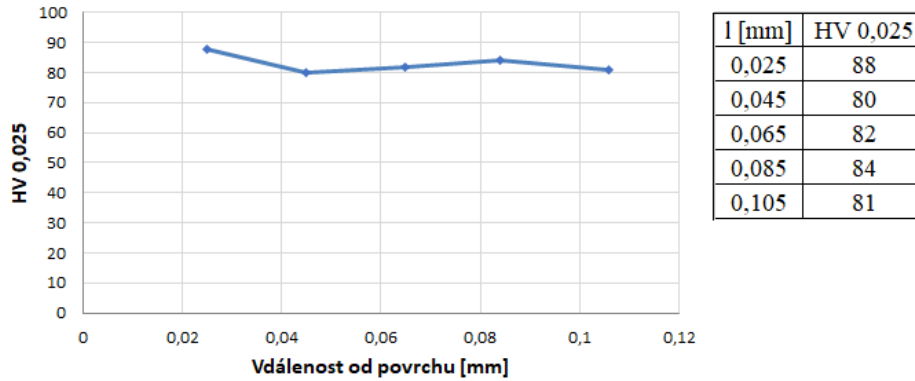
Obrázek C.19: Průběh mikrotvrdomosti slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (podélný řez)



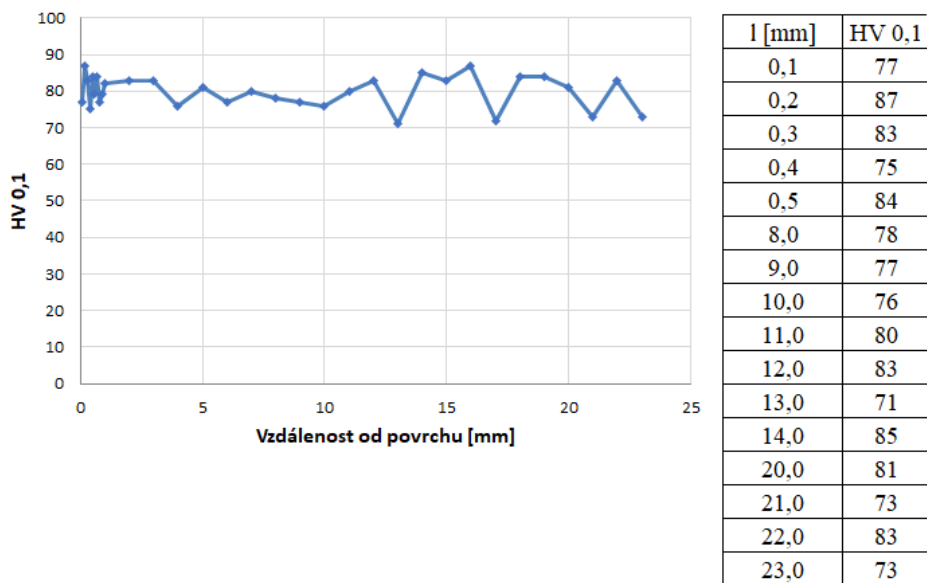
Obrázek C.20: Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu slitiny EN AW-6082 ve výchozím stavu (podélný řez)

■ C.2.2 EN AW-6082 po ohřevu

■ Příčný řez

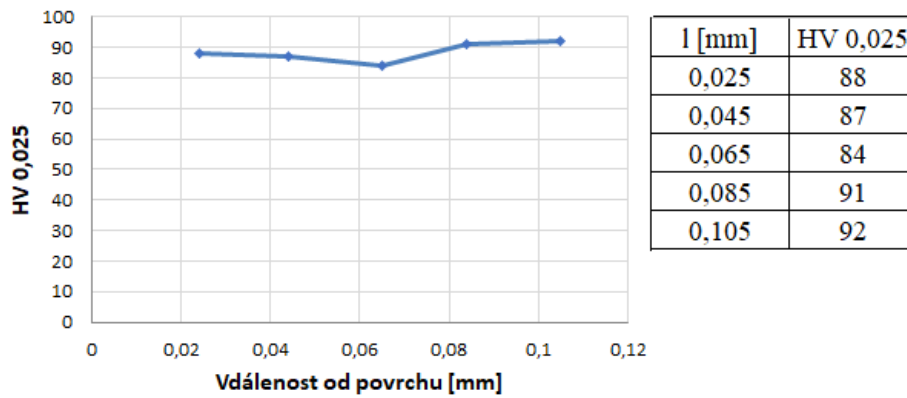


Obrázek C.21: Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu slitiny EN AW-6082 po ohřevu (příčný řez)

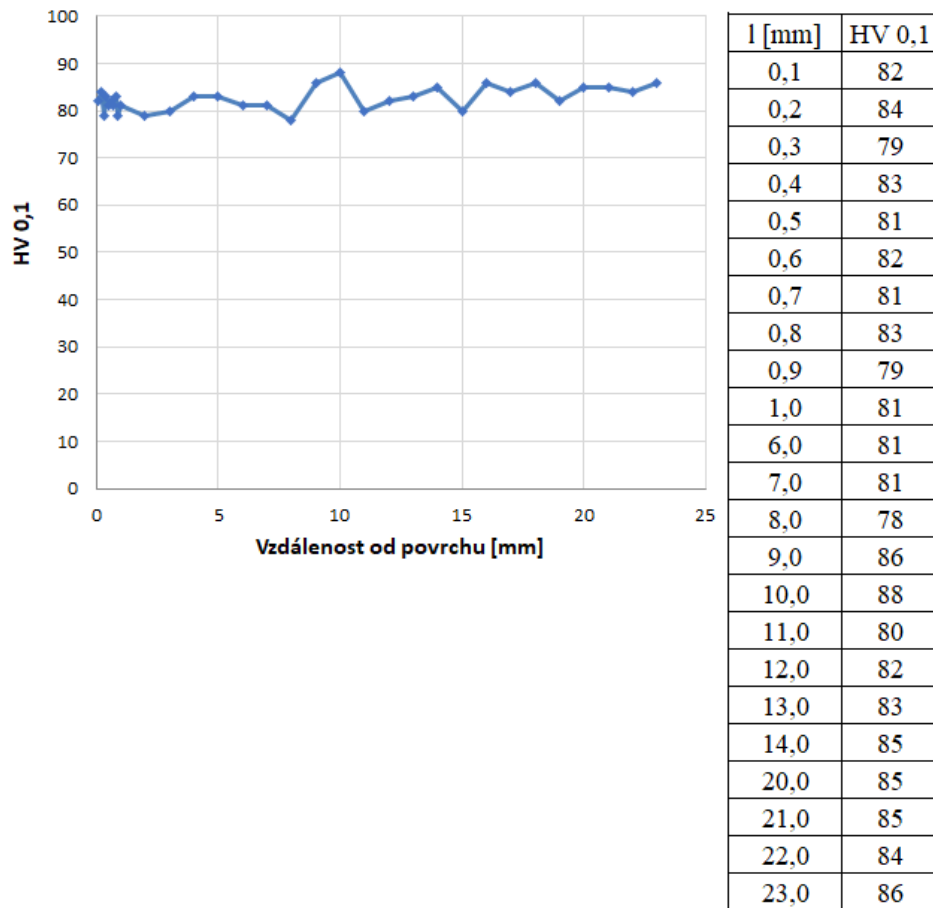


Obrázek C.22: Průběh mikrotvrdosti slitiny EN AW-6082 po ohřevu (příčný řez)

Podélný řez



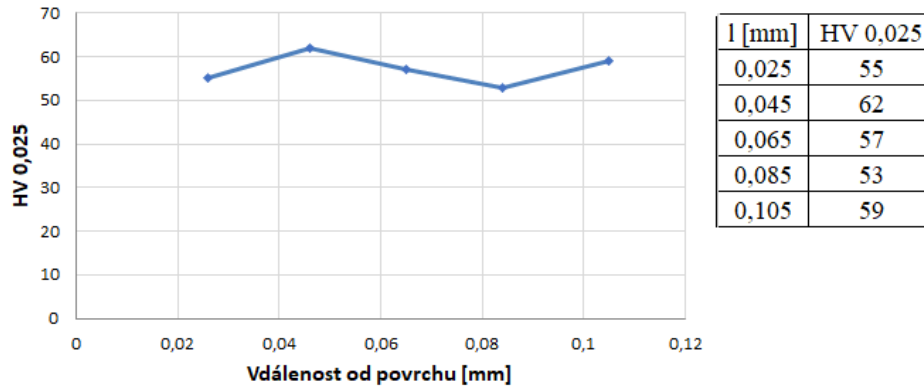
Obrázek C.23: Průběh mikrotvrdosti slitiny EN AW-6082 po ohřevu (podélný řez)



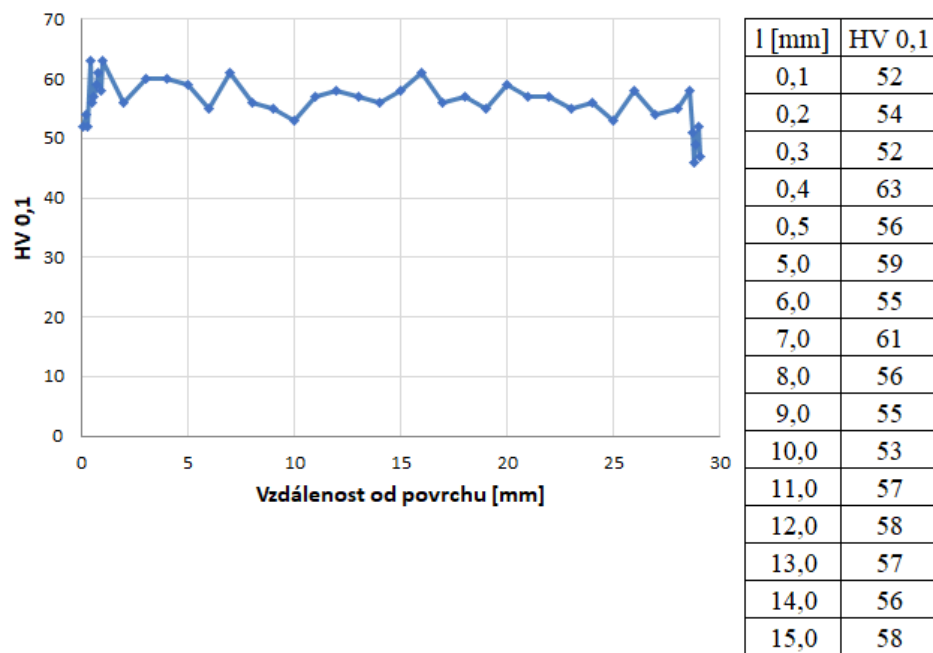
Obrázek C.24: Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu slitiny EN AW-6082 po ohřevu (podélný řez)

■ C.2.3 EN AW-6082 po deformaci 30 %

■ Příčný řez

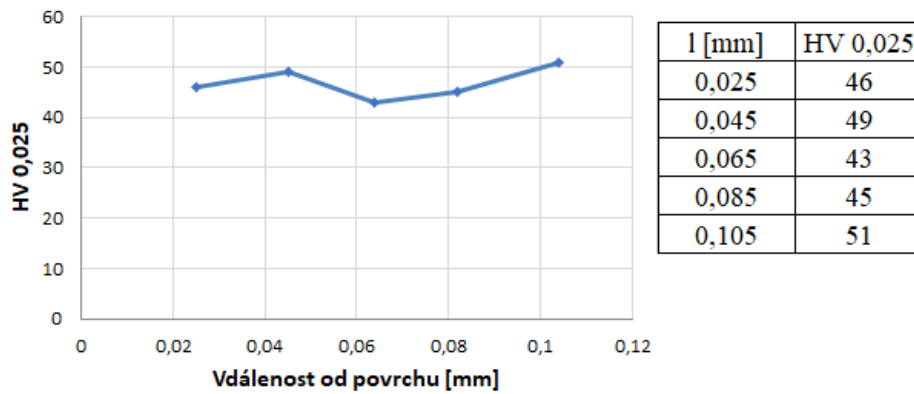


Obrázek C.25: Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu slitiny EN AW-6082 po deformaci (příčný řez)

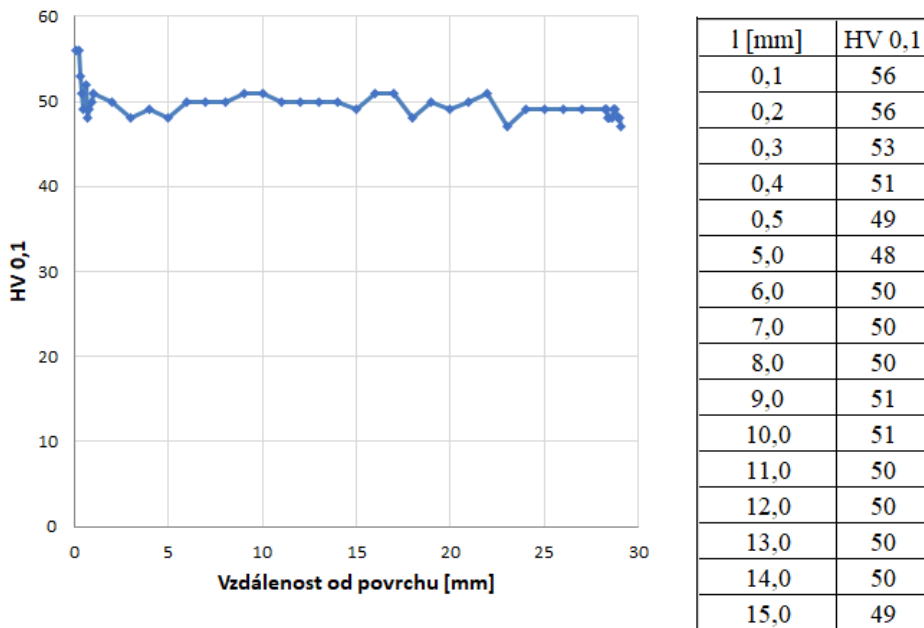


Obrázek C.26: Průběh mikrotvrdosti slitiny EN AW-6082 po deformaci (příčný řez)

Podélný řez



Obrázek C.27: Průběh mikrotvrdosti slitiny EN AW-6082 po deformaci (podélný řez)



Obrázek C.28: Průběh mikrotvrdosti v oblasti povrchu slitiny EN AW-6082 po deformaci (podélný řez)