

ZVÝŠENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ SLITINY AlSiCuMg

J. ŠERÁK¹, D. VOJTĚCH², P. NOVÁK³

ABSTRAKT: Byly studovány různé režimy tepelného zpracování slitiny AlSi9Cu2Mg (ASTM 354) s cílem dosažení maximální pevnosti v tahu. V rámci experimentů byly měněny teplota rozpouštěcího žíhání, doba výdrže na této teplotě a teplota ochlazovacího média. Na základě této práce byl zjištěn optimální režim tepelného zpracování slitiny typu AlSi9Cu2Mg (ASTM P 354.0) daného konkrétního chemického složení pro dosažení maximálních mechanických vlastností. Doporučený režim sestává z rozpouštěcího žíhání v intervalu teplot 505-515°C po dobu 4h, prudkého ochlazení do vody o teplotě 13°C a umělého stárnutí při teplotě 155°C po dobu 12h. Tento režim vede k získání slitiny s pevností v tahu vyšší než 400 MPa.

KEY WORDS: slitina AlSi9Cu2Mg, tepelné zpracování, mechanické vlastnosti

1 ÚVOD

V současné době se neustále zvyšují požadavky na mechanické vlastnosti odlitků a současně o co nejefektivnější ekonomické aspekty výroby. Proto roste snaha u odlitků z komerčně vyráběných slitin co nejjednodušším způsobem dosahovat maximálních užitečných vlastností.

Slitina AlSi9Cu2Mg (ASTM P354.0) se používá pro odlévání do kokil pro výrobu odlitků s vysokou pevností a možností dodatečného tepelného zpracování. U této slitiny lze po vytvrzení běžně dosahovat meze kluzu $R_{p0.2}$ přibližně 250 MPa, pevnosti v tahu R_m kolem 330 MPa. Zvýšení mechanických vlastností této slitiny lze realizovat buď optimalizací procesu tepelného zpracování slitiny či úpravou chemického složení slitiny [1,2]. V této práci jsme optimalizovali režim tepelného zpracování odlitku slitiny daného chemického složení.

Mechanické vlastnosti odlitku významně ovlivňuje teplota rozpouštěcího žíhání a doba výdrže na této teplotě. Důležitou roli hraje způsob rychlého ochlazení - běžně se používá rychlé ochlazení do vody o určité teplotě. S rostoucí teplotou vody sice klesá rychlost ochlazování, ale zároveň klesá riziko vzniku deformací, zvláště pak u rozměrnějších odlitků. V neposlední řadě mechanické vlastnosti odlitku závisí na podmínkách umělého stárnutí slitiny, tedy na použité teplotě umělého stárnutí a době výdrže na této teplotě.

Další možností je upravit chemické složení dané slitiny tak, aby byl zajištěn maximální obsah prvků, které se spolupodílí na vytvrzení slitiny v rámci umělého stárnutí. V případě této slitiny se při precipitačním vytvrzování uplatňují měď a hořčík. Cílem této práce bylo u této slitiny dosažení pevnosti v tahu R_m vyšší než 400 MPa.

¹ Ing. Jan Šerák, Ph.D. – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství, Technická 5, 166 28 Praha 6, Česká republik

² doc. Dr. Ing. Dalibor Vojtěch – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství, Technická 5, 166 28 Praha 6, Česká republik

³ Ing. Pavel Novák, Ph.D. – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství, Technická 5, 166 28 Praha 6, Česká republik

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro experimenty byly použity vzorky slitin ve tvaru kvádrů, které byly podrobeny různým režimům tepelného zpracování. Složení studované slitiny je uvedeno v tab. I.

Tab. I.: Chemické složení studované slitiny [hm.%]

Si	Cu	Mg	Ti	Fe	Mn	Zn
9,05	1,63	0,49	0,16	0,086	0,013	0,009
Ni	Sn	Pb	Ca	Na	Sr	P
0,003	0,00	0,00	0,0004	0,00	0,00	0,00

Doporučené tepelné zpracování pro tuto slitinu je rozpouštěcí žihání při teplotě v rozmezí 520-530°C po dobu 12 h, prudké ochlazení do vody o teplotě 60°C a následné umělé stárnutí při teplotě z intervalu 150-160°C po dobu 12 h.

V rámci tohoto experimentu byl zkoušen vliv teploty rozpouštěcího žihání, doby výdrže na této teplotě a vliv teploty chladicí vody. Precipitační vytvrzování bylo prováděno při uvedených doporučených podmínkách. Vliv teploty chladicí vody byl studován v rámci režimu rozpouštěcího žihání, který se ukázal jako optimální při chlazení do vody o teplotě 60°C (teplota rozpouštěcího žihání 505°C po dobu 4h). Teplota chladicí vody 13°C odpovídala vodě z vodovodního řadu. Podmínky expozice studovaných vzorků jsou shrnuty v tab. II.

Tab. II.: Souhrnný přehled podmínek expozice studovaných vzorků

Teplota rozpouštěcího žihání [°C]	495	505	515	525	535
Doba rozpouštěcího žihání [h]	4	12			
Teplota chladicí vody [°C]	13	40	60	70	80
Umělé stárnutí	155°C, 12 h				

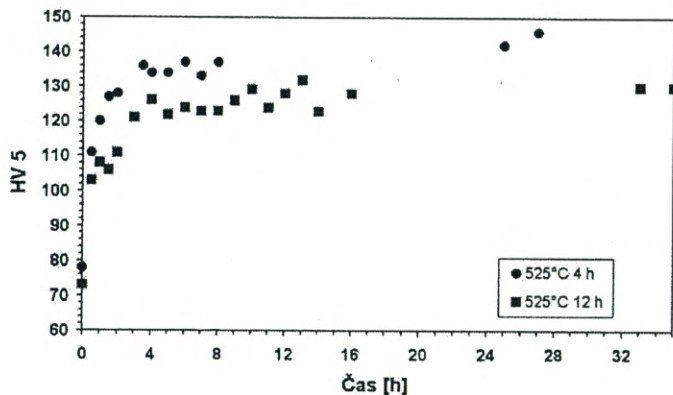
Průběh precipitačního vytvrzování byl hodnocen měřením tvrdosti podle Vickerse a Brinella na kvádrových vzorcích předem vybroušených pomocí sady brusných papírů P120, P400 a P800. Z uvedených vzorků byly po tepelném zpracování vyrobeny trhací tyče s kruhovým průřezem se závitovými hlavami, které byly následně podrobeny tahové zkoušce. Byly zjišťovány mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m a tažnost slitin $A_{5,65}$. Z každé slitiny byly vyrobeny vždy 3 zkušební trhací tyče. Kromě toho byla studována mikrostruktura tepelně zpracovaných slitin světelným mikroskopem. Pro ověření teploty solidu slitiny byla v rámci termické analýzy změřena křivka ohřevu studované slitiny.

3 VÝSLEDKY A DISKUSE

Vliv rozpouštěcího žihání na mechanické vlastnosti slitiny

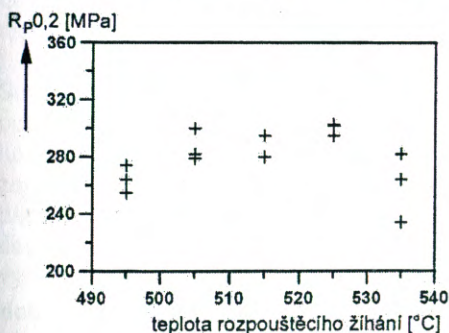
V první fázi experimentu byly naměřeny vytvrzovací křivky slitiny při dvou výdržích (4 a 12 h) na střední teplotě z doporučeného intervalu teplot rozpouštěcího žihání (525°C). Tvrdost byla měřena metodou podle Vickerse se zatížením 5 kg. Vytvrzovací křivky jsou

na obr. 1. Vytvrzovací křivka pro teplotu rozpouštěcího žíhání 525°C po dobu 12 h leží pod vytvrzovací křivkou pro teplotu rozpouštěcího žíhání 525°C po dobu 4 h. Důvodem je zhrubnutí křemíkové fáze během trojnásobně dlouhé výdrže na teplotě rozpouštěcího žíhání, což dokládají i uvedené mikrostruktury v další části textu. Získané vytvrzovací křivky ukazují, že doba 4 h je dostatečná pro vytvrzení slitiny.

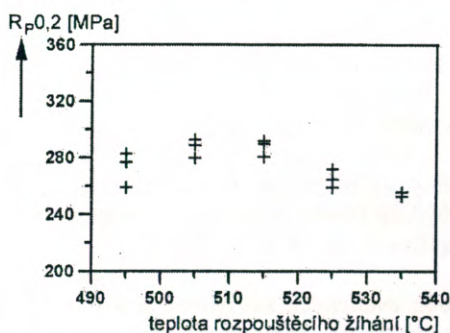


Obr. 1: Vytvrzovací křivky při teplotě rozpouštěcího žíhání 525°C a výdržích 4 a 12 h, umělé stárnutí při teplotě 155°C

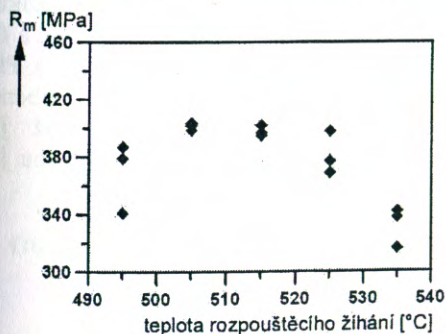
Výsledky tahových zkoušek jsou na obr. 2-8. Hodnoceny byly mez kluzu $R_{p0,2}$ (obr. 2-3), mez pevnosti v tahu R_m (obr. 4-5), tažnost $A_{5,65}$ (obr. 6-7) a tvrdost HB 2,5/62,5 (obr.8) v závislosti na teplotě rozpouštěcího žíhání při 4 a 12 hodinových výdržích.



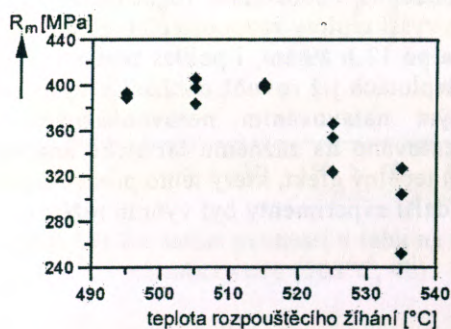
Obr. 2: Závislost meze kluzu na teplotě rozpouštěcího žíhání při výdrži 4 h



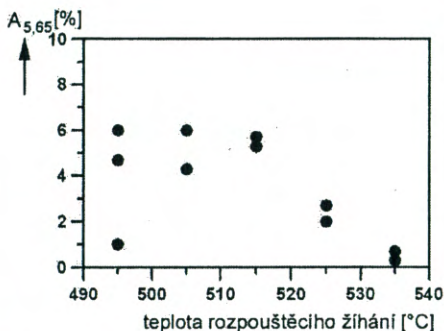
Obr. 3: Závislost meze kluzu na teplotě rozpouštěcího žíhání při výdrži 12 h



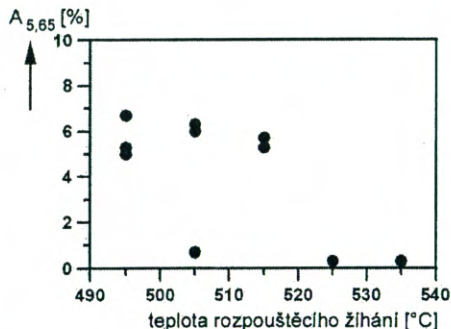
Obr. 4: Závislost meze pevnosti na teplotě rozpouštěcího žíhání při výdrži 4 h



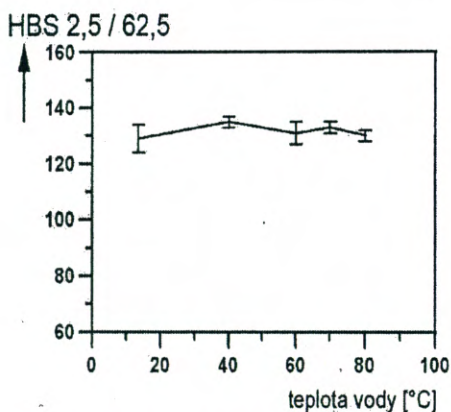
Obr. 5: Závislost meze pevnosti na teplotě rozpouštěcího žíhání při výdrži 12 h



Obr. 6: Závislost tažnosti na teplotě rozpouštěcího žíhání při výdrži 4 h



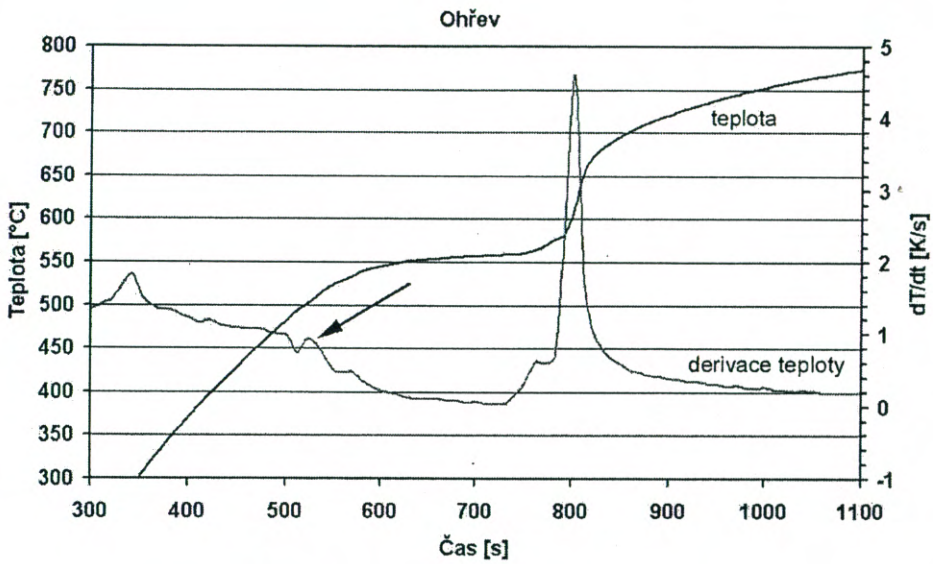
Obr. 7: Závislost tažnosti na teplotě rozpouštěcího žíhání při výdrži 12 h



Obr. 8: Závislost tvrdosti na teplotě rozpouštěcího žíhání při výdrži 4 h

Průběh uvedených závislostí je pro obě studované výdrže prakticky stejný. Žíhání po dobu 4h je tedy zcela dostačující. Jako optimální se pro dosažení maximálních mechanických vlastností jeví teplota rozpouštěcího žíhání z teplotního intervalu 505-515°C. Nižší teplota rozpouštěcího žíhání vede k poněkud nižším hodnotám meze kluzu i pevnosti. Důvodem je pravděpodobně nedokonalé rozpuštění fází bohatých na měď a hořčík v tuhém roztoku. Rovněž vyšší teploty rozpouštěcího žíhání nejsou žádoucí. Pokles meze kluzu a pevnosti, a to zejména po 12 h žíhání, i pokles tvrdosti jsou důsledkem hrubnutí struktury (obr. 14-19). Při těchto teplotách již rovněž dochází k významnému poklesu tažnosti. To může být způsobeno částečným natavováním nerovnovážných fází bohatých na měď a hořčík, což je dokumentováno na záznamu termické analýzy získané při ohřevu slitiny (obr.9). Šipkou je označen tepelný efekt, který tento proces doprovází.

Pro další experimenty byl vybrán režim rozpouštěcího žíhání 505°C/4h.

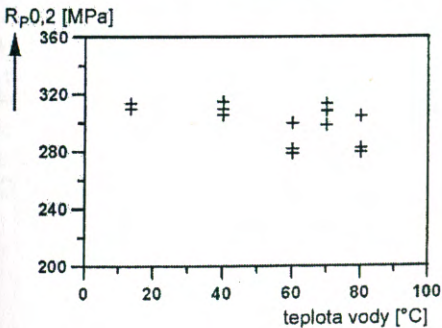


Obr. 9: Křivka ohřevu studované slitiny a její derivace

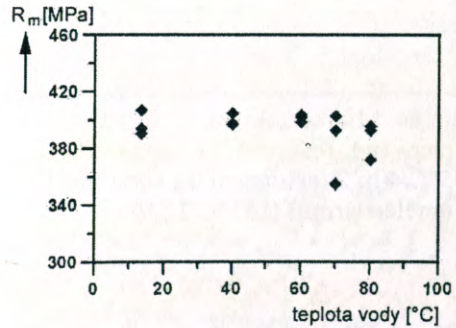
Vliv teploty chladicí vody na mechanické vlastnosti vytvrzené slitiny

Vliv teploty chladicí vody je shrnut na obr.10-13. Slitiny byly žháný při teplotě 505°C po dobu 4h, prudce ochlazený ve vodě o studované teplotě a následovalo umělé stárnutí při teplotě 155°C po dobu 12h.

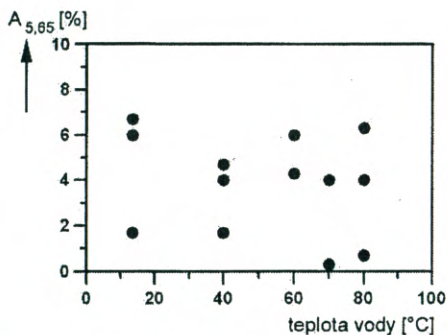
Je zřejmé, že tento vliv je mnohem méně významný než u teploty rozpouštěcího žhání. Souvisí to s malými rozměry zkušebních vzorků díky nimž došlo k překročení kritické ochlazovací rychlosti i ve středové části. I přes značný rozptyl naměřených hodnot (nízké hodnoty jsou způsobené přítomností slévárenských vad ve struktuře materiálu) je možno zejména u pevnosti v tahu pozorovat mírný náznak snižování s rostoucí teplotou vody. Je to dáno sníženou ochlazovací rychlostí vody s rostoucí teplotou. Nejvyšší pevnosti 407 MPa bylo dosaženo při chlazení do vody o nejnižší teplotě 13°C. Uvedený trend by se pravděpodobně výrazněji projevil u rozměrnějších součástí.



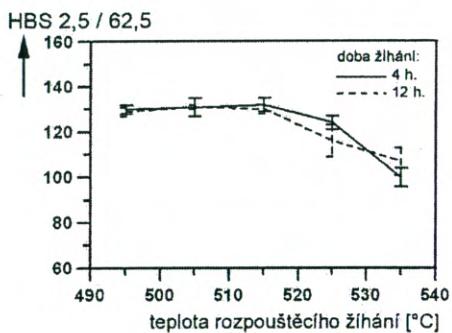
Obr. 10: Závislost meze kluzu na teplotě chladicí vody (505°C, 4h)



Obr. 11: Závislost pevnosti v tahu na teplotě chladicí vody (505°C, 4h)



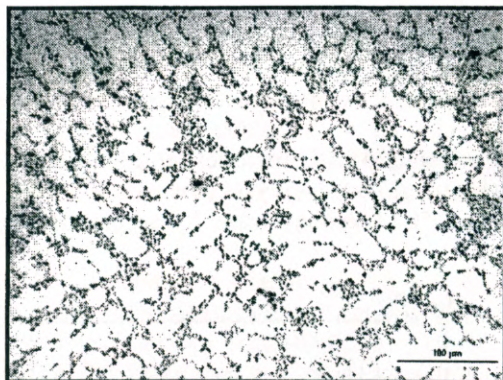
Obr. 12: Závislost tažnosti na teplotě chladicí vody (505°C, 4h)



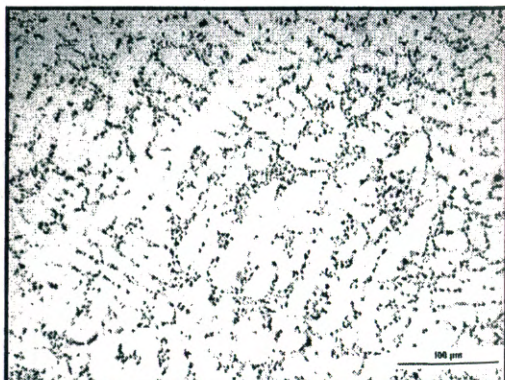
Obr. 13: Závislost tvrdosti na teplotě chladicí vody (505°C, 4h)

Mikrostruktura studovaných slitin

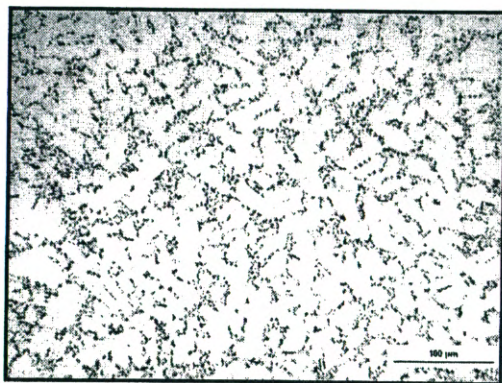
Mikrostruktura různě tepelně zpracovaných slitin jsou na obr.14-21. Struktura je tvořena zejména primárními dendrity tuhého roztoku α -Al – světlé a eutektikem tvořeným fází α -Al a eutektickým křemíkem. Intermetalické fáze nejsou patrné, neboť došlo k jejich rozpuštění při rozpouštěcím žhání. Rovněž vytvřující precipitáty nejsou pro své velmi malé rozměry patrné. Struktury se vzájemně výrazněji neliší, pouze u vzorku, u něhož bylo rozpouštěcí žhání provedeno při nejvyšší teplotě 535°C, je patrné zhrubnutí křemíkových částic (obr.18-19).



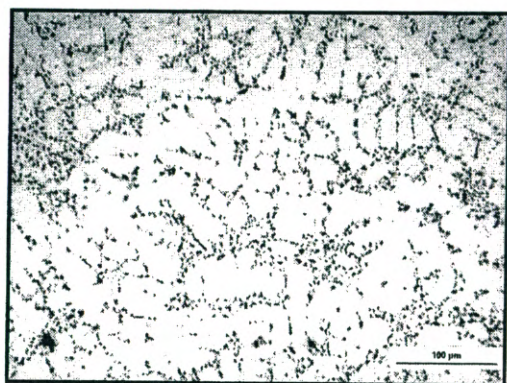
Obr.14. Mikrostruktura slitiny tepelně zpracované režimem: 1. rozpouštěcí žhání 495°C/4 h, 2. ochlazení do vody (60°C), 3. umělé stárnutí (155°C/12 h)



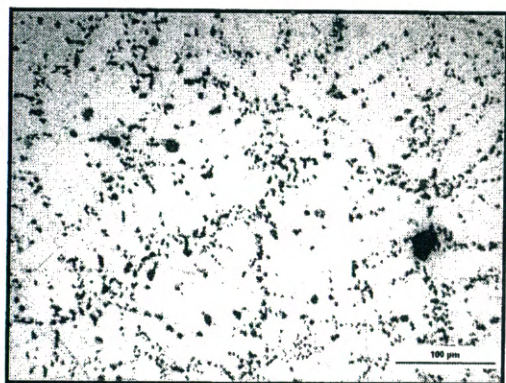
Obr.15. Mikrostruktura slitiny tepelně zpracované režimem: 1. rozpouštěcí žhání 495°C/12 h, 2. ochlazení do vody (60°C), 3. umělé stárnutí (155°C/12 h)



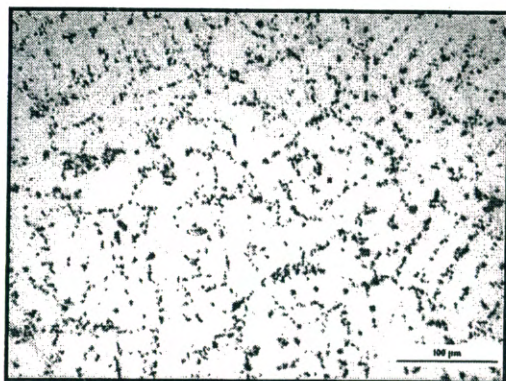
Obr.16: Mikrostruktura slitiny tepelně zpracované režimem: 1. rozpouštěcí žhání 505°C/4 h, 2. ochlazení do vody (60°C), 3. umělé stárnutí (155°C/12 h)



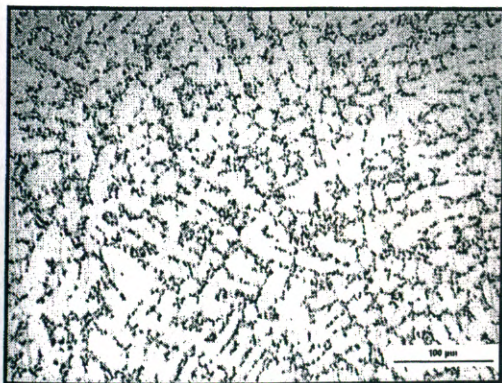
Obr.17: Mikrostruktura slitiny tepelně zpracované režimem: 1. rozpouštěcí žhání 505°C/12 h, 2. ochlazení do vody (60°C), 3. umělé stárnutí (155°C/12 h)



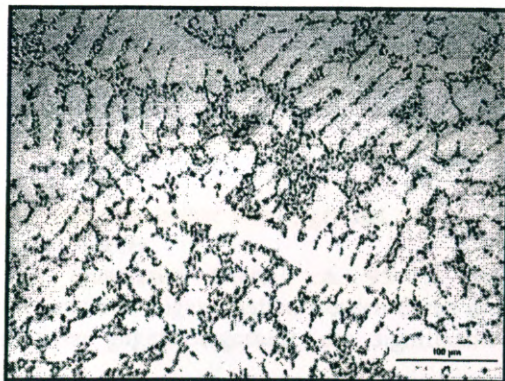
Obr.18: Mikrostruktura slitiny tepelně zpracované režimem: 1. rozpouštěcí žhání 535°C/4 h, 2. ochlazení do vody (60°C), 3. umělé stárnutí (155°C/12 h)



Obr.19: Mikrostruktura slitiny tepelně zpracované režimem: 1. rozpouštěcí žhání 535°C/12 h, 2. ochlazení do vody (60°C), 3. umělé stárnutí (155°C/12 h)



Obr.20: Mikrostruktura slitiny tepelně zpracované režimem: 1. rozpouštěcí žhání 505°C/4 h, 2. ochlazení do vody (13°C), 3. umělé stárnutí (155°C/12 h).



Obr.21: Mikrostruktura slitiny tepelně zpracované režimem: 1. rozpouštěcí žhání 505°C/4 h, 2. ochlazení do vody (80°C), 3. umělé stárnutí (155°C/12 h).

4 ZÁVĚR

Byl navržen optimální režim tepelného zpracování slitiny AISi9Cu2Mg (ASTM P 354.0) daného konkrétního chemického složení pro dosažení maximálních mechanických vlastností. Doporučený režim sestává z rozpouštěcího žíhání v intervalu teplot 505-515°C po dobu 4h, rychlého ochlazení do vody o teplotě 13°C a umělého stárnutí při teplotě 155°C po dobu 12h. Tento režim vede k získání pevnosti v tahu slitiny vyšší než 400 MPa. Pokud by nízká teplota chladicí vody byla příčinou deformací součástí, lze ji zvýšit na 60°C. U drobných součástí by tato změna prakticky neměla mít vliv na výsledné mechanické vlastnosti. Možnost jak dále zvýšit mechanické vlastnosti slitiny typu ASTM P 354.0 v rámci precipitačního vytvrzování spočívá ve využití horních limitů obsahu legujících prvků. Norma pro tuto slitinu připouští například obsah mědi v rozmezí 1,6 -2,0%, obsah hořčíku v rozmezí 0,4 – 0,6%. V případě studované slitiny se obsah Cu a Mg pohyboval na úrovni spodních limitů normy.

5 PODĚKOVÁNÍ

Tato práce byla realizována částečně řešena v rámci projektu MŠM 6066137302.

6 LITERATURA

- [1] DAVIS J.R.: Aluminum, ASM International, 1994
- [2] MICHNA, Š., LUKÁČ, I., OČENÁŠEK, V., KOŘENÝ, R., DRÁPALA, J., SCHNEIDER, H., MIŠKUFOVÁ, A.: Encyklopedie hliníku, Adin, s.r.o. Prešov 2005