

Hodnocení krystalizace bronzu při různých podmínkách tuhnutí odlitku

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství

Autor práce: **Jan Boubín**
Vedoucí práce: Ing. Jiří Machuta, Ph.D.



Evaluation of bronze crystalization in different conditions of cast solidification

Bachelor thesis

Study programme: B2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301R000 – Mechanical Engineering

Author: **Jan Boubín**
Supervisor: Ing. Jiří Machuta, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan Boubín**

Osobní číslo: **S12000024**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Strojní inženýrství**

Název tématu: **Hodnocení krystalizace bronzů při různých podmínkách tuhnutí odlitků**

Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s problematikou slitin mědi, jejich rozdělením a zpracováním.
2. Vyhodnoťte strukturu získaných odlitků na základě podkladů, které jsou dostupné v literatuře.
3. Proveďte hodnocení a formulujte dílčí závěry.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

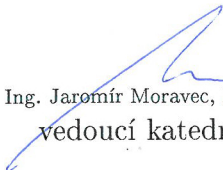
- [1] GRÍGEROVÁ, T. a kol. *Zlívárnostvo neželezných kovov. 1. Vyd. Bratislava /Praha 1988.*
[2] PÍŠEK, F. a kol. *Nauka o materiálu I/3 - Neželezné kovy. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha, 1975.*
[3] ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných kovů [skripta]. Akademické nakladatelství Cerm, Brno, 2004*
[4] SEDLÁČEK, V. *Neželezné kovy a slitiny. 1. vyd. Praha 1979.*

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Machuta, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání bakalářské práce: **31. října 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **31. ledna 2017**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. února 2016

Čestné prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo. Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL. Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše. Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem. Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 5.1.2017

Podpis:



Poděkování

Rád bych chtěl touto cestou poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Jiřímu Machutovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a především za jeho trpělivost při naší spolupráci. Zvláštní poděkování věnuji své rodině a přátelům za cennou podporu během celého mého studia.

Abstrakt

Tato bakalářská práce je členěna do dvou částí, kterými jsou část teoretická a část praktická. Teoretická část se zabývá charakteristikou slitin mědi, jejich rozdělením a zpracováním. Zejména se tato práce soustředí na charakteristiku, vlastnosti a využití bronzů. Veškeré tyto informace jsou zpracovány na základě prostudované literatury. Praktická část bakalářské práce se věnuje pozorování rozdílů ve struktuře pro materiál $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ mezi odlitkem do pískové formy a odlitkem do formy kovové. Následuje jejich metalografický rozbor obsahující výbrus a leptání, porovnání makrostruktury na světelném mikroskopu, chemická analýza struktury a test tvrdosti materiálu v řezu.

Klíčová slova: měď, bronz, metalografický rozbor, slitina $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$

Abstract

Presented bachelor thesis is divided into two parts - the theoretical part and the experimental part. The theoretical part deals with characteristics of copper alloys, their distribution and processing. This thesis is focused especially on properties and uses of bronze. All these information are processed on the base of examined literature. The experimental part of bachelor thesis follows up studying differences in structure of material $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ between casting into a sand mold and a metal mold. It is followed up by solving metalographic analysis which contains grinding and corroding, comparing both structures on a light microscope, chemical analysis of structure and hardness test in cut of material.

Key words: copper, bronze, metalographic analysis, alloy $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$

Obsah

Seznam jednotek a zkratk	8
1. Úvod.....	9
2. Teoretická část	10
2.1. Měď.....	10
2.1.1. Vlastnosti a využití čisté mědi	10
2.1.2. Výroba čisté mědi	12
2.1.3. Odolnost mědi a jejích slitin proti korozi	13
2.2. Bronz	14
2.2.1. Cínové bronzy	15
2.2.2. Hliníkové bronzy	17
2.2.3. Křemíkové bronzy	19
2.2.4. Beryliové bronzy.....	20
2.2.5. Niklové bronzy	21
2.2.6. Manganové bronzy	22
2.2.7. Olověné bronzy.....	22
2.3. Mosaz	23
2.3.1. Mosazi pro odlévání.....	24
2.3.2. Mosazi pro tváření	24
2.4. Porovnání podmínek kovových a pískových forem.....	25
2.5. Vlastnosti slitiny $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$	26
2.5.1. Využití slitiny	28
3. Experimentální část.....	29
3.1. Odlévání $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$	29
3.2. Analýza chemického složení pomocí spektrometru.....	31
3.3. Metalografické hodnocení vzorků.....	33
3.3.1. Pozorování vzorků	36

3.4. Měření tvrdosti odlitku.....	39
3.5. Diskuze.....	40
4. Závěr	41
Seznam použité literatury	43
Přílohy.....	44

Seznam jednotek a zkratek

R _m	mez pevnosti	[MPa]
Z	kontrakce	[%]
A ₁	tažnost	[%]
L	likvidus	
α,β,γ,δ,ε,η	tuhé roztoky taveniny	
T	teplota	[°C]
σ _{pt}	pevnost	[MPa]
HB	tvrdost podle Brinella	[-]
\bar{x}	průměrná hodnota	
σ	směrodatná odchylka	
v	variační koeficient	
ČSN	česká státní norma	
b _f	součinitel teplené akumulace formy	[J.m ⁻² .h ^{-1/2} .K ⁻¹]
λ _f	součinitel tepelné vodivosti formy	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
c _f	specifická tepelná kapacita	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
ρ _f	hustota formovací směsi	[kg.m ⁻³]

1. Úvod

Bronz je jednou z několika málo významných slitin, se kterou se člověk během své historie setkal. Jedná se o tak historicky důležitou slitinu, že po ní byla pojmenována jedna éra dějin člověka. Byla to doba bronzová, která je datována mezi 2300 – 800 let př. n. l.

Základním stavebním prvkem je měď, kterou ve struktuře najdeme v největší míře. Ta by se dala nazvat takřka nestárnoucím kovem. Asi 5000 let před objevením zlata byla jediným lidem známým kovem. Starověcí Egypťané používali pro měď symbol „ankh“, který znamenal „věčný život“. Bylo tak poukazováno na její recyklovatelnost a následovně opakované zpracování. Již v roce 2800 př. n. l. jsou zprávy o rudných dolech na Sinajském poloostrově nebo Kypru (odtud latinsky název Cuprum). V této době jsou užívány první slitiny mědi a to konkrétně bronz.

Po dobu několika století tak sloužil bronz jako materiál pro výrobu zbraní, zemědělských nástrojů, nástrojů pro umělecká řemesla, mince a domácí zařízení, umělecké a ornamentální předměty. A své širokospektrální využití si bronz udržel až dodnes díky svým výjimečným vlastnostem. Díky své zvýšené odolnosti proti korozi najdeme bronz v lodním průmyslu nebo při těžbě ropy a zemního plynu, kde součástky přichází do styku s mořskou vodou. Další výjimečnou vlastností některých bronzů je nejiskřivost, díky čemuž jsou nenahraditelné v důlním a chemickém průmyslu. Svou stopu historie si bronz zanechal v umění a architektuře, kde je k vidění zejména na sochách a drobné bižuterii.

V posledních letech se metalurgickému výzkumu mědi a jejich slitin věnují pracovníci Katedry strojírenské technologie – Technické univerzity v Liberci. Na tento výzkum navazuje tato bakalářská práce, která popisuje téma: „Hodnocení krystalizace bronzů při různých podmínkách tuhnutí odlitku“. Cílem této práce by tedy mělo být seznámení s problematikou slitin mědi a vyhodnocení struktury získaných odlitků.

2. Teoretická část

[1], [2]

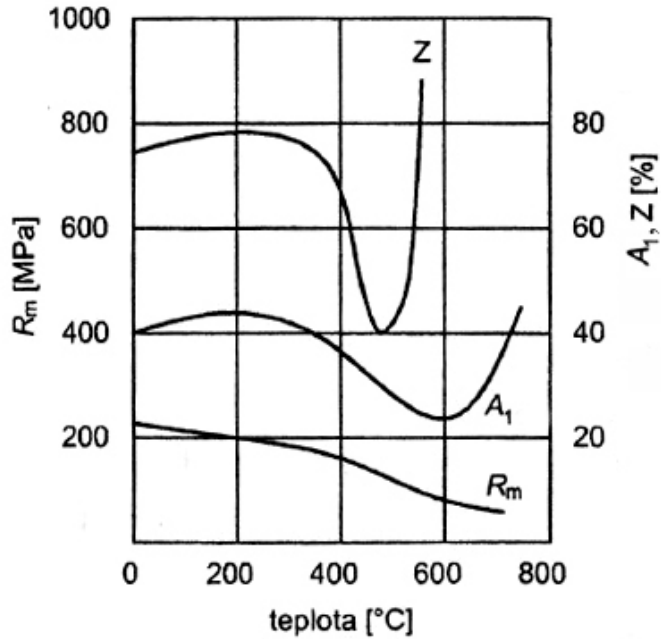
Z historických důvodů se slitiny mědi dělí na mosazi a bronzy. Toto dělení se odvíjí od základního legujícího prvku, kterými mohou být zinek nebo cín. Jestliže je základní přísadou zinek, jedná se o slitinu zvanou mosaz. Pokud je přídavkem jakýkoliv jiný prvek než zinek, hovoříme o slitině zvané bronz. Z technického hlediska je nejvhodnější členění slitin mědi podle hlavního legujícího prvku. Setkáváme se tak s pojmy jako cínové bronzy, hliníkové bronzy, beryliové bronzy a další. Zásadní rozdělení je na slitiny tvářené a slévárenské. Z pohledu vlastností a zpracovatelnosti jsou pak rozdíly mezi slitinami jednofázovými a vícefázovými.

2.1. Měď

2.1.1. Vlastnosti a využití čisté mědi

[3], [4], [8]

Měď je kov červenavé barvy krystalizující v kubické plošně centrované soustavě. S hustotou 8940 kg/m^3 a teplotou tání $1083 \text{ }^\circ\text{C}$ ji řadíme mezi kovy se střední teplotou tání. Vyniká výbornou elektrickou a tepelnou vodivostí, kam se svými hodnotami řadí hned za stříbro. Nutno podotknout, že se zvyšujícím se počtem nečistot ve struktuře tepelná i elektrická vodivost rapidně klesá. Dále vyniká svou odolností vůči korozi v silně agresivním prostředí, jako je například slaná voda. Velmi důležité je, že při působení koroze neklesá mez únavy mědi, na rozdíl od většiny ostatních kovů. Měď také patří mezi nejtvrnější kovy vůbec. Se stoupající teplotou se mění mechanické vlastnosti mědi, což dokonale dokazuje obr. 1. Pevnost se zmenšuje jen zvolna, naproti tomu zúžení a prodloužení se snižuje rychle až k minimální hodnotě při $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Při vyšší teplotě tažnost mědi opět stoupá. Je tedy vhodné tvářit měď za studena nebo při teplotě vyšší, nejlépe asi při $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Její další fyzikální vlastnosti jsou uvedeny v tab. 1.



Obrázek 1.: Mechanické vlastnosti Cu v závislosti na teplotě[4]

Tabulka 1.: Fyzikální vlastnosti čisté mědi

Veličina	Hodnota	Jednotka
Relativní atomová hmotnost	63,54	-
Atomové číslo	29	-
Elektronová konfigurace	[Ar] 3d ¹⁰ 4s ¹	-
Struktura	kubická plošně centrovaná	-
Hustota	8940	kg . m ⁻³
Teplota tání	1083	°C
Teplota varu	2595	°C
Tepelná vodivost (25°C)	394	W . m ⁻¹ . K ⁻¹
Elektrická vodivost	58,108 . 10 ⁶	S.m ⁻¹
Koeficient tepelné roztažnosti(20°C)	16,42 . 10 ⁻⁶	-
Molární objem	7,11 . 10 ⁻⁶	m ³ . mol ⁻¹
Skupenské teplo tání	209,3	kJ . kg ⁻¹
Skupenské teplo varu	204,9	kJ . kg ⁻¹

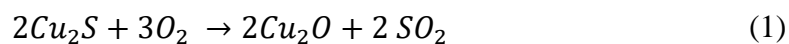
Použití mědi je značně rozsáhlé. Přibližně 55% mědi se spotřebuje na výrobu měďnatých výrobků a asi 45% mědi se spotřebuje na výrobu různých slitin. Použití čisté mědi je v první řadě dáno její výbornou elektrickou a tepelnou vodivostí. Nejvíce čisté mědi se spotřebuje na výrobu vodičů ve formě drátů a tyčí, menší množství pak na výrobu plechů, pásů a trubek pro konstrukční účely. V tepelné technice se využívá dobré tepelné vodivosti mědi ve stavbě různých ohřívacích a ochlazovacích systémů. Chemické odolnosti mědi se využívá v průmyslu potravinářském (cukrovary, pivovary) a chemickém. Čistá měď se velmi obtížně slévá. Také proto často vznikají slitiny s příměsí fosforu, zinku, cínu, manganu nebo niklu.

2.1.2. Výroba čisté mědi

[3]

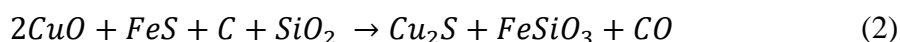
Celosvětové otevřené těžitelné zásoby mědi dosahují 680 Mt, z toho připadá 190 Mt na Chile. V Evropě se největší zásoby měďnatých rud nachází v Polsku ve výši 26 Mt. Za zmínku také stojí ložiska v České Republice s hodnotou 49 kt. Pro průmyslovou výrobu mědi jsou hlavním zdrojem sulfidické rudy, které jsou poměrně bohatým zdrojem železa, ale obsah mědi se pohybuje okolo 1%. Po vytěžení se tedy ruda nejprve drtí a koncentruje, abychom získali rudu o obsahu mědi 15 – 20%.

a) Pražení je prvním základním krokem, díky němuž dojde k odstranění co možná největšího množství síry z rudy a přeměně co největšího množství sulfidů na oxidy (1). Pokud klesne obsah síry v rudě natolik, že na jeden atom mědi přijde přibližně jeden atom síry, přichází na řadu krok druhý.

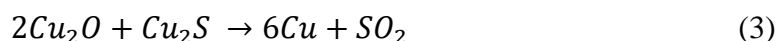


b) V šachovitých nebo plamenných pecích probíhá při teplotách okolo 1400°C a za přidání koksu a struskotvorných přísad tavení na měďnatý lech (kamínek). Důvodem toho je odstranění sulfidu železnatého FeS.

Během tohoto pochodu přechází oxid měďnatý v sulfid, sulfid železnatý reaguje s oxidem křemičitým na křemičitan železnatý, kterým je tvořena struska. Sulfid měďnatý se spolu s dalšími sloučeninami usazuje na dně taveniny a vzniká měďnatý lech (2). Po odstranění velkého množství sulfidu železnatého nastupuje krok třetí.



c) Závěrečným krokem zpracování měďného lechu na surovou měď je besemerace neboli pražení s dmýcháním. Roztavený lech se vlije do konvertoru, který obsahuje kyselou nebo zásaditou vyzdívku a vhání se stlačený vzduch. Sulfid železnatý se přetváří na oxid a tvoří tak strusku. Dále probíhá oxidace sulfidu měďného na oxid měďnatý, který energeticky reaguje se sulfidem měďným na kovovou měď (3).



Na závěr se surová měď čistí elektrolyticky

2.1.3. Odolnost mědi a jejích slitin proti korozi

[6]

Měď a její slitiny je široce využívána v mnoha agresivních prostředích díky její výborné odolnosti proti korozi, kterou můžeme výhodně skombinovat s jejími dalšími výhodami jako je elektrická a tepelná vodivost. Za agresivní prostředí můžeme považovat například místa, která podléhají atmosférickým vlivům nebo znečištěné ovzduší. Dále sem patří prostředí, kde se jednotlivé součásti nalézají v tekutinách. Typickým prostředím je slaná mořská voda, kde se jedná hlavně o výrobky spojené s lodním průmyslem. Ale agresivní tekutinou mohou být i vody odpaní nebo kyseliny a soli.

Koroze v H₂O

Jako nečastější zástupce výrobků z mědi a jejich slitin vyskytujících se v kontaktu s vodou jsou vodovodní trubky. Pro dopravu neznečištěné vody využíváme trubek

z čisté mědi nebo mosazí. Úbytek způsobený korozi závisí na obsahu kyslíku a CO₂. Pro dopravu znečištěné vody jsou vhodné slitiny mědi a niklu. Jako nejuniverzálnější pro dopravu vody pitné, znečištěné ba dokonce i mořské se jeví slitiny mědi a hliníku. Hliníkové bronzы tak odolávají oxidaci a nárazové korozi díky hliníku v povrchové vrstvě.

Koroze ve slané vodě

Zajímavé využití slitin mědi je pro dopravu mořské vody po lodích nebo také v elektrárenském průmyslu, kde je například u přílivových elektráren manipulace s mořskou vodou každodenní záležitostí. Měď sama o sobě je v těchto odvětvích dosti využívána, avšak nemůže konkurovat vlastnostem některých slitin. Ty dominují kombinací nerozpustnosti v mořské vodě, odolností proti erozi nebo minimálním biologickým znečištěním. Úbytek materiálu v relativně klidných mořských vodách se pohybuje okolo 50 μm/rok . Výbornou odolností proti korozi v mořské vodě vynikají niklové bronzы, kde se v laboratorních podmínkách úbytek pohybuje od 2 do 12 μm/rok. Niklové bronzы modifikované chromem vynikají odolností proti pittingu , kde se osvědčily například při dopravě mořské vody při vyšších rychlostech.

2.2. Bronz

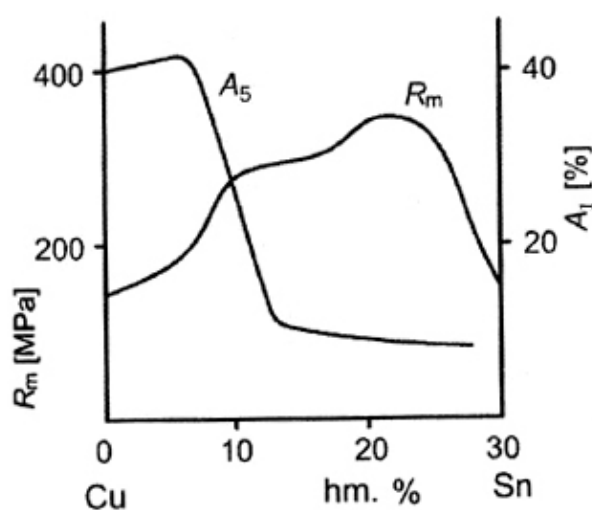
[1], [2], [4]

Bronzы se nazývají slitiny mědi s různými přísadami kovů s výjimkou zinku. Dostávají poté přívlastek podle jejich hlavního legujícího prvku a dělíme je tak na bronzы cínové, hliníkové, křemíkové, beryliové, niklové, manganové a konečně olověné.

Kořeny bronzу sahají hluboko do let minulých, kde díky němu byl pojmenován jeden úsek lidských dějin - doba bronzová. Postupem doby si bronz našel své místo v umění, kde ho můžeme najít ve velké míře v sochařství nebo šperkařství. V dobách válek bronz našel využití pro výrobu zbraní, kde sloužil jako materiál pro výrobu děl. Zajímavostí může být, že starším českým názvem pro bronz je spěž. Dnes můžeme jeho zpracování vidět jak v lité, tak v tvářené podobě v mnoha technických odvětvích, kde využíváme zejména jeho výbornou odolnost proti korozi v náročných podmínkách.

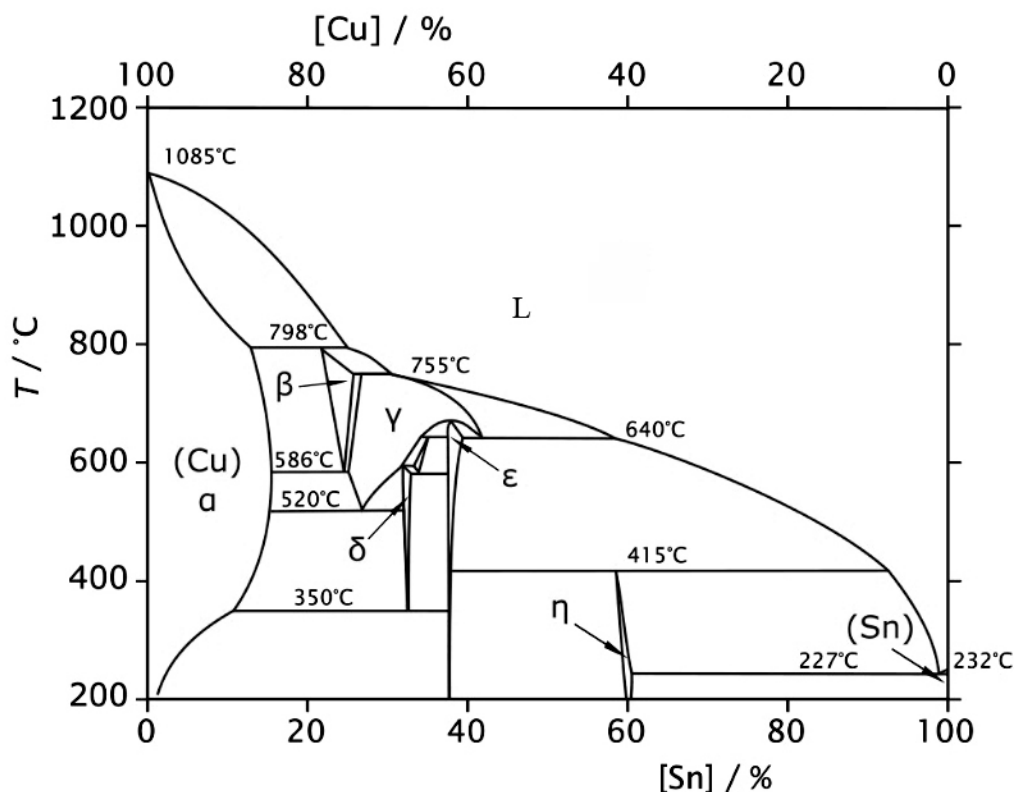
2.2.1. Cínové bronzy

Cínové bronzy definujeme jako slitinu mědi a cínu. Za běžných podmínek obsahují maximálně 33% cínu z celkové hmotnosti, avšak součet mědi a cínu musí dosahovat minimálně 99,3%. Zbytek jejich struktury tvoří určité množství jiných prvků, které se do nich dostávají jako nečistoty nebo záměrně jako přísady. Zejména u cínových bronzů pro tvářením se chceme vyvarovat škodlivých nečistot, kterými mohou být prvky jako hliník, olovo nebo síra. Naopak příznivý vliv mají na cínové bronzy zinek, nikl nebo jako dezoxidační přísada fosfor, mangan a křemík.



Obrázek 2: Mechanické vlastnosti cínových bronzů s rostoucím obsahem Sn [4]

Jak je vidno z obr. 2. u cínových bronzů roste s obsahem cínu rychle pevnost a tvrdost. Tažnost se jen mírně zvyšuje do 8% hm. Jejich mechanické vlastnosti můžeme ještě zlepšit tvářením za studena. Významnou vlastností cínových bronzů je dobrá odolnost proti korozi a malý součinitel tření.



Obrázek 3: Binární diagram Cu-Sn [3]

Rovnovázný diagram slitin mědi a cínu, který je vykreslen na obr. 3., patří mezi nejkomplicovanější binární diagramy. Pro technickou praxi mají však význam slitiny jen do obsahu 20% cínu, a to proto, že slitiny s vyšším obsahem cínu jsou vlivem chemické sloučeniny značně křehké.

Slitiny do 5% Sn jsou slitiny homogenní a jsou tedy tvořeny pouze tuhým roztokem α . Fáze α je substituční tuhý roztok cínu v mědi a má kubickou plošně centrovanou mřížku. Fáze β je elektronová sloučenina Cu_5Sn s prostorově centrovanou kubickou mřížkou. Ta je stabilní za vyšších teplot a následně při 586°C a eutektoidní přeměně vymizí. Fáze svou vnitřní stavbou blízká fázi β se nazývá fáze γ . Elektronové sloučenině $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ patří fáze δ , která krystalizuje v soustavě krychlové. Fáze ϵ je elektronová sloučenina Cu_3Sn , tvořená těsně uspořádanou šesterečnou mřížkou.

Cínové bronzы pro tváření

Cínové bronzы vhodné pro tváření se používají k výrobě pružin nebo membrán, které budou mít zvýšenou odolnost proti korozi. Dále je hledejme v chemickém, papírenském

nebo potravinářském průmyslu. V neposlední řadě jsou kvalitním materiálem pro výrobu ložiskových pouzder.

Cínové bronzы pro odlévání

K dobrým slévárenským vlastnostem bronzu patří jeho malá smrštitost, asi 1%. Mezi špatné slévárenské vlastnosti patří menší zabíhavost a sklon k tvoření mikrosraženin. Bronzových odlitků se užívá hlavně ve stavbě strojů tam, kde je třeba materiálu o dobré pevnosti a houževnatosti v kombinaci s odolností proti korozi. Cínových bronzů s nízkým obsahem cínu a tedy ještě dostatečnou elektrickou vodivostí se užívá pro výrobu odlitků pro elektrotechnické účely, jako jsou sběrné kroužky, kontaktní segmenty nebo různé spojky. Vyšší obsah cínu již garantuje dobré mechanické vlastnosti s odolností proti korozi. Z takových slitin můžeme odlévat součásti turbín nebo kompresorů.

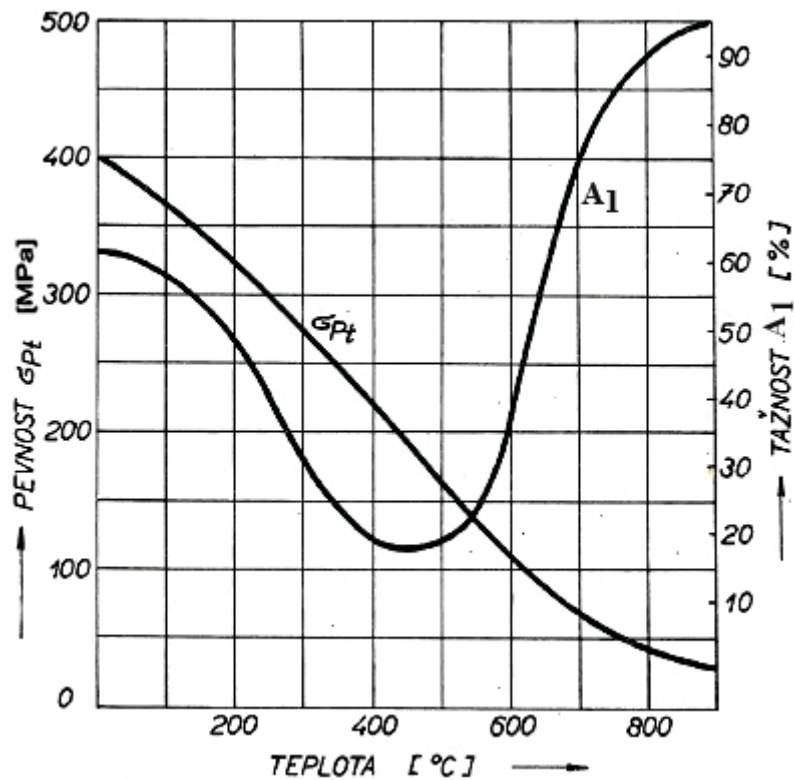
2.2.2. Hliníkové bronzы

Hliníkové bronzы jsou slitinou mědi a hliníku. Patří mezi velmi hodnotné konstrukční materiály pro svoji dobrou odolnost proti korozi, což dokazují svou naprostou stálostí ve vodě nebo minerálních a důlních vodách. Zvláštní význam má i jejich stálost v mořské vodě. Korozně odolávají v četných kyselinách, speciálně pak v kyselině sírové a kyselině solné. Toho se využívá například při stavbě chemických zařízení, konstrukci čerpadel nebo varných nádob. Velký význam mají hliníkové bronzы ve stavbě námořních plavidel. Uplatňují se zde hlavně vícesložkové slitiny na výrobu lodních šroubů nebo celých zařízení lodní strojovny. Využívá se tak vysoké meze únavy i za působení koroze. Jeden z takovýchto výrobků můžeme vidět na obr. 4. Dobrá odolnost proti otěru, trvalý lesk a žlutavá barva tvoří z hliníkových bronzů vhodný materiál na výrobu mincí, plaket a různých ozdobných předmětů.



Obrázek 4: Lodní šroub odlitý z hliníkového bronzu s příměsí niklu [6]

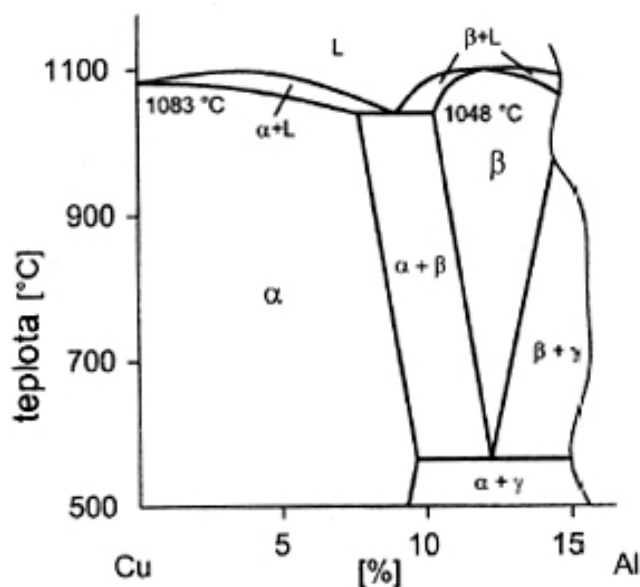
Hliníkové bronzy jsou použitelné i při vyšších teplotách do 800°C. Mechanické vlastnosti se vlivem teploty různou měrou, podle druhu slitiny, mění. Příkladně to demonstruje obr. 5, kde vidíme závislost pevnosti a tažnosti na teplotě.



Obrázek 5: Vliv teploty na mechanické vlastnosti hliníkového bronzu s 5% Al [2]

Dále se hliníkové bronzy dají dobře svařovat. Jejich výjimečnou vlastností je jedna z nejnižších hustot mezi slitinami mědi ($7400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). Z fyzikálních vlastností je důležitá jejich permeabilita, což z nich činí prakticky nemagnetické materiály.

Fázové přeměny znázorňuje část rovnovážného binárního diagramu Cu – Al na obr. 6. Jednotlivé fáze vyskytující se v diagramu můžeme charakterizovat takto. Slitiny mědi a hliníku jsou až do obsahu hliníku 9% jednofázové a mají tudíž fázi α s kubickou plošně centrovanou mřížkou. Ta trpí sice na nízkou pevnost, ale má dobrou tažnost. S rostoucím obsahem hliníku roste pevnost slitin a dostáváme elektronové sloučeniny, které již mají strukturu β -fáze nebo γ -fáze.

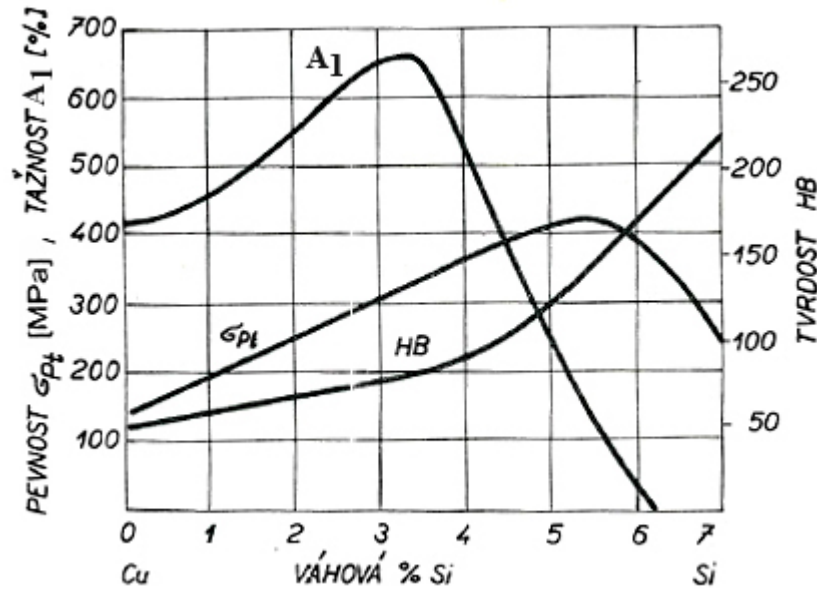


Obrázek 6: Část binárního diagramu Cu-Al [4]

2.2.3. Křemíkové bronzy

Křemíkové bronzy jsou slitiny mědi a křemíku, které mají zastudena i zatepla značnou tvárnost, a hodí se proto dobře k tažení a ražení. Nevýhodou je, že tvářením zastudena poměrně rychle zpevňují, a je tak třeba časté mezižhání. Dobře odolávají účinkům kyseliny sírové a solné, případně některým zásadám. Pro svoje dobré mechanické a chemické vlastnosti mohou nahradit cínové bronzy, které v mnohém překonávají. Tuto skutečnost dobře znázorňuje obr. 7. Používají se například pro výrobu

pružin pracujících v mořské vodě nebo za zvýšených teplot (až 250°C). Častěji se setkáváme se slitinami s více přísadami. V takových případech jde o slitiny heterogenní. Do základní slitiny Cu-Si se obvykle přidává mangan, nikl, zinek nebo olovo.



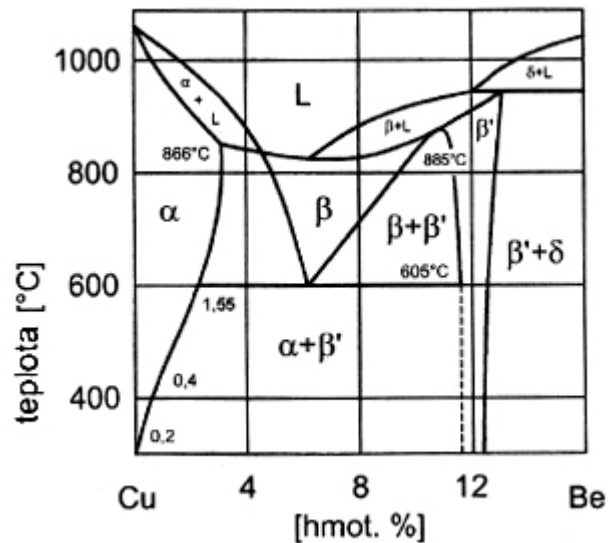
Obrázek 7: Vliv křemíku na mechanické vlastnosti slitiny Cu-Si [2]

Pro technickou praxi mají význam jen slitiny s nízkým obsahem křemíku (3 až 4%). Primární krystalizace probíhá v širokém teplotním intervalu a díky tomu jejich krystalizace probíhá nerovnovážně. Tudiž jsou pak slitiny heterogenní, ačkoliv podle složení a rovnovážného diagramu spadají k slitinám homogenním.

2.2.4. Beryliové bronzы

Beryliové bronzы jsou slitinou základních prvků mědi a beryllia. Obsah beryllia se pohybuje mezi 0.5 až 2.3%. Po vytvrzení a precipitaci dosahují až 1500 MPa. Jejich modul pružnosti je asi 2/3 modulu pružnosti oceli, což způsobuje, že pružiny pracují měkčeji a citlivěji než pružiny ocelové. Beryliové bronzы nejiskří, hodí se proto na výrobu nejiskřivých nástrojů pro doly nebo chemický průmysl. Antimagnetických vlastností se využívá v konstrukci přístrojů, jako jsou například lodní kompasы.

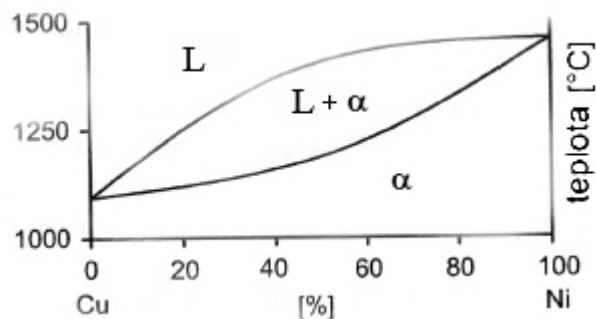
Výborné třecí vlastnosti se uplatňují při výrobě ložisek pro značná zatížení a velké obvodové rychlosti. Obr. 8. demonstruje binární diagram Cu-Be.



Obrázek 8: Binární diagram Cu – Be [4]

2.2.5. Niklové bronzy

Niklové bronzy jsou slitinou mědi a niklu. Oba kovy jsou vzájemně dokonale rozpustné v kapalném i tuhém stavu. Dokonalá rozpustnost tak vyplývá z jejich vzájemné polohy v periodické soustavě prvků, stejné krystalické stavby a příznivé velikosti jejich atomů. Z toho plyne, že s plynulou změnou chemického složení lze plynule měnit i vlastnosti slitin. Nejvyšší pevnosti až 600 MPa pak dosahují slitiny se 70% niklu. Obr 9. demonstruje binární diagram s dokonalou rozpustností Cu-Ni.



Obrázek 9: Binární diagram Cu-Ni[4]

Niklové bronzy mají dobrou pevnost za normální i zvýšené teploty, dobrou mez únavy, odolávají korozi i při napětí a výborně odolávají opotřebení. Mají vysoký elektrický odpor, který jen málo závisí na teplotě.

Jako zástupce korozivzdorných materiálů můžeme jmenovat slitinu Cupronikl, která se i díky své pevnosti používá pro výrobu kondenzátorových trubek nebo turbínových lopatek. Jako dalšího zástupce můžeme jmenovat Konstantan, který je slitinou mědi, 45% niklu a 1-3% manganu. Jak již název napovídá, jeho předností je neměnnost svého elektrického odporu v širokém tepelném intervalu. Hledejme ho například jako odporový materiál pro tenzometr.

2.2.6. Manganové bronzy

Manganové bronzy jsou slitinou mědi a manganu, které mají hlavní využití jako odporový materiál. Při správném postupu umělého vystárnutí zůstává hodnota odporu konstantní ve velmi úzkých mezích po desítky let. Proto se z tohoto materiálu vyrábějí nejpřesnější měřicí odpory tzv. etalony i pro měření malých napětí. Jako neznámější slitinu manganových bronzů uvedme manganin, který je složen z mědi, 13% manganu a niklu. Jako nejznámější slitinu manganových bronzů uvedme manganin, který je složen z mědi, 13% manganu a niklu. Jeho využití můžeme například nalézt i v odporových manometrech.

Za zmínku také stojí Heuslerovy slitiny, které mají feromagnetické vlastnosti, ačkoliv ani jeden z obsažených prvků není feromagnetický.

2.2.7. Olověné bronzy

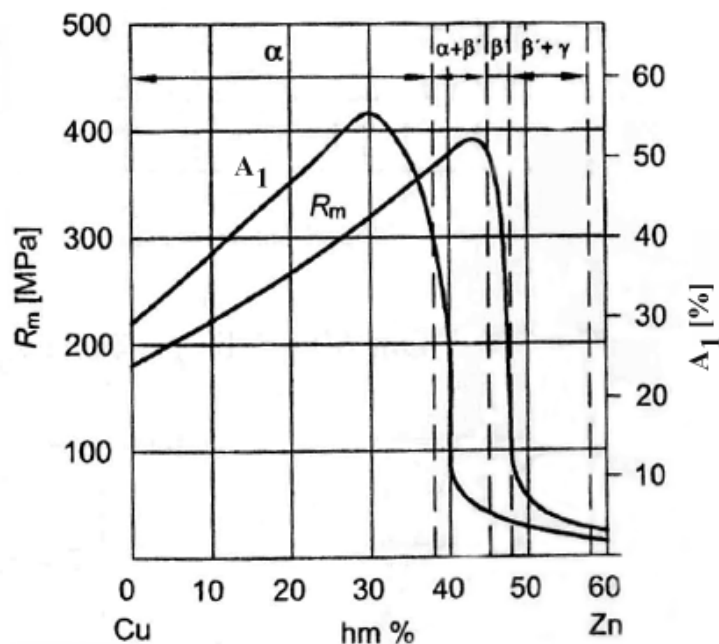
Olověné bronzy jsou slitinou mědi a olova. V soustavě Cu-Pb jsou oba kovy v kapalném stavu částečně mísitelné. Podaří-li se však dosáhnout toho, že nedojde k odměšení a olovem bohatá fáze zůstane rozptýlená ve struktuře, získají slitiny velmi dobré kluzné vlastnosti. Při odstředivém lití ložiskových výsterek ocelových pánví ve slabé vrstvě je slitina dostatečně rychle ochlazována a má vyhovující strukturu. Ložiska takovýchto slitin je možno zatížit poměrně vysokým měrným tlakem, vyšší obvodovou rychlostí (až 10 m/s) a poměrně vysokou provozní teplotou až do 300°C. Jejich tepelná

vodivost je podstatně vyšší než vodivost cínových bronzů. Určitou nevýhodou olověných bronzů je, že mají sníženou odolnost proti korozi, a to především proto, že se olovo rozpouští v některých organických kyselinách přítomných v olejích. Tomu se však dá zabránit přísadou 5 až 6% cínu, čímž zvýšíme odolnost proti korozi až 100krát. Užití takto namáhaných ložisek hledíme v automobilových motorech, kompresorech, obráběcích strojích nebo železničních vozech.

2.3. Mosaz

[1], [2]

Mosazi, slitiny na bázi mědi a zinku patří k materiálům, které jsou známé již velmi dávno. V Římě se mosaz používala například na výrobu mincí. V současnosti se mosaz používá převážně jako konstrukční materiál a materiál pro výrobu bižuterie. Z hlediska aplikace můžeme mosazi dělit na mosazi tvářené a mosazi odlévané. Ze strany chemického složení je pak rozdíl mezi slitinami jednofázovými a slitinami vícefázovými. Pro technické využití mají význam slitiny s obsahem mědi větším než 58 hm%. S nižším obsahem mědi jsou díky své křehkosti nepoužitelné, jak dokazuje obr. 10. Dobře se dají svařovat i pájet a za zmínku stojí jejich velmi dobrá zabíhavost, díky malému teplotnímu intervalu mezi likvidem a solidem. Velkou nevýhodou je však jejich velká lineární smrštitelnost (asi 1,5% u binárních slitin a 1,9% speciálních mosazí).



Obrázek 10.: Vliv Zn na mechanické vlastnosti mosazi[4]

2.3.1. Mosazi pro odlévání

Pokud popisujeme mosazi pro odlévání, jsou to až na malé výjimky heterogenní slitiny s obsahem mědi mezi 63 až 58% mědi. Odlévání těchto slitin je možné jak do kokil, tak i do pískových forem. Podobně jako měď jsou i mosazi doprovázeny různými přímíšeninami. Ale na rozdíl od mědi, u které se požaduje vysoká elektrická vodivost, je tento požadavek u mosazí méně obvyklý, a proto celkový obsah přímíšenin u mosazí bývá vyšší než u mědi. Na nečistoty jsou velmi citlivé mosazi s obsahem jen fáze α , kdežto mosazi s fázemi $\alpha + \beta$ již snesou obsah nečistot větší. Dělit přímíšeniny můžeme na vysloveně škodlivé (síra, vizmut, antimon, arsen, fosfor) nebo na přímíšeniny příznivé (železo, cín, nikl, mangan).

Vliv jednotlivých přímíšenin na vlastnosti mosazí je tedy následující. Mangan je rozpustný v α -fázi a v β -fázi asi do 4%. Ve větším množství se jako legující prvek přidává na zvýšení pevnostních vlastností a pro zlepšení odolnosti proti korozi mosaze, obzvláště v mořské vodě. Cín velmi zužuje oblast α -fáze a na vlastnosti materiálu působí velmi podobně jako mangan. Pokud se použije jako legující prvek hliník, je třeba zdůraznit, že zvýšená odolnost proti korozi souvisí s tvorbou vrstvy Al_2O_3 na povrchu. Železo má v mosazích dvojitý účinek. Jednak zjemňuje velikost zrna při krystalizaci a také zpevňuje α -matrici. Pokud je jeho množství větší jak 0,35% je možné ho zaznamenat v metalografickém výbrusu. Prvek nikl zvyšuje houževnatost mosazí a odolnost proti korozi. Využití mosazí pro odlévání hledíme nejčastěji u výroby vodovodních armatur, součástí čerpadel, ozubených kol nebo ventilů.

2.3.2. Mosazi pro tváření

Mosazi pro tváření v sobě zahrnují slitiny mezi 95 až 58% mědi, jsou to tedy mosazi homogenní i heterogenní. Tyto slitiny pro tváření tvoří převážnou část výroby. Dodávají se jako pásy, plechy, tyče, dráty a trubky.

S rostoucím zastoupením zinku ve slitině roste pevnost, tvrdost a tažnost mosazí, snižuje se ale elektrická a tepelná vodivost. U mosazí homogenních je tváření zastudena a rekrystalizační žihání jednou z možností, jak ovlivnit velikost zrna a vlastnosti těchto slitin. Z hlediska některých vlastností, jsou mosazi s vyšším obsahem mědi pokládány za ušlechtilější než mosazi ostatní. Proto jsou mosazi s obsahem 95% až 80% mědi

označovány zvláště tombaky. Tombak s vyšším obsahem mědi slouží jako materiál na různé mince, plakety nebo medaile. Dříve se užíval na pláště strel nebo na výrobu roznětek. Tombak s nižším obsahem mědi má světle žlutou barvu, která připomíná barvu zlata. Fólie z takového materiálu proto můžeme použít jako náhradu za zlato.

2.4. Porovnání podmínek kovových a pískových forem

[1], [9]

Pokud hodláme porovnávat podmínky mezi těmito dvěma formami, je nutné vycházet z předpokladu různé tepelné akumulace jednotlivých forem, které se odvíjí od použitého materiálu dané formy. Ukazatelem schopnosti slévárenské formy pohltit teplo z odlitku je součinitel tepelné akumulace formy b_f , který vychází z rovnice (4).

$$b_f = \sqrt{\lambda_f c_f \rho_f} \quad (4)$$

Tato odvozená veličina popisuje, že akumulační schopnost materiálu je množství tepla, které projde z odlitu do formy jednotkou plochy za jednotku času při rozdílu teplot 1K. Pro představu pokud odléváme do suchých pískových forem, koeficient b_f se pohybuje mezi hodnotami 12 až 15 $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1/2}\cdot\text{K}^{-1}$. Jestliže hovoříme od kovové formě vyrobené z litiny, koeficient dosahuje hodnoty 185 $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1/2}\cdot\text{K}^{-1}$. Je tedy zřejmé, že kovová forma umožňuje několikanásobně rychlejší odvod tepla a tím pádem i menší růst jednotlivých zrn.

Výhody kovových forem

S menším růstem zrn souvisí i zvýšení mechanických vlastností jako jsou mez pevnosti v tahu nebo tvrdost. Odlitky odlévané do kovové formy, které se také říká kokila, mají vysokou kvalitu povrchu. Může za to vysoký stupeň drsnosti kovové formy a kvalitní nátěr formy, který je nevyhnutelným technologickým doplňkem přípravy formy. S využitím kokil se úzce pojí i ekonomická stránka pohledu na věc. Dochází ke zvýšení produktivity práce nebo se zmenšuje počet zmetků, jelikož v průběhu odlévání jsou podmínky víceméně stálé. Vyloučení pískových forem se snižuje spotřeba dopravy materiálu na přípravu formovacích směsí a tím se i zlepšují hygienické podmínky na pracovišti.

Výhody pískových forem

Díky pomalejšímu odvodu tepla a tím i delšímu růst zrn materiálu nedochází u pískových forem k tak velkému brždění smršťování odlitku jako je tomu u forem kovových. Předcházíme tím vzniku smršťovacích napětí, které mohou být příčinou porušení souvislosti odlitků. A pokud bychom přeci jen potřebovali z některých míst rychlejší odvod tepla, vkládají se od formy kovová chladítka. Z ekonomického hlediska jsou výhodou minimální náklady na konstrukci formy oproti nákladům na konstrukci kokil. S tím se samozřejmě pojí i méně nákladný strojový park pro výrobu pískové formy.

2.5. Vlastnosti slitiny $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$

[5]

Slitina mědi se zinkem, manganem a hliníkem. Její podrobné chemické složení dle ČSN 42 3322 je vypsáno v tab. 2. Na její mechanické vlastnosti za normovaného stavu poukazuje tab. 3. Vyznačuje se velmi dobrou odolností proti korozi v atmosféře. V roztocích neutrálních solí a mořské vodě je ve srovnání se slitinami s více než 80% Cu (např. tombaky) odolnost proti korozi snížena. Má sníženou odolnost proti siričukům, neodolává amonným solím, kyanidům a oxidujícím kyselinám. Podléhá odzinkování a koroznímu praskání. Má dobrou zabíhavost a obtížnou slévatelnost. Teplota tuhnutí se pohybuje mezi 890 – 885°C a lineární smrštění při tuhnutí je 1,6 %. Jako tepelné zpracování se užívá žíhání ke snížení zbytkových napětí při 260 – 290 °C po dobu 1 hodiny na vzduchu.

Tabulka 2.: Chemické složení $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ [hm. %]

		Cu	Mn	Al	Zn	Cu+Mn+Al +Zn+Ni
Chemické složení [%]	Legující prvky	56 až 59	0,5 až 2,0	0,5 až 2,0	zbytek	min. 98,0
	Doprovodné prvky max.	Pb	Fe	Sn	Ni	celkem
		1,5	1,0	1,5	1,0	5,0

Tabulka 3.: Mechanické vlastnosti $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$

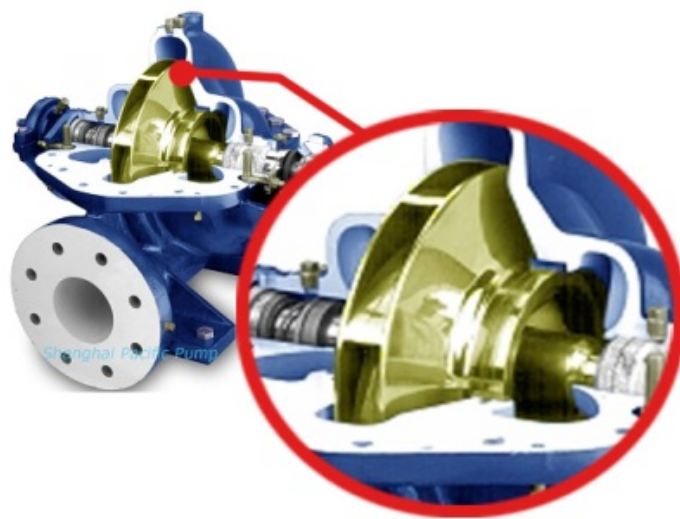
Polotovary	odlitky lité do pískové formy
Stav	tepelně nezpracovaný
Mez kluzu R_p 0,2 [Mpa]	200
Mez pevnosti R_m [Mpa]	400
Tažnost [%]	20
Tvrdość HB	90
Modul pružnosti E [GPa]	98

Tabulka 4.: Fyzikální vlastnosti $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$

Hustota	Měrná tepelná kapacita	Teplotní součinitel roztáhnutosti	Tepelná vodivost	Konduktivita
ρ [kg.m ⁻³]	c_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	α [K ⁻¹]	λ_t [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	γ [MS.m ⁻¹]
8300	395	$21 \cdot 10^{-6}$ (20-200°C)	88 (20-200°C)	11

2.5.1. Využití slitiny

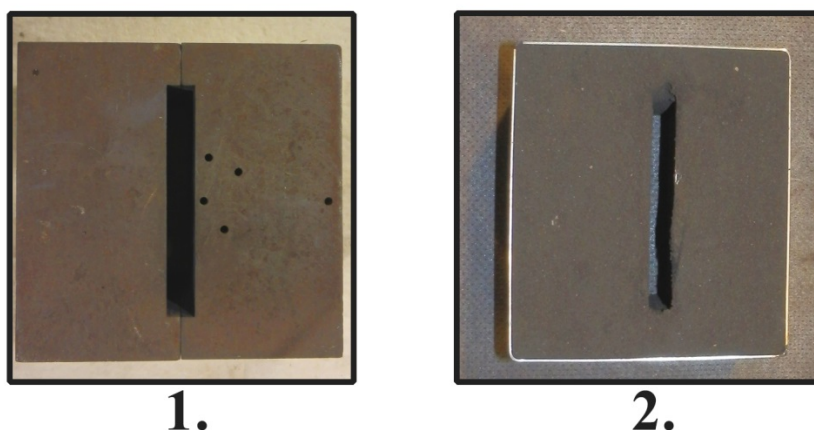
Slitina $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ je vhodná na oběžná kola odstředivých čerpadel větších obvodových rychlostí, jaké je ku příkladu vyobrazeno v detailu na obr. 11. Dále se materiál používá pro stahovací desky statorů a stahovací kruhy cívek, nosiče vinutí. Nelze zapomenout ani na ventily, pouzdra a tělesa hydraulických přístrojů, těsnící kroužky, méně namáhaná ložisková pouzdra obráběcích strojů nebo na vodící pouzdra a pouzdra čerpadel.



Obrázek 11.: Oběžné kolo odstředivého čerpadla z materiálu $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ [7]

3. Experimentální část

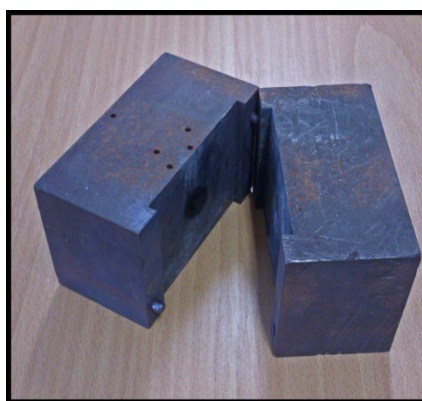
Záměrem experimentální části práce bylo zhodnotit krystalickou strukturu odlitků, které byly odlity do kovové a pískové formy jako jsou na obrázku 12. Dále byla práce zaměřena na sledování mikrostruktury a tvrdosti jednotlivých odlitků. Celkově se pracovalo s předpokladem, že kovová forma má velkou akumulaci schopnost tepla, díky čemuž bychom měli dosáhnout drobnější krystalické struktury než u odlitků odlévaných do formy pískové



Obrázek 12: *Kovová (12.1.) a písková (12.2.) forma o rozměrech 80 x 80 x 10 mm*

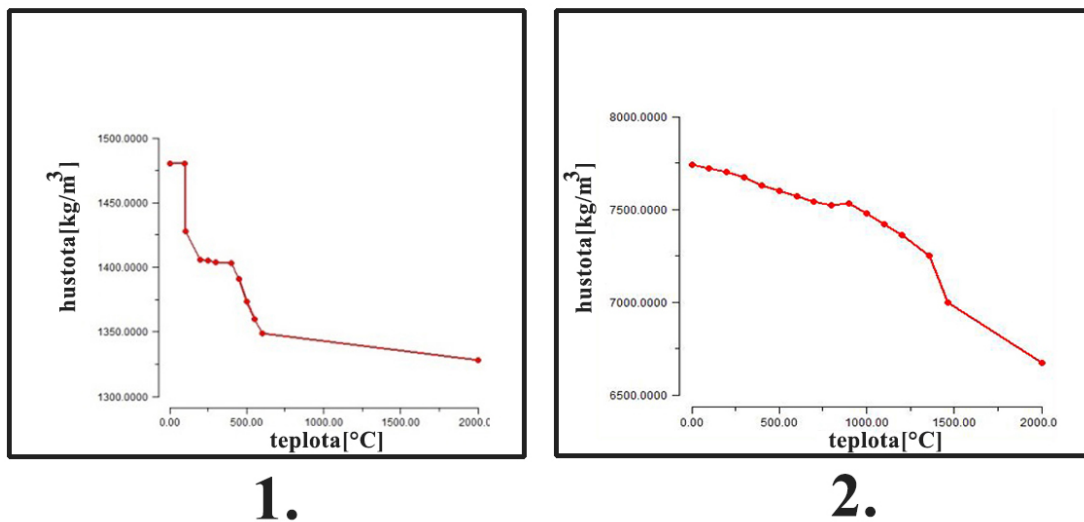
3.1. Odlévání $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$

Tavení slitiny $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ bylo provedeno v tavicí elektrické odporové peci typ 110165 CLASIC. Tavenina byla tavena v grafitovém kelímku s použitím dřevěného uhlí. V prvním případě byla pro odlévání použita zkušební kovová forma ve tvaru desky o rozměrech 80 x 80 x 10 mm, kterou můžeme vidět na obrázku 12.1 a 13.

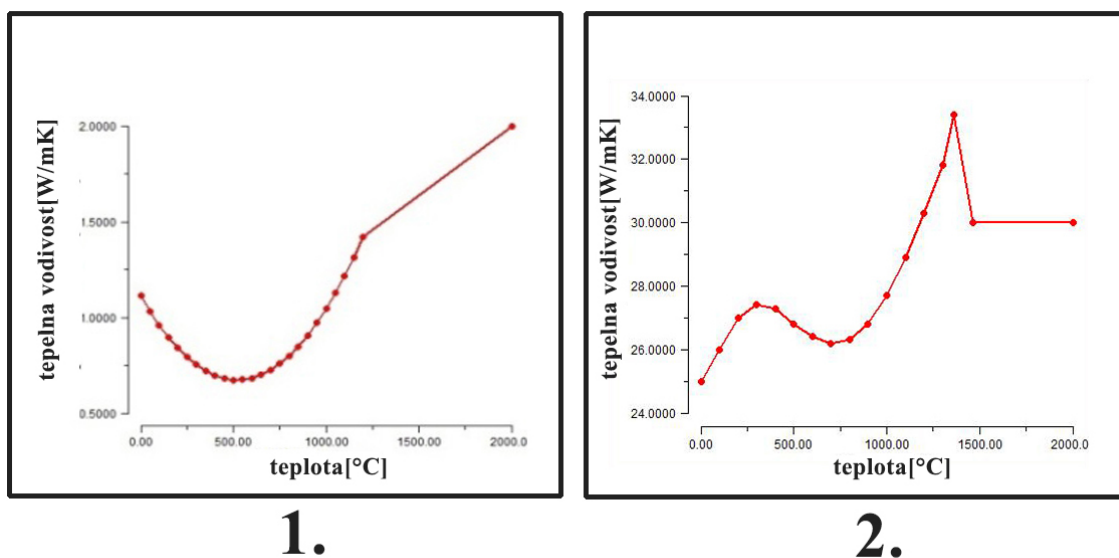


Obrázek 13: *Zkušební kovová forma pro odlití $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ v rozloženém stavu*

Ve druhém případě bylo odléváno do formy zhotovené z bentonitové směsi, kterou ukazuje obrázek 12.2. Použitá slitina byla po roztavení metalurgicky ošetřena a odlita do forem o teplotě 20 °C. Pro ochranu forem byly licí formy ošetřeny nátěrem Dicot 5 o tloušťce 0,2 mm.



Obrázek 14: Hustoty pískové (14.1) a kovové formy (14.2) v závislosti na teplotě z programu MAGMA 5



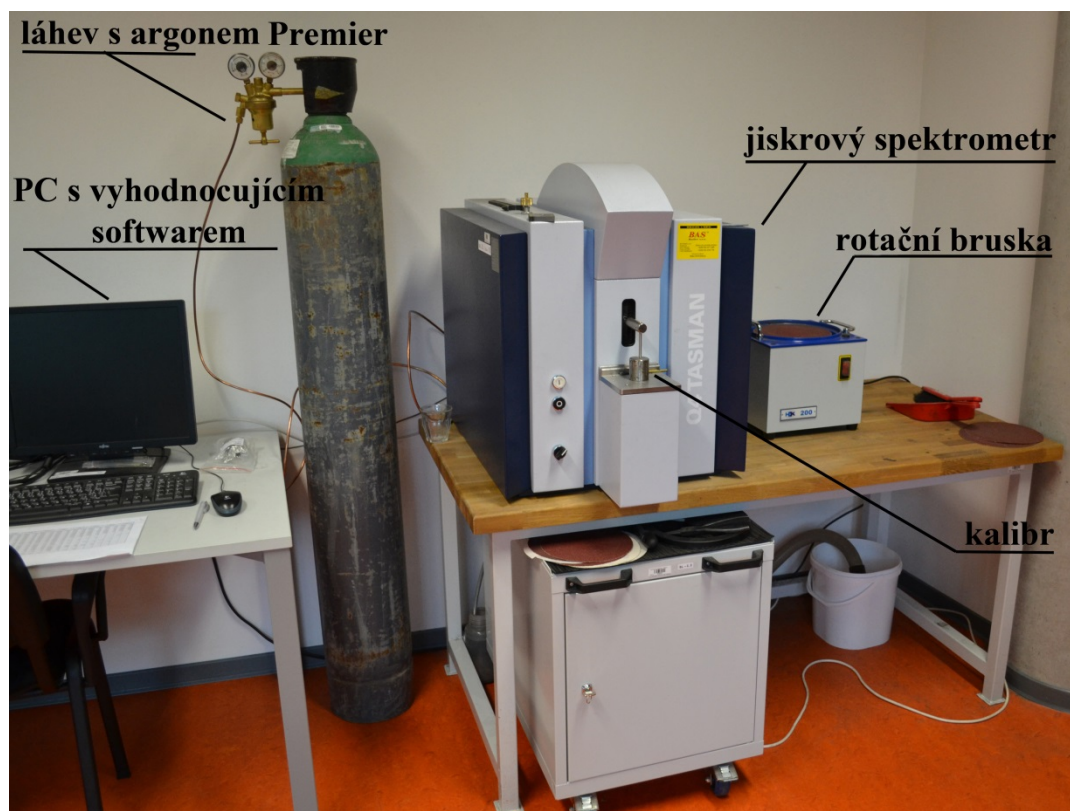
Obrázek 15: Tepelné vodivosti pískové (15.1) a kovové formy (15.2) v závislosti na teplotě z programu MAGMA 5

Pro větší demonstraci rozdílných podmínek v pískové a kovové formě jsem použil grafy závislosti hustoty nebo případně tepelné vodivosti na teplotě, které byly vytvořeny v programu MAGMA 5. Hodnoty pro pískovou formu odpovídají bentonitové směsi. Hodnoty kovové formy se vztahují k materiálu 1.2343. Tyto skutečnosti je možné vidět na obrázcích 14 a 15.

$\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ jako vícekomponentní mosaz krystalizuje po odlití do kovové formy ve tvaru jemných protáhlých zrn, tvořených směsí tuhého roztoku α bohatého na měď (světlá zrna) a tuhého roztoku β bohatého na zinek (tmavé oblasti). Oproti tomu po odlití do pískové formy krystalizuje ve tvaru hrubších protáhlých zrn.

3.2. Analýza chemického složení pomocí spektrometru

Pro přesnou analýzu chemické struktury vzorku $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ odlévaného do pískové formy posloužil stolní jiskrový optický emisní spektrální analyzátor Q4 Tasman (výr. Bruker), který můžeme vidět na obrázku 16. Po zapnutí stroje bylo nejprve nutné vyčkat pro vyrovnaní teplot z důvodu přesného měření. Za tímto stejným účelem došlo k ručnímu čištění stativu a k čistícímu cyklu pomocí čistého argonu Premier, který se vyznačuje vysokou čistotou přes 99%. Ten ve stroji také působí jako inertní plyn. Následně byla nutná kalibrace pro materiály s převahou mědi, která zahrnovala volbu vhodného kalibru a výměnu elektrody pro námi měřený materiál. Ještě před samotnou kalibrací byla zvolena metoda Cu120 se zpřesněním Cu-Zn. Toto zpřesnění bylo vhodné z důvodu většího obsahu zinku a tudíž následného přesnějšího měření. Jako výsledek úspěšné kalibrace posloužilo porovnání naměřených hodnot z kalibrace s materiálovými hodnotami pro náš kalibr.



Obrázek 16: Sestava s optickým jiskrovým spektrometrem Q4 TASMAN

Před měřením předcházela příprava vzorku na rotační brusce s brusným papírem. V následném měření bylo provedeno 5 jisker, každá vždy v jiném místě vzorku. Mezi každým měřením bylo nutné čištění elektrody z důvodů přesnosti měření. Vyhodnocení výsledků pomocí softwaru můžeme vidět v tabulce 2.

Tabulka 5: Naměřené hodnoty na optickém jiskrovém spektrometru pro CuZn31MnAl odlitý do pískové formy

	PRVKY [%]							
	Cu	Zn	Mn	Al	Fe	Ni	Pb	Sn
1. měření	60,34	35,41	1,103	1,074	0,214	0,243	0,766	0,772
2. měření	59,84	35,89	1,121	1,068	0,215	0,24	0,792	0,754
3. měření	60,06	35,74	1,126	1,061	0,203	0,237	0,736	0,756
4. měření	60,18	35,6	1,121	1,054	0,209	0,24	0,76	0,75
5. měření	60,7	35,05	1,129	1,073	0,206	0,239	0,766	0,751
\bar{x}	60,2	35,54	1,12	1,066	0,209	0,24	0,764	0,757
σ	0,323	0,325	0,01	0,0085	0,0051	0,0022	0,02	0,0089
v	0,523	0,914	0,893	0,797	2,44	0,917	2,613	1,176

3.3. Metalografické hodnocení vzorků

[10]

Metalografie je obor, věnující se zkoumání vnitřní struktury materiálů a dává tak celkový obraz o jejich vlastnostech a vzájemném vztahu mezi vlastnostmi – strukturou – technologií. Je to věda, která pojednává o vnitřní stavbě kovů nebo slitin a můžeme ji rozdělit do těchto dvou částí: na přípravu metalografických vzorků a na studium struktury. Je to tedy vědní obor, kde pomocí mikroskopů sledujeme mikrostrukturu studovaného materiálu. Ta je dána jeho složením a zpracováním a značně nám ovlivňuje vlastnosti a chování materiálu. Pro pochopení struktury jsou nutné znalosti procesů, kterými různé procesy vznikají. To pomáhá odhalit věda, která se nazývá fyzikální metalurgie. Tato věda poskytuje vysvětlení toho, co se děje uvnitř materiálu během různých výrobních nebo provozních procesů.

Každá příprava metalografického vzorku by měla postupně projít těmito jednotlivými etapami a to v tomto pořadí: volba místa odběru vzorku, odběr vzorku, zalití vzorku, značení, broušení a leštění. V případě nedostatečné kvality povrchu pro detailnější pohled do struktury následuje krok leptání vzorku.

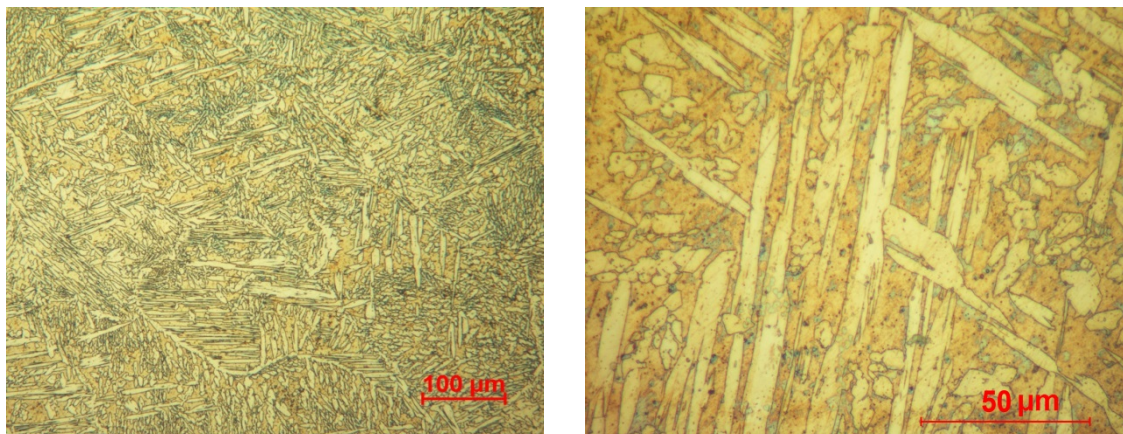
Volba místa odběru vzorku byla volena tak, aby vystihla charakter struktury. Při dělení vzorku od celku bylo myšleno na to, aby nešlo k mechanickému ani tepelnému ovlivnění struktury. Mohlo by tak dojít k tzv. spálení vzorku. Dělili jsme tedy za optimální rezné rychlosti a dostatečného chlazení místa dělení. Po dělení bylo nutné vzorky označit, aby nedošlo k jejich záměně. Pro lepší manipulaci se vzorkem při dalších operacích jsme vzorky zalili do Dentakrylu.



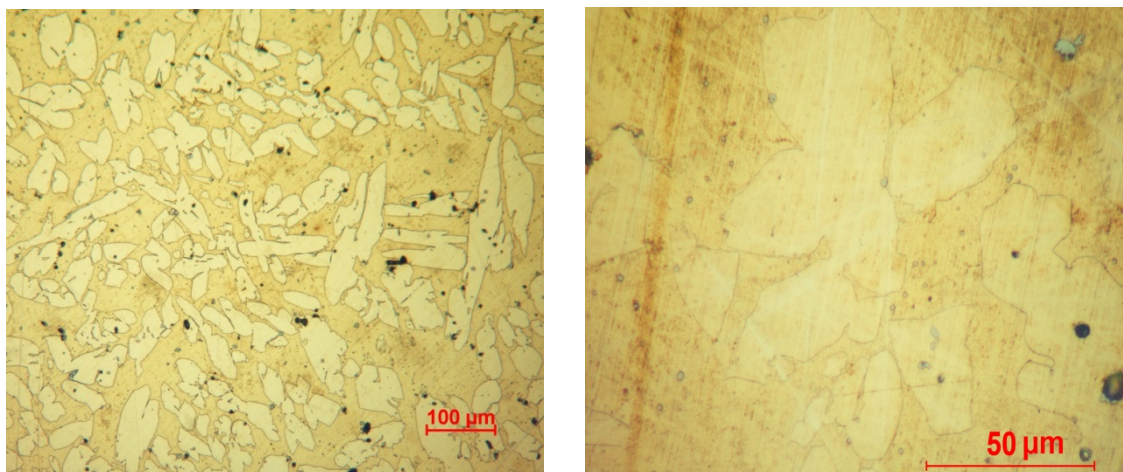
Obrázek 17: *Strojní broušení vzorků strojem Phoenix 4000*

Obrázek 17 demonstruje následující proces strojního broušení, jehož cílem je postupně odstranit pásmo deformací způsobené dělením a dosáhnout rovinného povrchu vzorku s minimem poškození, které se následně odstraní leštěním. V našem případě byly při broušení použity kotouče s hrubostí 120, 240, 400 a 600. Vzorky byly umístěny do brousící hlavy, která se při broušení otáčí ve stejném smyslu jako brusný kotouč. Pro lepší kontakt vzorku s kotoučem na vzorek působí síla přidržovače, kterou je možno plynule měnit. Dále je nutné zmínit vznik Beilbyho vrstvy, která značně ovlivňuje původní strukturu. Čím vyšší tlak a rychlost, tím vyšší teplota od tření a na povrchu vzorku vzniká tlustší deformovaná vrstva. Pro odstranění Beilbyho vrstvy se používá intenzivní chlazení vodou. Podobu vzorků je možné vidět na obr. 26.

Po poslední fázi přípravy vzorku, kterou bylo leptání ve směsi HNO_3 s destilovanou vodou v poměru 1:1, byly vzorky vyfoceny na světelném mikroskopu Neophot 21 propojeným s digitální kamerou Nikon DS-L1 se stonásobným a pětisetnásobným zvětšením, jak je patrné z obrázků 18 a 19.



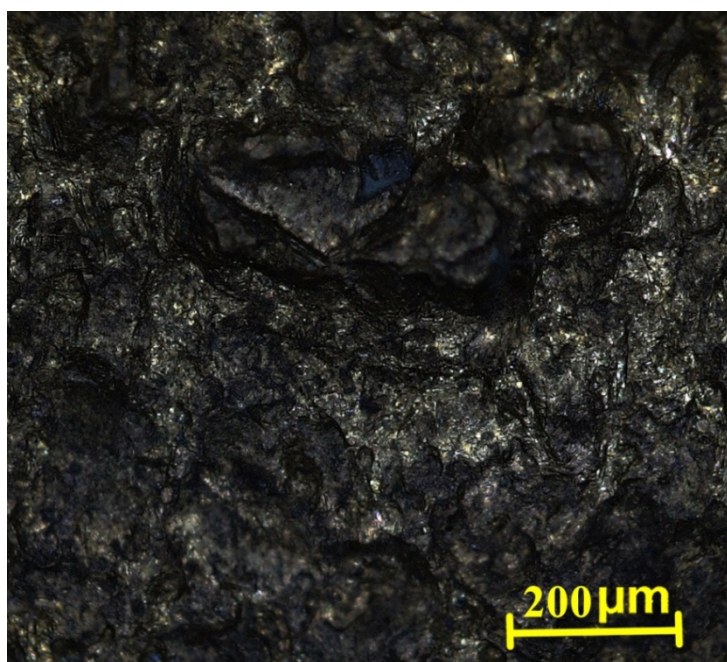
Obrázek 18: Vzorek odlitku $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ do kovové formy při zvětšení 100x a 500x



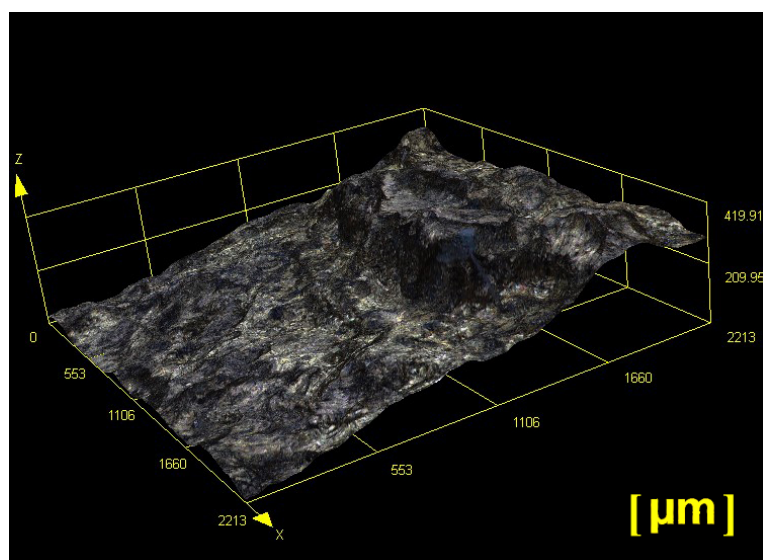
Obrázek 19: Vzorek odlitku $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ do pískové formy při zvětšení 100x a 500x

3.3.1. Pozorování vzorků

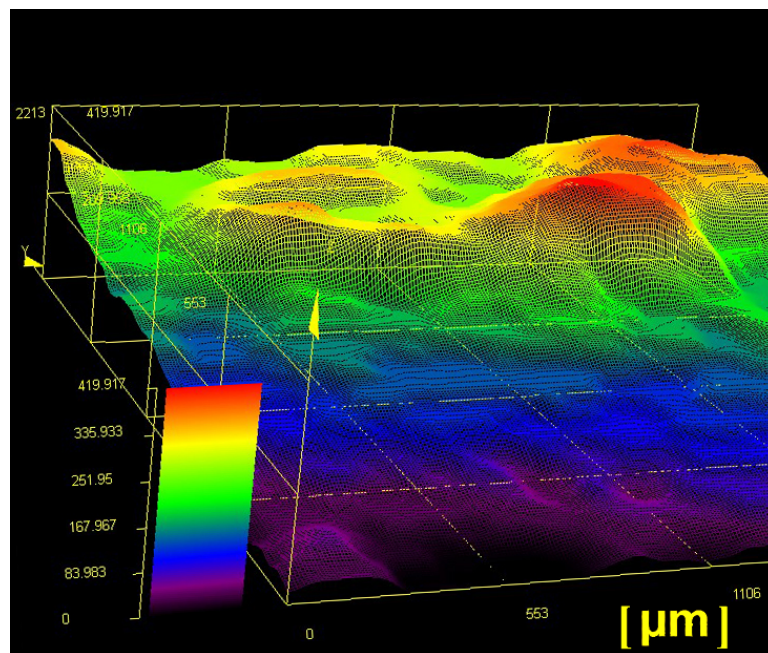
V práci bylo využito světelného mikroskopu Olympus DSX 500. Díky němu bylo možné nasnímat jedno konkrétní místo povrchu odlitku do pískové formy při pohledu shora (obrázek 20), v 3D modelu vytvořeném tímto mikroskopem (obrázek 21) nebo v pohledu drátového modelu (obrázek 22). Můžeme si tak povšimnout vrásčitosti povrchu, kde se dostáváme až k hodnotám hloubky jednotlivých vrásek okolo 400 μm , což je i patrné například z osy Z v obrázku 21.



Obrázek 20: 2D snímek povrchu odlitku $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ do pískové formy

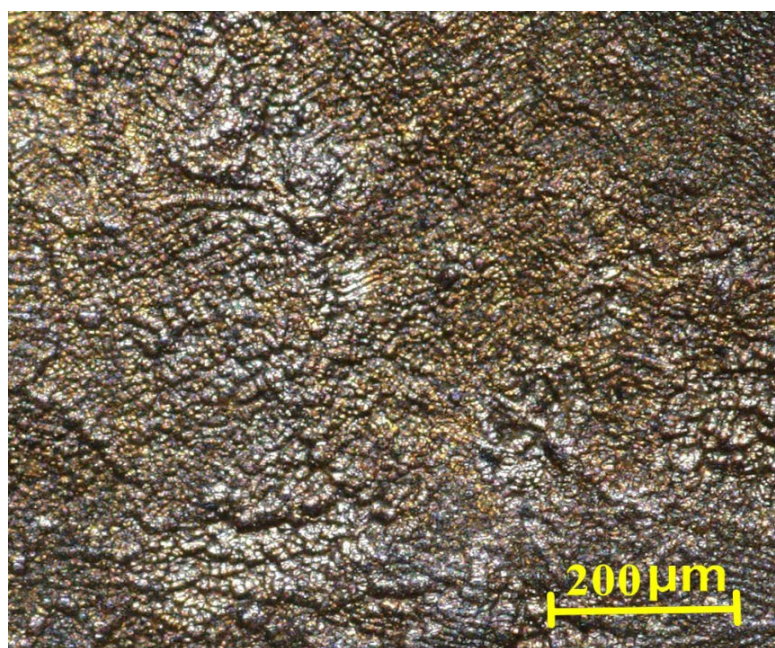


Obrázek 21: 3D snímek povrchu odlitku $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ do pískové formy

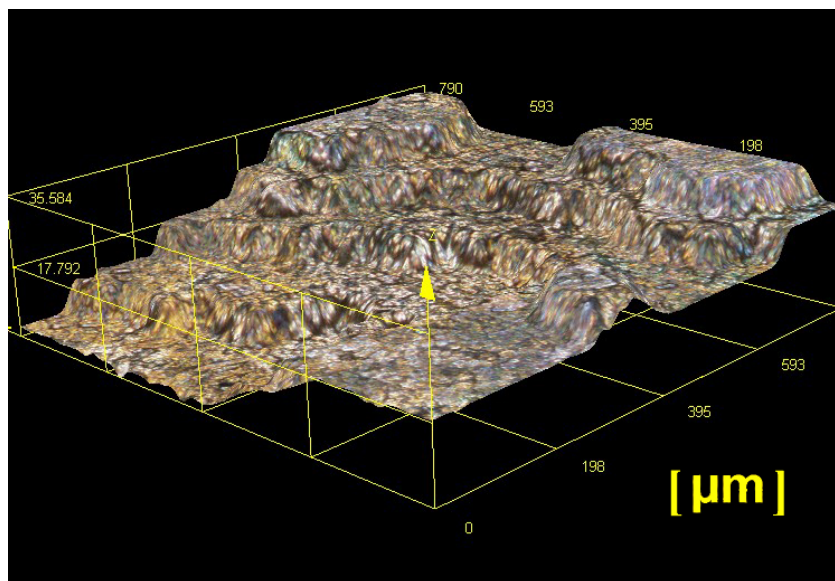


Obrázek 22: Drátový model povrchu odlitku $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ do pískové formy

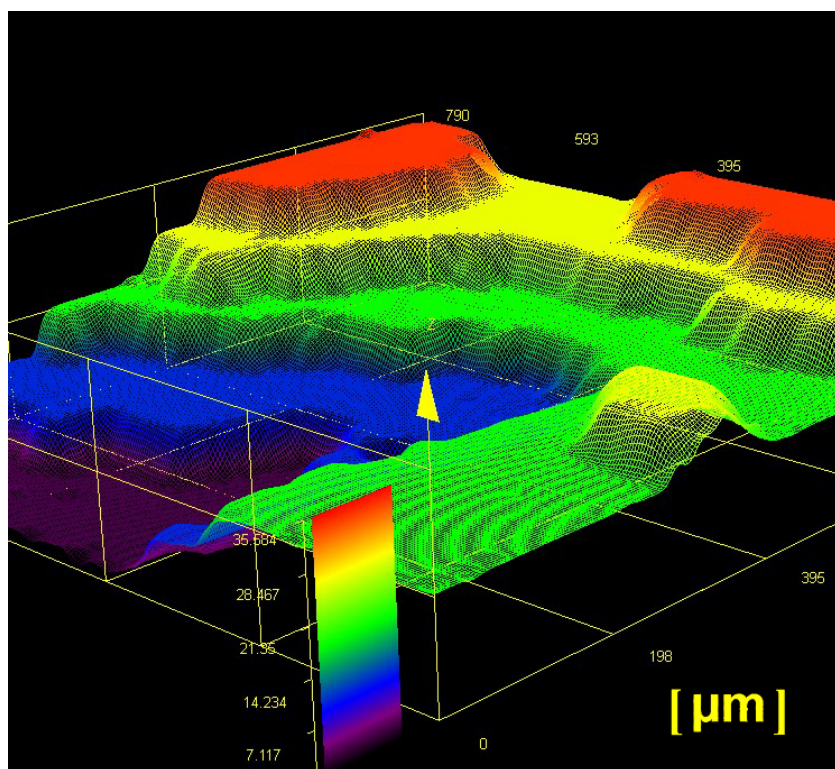
Stejné technologie pozorování a postupu bylo využito i u sledování povrchu odlitku $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ do kovové formy. Snímky z tohoto pozorování se nachází na obrázcích 23., 24. a 25. Můžeme si tak povšimnout výrazně jemnější vrásčitosti, kde hloubka jednotlivých vrásek dosahuje až 10x menších hodnot než u formy pískové, což je patrné například z obr. 25.



Obrázek 23: 2D snímek povrchu odlitku $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ do kovové formy



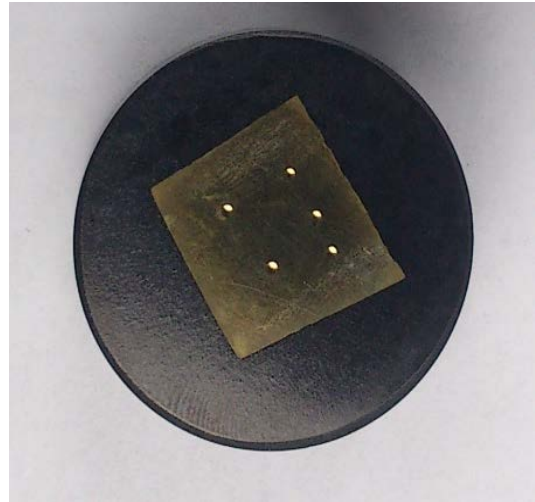
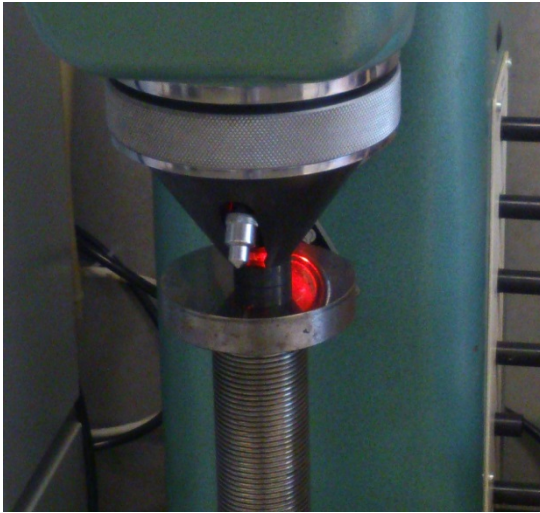
Obrázek 24: 3D snímek povrchu odlitku $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ do kovové formy



Obrázek 25: Drátový model povrchu odlitku $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ do kovové formy

3.4. Měření tvrdosti odlitku

Měření tvrdosti odlitků $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ do kovové a pískové formy bylo provedeno na vzorcích, které nám již posloužily při hodnocení struktury. Využili jsme tedy opracované plochy v řezu pro hodnocení tvrdosti odlitku. Průběh je možno vidět na obr. 26. a 27.



Obrázek 27: Měření tvrdosti podle Brinella Obrázek 26: Vzorek $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ po měření tvrdosti

Pro měření tvrdosti neželezných kovů se při metodě měření podle Brinella používá kulička o průměru 2,5 mm se zatížením 62,5 kp (613 N). Při vyhodnocení provedených vpichů se využívá živého obrazu z kamery umístěné na Brinellově tvrdoměru v kombinaci se softwarem LabNET.CCD. Hodnoty naměřené pro odlitky z kovové a pískové formy můžeme nalézt v tab. 6.

Tabulka 6: Hodnoty tvrdosti pro vzorek $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ odlitý do pískové a kovové formy

Druh formy	Měření					Výběrový průměr tvrdosti HBW	Směrodatná odchylka tvrdosti HBW	Variační konstanta [%]
	1	2	3	4	5			
písková forma	110	106	106	104	103	105,8	2,4	2,27
kovová forma	129	118	127	119	128	124,2	4,71	3,79

3.5. Diskuze

V experimentální části jsem se zabýval slitinou $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$, u které se hojně využívá zvýšené odolnosti proti korozi v atmosféře nebo v mořské vodě. Můžeme jí tak využít jako materiál pro výrobu oběžných kol odstředivých čerpadel (viz. obr. 11), pouzder čerpadel nebo těles hydraulických přístrojů.

Hodnocení vzorků slitiny $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ bylo provedeno s pomocí spektrální analýzy, metalografického rozboru a měřením tvrdosti. Pracovalo se s předpokladem, že kovová forma bude mít větší akumulaci schopnost tepla než forma písková a tomu odpovídají i výsledky jednotlivých měření. Odlitky ve formě pískové tuhnou pomaleji a tím dosahují větší velikosti jednotlivých zrn.

Provedená analýza chemického složení pomocí spektrálního analyzátoru na vzorku $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$ prokázala takové složení, které vyhovuje materiálové normě ČSN 42 3322 [5]. Obsah manganu a hliníku nad 1% tak zvyšuje pevnost materiálu a jeho odolnost proti korozi. Při hodnocení odlitku z pískové formy pomocí mikroskopu Olympus DSX 500 si můžeme povšimnout bublin a odvařením na povrchu odlitku, což bývá způsobeno obsahem vody v pískové formě. Tuto skutečnost dokonale popisují obr. 21. a 22. Z těchto snímků je také vidět, že hloubka trhlin na povrchu pískové formy se pohybuje mezi hodnotami $-200\ \mu\text{m}$ a $+200\ \mu\text{m}$. Kdežto u vrásčitosti povrchu formy kovové se dostáváme k hodnotám od $-20\ \mu\text{m}$ do $+20\ \mu\text{m}$. Při pohledu na metalografický rozbor, který demonstrují obr. 18. a 19., můžeme usoudit, že předpoklad větší akumulace tepla u kovové formy byl správný. U pískové formy dostávají krystaly fáze α podobu hrubších protáhlých zrn s průměrnou šířkou $80\ \mu\text{m}$. Kdežto u formy kovové se krystaly fáze α (světlá místa) formují do tvaru jemnějších protáhlých zrn s průměrnou šířkou $8\ \mu\text{m}$. Fáze β je demonstrována tmavými místy v metalografickém rozboru. Dalším důkazem jemnější struktury a menšího růstu zrn je zkouška tvrdosti jednotlivých odlitků v řezu materiálem. Dle tab. 6 dosahuje odlitek z kovové formy v průměru až o 20 HBW větších hodnot než odlitek z formy pískové.

Všechny tyto skutečnosti zjištěné měřením tak poukazují na vhodnost použití materiálu ve ztížených podmínkách. Vhodnější variantou je však využití odlitku z kovové formy díky vyšším hodnotám tvrdosti a jemnější struktuře.

4. Závěr

Bakalářská práce zpracovaná na téma „Hodnocení krystalizace bronzů při různých podmínkách tuhnutí odlitu“, jež byla vytvořena na základě prostudované literatury, se dělí na část praktickou a část experimentální. Práce tedy byla zaměřena na studium rozdílných podmínek pro tuhnutí bronzového odlitku. Konkrétně byl kladen důraz na rozdílné vlastnosti odlitků z formy kovové a pískové. Zkoušky experimentální části byly provedeny v laboratořích Katedry strojírenské technologie TU v Liberci.

Teoretická část byla zaměřena na rozdělení slitin mědi a jejich jednotlivé studium s důrazem na jejich vlastnosti, chemické složení a využití v praktickém životě. V závěru teoretické části byla rozebrána slitina $\text{CuZn}_{31}\text{MnAl}_1$, se kterou se setkáváme v experimentální části.

Experimentální část se z počátku věnuje výrobě odlitků ze slitiny mědi, která byla odlévána do pískové a kovové formy ve tvaru desky o rozměrech 80x80x10. Částečně bylo využito grafů vytvořených simulačním programem MAGMA 5, které podpořili předpoklad vyšší akumulace tepla u kovové formy. Ta je například možná díky vyšší hustotě materiálu formy. Stěžejní však byly zkoušky provedené přímo na odlitých vzorcích. Jednalo se o zkoušku chemického složení pomocí spektrometru Q4 Tasman, metalografický rozbor a zkoušku tvrdostí provedenou v řezu materiálem.

Důkazy o tvaru a velikosti zrn slitin mědi v závislosti na volbě materiálu licí formy byly nejlépe patrné ze snímku světelného mikroskopu. Velikost zrn u odlitku z pískové formy až desetinásobně větší než u odlitku z formy kovové poukazuje na fakt (viz. obr. 21. A 22.), že písková forma je pórovité těleso. Tudíž nemůže být tak dobrým vodičem tepla jako forma kovová. Bublin a vad povrchu u odlitku do pískové formy si můžeme povšimnout také z 3D snímků mikroskopu Olympus DSX 500.

Výsledky měření tvrdosti jednotlivých odlitků metodou podle Brinella poukazují na delší dobu tuhnutí odlitku v pískové formě a tedy i větší růst samotných krystalů. Tomu odpovídá i výsledek měření tvrdosti v řezu materiálem (viz. tab. 6.), kde odlitek do kovové formy vykazuje průměrnou hodnotu 124,2 HBW, kdežto odlitek z pískové formy dosáhl průměrné hodnoty 105,8 HBW.

Pro další výzkum by bylo vhodné rozšířit rozdílné podmínky odlévání. Například posoudit také variantu s litím do přehřáté kovové formy.

Seznam použité literatury

- [1] GRÍGEROVÁ, Tatiana, Ivan LUKÁČ a Rudolf KOŘENÝ. *Zlievarenstvo neželezných kovov*. Bratislava, 1988. Edícia hutníckej literatúry (Alfa).
- [2] PÍŠEK, František, Ladislav JENÍČEK a Přemysl RYŠ, CENEK, Mojmir a Antonín HRBEK (ed.). *Nauka o materiálu*. 2., zcela přeprac. a rozš. vyd. Praha: Academia, 1973.
- [3] Technická data. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-07-11].
- [4] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu: Speciální kovové materiály*. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04212-0.
- [5] ČSN 42 3322: *Slitina mědi na odlitky pro všeobecné účely - CuZn₃₁MnAl₁*. 1999.
- [6] DAVIS, Joseph R. *Copper and copper alloys*. Materials Park, OH: ASM International, 2001. ISBN 08-717-0726-8.
- [7] *Technická data* [online]. [cit. 2016-09-15]. Dostupné z: www.automatizace.hw.cz
- [8] *Měď* [online]. [cit. 2016-09-21]. Dostupné z: www.prvky.com/29.html
- [9] *Technická data* [online]. [cit. 2016-08-21]. Dostupné z: www.techstroj.g6.cz
- [10] MICHNA, Štefan a Sylvia KUŠMIERCZAK. *Praktická metalografie*. V Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 2012. ISBN 978-80-7414-503-2.
- [11] MICHNA, Štefan, Sylvia KUŠMIERCZAK a Matúš BAJCURA. *Metalografie : metody a postupy*. 1.vyd. Prešov : Adin, 2010. ISBN 978-80-89244-74-4.
- [12] MACHUTA, Jiří a Iva NOVÁ. Monitoring Of Copper Alloys Structures During Solidification And Cooling Of Casting. *Metal*. **2015**.

Přílohy

- 1) Protokol z měření složení – Q4 Tasman

1) Protokol z měření složení – Q4 Tasman

25.7.2016 13:18:05

Atest - Q4 TASMAN

Popis vzorku										
SampleNo	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni	Si	Al	As
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	35.41	0.766	0.772	0.00090	1.103	0.214	0.243	0.058	1.074	0.0033
2.	35.89	0.792	0.754	0.00090	1.121	0.215	0.240	0.055	1.068	0.0029
3.	35.74	0.736	0.756	0.00090	1.126	0.203	0.237	0.054	1.061	0.0031
4.	35.60	0.760	0.750	0.00090	1.121	0.209	0.240	0.053	1.054	0.0031
5.	35.05	0.766	0.751	0.00091	1.129	0.206	0.239	0.056	1.073	0.0030
↑										
□	35.54	0.764	0.757	0.00090	1.120	0.209	0.240	0.055	1.066	0.0031
↓										
σ	0.325	0.020	0.0089	0.00001	0.010	0.0051	0.0022	0.0019	0.0085	0.00015
υ	0.914	2.618	1.176	1.111	0.893	2.440	0.917	3.455	0.797	4.839

	Be	Ag	Bi	Cd	Sb	Cu
	%	%	%	%	%	%
1.	<0.00020	0.013	0.0038	0.0021	0.0055	60.34
2.	<0.00020	0.013	0.0036	0.0023	0.0039	59.84
3.	<0.00020	0.013	0.0038	0.0021	0.0050	60.06
4.	<0.00020	0.013	0.0036	<0.0020	0.0057	60.18
5.	<0.00020	0.013	0.0037	<0.0020	0.0053	60.70
↑						
□	<0.00020	0.013	0.0037	0.0021	0.0051	60.22
↓						
σ			0.00010	0.00012	0.00071	0.323
υ			2.703	5.714	13.92	0.536