

UNIVERZITA PARDUBICE

Dopravní fakulta Jana Pernera

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2014

Ivo Koutník

UNIVERZITA PARDUBICE
Dopravní fakulta Jana Pernera

Hodnocení kvality lehčených odlitků ze slitin hliníku
Ivo Koutník

Bakalářská práce
2014

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ivo Koutník**
Osobní číslo: **D10300**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**
Název tématu: **Hodnocení kvality lehčených odlitků ze slitin hliníku**
Zadávající katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

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

1. Představení procesu lití do kovových forem a související problematiky výroby vybraného druhu odlitků.
2. Teoretický základ výroby lehčených odlitků, aktuální stav technického řešení.
3. Proces řízení kvality lehčených odlitků, představení používaných metod kontroly kvality.
4. Výběr referenční sady vzorků pro metalografické analýzy, návrh metodiky hodnocení kompaktnosti odlitků.
5. Laboratorní analýzy vnitřní stavby vybraných odlitků, zaměření na hodnocení kompaktnosti v definovaných řezech obrazovou analýzou.
6. Souhrnné vyhodnocení výsledků analýz, posouzení morfologických a kvantitativních parametrů pórovitosti v souvislosti s procesem výroby.

Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího diplomové práce

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran textu a přílohy

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

1. Roučka J.: Metalurgie neželezných slitin. VUT Brno, CERM Brno, 2004. ISBN 80-214-2790-6
2. Michna Š. a kol: Encyklopedie hliníku, Adin, s. r. o., Prešov 2005, ISBN 80-89041-88-4
3. Pluhař J., Puškár A., Koutský J., Macek K., Beneš V.: Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu, SNTL/Alfa, 1987
4. Havlíček, F. Teorie slévárenství. Skripta VŠB Ostrava, 1992.
5. Levíček, P., Stránský, K.: Metalurgické vady ocelových odlitků, Praha 1984, 04-415-84

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.

Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání bakalářské práce: 15. února 2013

Termín odevzdání bakalářské práce: 23. května 2013



prof. Ing. Bohumil Čulek, CSc.
děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. února 2013

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Bakalářskou práci jsem zpracoval v souladu s právními normami ČR. Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Pardubicích dne

Ivo Koutník

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval své vedoucí práce prof. Ing. Evě Schmidové Ph.D. za její odbornou pomoc, cenné rady a připomínky, poskytnuté materiály, které mi velmi pomohly při zpracování bakalářské práce.

Zároveň bych chtěl velice poděkovat pracovníkům technického a výrobního úseku společnosti Slévárna a modelárna Nové Ransko, s.r.o. za poskytnuté informace a vzorky z praktických zkoušek s kovovými pěnamí.

Anotace

Bakalářská práce je zaměřena na studium vnitřní stavby lehčených odlitků z litých materiálů. Teoretická část je orientována na základní charakteristiku a využití odlitků kovových pěn v nejrůznějších odvětvích průmyslu. Předmětem vlastní experimentální práce je laboratorní hodnocení odlitků kovových pěn třech různých materiálů - hliníkové slitiny, cínového bronzu a šedé litiny. Hodnocení bylo zaměřeno na studium strukturní homogenity odlitků, především pod vlivem rozdílů tloušťky stěny. Metodicky se praktická část práce opírá o metalografické analýzy za podpory obrazové analýzy. Součástí práce bylo hodnocení případné chemické heterogenity studovaných variant provedení kovových pěn.

Klíčová slova

Kovové pěny, lehčené odlitky, gravitační lití kovových pěn, řízená pórovitost odlitků.

Název

Hodnocení kvality lehčených odlitků ze slitin hliníku

Annotation

The thesis is focused on the study of the internal structure of lightweight cast alloy materials. The theoretical part is focused on basic characteristics and use of casting metal foams in various industries. The subject of this own experimental work is a laboratory evaluation of castings of metal foams of three different materials - aluminium alloys, tin bronze and cast iron. The evaluation is focused on the study of structural homogeneity castings, mainly under the influence of differences in wall thickness. Methodically, the practical part of the work is based on metallographic analysis support for image analysis. Part of this work was to evaluate the possible chemical heterogeneity of the studied variants of metal foams.

Key words

Metal foams, porous castings, gravity die casting metal foams, controlled porosity castings.

Title

Evaluation of quality lightweight aluminium alloy castings

Obsah

1	Úvod	9
2	Kovové pěny	10
2. 1.	Vysvětlení pojmu kovová pěna	10
2. 2.	Vznik kovové pěny	10
2. 3.	Použití kovových pěn	13
2. 3. 1.	Lehké konstrukce.....	14
2. 3. 2.	Absorpce nárazové energie.....	14
2. 3. 3.	Tlumení zvuku a vibrací, tepelné vlastnosti	15
2. 3. 4.	Další možnosti použití.....	15
2.4.	Možnosti hodnocení kvality odlitků	16
3	Představení analyzovaných materiálů	18
3. 1.	Silumin	18
3. 2.	Cínový bronz	19
3. 3.	Šedá litina	21
4	Analýzy vybraných provedení kovových pěn.....	23
4.1.	Referenční sada vzorků	23
4.2.	Příprava vzorků, použité metody hodnocení	24
4.3	Výsledky analýz vzorku siluminu	26
4.4	Výsledky analýz vzorku cínové bronzy.....	28
4.5	Výsledky analýz vzorku šedé litiny	30
4.6	Chemické mikroanalýzy	38
4. 6. 1.	Chemické mikroanalýzy siluminu	38
4. 6. 2.	Chemické mikroanalýzy cínové bronzy	43
4. 6. 3.	Chemické mikroanalýzy šedé litiny	44
5	Závěr	45
6	Použitá literatura	46

Seznam obrázků

Obr. 1: Nepravidelné uspořádání dutin kovové pěny v odlitku [1].....	11
Obr. 2: Model pro pravidelné uspořádání dutin kovové pěny v odlitku [1].....	11
Obr. 3: Jaderník	12
Obr. 4: Hotová jádra CB amin.....	12
Obr. 5: Aplikační možnosti vyztuženého pěnového hliníku [2].....	13
Obr. 6: Vlevo: Sendvičový panel z hliníkové pěny. [3]	14
Obr. 7: Použití hliníkové pěny pro deformační zóny automobilů [4]	14
Obr. 8: Konstrukce tlumící hluk na spodní části	15
Obr. 9: Tlumiče z pěnového hliníku [3]	15
Obr. 10: Tlaková práce plného vzorku [11]	16
Obr. 11: Tlaková práce vzorku s pravidelnou geometrií pórů[11].....	16
Obr. 12: Vzorky siluminu, šedé litiny a bronzu[12].....	17
Obr. 13: Pevnosti v tlaku, červená silumin, modrá šedá litina, zelená bronz [12]	17
Obr. 14: Binární diagram hliník-křemík [5]	19
Obr. 15: Vliv očkování siluminu [5]	19
Obr. 16: Binární diagram měď-cín [5]	20
Obr. 17: Binární diagram železo-uhlík [6]	22
Obr. 18: Naznačení řezu siluminem	23
Obr. 19: Naznačení řezu bronzem	23
Obr. 20: Naznačení řezu litinou.....	24
Obr. 21: Pásová pila s chladicí emulzí	24
Obr. 22: Vzorek siluminu	25
Obr. 23: Vzorek bronzu	25
Obr. 24: Vzorek litiny.....	25
Obr. 25: Mikrostruktura silumin, neleptáno, 25x	27
Obr. 26: Mikrostruktura silumin, neleptáno, 25x	27
Obr. 27: Hliník struktura silné části,leptáno, 10 % NaOH, 100x	27
Obr. 28: Hliník struktura můstku, leptáno, 10 % NaOH, 100x	27
Obr. 29: Mikrostruktura bronzu v silné části.....	29
Obr. 30: Mikrostruktura bronzu v můstku.....	29
Obr. 31: Bronz, leptáno, 10% hydroxidem železa, 25x.....	29
Obr. 32: Bronz detail s eutektoidní fází, leptáno, 10% hydroxidem železa, 1000x	29
Obr. 33: Bronz, struktura silná část, leptáno 10% hydroxidem železa, 250x.....	30
Obr. 34: Bronz, struktura můstku, leptáno, 10% hydroxidem železa, 250x.....	30
Obr. 35: Mikrostruktura litiny zvětšení 25x	31
Obr. 36: Mikrostruktura litiny zvětšení 25x	31
Obr. 37: Očíslování přechodových částí	31
Obr. 38: Naznačení místa zvětšení, leptáno Nital, 25x	34
Obr. 39: Struktura zvětšeného výřezu, neleptáno, 200x.....	34
Obr. 40: Naznačení místa zvětšení, leptáno Nital, 25x	34
Obr. 41: Struktura zvětšeného výřezu, neleptáno, 250x.....	34

Obr. 42: Naznačení místa zvětšení, leptáno Nital, 25x	35
Obr. 43: Struktura zvětšeného výřezu, leptáno Nital, 100x.....	35
Obr. 44: Naznačení místa zvětšení, leptáno Nital, 25x	35
Obr. 45: Struktura zvětšeného výřezu, neleptáno, 500x.....	35
Obr. 46: Struktura zvětšeného výřezu, leptáno Nital, 100x.....	36
Obr. 47: Struktura zvětšeného výřezu, neleptáno 500x.....	36
Obr. 48: Struktura silné části, leptáno Nital, 100x	36
Obr. 49: Struktura můstku, leptáno Nital, 100x	36
Obr. 50: Silná část šedé litiny.....	37
Obr. 51: Můstek šedé litiny	37
Obr. 52: Můstek šedé litiny, detail	37
Obr. 53: Naznačení třech vybraných míst ve vzorku siluminu	38
Obr. 54: Graf vyhodnocení EDX analýzy, žlutě označené místo.....	39
Obr. 55: Graf vyhodnocení EDX analýzy, bíle označené místo	40
Obr. 56: Graf vyhodnocení EDX analýzy, červeně označené místo.....	41
Obr. 57: Vybrané místo vzorku siluminu	41
Obr. 58: Graf vyhodnocení analýzy EDX	41
Obr. 59: Série snímků pro identifikaci rozložení jednotlivých prvků v siluminu	42
Obr. 60: Vybrané místo vzorku cínové bronzy	43
Obr. 61: Graf vyhodnocení analýzy EDX	43
Obr. 62: Série snímků pro identifikaci rozložení jednotlivých prvků bronzy.....	43
Obr. 63: Vybrané místo vzorku šedé litiny	44
Obr. 64: Graf vyhodnocení analýzy EDX	44
Obr. 65: Vybrané místo vzorku šedé litiny a graf s průběhem množství prvků ve vzorku.	44

Seznam tabulek

Tab. 1: Chemické složení slitiny Al-Si referenčního vzorku dle normy	26
Tab. 2: Chemické složení slitiny Al-Si referenčního vzorku spektrální analýzou	26
Tab. 3: Chemické složení housek pro tavbu bronzy Cu-Sn	28
Tab. 4: Upravené chemické složení bronzy Cu-Sn	28
Tab. 5: Upravené chemické složení bronzy Cu-Sn	28
Tab. 6: Chemické složení šedé litiny referenčního vzorku spektrální analýzou	30
Tab. 7: Výsledky analýzy EDX.....	39
Tab. 8: Výsledky analýzy EDX.....	40
Tab. 9: Výsledky analýzy EDX.....	41

1 Úvod

Tato práce pojednává o výrobě lehčených odlitků, vyrobené se záměrně definovanou porezitou. V práci se porovnávají zatím dostupné tři vzorky z různých materiálů. Vybranými materiály jsou: cínová bronz, slitina hliníku s křemíkem a litina s lupínkovým grafitem. Pomocí metalografie se porovnává struktura materiálu v okrajové kůře a ve vnitřní mřížce mezi dutinami ve tvaru kuliček. Porovnáním pořízených struktur jsou zjišťovány změny mezi silnější okrajovou stěnou a vnitřními velmi tenkými „můstky“.

Kovové porézní materiály jsou využívány pro snižování hmotnosti jednotlivých odlitků a to aniž by byly negativně ovlivněny jejich očekávané užité vlastnosti. Porézności materiálu se dosahuje uměle různými postupy (naplyňováním, plněním organickými nebo anorganickými prekursory). Prekursory jsou vžitým názvem pro částice, kterými jsou dutiny kovových pěn vytvořeny.

V praktické části této práce jsou vybrány tři vzorky odlitků kovových pěn s pravidelným vnitřním uspořádáním. Společnost Slévárna a modelárna Nové Ransko, s.r.o. poskytla skupiny vzorků z uvedených materiálů.

2 Kovové pěny

2.1. Vysvětlení pojmu kovová pěna

Kovové pěny a porézní kovy ve své struktuře materiálu obsahují záměrně vytvořené dutiny (póry). Pojem *porézní kov* je obecným označením materiálu s velkou pórovitostí. Pojmem *kovová pěna* označujeme porézní kov se záměrně vytvořenými dutinami, pravidelně nebo nepravidelně uspořádanými. V této problematice se můžeme setkat ještě s dalším pojmem, spíše historickým, *kovová houba* používaný pro vysoce porézní kov s makroskopickými vměstky a plynovými dutinami. U kovových pěn dochází k tomu, že póry jsou obvykle různé (dle použité technologie a částic tvořících dutiny tzv. prekursorů) propojeny. Ovšem pojem kovová pěna se i v odborné literatuře používá jako obecné označení porézního kovu bez ohledu na to, jakou technologií byly póry vytvořeny a zda jsou dutiny uspořádány pravidelně nebo nepravidelně. [2]

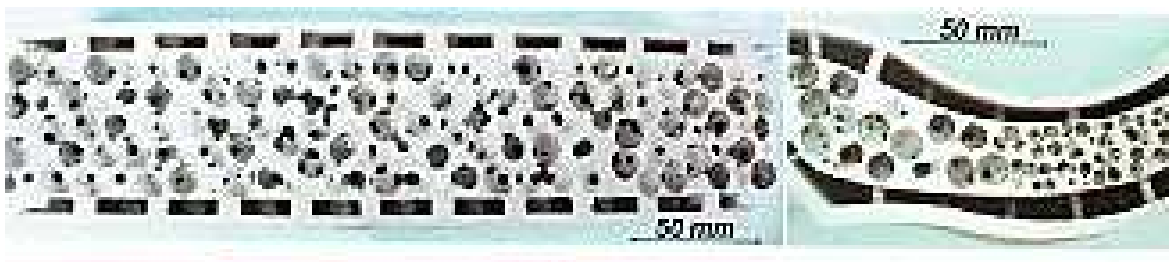
Kovové pěny se zatím v České republice nevyrábí. Záměrem výzkumu kovových pěn v ČR je zvládnutí způsobu výroby v běžných slévárenských podmínkách. Cílem je vyhotovit i odlitky složitějších tvarů bez zbytečného použití dodatečného tváření, sváření a obrábění. [3]

2.2. Vznik kovové pěny

Myšlenka porézních kovů se objevila již v minulém století a to v sedmdesátých letech. První snahy o vylehčení kovových konstrukcí se neshodovaly s pojmem kovové pěny.

Při návrhu odlehčených odlitků litinových frém obráběcích strojů, se problematikou zabýval také prof. Vetiška z FS VUT Brno. Podmínky v této době nebyly odpovídající pro výzkum. Princip tohoto odlehčení spočíval v návrhu vytvořit odlitek se ztuhlou kůrou (kolumnární pásma). Po té by se zbytek tekutého kovu z formy vyprázdnil a zůstala by vrstva ztuhlé kůry a ve stěnách by byly pouze dendrity základní kovové hmoty. Princip by bylo možné aplikovat pomocí technologie nízkotlakého lití s předčasným poklesem tlaku ve stoupačích trubici. Zbytek tekutého kovu by opustil odlitek. [2]

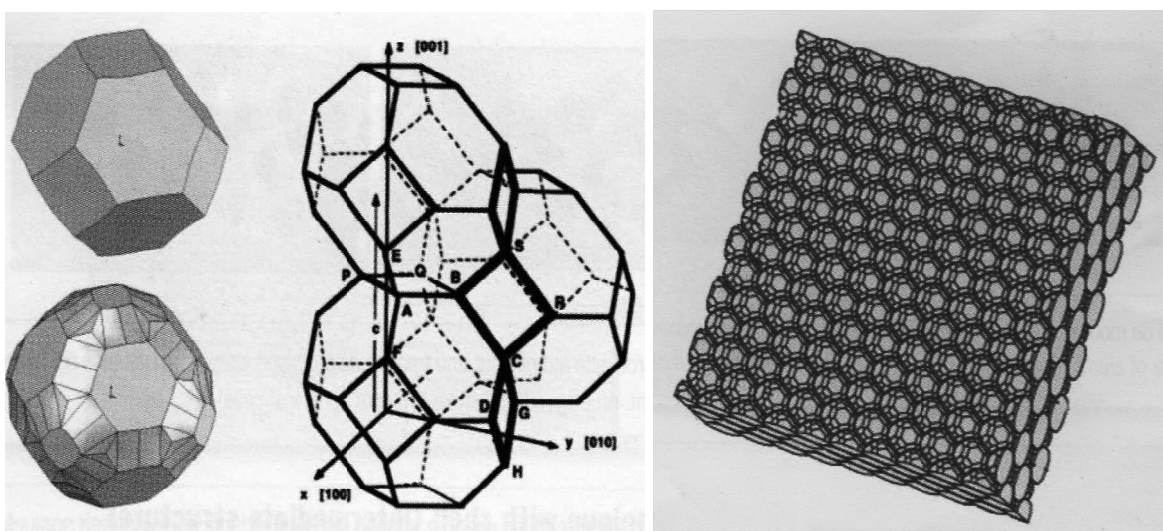
Inspirace pro další vývoj kovových pěn byla nalezena v přírodě z různých přírodnin s pórovitostí. Těmito přírodninami byly (stonky, dřevo, tufy korály, obsidián, pemza, apod.). V těchto materiálech póry vznikly přirozenou cestou. V použití pro lehčené odlitky se nahodily póry daly poměrně lehce vytvořit. Plyn, uvolněný řízenou reakcí v tavenině zůstal při tuhnutí a vytvořil pórovitost. Jiný postup pro vytvoření pórů bylo použití materiálů, které se odpařily nebo vyhořely (organické prekurzory). Další z možností je použití anorganických prekurzorů (keramická tělíska, písková jádra). Tyto postupy lze v praxi použít v případech, kdy nezáleží na rozmístění, tvaru a velikosti výsledných pórů (**Obr. 1**). Po zatížení by se mohl odlitek zhroutit, protože by pod povrchovou kůrou vznikl pór nežádoucích rozměrů, který by neměl oporu ve zbytku materiálu. [11]



Obr. 1: Nepravidelné uspořádání dutin kovové pěny v odlitku [1]

V posledních letech se přišlo s nápadem využít definovanou pórovitost pomocí pískových jader a tím zamezit nepravidelným shlukům pórů a mít v každém místě pod povrchovou kůrou pravidelné geometrické uspořádání dutin.

V současnosti se provádějí experimenty s pravidelným geometrickým uspořádáním dutin v laboratorní slévárně VŠB Ostrava a v provozech sléváren v Novém Ransku. Vytvoření dutin je zajištěno pískovými jádry. Odlitky s definovaným rozmístěním jader (*Obr. 2.*) a následně vzniklých pórů jsou lehčí a to aniž by byly negativně ovlivněny jejich mechanické vlastnosti



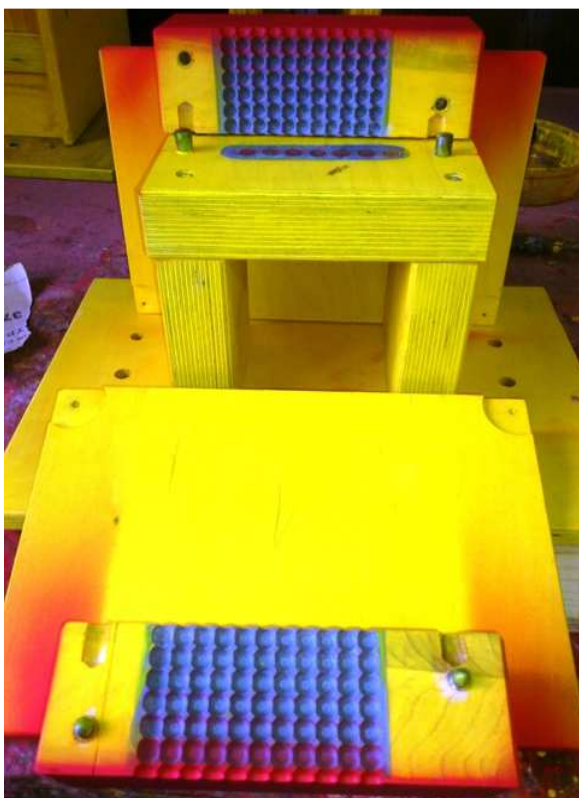
Obr. 2: Model pro pravidelné uspořádání dutin kovové pěny v odlitku [1]

Zavedení technologie lití kovových pěn do sléváren v běžných provozních podmínkách vyžaduje jednoduchý a ekonomicky přijatelný pracovní postup.

Z prvních prováděných experimentů vyplývá naděje, že tato aplikace se podaří vyvinout. Jako schůdná možnost se pak nabízí odlévání kovových pěn se srovnatelnými nebo lepšími vlastnostmi než mají dílce z kompaktních kovových i nekovových materiálů. Kovové pěny jde využít také k odlití kovových filtrů, ovšem tato metoda je kvůli technologickému hledisku složitější a vyžaduje, prozatím, odlévání do forem za podtlaku, protože musí kov zaběhnout do velmi subtilních stěn buněk filtru. Laboratorní slévárna VŠB Ostrava připravuje výrobu série filtrů v provozních podmínkách snadnějšími postupy než doposud. Kombinace filtru a odlitku ze stejného kovu se nabízí jako kombinace pro odlití

experimentálních vzorků velmi lehkých odlitků. Zkoušky probíhají na odlitcích s definovanou geometrií vnitřních dutin (kuličky \varnothing 9,6 mm se šesti dotykovými ploškami). [4]

Odlitky s dutinami ve tvaru kuliček s dotykovými ploškami jsou vhodné pro použití jako výměníků tepla, protože mají velkou vnitřní stykovou plochu. Ve společnosti byl zhotoven jaderník (*Obr. 3.*) na výrobu těchto jader. Jádra byla vyhotovena vstřelováním CB aminové směsi (*Obr. 4.*).



Obr. 3: Jaderník



Obr. 4: Hotová jádra CB amin

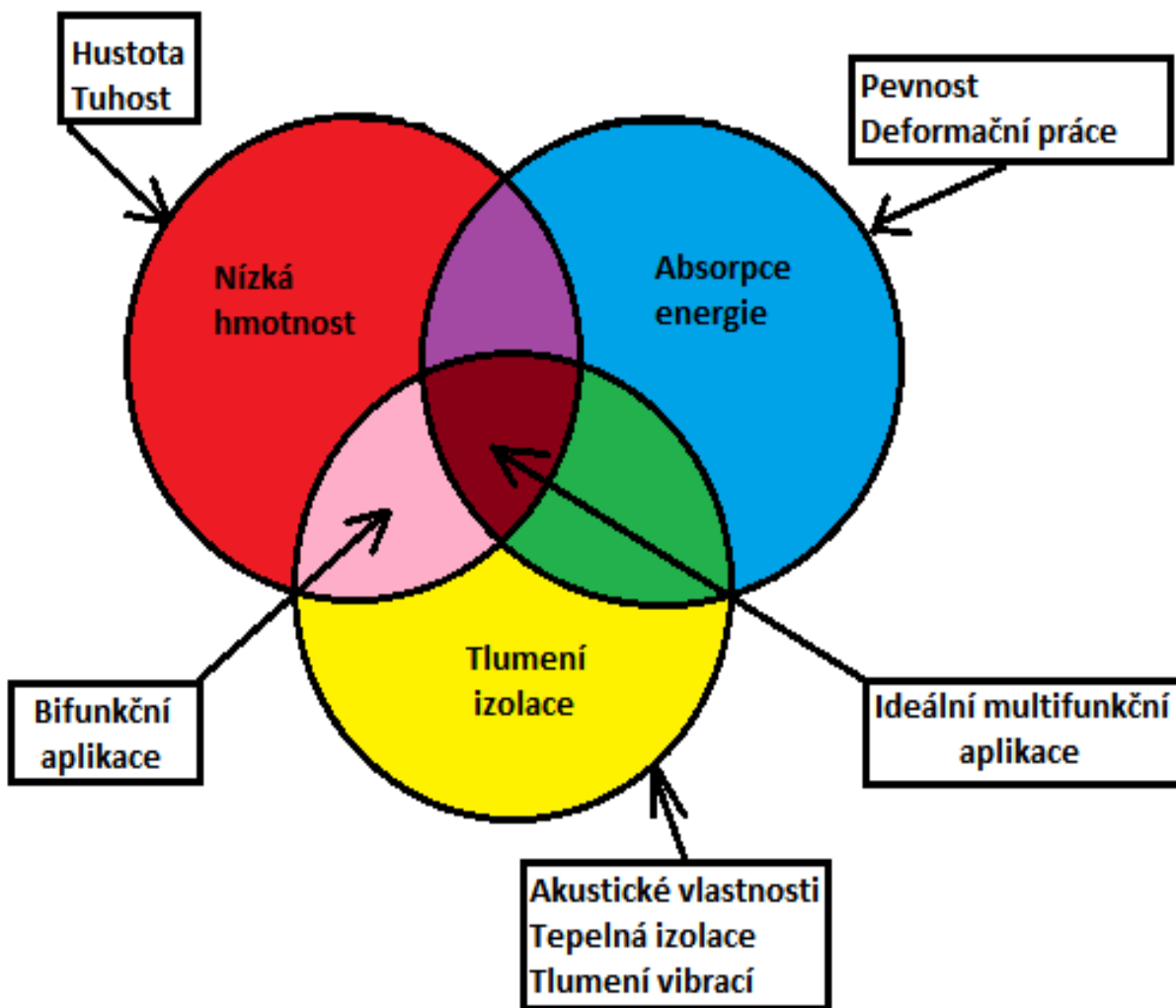
Zhotovení jaderníku proběhlo do dřevěného rámu zalitím plastového modelu (3D tisk VŠB) jádra se 66 celými kuličkami (*Obr. 4.*). Model jádra byl vytištěn z termoplastu akrylonitril-butadein-styrenu.

Použitá technologie pro výrobu jader se jmenuje Cold Box amin. Tato technologie používá dvousložkový pojivový systém (směs ostřiva, benzyetherpolyolu a difenylmethan-4-4-diisokyanátu). Směs se připravuje nad strojem v lopatkovém misiči a je vedena samospádem nad jaderník a po té je vstřelena do jaderníku. Vytvrzování probíhá za studena.

Jádro je profouknuto terciálním aminem, který má úlohu katalyzátoru a vznikne pískové jádro, pojené polyuretanovou pryskyřicí. Jádra jsou skládána na sebe nebo vedle sebe s dotykem mezi jednotlivými jádry. Kuličky se mezi sebou dotýkají ploškami o průměru 4,0 mm. [4]

2. 3. Použití kovových pěn

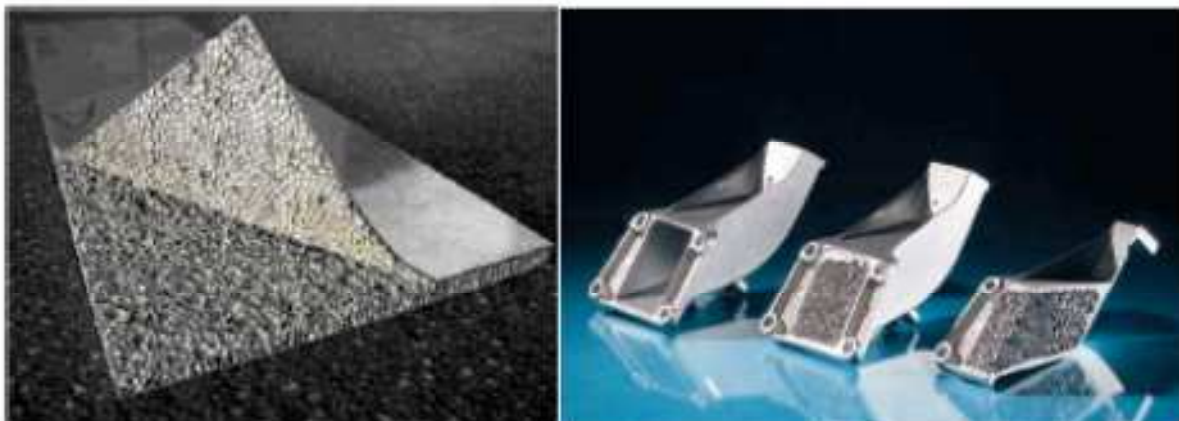
Hliník a jeho slitiny se nejčastěji používají pro výrobu kovových pěn. Výhodou těchto materiálů je nízká hustota ($\sim 2700 \text{ kg.m}^{-3}$) a nízká teplota tání (660°C). Hliník a jeho slitiny mají dobré mechanické vlastnosti. Tyto materiály vykazují dále dobré vlastnosti při pohlcování nárazové energie, nehořlavosti, tlumící schopnosti a recyklovatelnosti. Výhodou je tedy využít většího množství jeho kladných vlastností současně. (Obr. 5). [11]



Obr. 5: Aplikační možnosti vyztuženého pěnového hliníku [2]

2. 3. 1. Lehké konstrukce

V této oblasti lze očekávat široké uplatnění kovových pěn ze slitin hliníku. Ovšem navrhnutí takové součásti vyžaduje velice citlivý přístup. V místech součásti, u kterých je očekáváno vysoké namáhání, se tato místa doplní o výztuhy, případně se pozmění tvar dané součásti, je-li to možné. Výhodou kovové pěny je při snížené hmotnosti vysoká tuhost a tlumící schopnost. Kovová pěna poslouží jako výplň sendvičového panelu nebo výplň nosných konstrukcí (**Obr. 6.**) [5]



Obr. 6: Vlevo: Sendvičový panel z hliníkové pěny. [3]

Vpravo: Držák motoru pro BMW (zleva: dutý odlitek, odlitek s pěnovou výplní, řez odlitkem)

2. 3. 2. Absorpce nárazové energie

Kovové pěny jsou kvůli své vysoce pórovité struktuře schopny pohlcovat při deformaci velké množství energie. Tato vlastnost je vynikajícím předpokladem k použití v deformačních zónách dopravních prostředků a zařízení podél komunikací (**Obr. 7.**). Při vyztužení korundovou keramikou se zvýší odolnost proti proniknutí projektilů z palných zbraní. Tento jev umožní použití v lehkém pancéřování vojenské techniky a vládních vozidel. V praxi tato metoda není zatím používána. [5]



Obr. 7: Použití hliníkové pěny pro deformační zóny automobilů [4]

2. 3. 3. Tlumení zvuku a vibrací, tepelné vlastnosti

Kovové pěny mají dobrou schopnost tlumení vibrací a absorpci hluku. V dopravním stavitelství jsou používány v konstrukci mostu jako tlumič vibrací a hluku (**Obr. 8.**). Na (**Obr. 9.**) jsou znázorněny další varianty tlumičů hluku. [11]



Obr. 8: Konstrukce tlumičů hluku na spodní části mostu [4]



Obr. 9: Tlumiče z pěnového hliníku [3]

Kovová pěna ze slitiny hliníku s otevřenými póry je dále vhodná pro použití ve výměnících tepla, vzhledem k vysoké hodnotě tepelné vodivosti, velkému povrchu a dobré korozní odolnosti. Pěna s uzavřenými póry má nízkou tepelnou vodivost a je proto dobrá pro konstrukci tepelných štítů a izolátorů. I přesto, že kovová pěna ze slitiny hliníku má horší zvukoizolační vlastnosti než polymerní pěny, najde své využití spíše tam, kde bude třeba zvýšené tuhosti nebo také zaručené nehořlavosti. Používá se na výrobu pouzder výkonných tepelných zdrojů nebo k výrobě plováků, které musí odolávat vysokým tlakům a teplotám. [11]

2. 3. 4. Další možnosti použití

Kvůli svým nepřehlédnutelným výhodám se kovové pěny používají pro vytvoření přepážek v kancelářích, kabiny výtahů, obvodové konstrukce, detaily nábytku atd.

Kovová pěna ze slitiny hliníku pohlcuje i elektromagnetické záření. Díky této schopnosti je vhodná pro výrobu krytů citlivých elektronických zařízení.

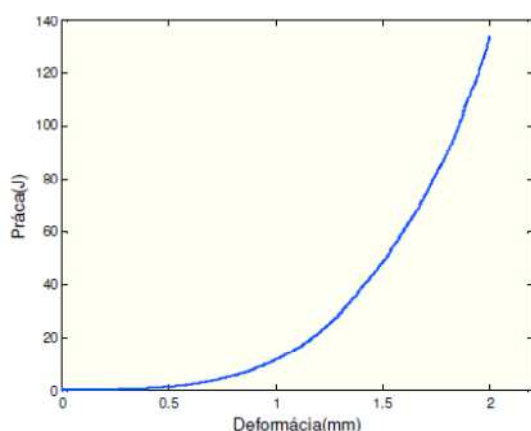
Pěnu s otevřenými póry lze použít jako vnitřní součást palivových nádrží, které budou mít za úlohu při nehodě bránit rychlému vytékání vysoce hořlavých látek. [4]

2.4. Možnosti hodnocení kvality odlitků

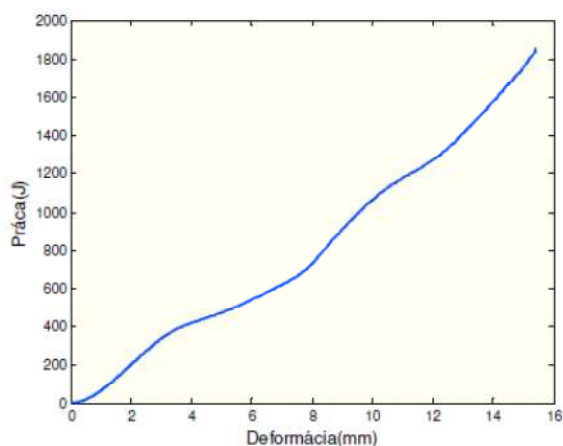
Hodnocení kvality odlitků je možné provádět tlakovými zkouškami, které ukazují na celistvost a neporušenost vnitřních můstků. Při vadné vnitřní mřížce dojde k značně menšímu odporu a menší absorpci energie.

V případě plného vzorku došlo k malému stlačení, což představuje například u siluminů relativní stlačení 6,67 %. Celková práce vykonaná tlakovou silou byla pak rovna 133,99 J.

U odlitku s pravidelnou geometrií pórů došlo ke stlačení o řád vyššímu.



Obr. 10: Tlaková práce plného vzorku [11]



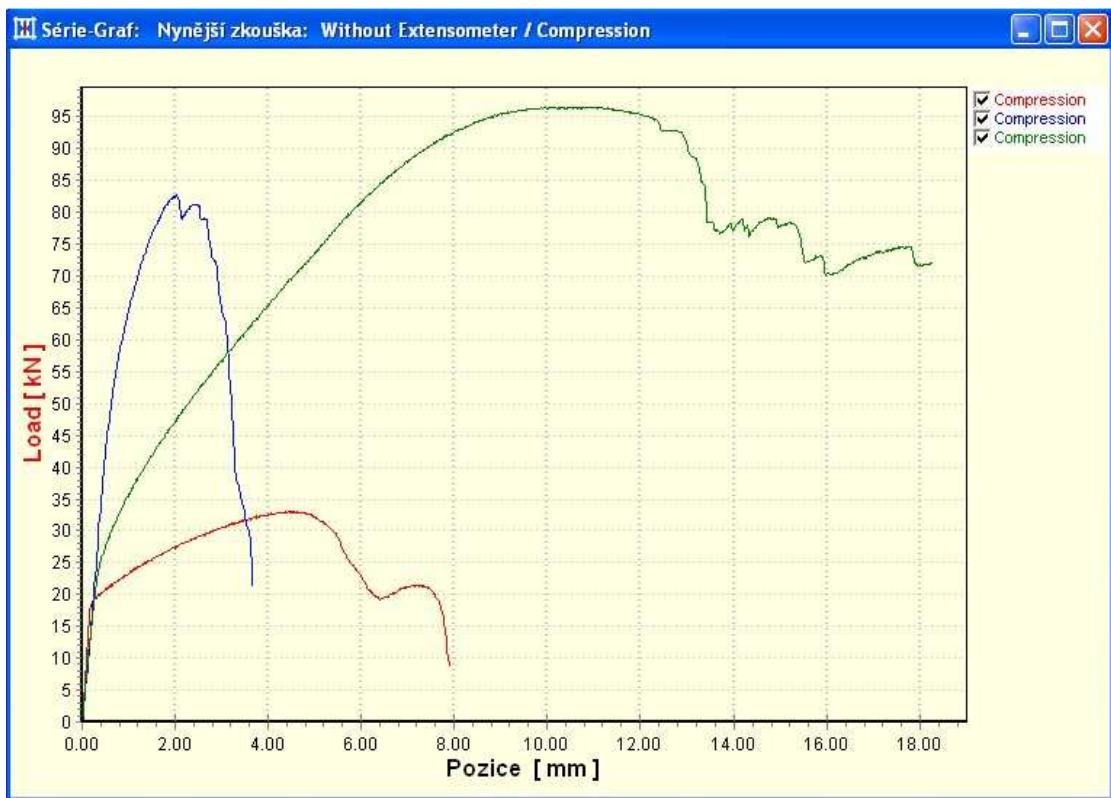
Obr. 11: Tlaková práce vzorku s pravidelnou geometrií pórů[11]

Schopnost materiálu absorbovat energie je možné stanovit vyhodnocením závislosti tlakové zatěžovací síly (kN) na deformaci (mm). Na křivce lze vyznačit tři oblasti: první odpovídá lineární elastické deformaci vzorku, na konci této oblasti se může objevit pík. Druhá oblast znázorňuje deformaci při konstantním napětí a v třetí oblasti probíhá prudký pokles z důvodu destrukce můstků. Energie absorbovaná jednotkovým objemem materiálu odpovídá oblasti pod křivkou.

Pro zatěžování jednotlivých vzorků byly použity výřezy na (*Obr. 12*), průběh je patrný z (*Obr. 13*).



Obr. 12: Vzorčky siluminu, šedé litiny a bronzu[12]



Obr. 13: Pevnosti v tlaku, červená silumin, modrá šedá litina, zelená bronz [12]

3 Představení analyzovaných materiálů

3.1. Silumin

Hliník je stříbrolesklý kov s kubickou plošně středěnou krystalizační mřížkou a s měrnou hmotností 2690 kg/m^3 . Teplota tání hliníku je nízká 660°C . Má stálé vlastnosti v atmosférickém prostředí. Obalí se malou vrstvou oxidu (Al_2O_3), tato vrstva se dále nezvětšuje a chrání kov před další korozi. Odolává slané vodě a slabým kyselinám. Nedokáže odolat čpavkům a louhům, které způsobují korozi. Samotný hliník je dobře tvárný za studena i za tepla, ale je špatně slévatelný. Z tohoto důvodu jsou vhodnější jeho slitiny. [5]

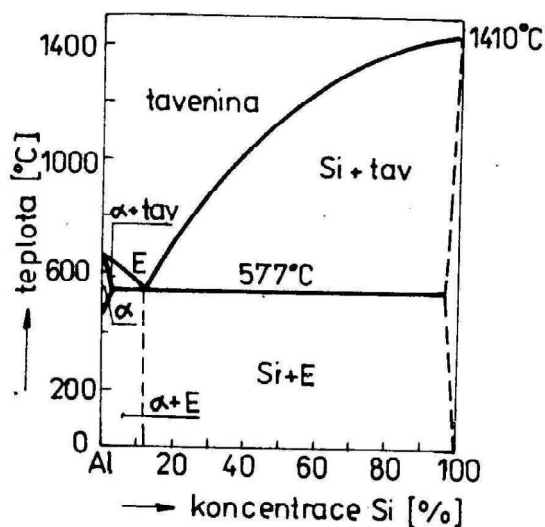
Přísadami dalších prvků (legováním) je dosahováno zlepšení jeho vlastností. Prvky, které příznivě ovlivní vlastnosti hliníku, jsou hlavně: křemík, měď, mangan, hořčík a nikl. Přidáním křemíku (max. 25%) dosahujeme u slitiny zvýšení pevnosti tuhého roztoku a odolnosti proti korozi. Při velkých koncentracích je v kovu vyloučeno ve velkých útvarech křemíkové eutektikum, čímž se zvyšuje křehkost. U mědi (max. 12%) výsledná slitina vykazuje zvýšenou pevnost a tvrdost, zároveň ale snižuje schopnost tváření a korozní odolnost. Přítomnost manganu (max. 2%) zvyšuje pevnost, odolnost proti korozi a schopnost tváření. Hořčíkem (max. 11%) dosahujeme lepší korozní odolnosti, pevnosti, obsah hořčíku nad 0,2 % umožňuje další zvýšení mechanických hodnot tepelným zpracováním (vytvrzením). Nikl (max. 2%) zvyšuje pevnost i houževnatost za normální i zvýšené teploty (použití na tepelně namáhané součásti). [5]

Dalšími prvky, které se používají do slitin hliníku v malých množstvích pro zjemnění zrn, jsou chrom a titan.

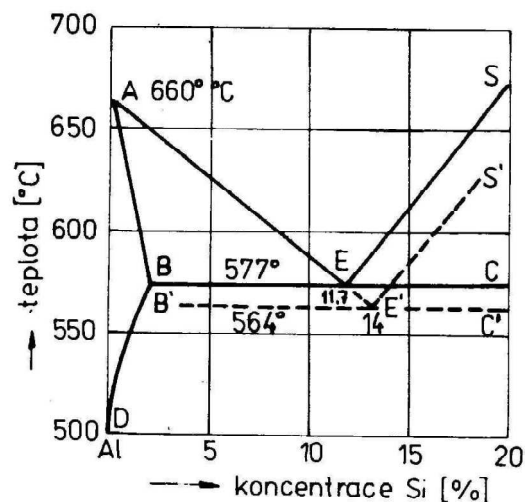
Slitiny hliníku používané ve slévárenství obsahují více nečistot i přísadových prvků než slitiny tvářené. Mechanické vlastnosti je možné u slitin ovlivnit použitou technologií odlévání. Gravitačním litím do kovových forem (kokil), nízkotlakým litím nebo tlakovým litím mají odlitky lepší vlastnosti než odlitky lité do pískových forem. Možnost ovlivnění mechanických vlastností můžeme provést modifikací a očkovaním taveniny, tím ovlivnit způsob krystalizace kovu. [5]

Nejvíce používaná slitina hliníku s křemíkem se nazývá silumin. Ve slévárenství se používá s vyšším obsahem křemíku, který v kovu tvoří eutektické fáze, a proto se méně smršťují

a jsou dobře slévatelné. Na (**Obr. 14.**) je vyobrazen rovnovážný binární diagram Al-Si. Oba kovy jsou krystalické. Rozpustnost křemíku v hliníku se snižuje s klesající teplotou. V důsledku nízké rozpustnosti se tato slitina nedá tepelně zpracovávat vytvrzováním, ale zlepšení mechanických vlastností se dosahuje očkovaním a modifikací. [5]



Obr. 14: Binární diagram hliník-křemík [5]



Obr. 15: Vliv očkování siluminu [5]

Modifikace taveniny hliníku s křemíkem se provádí vždy před odléváním, jako modifikační přísada se používají látky, z nichž se uvolňuje sodík. Důsledkem je pokles eutektické přeměny až na 564°C, znázorněno na (*Obr. 15.*). Eutektický bod se také posune doprava asi až na 14 % křemíku. Touto změnou se dosahuje výrazným zlepšením mechanických vlastností, protože modifikací se dosáhne změny stavby (morfologie) křemíkového eutektika z jehlicovitého na zrnitý. Nemodifikovaný silumin dosahuje pevnosti $R_m = 140$ MPa a tažnosti $A_{10} = 3$ %, ale modifikovaný silumin dosahuje $R_m = 250$ MPa a tažnosti $A_{10} = 9$ %.[5]

Pro zvláštní účely se používají upravené siluminy s přísadami hořčíku (Mg), mědi (Cu) a niklu (Ni).

3. 2. Cínový bronz

Měď je červenavý kov s kubickou plošně středěnou krystalizační mřížkou a s měrnou hmotností 8900 kg/m^3 . Teplota tání mědi je 1083°C. Samotná měď je dobře tvárná za studena i tepla, ale je špatně slévatelná. Mezi teplotami 400°C až 650°C je obtížné tváření, z tohoto důvodu je nutné jí tvářet za studena nebo v rozmezí teplot 800°C až 900°C. Samotná měď je obtížně slévatelná a má velkou smršťivost (až 1,8 %). Při vysokých teplotách rozpouští velké množství plynů, které se uvolňují při tuhnutí a způsobí nežádoucí pórovitost odlitku. [5]

V porovnání se železem měď odolává lépe chemickým vlivům. Měď se stejně jako hliník pokryje vrstvou oxidu. V atmosférických podmínkách, které obsahují oxidy, se na mědi vytvoří povlak, který je zbarven podle druhu a koncentrace oxidů v atmosféře (jedná-li se o převahu oxidů uhlíku, zbarví se povrch zeleně a jedná-li se o převahu oxidů síry, zbarví se černě). Měď je odolná proti kyselině sírové, octové a solným roztokům pokud není přítomen kyslík. [5]

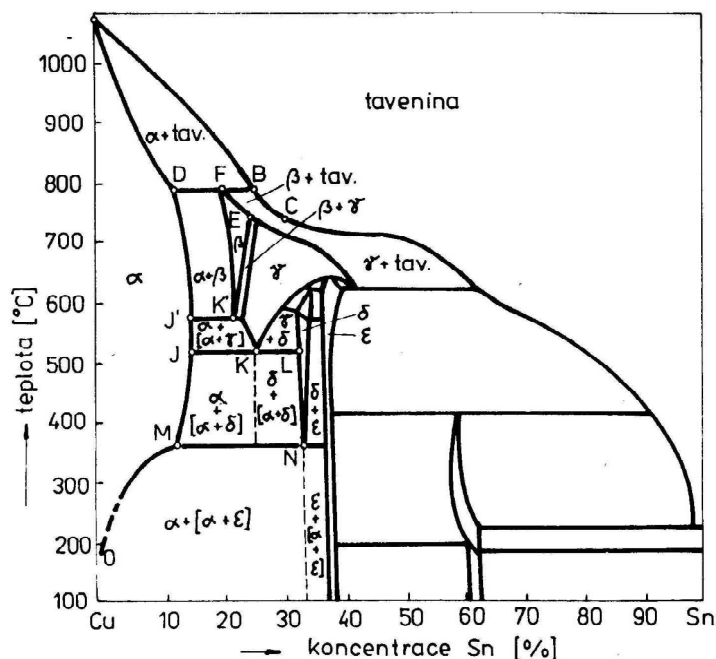
V mědi se nacházejí často drobné příměsi olova, kyslíku (oxidické vměstky), síry, cínu, železa, niklu, stříbra a křemíku. Vysloveně škodlivými prvky v mědi jsou olovo, kyslík a síra. Kyslík se z kovu odstraňuje desoxidací pomocí fosforu (fosforová měď). [5]

Měď je používána v širokém spektru. Čistá měď se kvůli svým vlastnostem (dobrá tepelná a elektrická vodivost) nejvíce používá na výrobky, jako jsou dráty, trubky a plechy. Na tyto výrobky je spotřebováno asi 55% mědi. Zbylá část se využívá na výrobu slitin. [5]

Velké uplatnění najde měď u slitiny se zinkem (mosaz). Z celkové spotřeby mědi je do této slitiny spotřebováno asi 25% celkové produkce. Mosaz obsahuje také vedle základních kovů (měď a zinek) doprovodné prvky (olovo, cín, křemík). Obsah doprovodných prvků ovlivňuje její mechanické vlastnosti podle způsobu použití slitiny. Mosazi určené pro odlévání mají dobré vlastnosti (zabíhavost, malý sklon k odměšování). Nevýhodou je velké smršťování

(až 1,5%). To vede k vytváření staženin a mikrostaženin. V důsledku hrubší struktury a tím i zhoršených mechanických vlastností, se mosaz používá na méně namáhané odlitky (plynové a vodovodní armatury, stavební a nábytkové kování). [5]

Měď ve slitině s cínem je označována jako bronz (cínový). Binární diagram (**Obr. 16.**) těchto dvou kovů je jeden z nejsložitějších, ale v technické praxi se využívá bronz s obsahem cínu pouze do 20%. Bronz s obsahem cínu nad 20% je velmi křehká, vlivem intermediárních fází. Heterogenní struktura je tvořená primárními krystaly α a eutektoidem $[\alpha+\delta]$. Struktura vzniká při obsahu cínu větším než 5%. Fáze δ je velmi tvrdá a křehká, ale fáze α je měkká. Nejvíce se používají bronzy s obsahem cínu mezi 10 a 12%, ale s vyšším obsahem jsou používány na namáhaná ložiska (14 až 16%) a na výrobu zvonů (20 až 22%).[5]



Obr. 16: Binární diagram měď-cín [5]

Bronzy mají dobrou odolnost proti korozi a výborné třecí vlastnosti, ale proti mosazi mají menší smrštivost (1%) a větší sklon k tvoření mikrostaženin nebo dendritickému odmíšení. [5]

Bronzy tvořené mědí a jiným kovem už nejsou často používané, ale je jich poměrně hodně, některými jsou hliníkové, olovené, beryliové, niklové a křemíkové. [5]

3. 3. Šedá litina

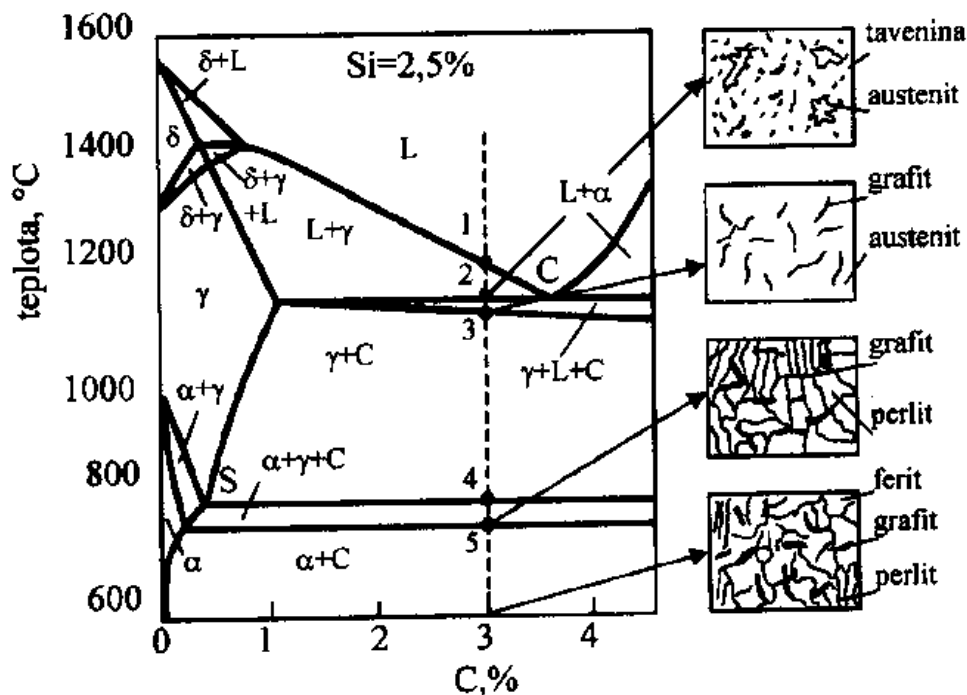
V technické praxi jsou dosud nejvíce používány slitiny železa. Produkce těchto slitin zaplňuje 95% celosvětového trhu. Takto silné využití těchto slitin umožňují velké zásoby železných rud v zemské kůře. Slitiny železa mají velice rozmanité mechanické vlastnosti. Získaný kov z rud obsahuje vždy větší nebo menší množství dalších prvků, výjimkou jsou velmi čisté kovy, připraveny zvláštními výrobními postupy. Vnikání prvků do železa je ovlivněno použitými surovinami a technologií tavení. Ostatní prvky se přidávají záměrně pro dosažení požadovaných vlastností slitiny. Všechny slitiny železa obsahují uhlík, a podle tohoto kritéria je i kov dělen na oceli (uhlíkaté do cca 0,6 %, nízkolegované a vysokolegované) a litiny (s lupínkovým grafitem, uhlík přesahuje 3 %, s kuličkovým grafitem, uhlík přesahuje 3,5%). [5]

Čisté železo ferické (α) je kov s kubickou prostorově středěnou mřížkou a s měrnou hmotností 7874 kg/m^3 . Teplota tání železa je 1539°C . Zvláštností je, že své paramagnetické vlastnosti železo ztrácí nad teplotou 768°C (Curieova teplota). [5]

Šedá litina je technickou slitinou, kterou tvoří železo a uhlík, na (*Obr. 17*) je vyobrazen jejich rovnovážný diagram. Uhlík musí být obsažen v této slitině nad 2,14%, aby se jednalo o šedou litinu. Vyznačuje dobrou pevností v tlaku. Ovšem při ostatním namáhání je náchylná na iniciaci praskliny a následného zlomení, protože grafit zde ve formě lupínek funguje jako vrub (koncentrátor napětí). [5]

U šedé litiny ovlivňuje její mechanické vlastnosti hlavně rozložení lupínkového grafitu. Litina dosahuje nejlepších vlastností při rovnoměrně rozloženém grafitu. Nízká pevnost je charakterizována u růžicového uspořádání nebo u smíšeného grafitu (pro nadeutektické litiny), ani mezidendritické uspořádání není optimální. Se snižováním pevnosti se také snižují i jiné vlastnosti jako jsou tvrdost, plasticita a houževnatost, ale se snížením těchto vlastností jsou zvyšovány kladné, jako jsou tlumící schopnosti a menší náchylnost k vnějším vrubům. Základní perlitická hmota prokazuje vyšší pevnost. Zvyšováním podílu feritu dochází ke snížení pevnosti a tvrdosti, současně dochází ke zlepšení houževnatosti. Cementit v litině zvýší tvrdost, ale zároveň zhoršuje obrobiteľnosť a pevnost. Aby se dosáhlo nejvyšší pevnosti a tvrdosti, je potřebné dosáhnout bainitické nebo sorbitické struktury. Martenzitická struktura prokazuje vysokou tvrdost, ale nízkou pevnost, takže z hlediska nejlepších vlastností je důležitý rovnoměrně rozložený lupínkový grafit s perlitickou strukturou základní kovové hmoty. Při těchto podmínkách je předpokládáno, že litina bude dobře obrobiteľná s vysokou pevností a dostatečnou tvrdostí. [5]

Doprovodné prvky v litině, které dokáží ovlivnit její mechanické vlastnosti, jsou uhlík, křemík, mangan, fosfor, síra, chrom, titan, nikl, hliník a měď. Uhlík snižuje pevnost a tvrdost zvýšením množství grafitu a zhrubnutím grafitu. Křemík snižuje pevnost nejen zvýšením stupně grafitizace, ale také feritizací kovu. Mangan dosahuje v základní kovové hmotě zjemnění perlitu při obsahu nad 0,8 %. Tímto zlepšuje pevnost a tvrdost. Fosfor je považován za nežádoucí prvek, vyšší obsahy fosforu způsobují vlivem fosfidického eutektika křehkost, ale na příklad u odlitků kde je vyžadována velká odolnost při tření (např. brzdové zdrže kolejových vozidel) je fosfor nezbytný. Výrazně zlepšuje zabíhavosti, takže je této vlastnosti využíváno při odlévání jemných reliéfů. Síra způsobuje zákalku zejména v tenkých stěnách odlitků a dochází ke zvýšení pevnosti. Chrom je perlitotvorný, a proto zvyšuje pevnost a ořezuvzdornost. Titan rovněž zvyšuje pevnost i tvrdost a zjemňuje zrna. Nikl zjemňuje grafit a podporuje perlitizaci, což má za následek zvýšení pevnosti. Vyšší obsah niklu obvykle se zvýšeným obsahem chromu způsobuje, že základní kovová hmota je austenitická. Hliník má dezoxidační účinek, ale vyšší obsahy hliníku způsobují vady (bubliny, bodliny). Měď je perlitotvorná a zvyšuje mechanické hodnoty pevnosti a tvrdosti. [5]



Obr. 17: Binární diagram železo-uhlík [6]

4 Analýzy vybraných provedení kovových pěn

Vlastní materiálové analýzy byly zaměřeny na studium vlivu různé tloušťky stěn odlitku kovové pěny na vnitřní stavbu materiálu, tj. rozdíly:

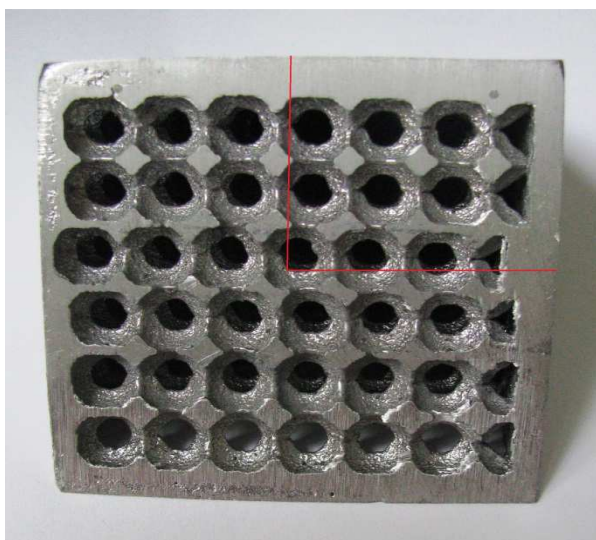
- disperze jednotlivých fází,
- kompaktnosti matrice.

Součástí rozborů byla i základní analýza případné chemické heterogenity, spojené s přítomností nežádoucích prvků zejména na fázovém rozhraní, v závislosti na typu analyzovaného materiálu.

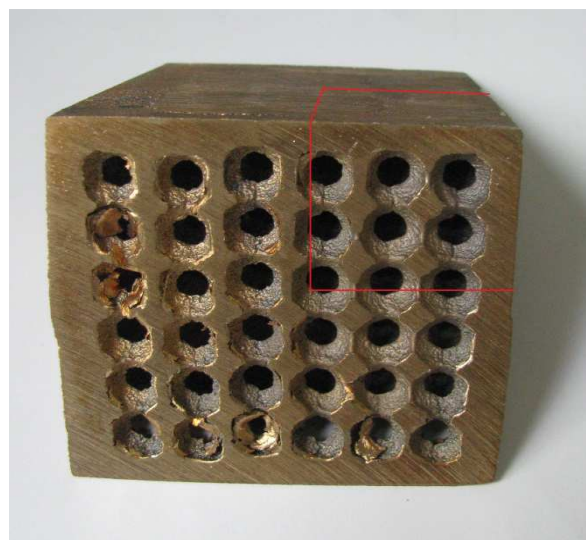
Uvedené srovnávací metalografické analýzy byly provedeny na třech výše představených materiálových variantách provedení kovových pěn, tj. siluminu, cínové bronzy a šedé litině.

4.1. Referenční sada vzorků

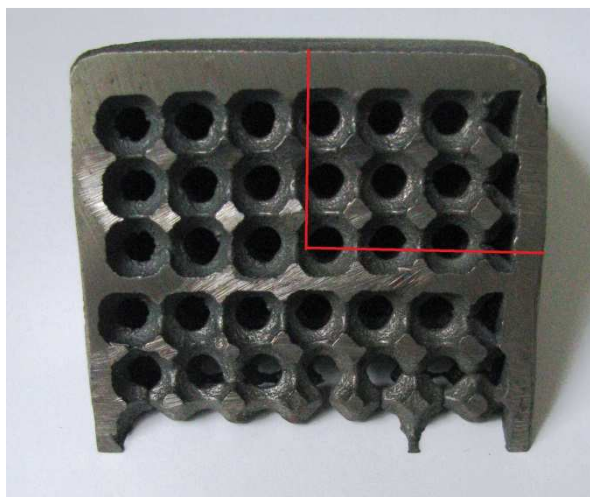
Vybranou sadou referenčních vzorků je kovová pěna z materiálu slitiny hliníku s křemíkem (*Obr. 18.*), cínové bronzy (*Obr. 19.*), a litiny s lupínkovým grafitem (*Obr. 20.*). Tyto vzorky byly zatím jediné dostupné. Z poskytnutých vzorků ze slévárny jsou vybrány místa, kde se nachází nejvíce rozporné části s ohledem na průřez materiálu. Tyto řezy umožnily srovnat rozdíly vnitřní stavby materiálu v oblasti vnější stěny odlitků v „můstků“ mezi dutinami odlitku. Na následujících fotografiích je naznačen následný výřez z těchto tří materiálů.



Obr. 18: Naznačení řezu siluminem



Obr. 19: Naznačení řezu bronzem



Obr. 20: Naznačení řezu litinou

4.2. Příprava vzorků, použité metody hodnocení

Dělení vzorků proběhlo na pásové pile s chladicí emulzí (*Obr. 21.*) v přibližném místě naznačených řezů. Dělení i následné další úpravy proběhly s chlazením pro zamezení tepelného, popř. mechanického ovlivnění materiálu pro rozbory.

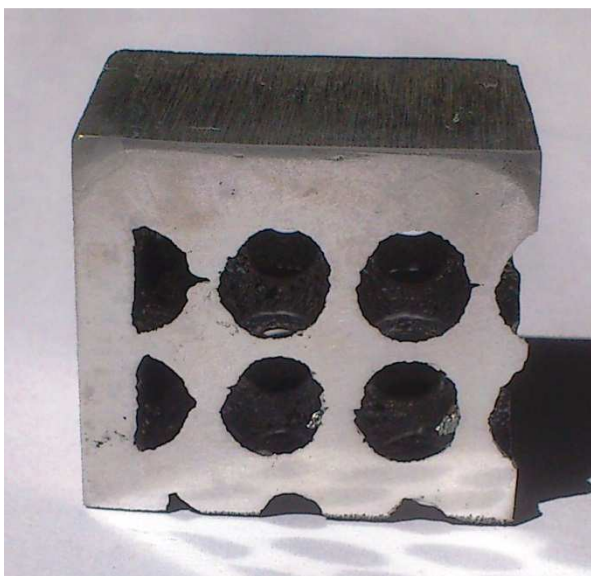


Obr. 21: Pásová pila s chladicí emulzí

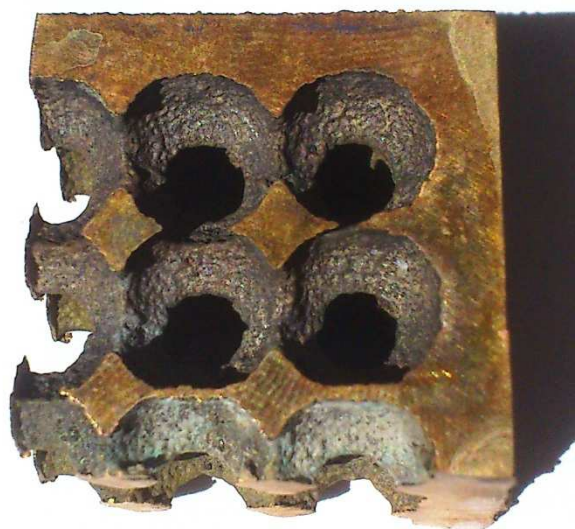
Z odděleného referenčního materiálu byly připraveny standardní metalografické výbrusy. Odřezané vzorky se zabrousily na brusce s hrubým smirkovým papírem cca 100. Po zarovnání vzorků a přiblížení se požadovaného místa se vzorky brousily ve vodní lázni a to následnými drsnostmi 240,600,1000 a 1500.

Následně se vzorky leštily za použití diamantové pasty se zrnitostí max. 5 μ m. Finální fáze proběhla leštěním s diamantovou pastou o zrnitosti max. 0,7 μ m.

Výsledné vzorky měly tuto podobu silumin (*Obr. 22.*), bronz (*Obr. 23.*) a litina (*Obr. 24.*).



Obr. 22: Vzorek siluminu



Obr. 23: Vzorek bronzu



Obr. 24: Vzorek litiny

EDX –Energiově disperzní rentgenová spektroskopie

Energiově disperzní rentgenová spektroskopie (EDS, EDX, nebo XEDS), někdy nazývaný energetický disperzní analýza X-paprsky (EDXA) nebo energeticky disperzní rentgenové mikroanalýzy (EDXMA), je analytická technika používaná pro stanovení obsahu prvků vzorku. interakci rentgenového záření se vzorkem. Každý prvek má jedinečnou atomovou strukturu, která umožňuje zobrazit soubor píků, které kvantifikují z rentgenového spektra prvky přítomné v místě dopadu svazku rentgenových paprsků. Využití je široké, mimo jiné v oblasti mineralogie, naukách o kovech, fyzikální metalurgii apod., ve slévárenství slouží ke studiu morfologie (jaké prvky se ve vybraném útvaru vzorku nachází) strukturálních součástí slitin.

4.3 Výsledky analýz vzorku siluminu

Prvním vzorkem poskytnutým pro zkoumání v této práci je odlit ze slitiny hliníku a křemíku (tzv. silumin).

U toho vzorku se jedná o silumin značen AlSi10MgMn. Vzorek je odlit podle normy ČSN 424331. Z normy je v (*Tab. 1.*) vypsané složení použitého vzorku.

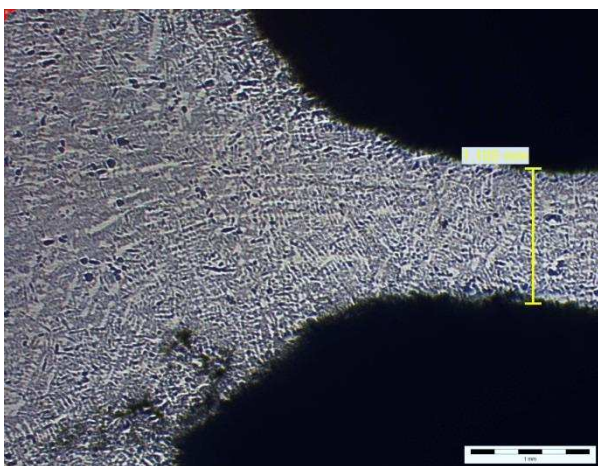
Tab. 1: Chemické složení slitiny Al-Si referenčního vzorku dle normy

Chemické Složení [hm.%]	Legovací prvky	Si		Mg		Mn ²⁾
		9,00 až 10,50		0,25 až 0,45		0,10 až 0,40
	Doprovodné prvky max.	Cu	Zn	Fe ¹⁾	Ti	Celkem
		0,05	0,10	0,50	0,10	0,70

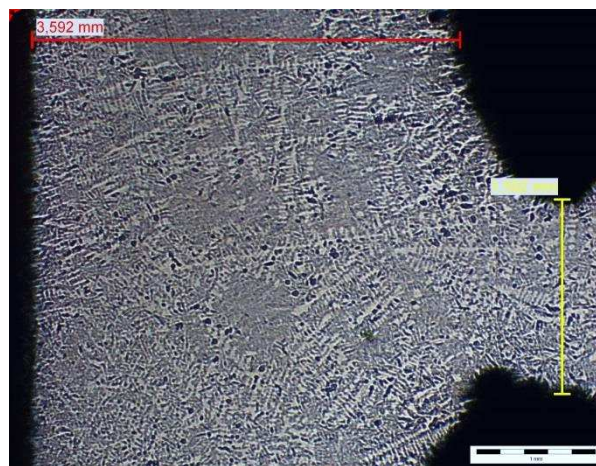
Tab. 2: Chemické složení slitiny Al-Si referenčního vzorku spektrální analýzou

Průměrné chemické složení silumin v hm.%											
Prvek	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Na	Ca
Průměr	88,41	10,64	0,327	0,023	0,168	0,288	0,013	0,037	0,033	0,00080	0,00477

Pro srovnání rozdílů výskytu mikroskopických nespojitostí v materiálu byly použity snímky metalografických výbrusů v neleptaném stavu. (*Obr. 25., Obr. 26.*)



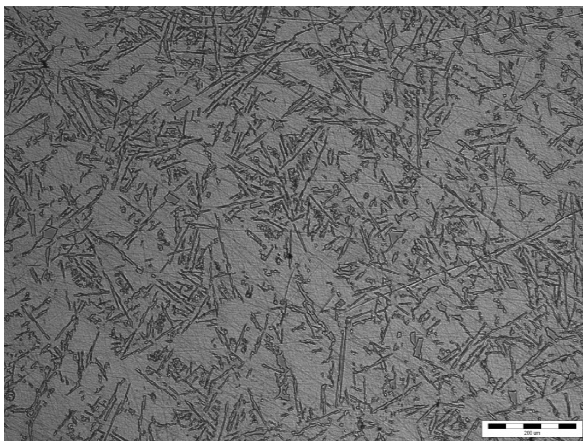
Obr. 25: Mikrostruktura silumin, neleptáno, 25x



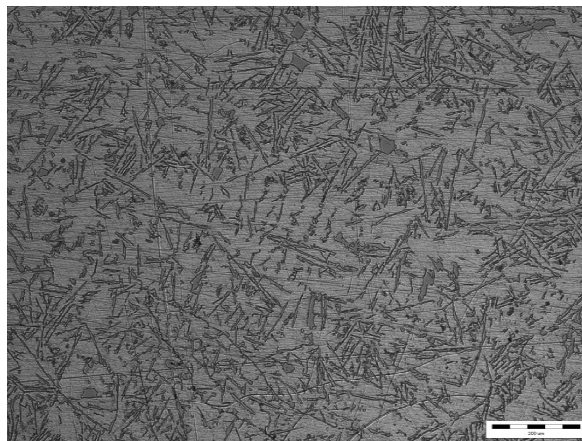
Obr. 26: Mikrostruktura silumin, neleptáno, 25x

Na obou snímcích jsou jasně patrné dendrity základní kovové hmoty, v užších částech jsou osy dendritů výrazně kratší, což se dá vysvětlit rychlejším ztuhnutím kovu v můstcích. Při malém zvětšení (25x) není dostatečně zřejmé, jak bylo vyloučeno křemíkové eutektikum. Proto byly pořízeny další dva snímky (*Obr. 27., Obr. 28.*)

Vzorek siluminu byl naleptán pro lepší identifikaci strukturálních složek. Leptání proběhlo 10 % roztokem NaOH.



Obr. 27: Hliník struktura silné části,leptáno,
10 % NaOH, 100x



Obr. 28: Hliník struktura můstku, leptáno,
10 % NaOH, 100x

Při 100x zvětšení lze dobře rozeznat uspořádání křemíkového eutektika. Jedná se o nemodifikovanou strukturu (jehlice). Dále je potvrzeno, že osy dendritů na (*Obr. 28.*) jsou kratší než na (*Obr. 27.*) ze středové části v silnější stěně. Z obou snímků je tedy patrné, že struktura vzorku v můstku a středové části silnější stěny je z hlediska uspořádání téměř shodná. Rozdíl je pouze v patrném zjemnění struktury v můstcích.

4.4 Výsledky analýz vzorku cínové bronzy

Druhým vzorkem poskytnutým pro zkoumání v této práci je bronz, odlitá ze slitiny mědi a cínu.

U toho vzorku se jedná o bronz značenou CuSn10Zn2. Vzorek je odlit podle normy ČSN 423138. Z normy je v (**Tab. 3.**) vypsané složení housek pro tavbu použitého vzorku. V (**Tab. 4.**) je změna chemického složení pro odlitky.

Tab. 3: Chemické složení housek pro tavbu bronzy Cu-Sn referenčního vzorku dle normy

Chemické Složení [hm.%]	Legovací prvky	Sn				Zn		
		9,50 až 11,00				1,00 až 3,00		
	Doprovodné prvky max.	P	Pb	Fe	Al	Sb	Bi	Celkem
		0,05	0,50	0,30	0,02	0,30	0,025	1,2

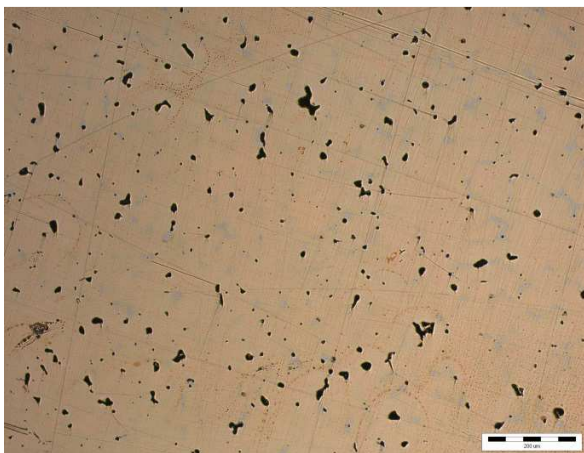
Tab. 4: Upravené chemické složení bronzy Cu-Sn referenčního vzorku dle normy

Změny chemického složení pro odlitky	Sn
	9,00 až 11,00

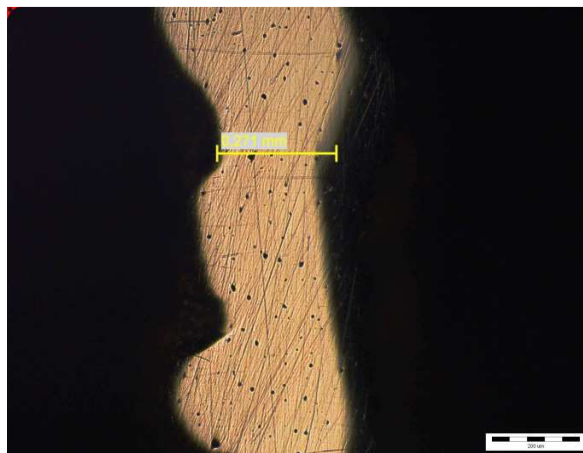
Tab. 5: Upravené chemické složení bronzy Cu-Sn referenčního vzorku spektrální analýzou

Průměrné chemické složení cínové bronzy v hm.%								
Prvek	Cu	Sn	Pb	Fe	Ni	Mn	Al	Zn
Průměr	88,40	10,00	0,351	0,0524	0,785	0,0015	0,0036	1,931

Vzorek se ještě v neleptaném stavu zkoumal mikroskopem (*Obr. 29., Obr. 30.*).



Obr. 29: Mikrostruktura bronzu v silné části, neleptáno, 25x



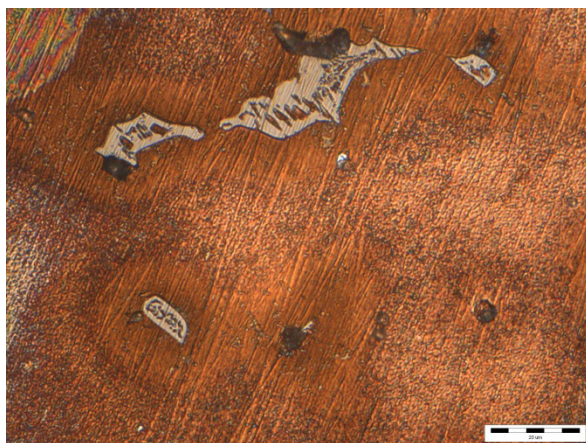
Obr. 30: Mikrostruktura bronzu v můstku, neleptáno, 25x

Na obou snímcích nejsou patrné rozdíly struktury, v užších částech jsou pouze patrné jemnější póry, což se dá vysvětlit rychlejším ztuhnutím kovu v můstcích. Při malém zvětšení (25x) a v neleptaném stavu nejsou viditelné hranice zrn. Proto byly pořízeny další dva snímky (*Obr. 31 a Obr. 32.*)

Vzorek bronzu byl naleptán pro lepší identifikaci strukturních složek. Leptání proběhlo 10% roztokem hydroxidu železa.



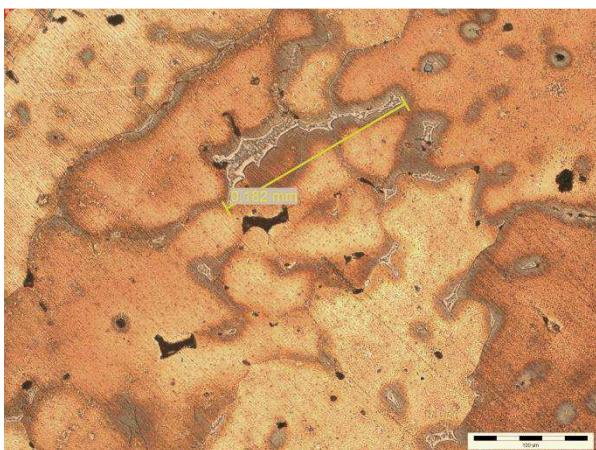
Obr. 31: Bronz, leptáno, 10% hydroxidem železa, 25x



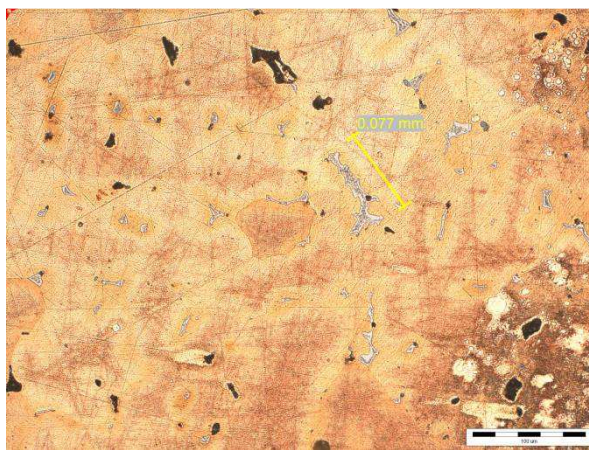
Obr. 32: Bronz detail s eutektoidní fází, leptáno, 10% hydroxidem železa, 1000x

Jednotlivé vzorky byly odebrány obdobně, jak tomu bylo u vzorku litinových (viz. dále). Typický představitel je uveden na (**Obr. 33.**) V širší oblasti vzorku jsou v jednotlivých, barevně rozdílných zrnech viditelné osy dendritů základní kovové hmoty. Zrna jsou v širší části větší.

Na (**Obr. 34.**) je vyobrazen detail eutektoidní fáze v 1000x zvětšení. V dostupné literatuře není jednoznačně definována stechiometrie eutektoidních fází. Tato fáze byla dále zkoumána pomocí EDX analýzy.



Obr. 33: Bronz, struktura silná část, leptáno 10% hydroxidem železa, 250x



Obr. 34: Bronz, struktura můstku, leptáno, 10% hydroxidem železa, 250x

Při 250x zvětšení lze dobře rozeznat uspořádání zrn základní kovové hmoty a eutektoidní fáze. Zejména u eutektoidní fáze je zřejmé její jemnější vyloučení v můstcích 0,077 mm (**Obr. 34.**), v silné části dosahuje tato fáze až 0,182 mm (**Obr. 31.**). Z obou snímků je tedy patrné, že struktura vzorku v můstku a středové části silnější stěny je z hlediska uspořádání obdobná. Rozdíl je pouze v patrném zjemnění struktury v můstcích.

4.5 Výsledky analýz vzorku šedé litiny

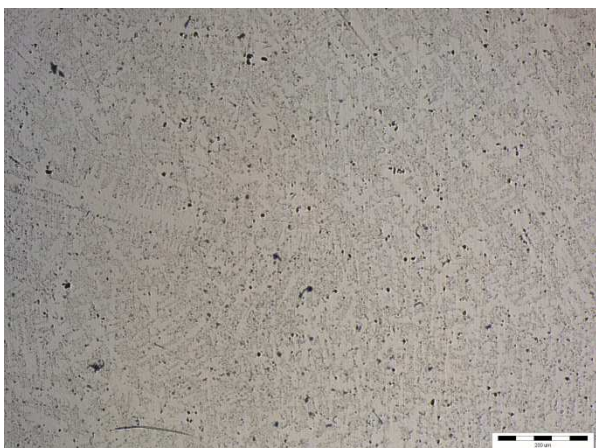
Třetím vzorkem poskytnutým pro zkoumání v této práci je litina s lupínkovým grafitem.

Vzorek je odlit podle normy ČSN 422420. Viz složení vzorku (**Tab. 6.**).

Tab. 6: Chemické složení šedé litiny referenčního vzorku spektrální analýzou

Průměrné chemické složení šedé litiny v %													
Prvek	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Mg
Průměr	93,2	3,668	2,625	0,066	0,049	0,017	0,019	0,008	0,025	0,016	0,001	0,022	0,042

Vzorek se ještě v neleptaném stavu zkoumal mikroskopem (*Obr. 35., Obr. 36.*).



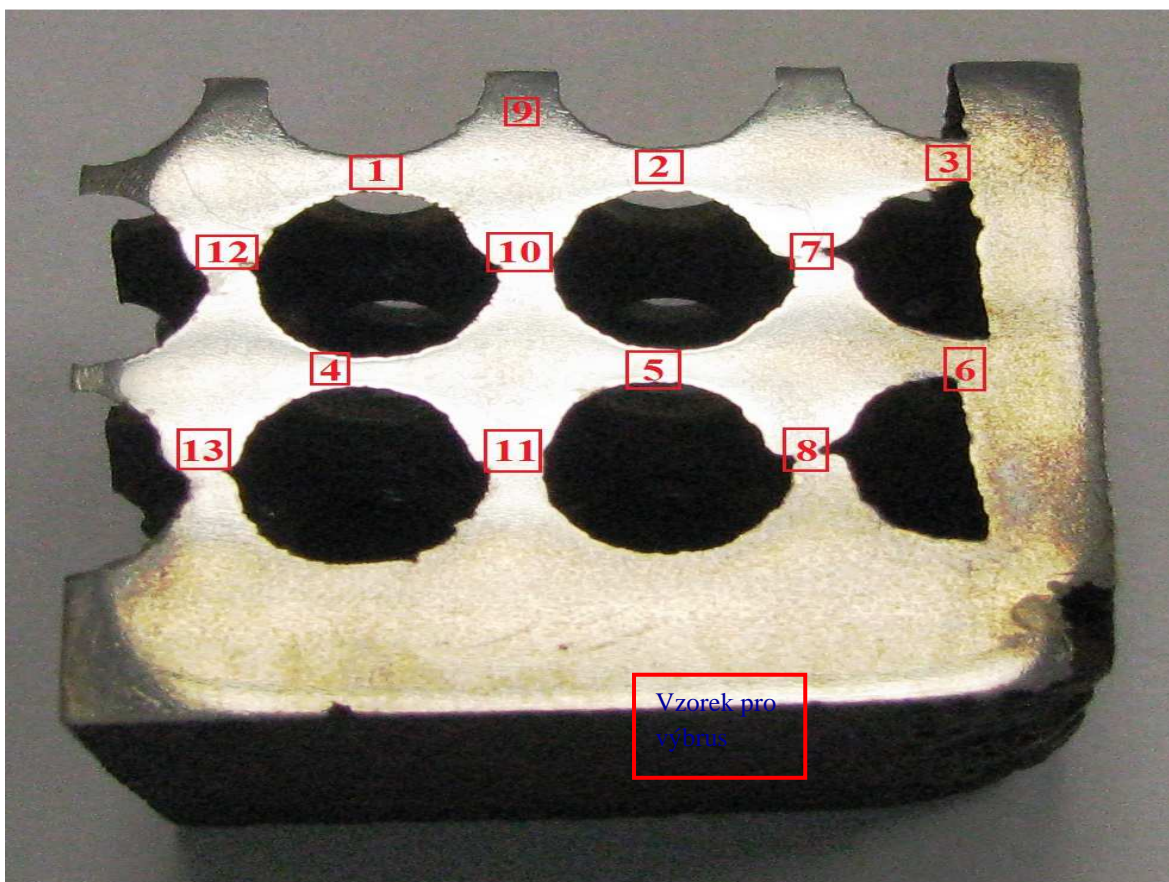
Obr. 35: Mikrostruktura litiny zvětšení 25x



Obr. 36: Mikrostruktura litiny zvětšení 25x

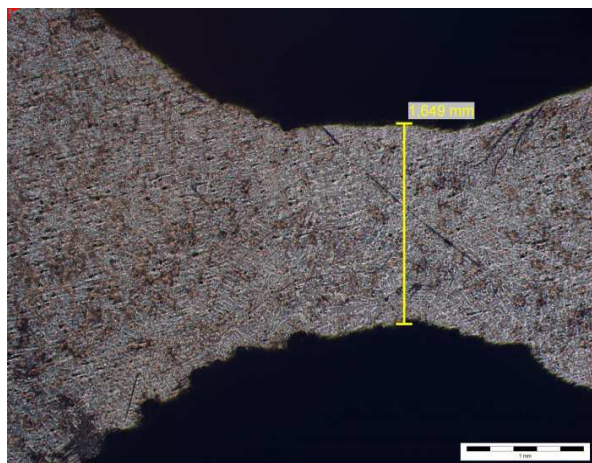
Vzorek šedé litiny s lupínkovým byl naleptán pro lepší identifikaci strukturálních složek. Leptání proběhlo 4% roztokem HNO_3 (Nital).

Bylo provedeno porovnání jednotlivých snímků ze vzorku litiny po naleptání jednotlivých přechodových částí. Systém označení a postupu ve vzorku (*Obr. 37.*). To umožnilo posouzení strukturálních rozdílů v závislosti na konkrétní tloušťce stěny.

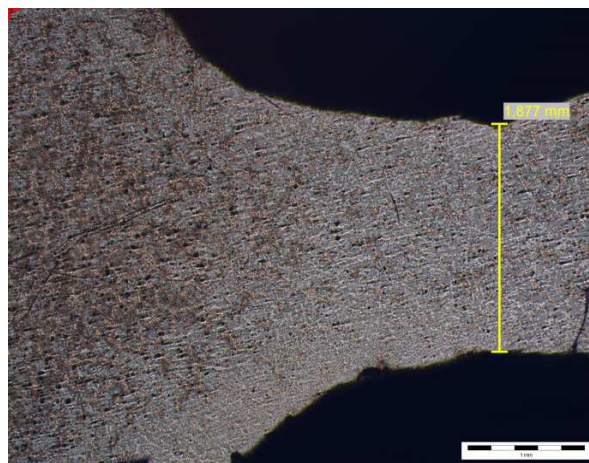


Obr. 37: Očíslování přechodových částí

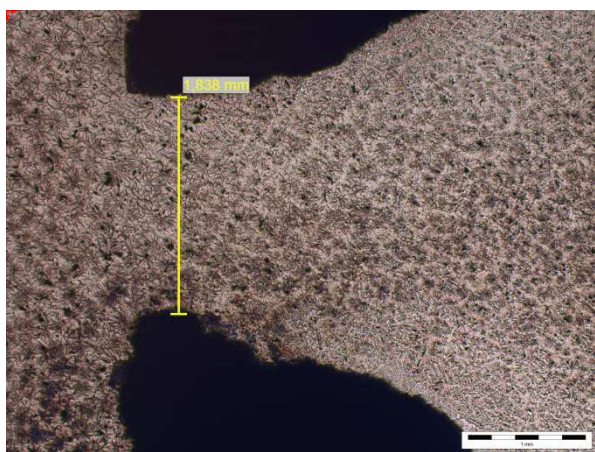
Litina – přechodové části



Obr. 37.1. Přechod číslo 1



Obr. 37.2. Přechod číslo 2



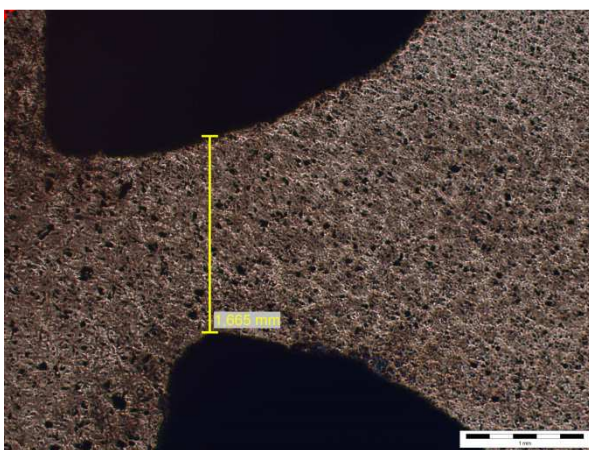
Obr. 37.3. Přechod číslo 3



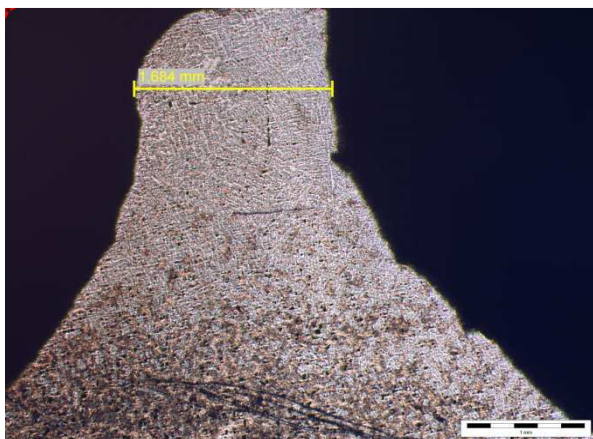
Obr. 37.4. Přechod číslo 4



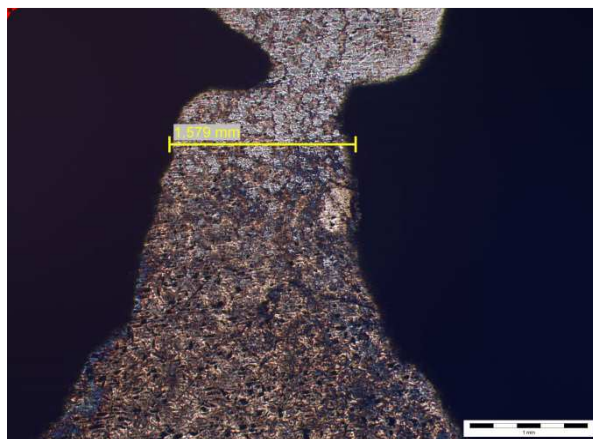
Obr. 37.5. Přechod číslo 5



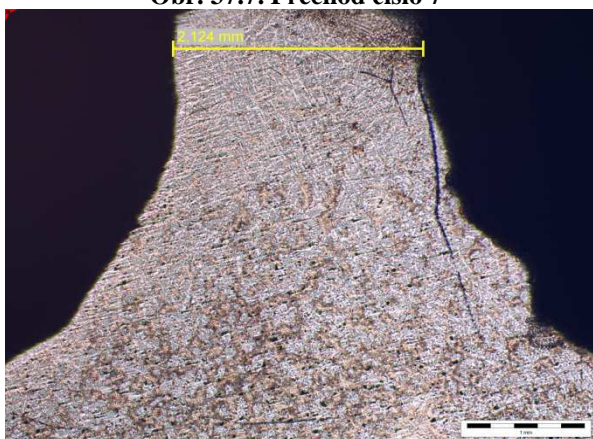
Obr. 37.6. Přechod číslo 6



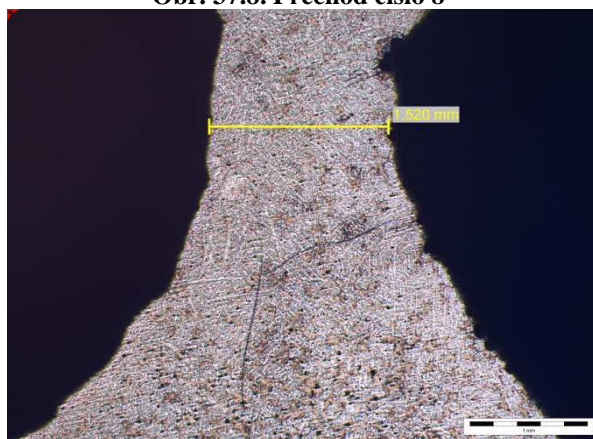
Obr. 37.7. Přechod číslo 7



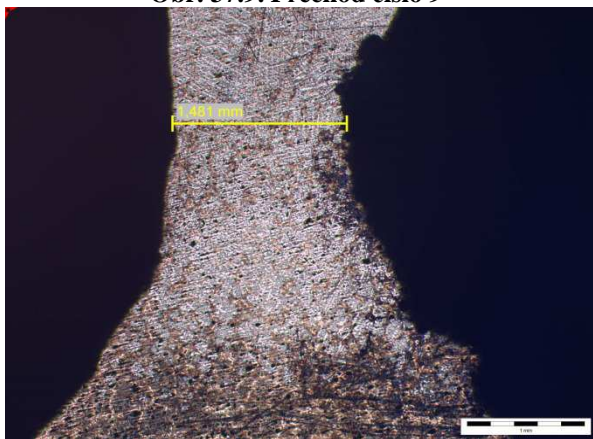
Obr. 37.8. Přechod číslo 8



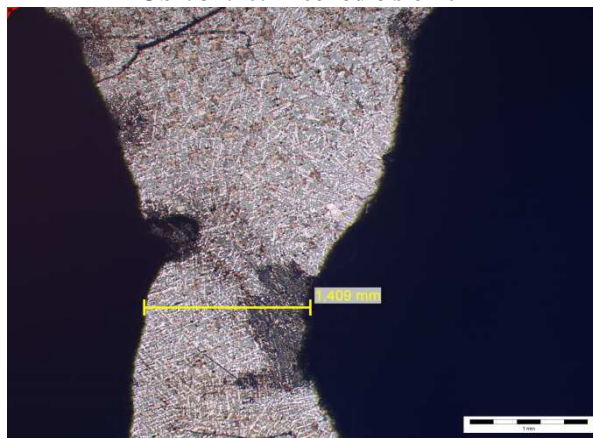
Obr. 37.9. Přechod číslo 9



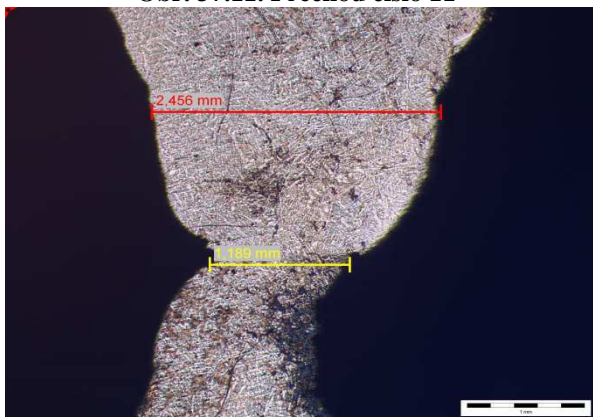
Obr. 37.10. Přechod číslo 10



Obr. 37.11. Přechod číslo 11



Obr. 37.12. Přechod číslo 12



Obr. 37.13. Přechod číslo 13

Jednotlivé vzorky byly odebrány dle schématu na (*Obr. 37.*). Přechody na obrázcích (*37.1,2,4 a 5*) ze středových částí mezi jednotlivými buňkami ve vodorovném směru. Přechody na obrázcích (*37.3,6*) z okrajové části vzorku ve vodorovném směru. Přechody na obrázcích (*37.7 až 13*) ze středových částí ve svislém směru.

Na všech snímcích je jasně patrná změna vylučování grafitu mezi dendrity základní kovové hmoty. V širších částech je obsažen perlit a ferit s jemně vyloučeným grafitem, kdežto v můstcích není perlit patrný. Struktura je tvořena pouze dendrity základního kovu a v mezidendritických prostorech se vyskytuje jen jemně vyloučený lupínkový grafit. Různá rychlost tuhnutí má za následek rozdílné rozmístění strukturálních složek (v silnějších částech struktura feriticko-perlitická v tenčích částech vzorku feritická) výjimkou je výskyt perlitu u vzorku č. 3 a 6 z okrajových částí, kde je tloušťka stěny 6,5 mm a perlit se vyskytuje v menší míře i v oblasti můstku.

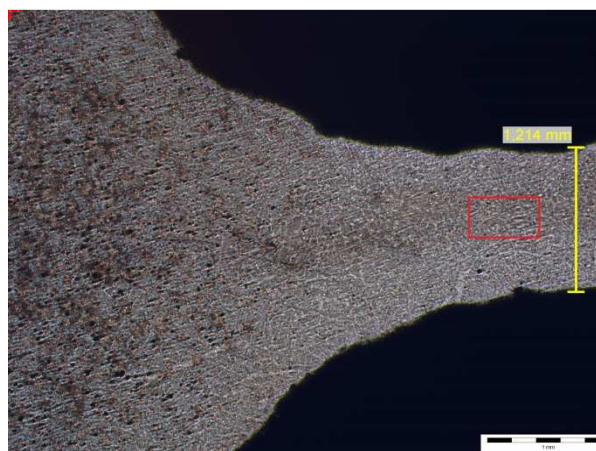


Obr. 38: Naznačení místa zvětšení, leptáno Nital, 25x

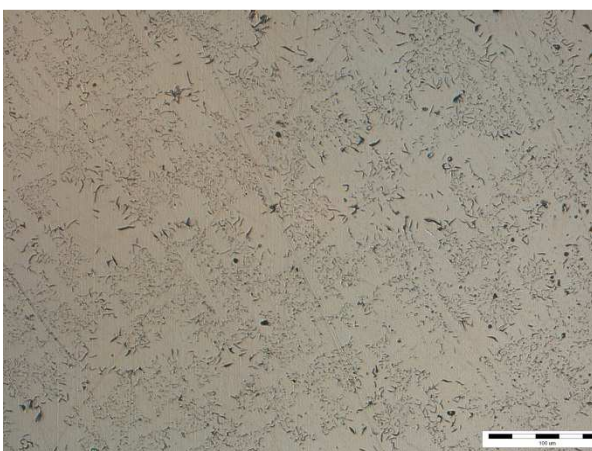


Obr. 39: Struktura zvětšeného výřezu, neleptáno, 200x

Na (*Obr. 39.*) jsou patrné dendrity základní kovové hmoty a jemně vyloučený lupínkový grafit, podle ISO 945-1:2008(E) tato struktura odpovídá. Neidentifikované černé útvary jsou mezidendritické póry.

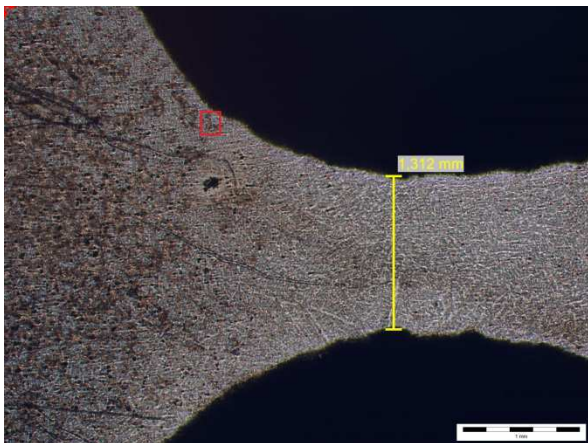


Obr. 40: Naznačení místa zvětšení, leptáno Nital, 25x

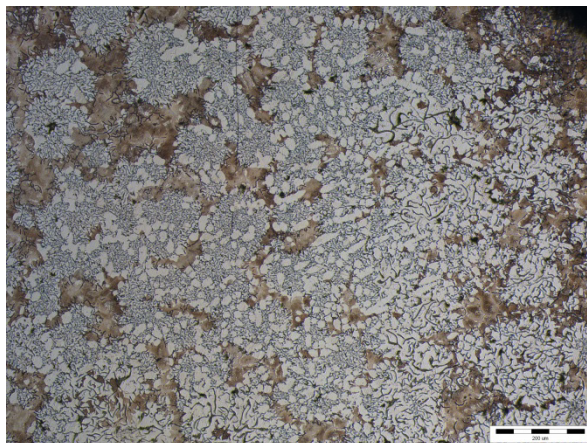


Obr. 41: Struktura zvětšeného výřezu, neleptáno, 250x

Na (**Obr. 41.**) jsou patrné opět dendrity základní kovové hmoty s poněkud delšími osami, ale vedle jemně vyloučeného lupínkového grafitu se místy vyskytují náznaky růžicového uspořádání. Podle ISO 945-1:2008(E) tato struktura odpovídá kategorii (formou I / strukturou A - B / velikostí 7).



Obr. 42: Naznačení místa zvětšení, leptáno Nital, 25x

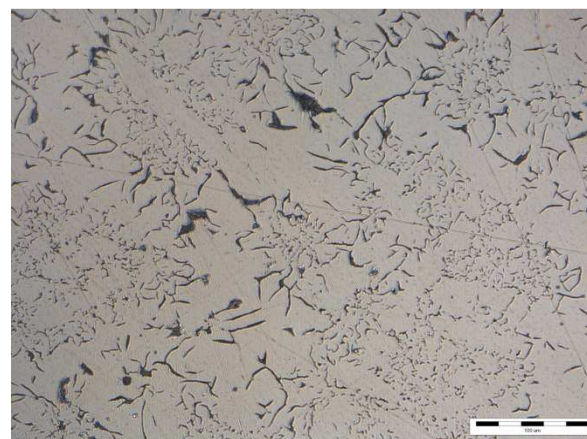


Obr. 43: Struktura zvětšeného výřezu, leptáno Nital, 100x

Na (**Obr. 43.**), který je pořízen z okraje přechodové části. Jsou patrné opět dendrity základní kovové hmoty. Vedle jemně vyloučeného lupínkového grafitu se vyskytují až 4x větší lupínky grafitu. V útvarech jemně lamelárního perlitu se vyskytuje méně lupínků grafitu, než je tomu v okolí dendritů základní kovové hmoty. V této oblasti jsou v okolí větších lupínků grafitu občas viditelné feritické dvorce. Podle ISO 945-1:2008(E) tato struktura odpovídá kategorii (formou I / strukturou D / velikostí 5). Neidentifikované černé útvary jsou opět mezidendritické póry.

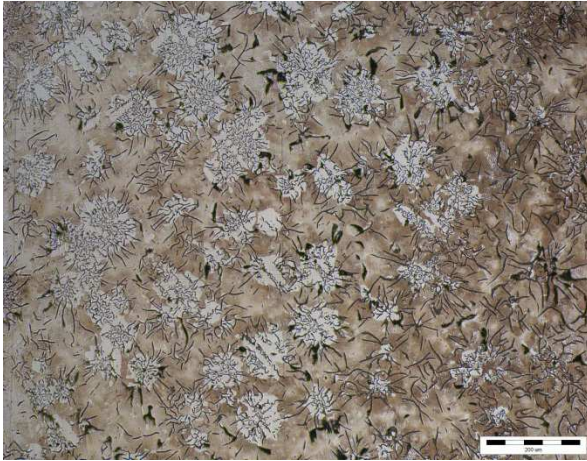


Obr. 44: Naznačení místa zvětšení, leptáno Nital, 25x

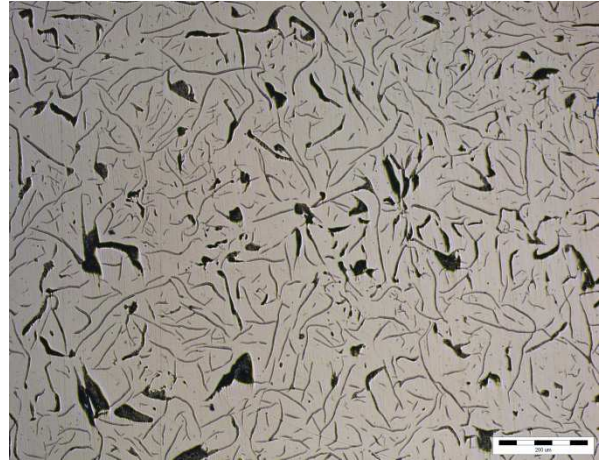


Obr. 45: Struktura zvětšeného výřezu, neleptáno, 500x

Na (**Obr. 45.**), který je pořízen ze středu poněkud širšího můstku (1,312 mm). Jsou patrné dendrity základní kovové hmoty. Grafit je jemně vyloučen, ale vyskytují lupínky grafitu až 7x větší. Několikrát je grafit uspořádán v růžicích, ale objevují se i větší lupínky uspořádané bez orientace. Podle ISO 945-1:2008(E) tato struktura odpovídá kategorii (formou I / strukturou A - B - C / velikostí 7). Neidentifikované černé útvary jsou opět mezidendritické póry.



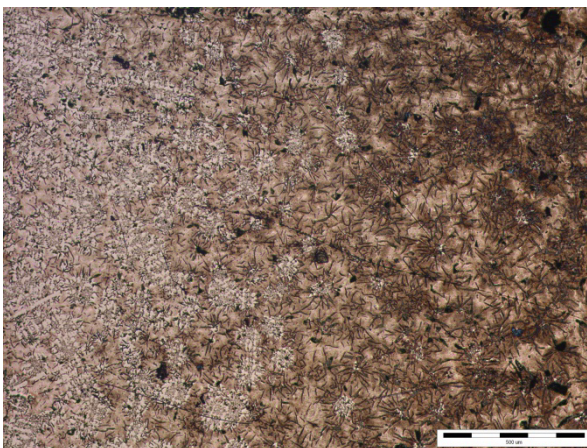
Obr. 46: Struktura zvětšeného výřezu, leptáno Nital, 100x



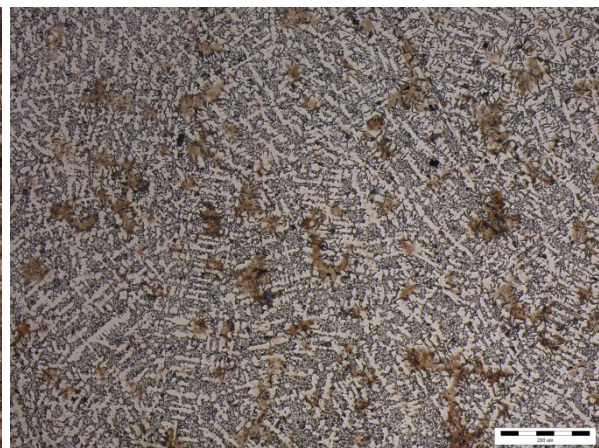
Obr. 47: Struktura zvětšeného výřezu, neleptáno 500x

Na (*Obr. 46.*), který je pořízen z okrajové stěny vzorku (*Obr. 37.*), jsou patrné lupínky grafitu uspořádané růžicově. V růžicích převládá ferit v okolí lupínek, ostatní plocha je tvořena jemně lamelárním perlitem. Místy je perlit poněkud hrubší. Podle ISO 945-1:2008(E) tato struktura odpovídá kategorii (formou I/ strukturou B/ velikostí 5). Neidentifikované černé útvary jsou póry.

Na (*Obr. 47.*), který je pořízen z okrajové stěny vzorku (*Obr. 37.*), jsou patrné lupínky grafitu v základní kovové hmotě. Výběr místa byl proveden, aby byl objasněn tvar grafitu mezi růžicemi, pro větší názornost bylo použito zvětšení 500x. Zde se podle ISO 945-1:2008(E) jednoznačně jedná o strukturu kategorie (forma I/ strukturou C/ velikostí 7). Neidentifikované černé útvary jsou mezidendritické póry.



Obr. 48: Struktura silné části, leptáno Nital, 100x



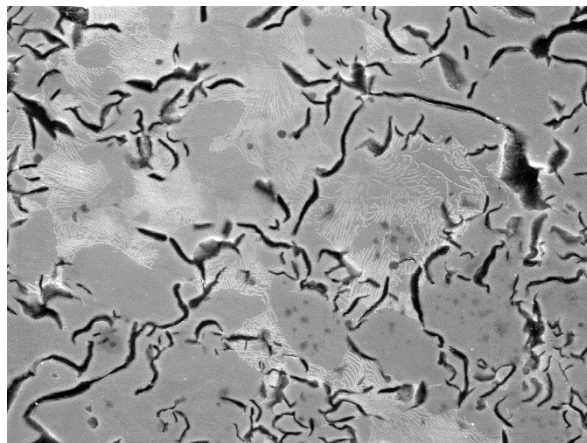
Obr. 49: Struktura můstku, leptáno Nital, 100x

Na (*Obr. 48.*) je jasně patrné, že u povrchu odlitku je vyšší podíl feritu, jehož výskyt je z důvodu oduhličení povrchu. Delší osy dendritů základní kovové hmoty pod povrchem vzorku rovněž dokumentují rychlejší tuhnutí. Růžicové uspořádání grafitu se vyskytuje nejvíce v přechodové části vzorku (uprostřed snímku). Podle ISO 945-1:2008(E) tato struktura odpovídá kategorii (formou I / strukturou A-D / velikostí 4).

Na (**Obr. 49.**) rychlé tuhnutí v můstku vzorku je opět typické jasným uspořádáním dendritů základní kovové hmoty. V mezidendritických prostorách se objevují drobné útvary lamelárního perlitu. Podle ISO 945-1:2008(E) tato struktura odpovídá kategorii (formou I / strukturou D / velikostí 7).

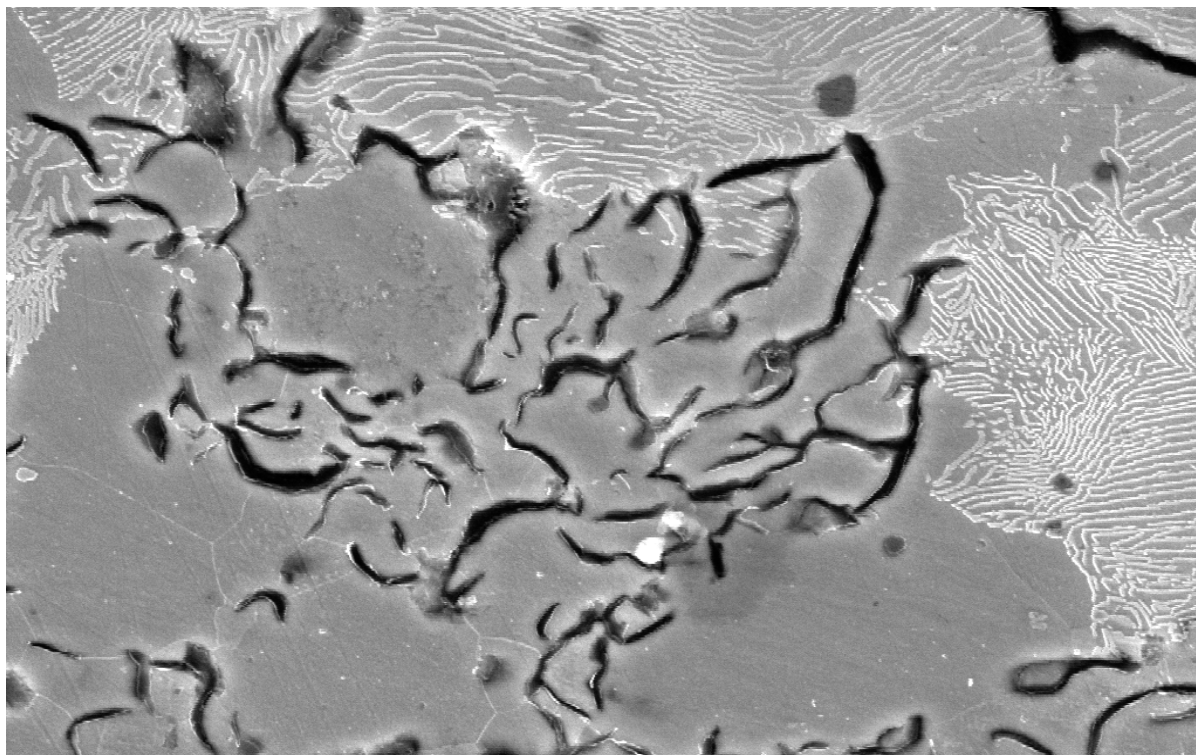


Obr. 50: Silná část šedé litiny



Obr. 51: Můstek šedé litiny

Na snímku (**Obr. 50.** a **Obr. 51.**) je porovnání struktur v silné části a můstku vzorku ze šedé litiny. Snímky potvrzují závěry uvedené v textu ke snímkům z optického mikroskopu. (**Obr. 44.** a **Obr. 45.**).



Obr. 52: Můstek šedé litiny, detail

Na snímku (*Obr. 52.*) jsou zřetelná lamelární struktura perlitu, tím jsou opět potvrzeny údaje uvedené v popisu snímků z optického mikroskopu.

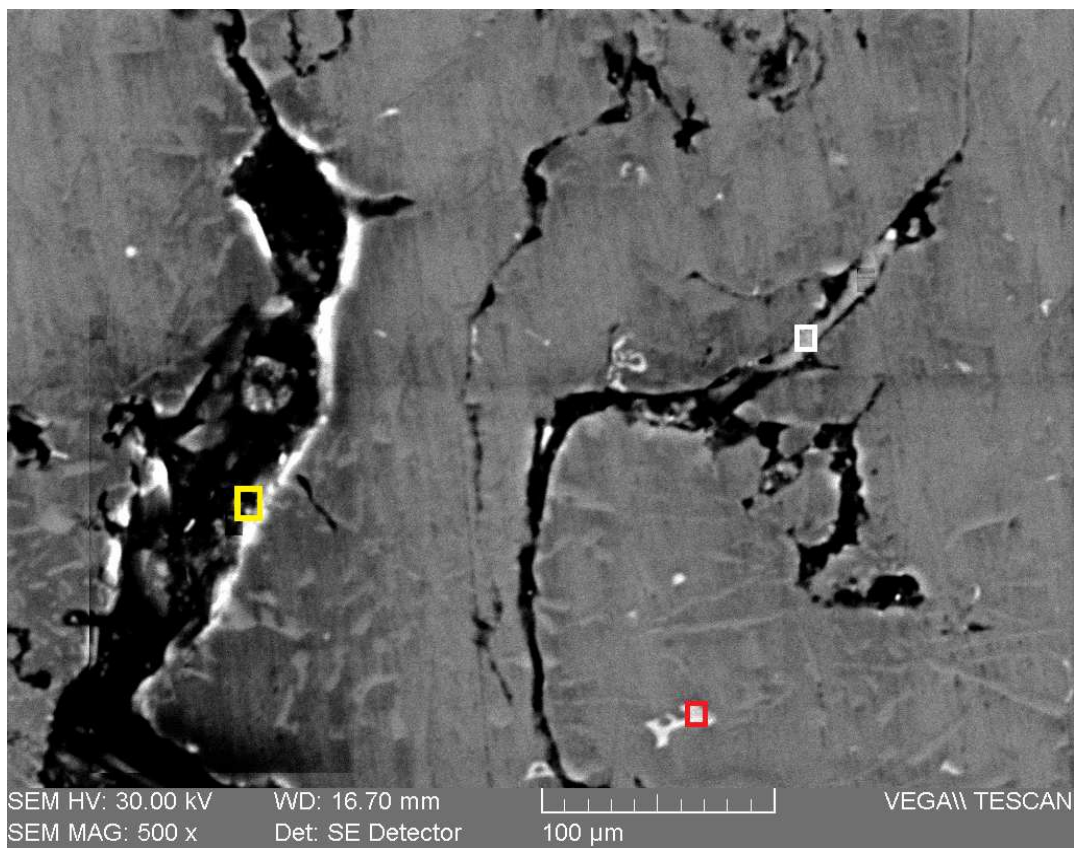
Při rychlém tuhnutí dochází významnému projevu efektu smrštění. Grafitická expanze nepostačí k zamezení vzniku pórů.

4.6 Chemické mikroanalýzy

Vzorky byly dále zkoumány EDX analýzou pro přesnější určení struktur a fází v nich obsažených.

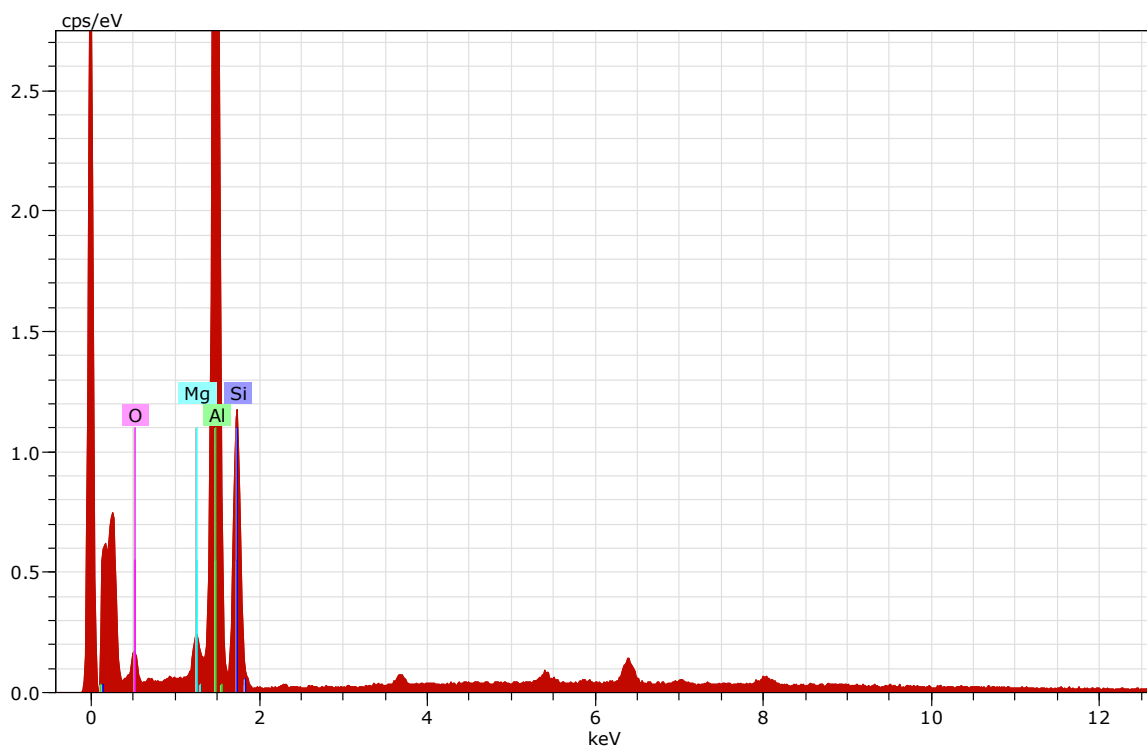
4. 6. 1. Chemické mikroanalýzy siluminu

Na (*Obr. 53.*) jsou označeny tři vybraná místa, u kterých byl ověřen možný výskyt nežádoucích prvků (očekávány významné změny koncentrací prvků oproti základní kovové hmotě a křemíkového eutektika). Jedná se o místa uvnitř (žlutě a bíle označené místo) a poblíž (červeně označené místo) protáhlých pórů a oxidických plen. Oxidické pleny vznikají zaplavováním rychle se tvořící oxidické blány na hladině taveniny. Oxidické vměstky polygonálních nebo deskovitých tvarů jsou typické spíše pro ostatní kovy obsažené v tavenině. Oxidy ostatních kovů se ve zvoleném místě se vyskytují zanedbatelně (nebyly identifikovány).



Obr. 53: Naznačení třech vybraných míst ve vzorku siluminu

Ve žlutě označeném místě byly identifikovány tyto prvky majoritně hliník, křemík, kyslík a minoritně hořčík (**Tab. 7.**). V souladu s očekáváním je nejvíce oxidů tvořeno reakcí hliníku a křemíku s kyslíkem, protože útvary eutektického křemíku zabíhají až k oxidickým plenám, je přibližně polovina oxidů tvořena reakcí s křemíkem.



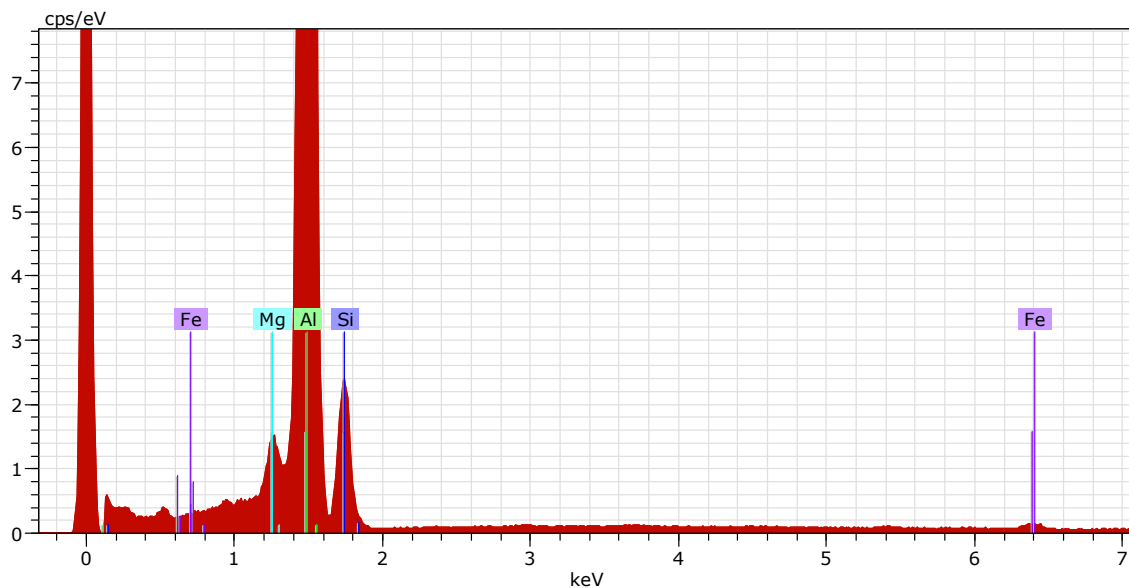
Obr. 54: Graf vyhodnocení EDX analýzy, žlutě označené místo

Tab. 7: Výsledky analýzy EDX

Prvek	Atomové č.	Hmotnostní %	Atomová hmotnost %
Hliník (Al)	13	52,39	46,91
Křemík (Si)	14	25,03	26,96
Kyslík (O)	8	16,84	18,14
Hořčík (Mg)	12	2,34	2,52

V bíle označeném místě byly identifikovány tyto prvky majoritně hliník, křemík a minoritně hořčík a železo (**Tab. 8.**). Opět je nejvíce oxidů tvořeno reakcí hliníku a křemíku s kyslíkem, ale uvnitř převládají oxidy hliníku. Oxidy hořčíku nejsou zjevné.

Oxidické pleny nemají homogenní chemické složení, i když převládají oxidy hliníku.



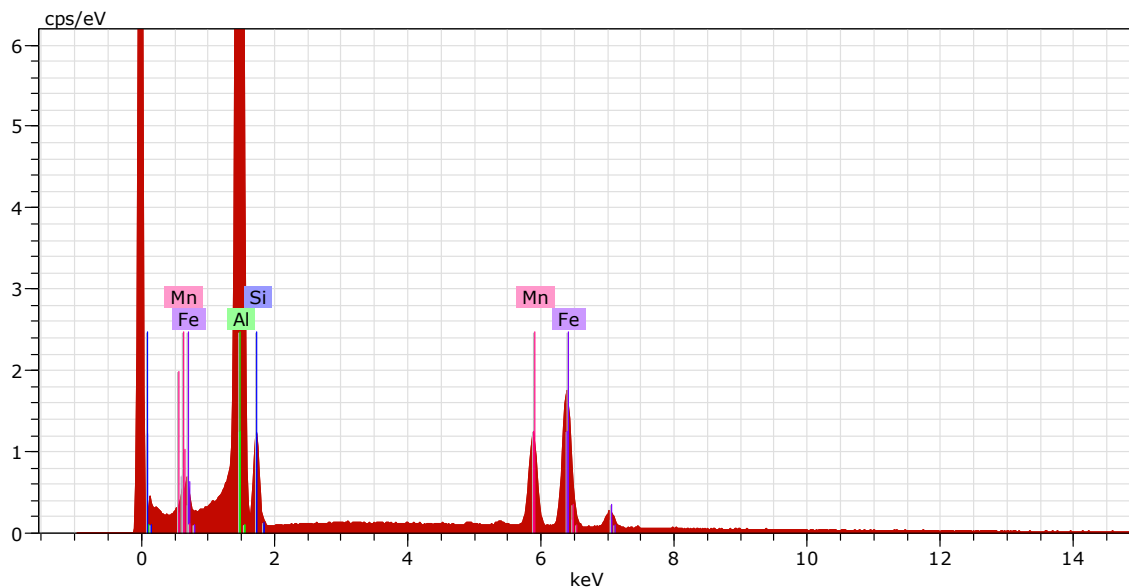
Obr. 55: Graf vyhodnocení EDX analýzy, bíle označené místo

Tab. 8: Výsledky analýzy EDX

Prvek	Atomové č.	Hmotnostní %	Atomová hmotnost %
Hliník (Al)	13	82,02	82,55
Křemík (Si)	14	14,74	14,25
Hořčík (Mg)	12	2,58	2,88
Železo (Fe)	26	0,67	0,32

V červeně označeném místě byly identifikovány tyto prvky hliník, železo, mangan a křemík (*Tab 9*). Vysoké procento obsahu hliníku v místě ozáření je dáno jednak tím, že paprsek zabral i oblast kolem zkoumaného útvaru a krom toho vyloučený útvar je sloučenina α ($\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$), a takto vyloučené železo se vyskytuje v útvech obvykle nazývaných rybí kostičky nebo rozsypaný čaj. Analýza EDX potvrdila, že obsah manganu je více než poloviční ve vztahu k železu. Toto tvrzení je též potvrzeno spektrální analýzou použitého vzorku. V případě, že by obsah manganu byl významně nižší než polovina obsahu železa, vznikaly by útvary jiné morfologie.

Podle dostupných teoretických podkladů je očekáváno, že je nejvíce oxidů tvořeno reakcí hliníku s kyslíkem. Útvary obsahující železo vznikají reakcí s hliníkem a křemíkem β (Al_5FeSi). Takto vyloučené železo je nežádoucí, protože tvoří deskovité útvary, které významně snižují houževnatost. Čím je vyšší obsah železa v siluminu (nad 1%), pokud není morfologie útvaru změněna vlivem dostatečného množství manganu (nad polovinu obsahu železa), stává se silumin velmi křehkým.

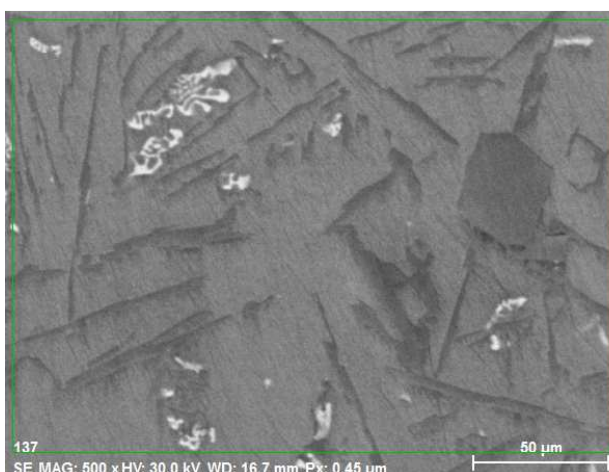


Obr. 56: Graf vyhodnocení EDX analýzy, červeně označené místo

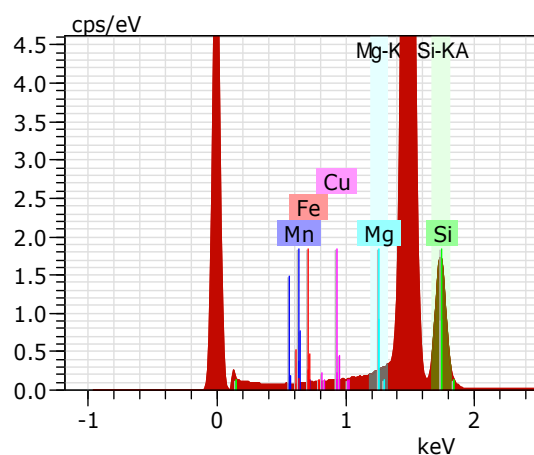
Tab. 9: Výsledky analýzy EDX

Prvek	Atomové č.	Hmotnostní %	Atomová hmotnost %
Hliník (Al)	13	65,49	76,90
Železo (Fe)	26	17,68	10,03
Mangan (Mg)	25	10,73	6,19
Křemík (Si)	14	6,10	6,88

Následující série snímků vypovídá o rozložení jednotlivých prvků ze snímku (Obr. 53.) distribuce Si, Fe a Mn odpovídá rozložení typických fází v matrici siluminu.



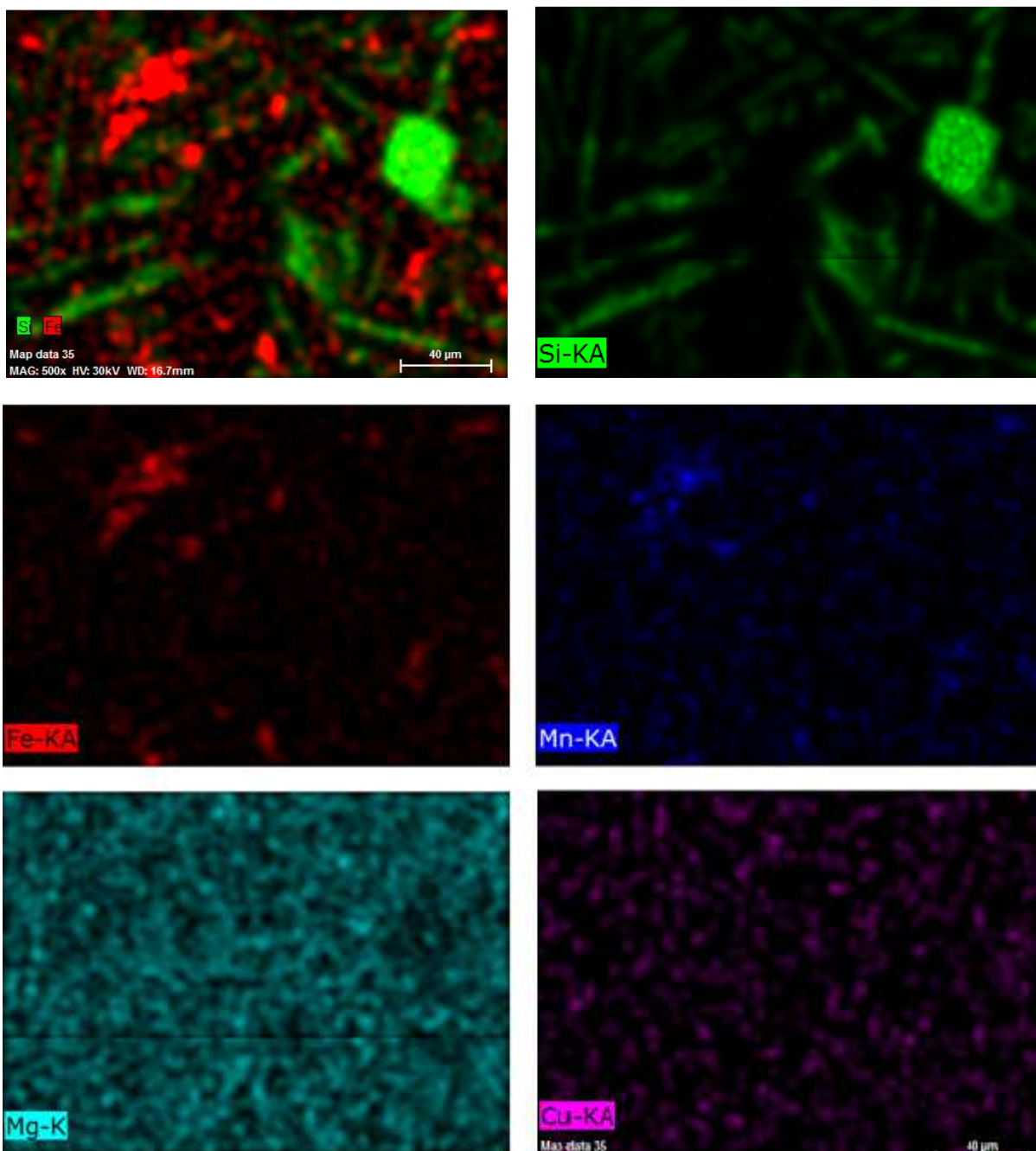
Obr. 57: Vybrané místo vzorku siluminu



Obr. 58: Graf vyhodnocení analýzy EDX

Nejprve byl pořízen snímek FeSi, ze kterého vyplývá, že nejsvětlejší útvary (Obr. 57.), na (Obr. 59. vlevo nahoře) znázorněny červeně obsahují železo (kostřičky, rozsypaný čaj).

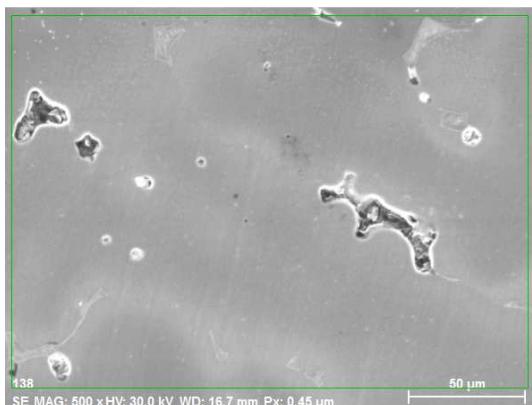
Zeleně je znázorněn křemík, zelený kosočtvercový útvar je s největší pravděpodobností nerozpuštěný křemík ostatní zelené útvary jsou křemíkové eutektika. Toto tvrzení potvrzuje snímek (*Obr. 59. vpravo nahoře*).



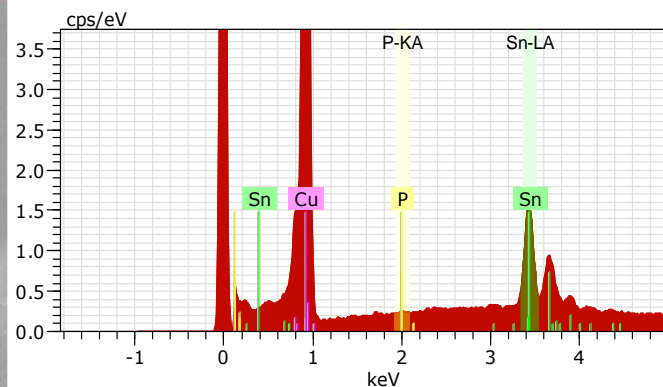
Obr. 59: Série snímků pro identifikaci rozložení jednotlivých prvků v siluminu

Obdobně je potvrzen obsah železa (*Obr. 59. vlevo uprostřed*). Je-li železo vyloučeno v uvedených útvarech (kostřičky, rozsypaný čaj), je doprovázeno obsahem manganu, což potvrzuje snímek (*Obr. 59. vpravo uprostřed*). Podeutektický silumin AlSi10Mg obsahuje více než 2,0 % Mg, který je téměř rovnoměrně rozptýlen, menší výskyt Mg je patrný v místech s obsahem Fe a Si. Stopy mědi na (*Obr. 59. vpravo dole*) jsou téměř rovnoměrně rozloženy v celém snímku a vztahy s křemíkem, železem a hořčíkem nejsou nijak patrné.

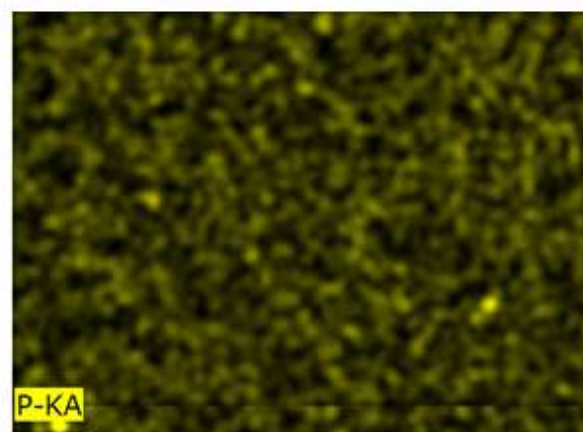
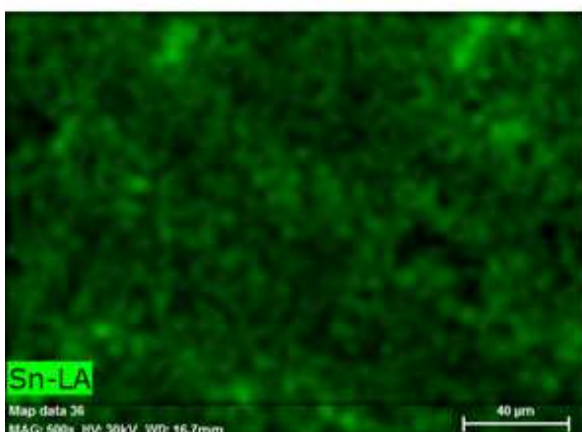
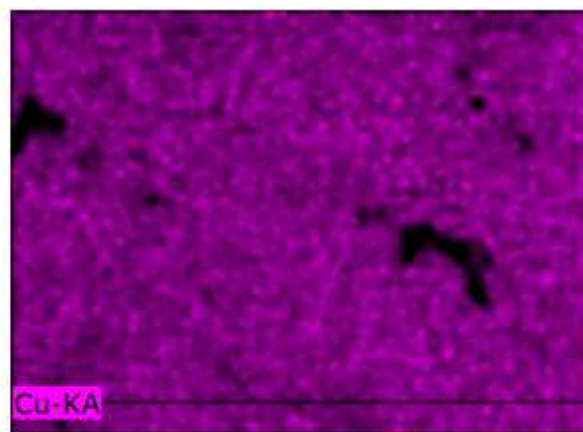
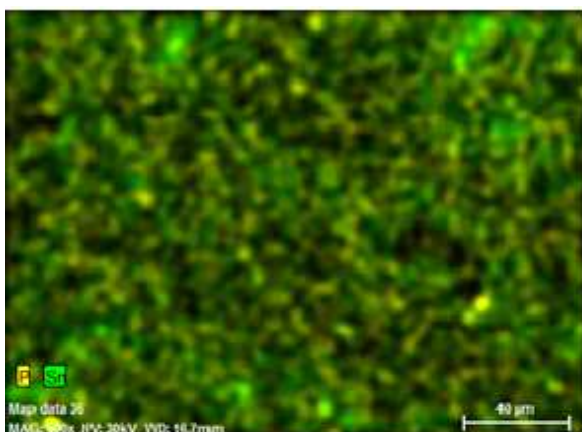
4. 6. 2. Chemické mikroanalýzy cínové bronzy



Obr. 60: Vybrané místo vzorku cínové bronzy



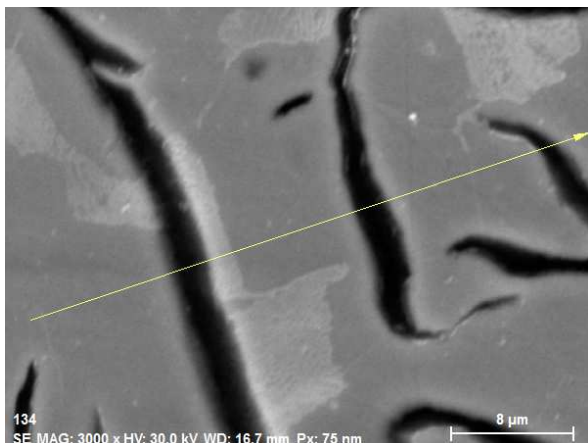
Obr. 61: Graf vyhodnocení analýzy EDX



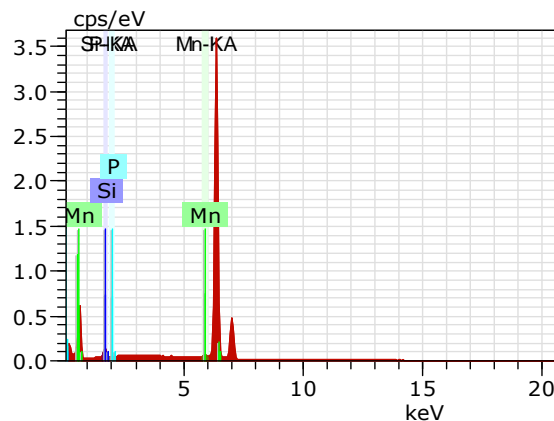
Obr. 62: Série snímků pro identifikaci rozložení jednotlivých prvků bronzy

Nejprve byl pořízen snímek P Sn, ze kterého vyplývá, že útvary eutektoidu (*Obr. 60.*), jsou patrné na hranicích zrn základní měděné fáze na (*Obr. 62. vlevo nahoře zeleně, ale výrazněji vlevo dole*). Ohraničené útvary jsou póry, kde se jedná o dopočítaný výsledek (výsledek není relevantní). Měď je poněkud řidčeji rozptýlená v místech výskytu cínového eutektoidu v dutinách se nevyskytuje vůbec.

4. 6. 3. Chemické mikroanalýzy šedé litiny

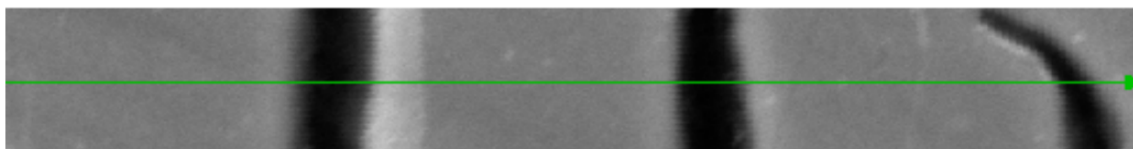
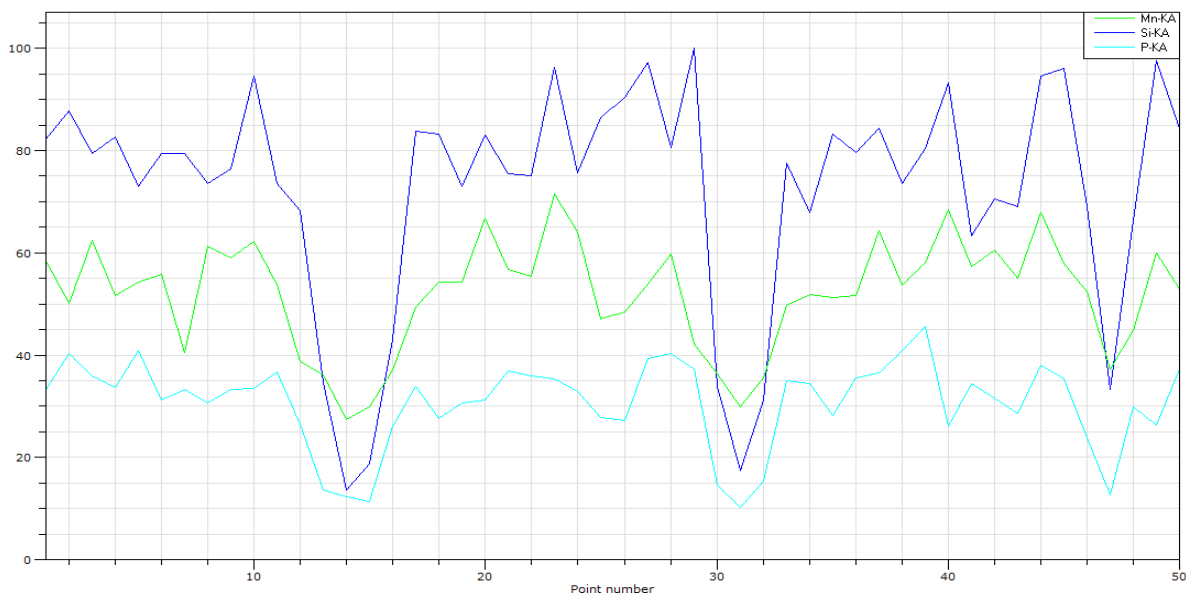


Obr. 63: Vybrané místo vzorku šedé litiny



Obr. 64: Graf vyhodnocení analýzy EDX

Chemické mikroanalýzy byly provedeny přednostně na rozhraní grafitických útvarů s cílem posoudit možný nežádoucí výskyt fosforu, uváděný výrobcem. Na snímku (Obr. 63.) je znázorněna linie (žlutá úsečka) EDX analýzy, s výsledkem na (Obr. 65.). Kolem lupínek grafitu se vyskytuje základní kovová hmota (ferit) s ostrůvky lamelárního perlitu.



Obr. 65: Vybrané místo vzorku šedé litiny a graf s průběhem množství prvků ve vzorku

Na (Obr. 65.) je detailně vyobrazena uvedená linie s doplněným diagramem obsahu mangan (zeleně), křemík (modře) a fosfor (azurově). U všech tří prvků je znatelný významný pokles v místech lupínek grafitu až na „teoretickou nulu“. Výskyt fosforu, popř. jiných nežádoucích prvků nebyl zjištěn v detekovatelném obsahu.

5 Závěr

Práce je věnována studiu kovových pěn ze siluminu, cínové bronzy a šedé litiny. Jedná se o perspektivní materiály s širokým uplatněním v mnoha průmyslových oborech (doprava, strojírenství, stavebnictví, elektrotechnika apod.).

Předmětem analýzy byly vzorky z experimentálních odlitků, vyhotovených v rámci vývoje technologie lití kovových pěn v ČR, bylo využito vzorků, které byly v době zpracování praktické části k dispozici.

V teoretické části byla provedena rešerše z dostupných prací o kovových pěnách, problematika byla popsána od prvních záměrů včetně použitelných aplikací.

Tyto vzorky (silumin, cínová bronz, šedá litina) byly nejprve připraveny pro optickou mikroskopii. Provedeny byly základní strukturní a fázové analýzy všech materiálových variant se zaměřením na rozdíly v závislosti na tloušťce stěny hodnocených odlitků. Vyhotovena byla srovnávací fotodokumentace světelnou a elektronovou mikroskopií, jako základ pro navazující kvantitativní vyhodnocení zjištěných strukturních rozdílů. V návaznosti na výsledky strukturního rozboru byly ve vybraných oblastech provedeny chemické mikroanalýzy. Cílem bylo ověřit možný výskyt nežádoucích prvků na rozhraní vyskytujících se fází (kupř. fosforu u šedé litiny). Rovněž byla blíže dokumentována morfologie vybraných strukturálních složek a zmapováno rozložení vybraných prvků v jednotlivých fázích.

Zjištěny byly podstatné strukturní rozdíly především u šedé litiny, kdy byly pozorovány rozdíly v tloušťce i distribuci grafitických útvarů, rovněž v podílu feritu / perlitu v matrici. Celkově byly u všech vzorků zjištěny tendence zjemnění struktury v průřezu můstků mezi póry kovové pěny.

Tyto rozdíly byly v provedeném rozsahu praktických analýz dokumentovány v konkrétní tloušťce stěny v analyzovaném místě. Rozsáhlejší rozbor, doplněný o kvantifikaci zjištěných strukturních rozdílů použitím metod obrazové analýzy, by v návaznosti na tyto výsledky umožnilo vyjádření případných obecněji použitelných závislostí.

Hlavní záměr hodnocení kvality lehčených siluminů do kovových forem byl rozšířen o hodnocení odlitků z šedé litiny a cínové bronzy. Vzorky odlévané do kovových forem nebyly k dispozici. Zaměřením na litiny a bronzy společně se siluminy přineslo vstupní informace o mikrostruktuře použitých materiálů pro výrobu kovových pěn. Zejména hodnocení litin ukázalo na vliv rozdílu tloušťky stěny na mikrostrukturu a tím i na lokální pevnost lehčených odlitků.

6 Použitá literatura

- [1] Gailard, Y., Dairon, J., Fleuriot, M., Les matériaux cellulaires, Fonderie Janvier 2010 N°1, s. 29-30
- [2] Lichý, P., Bednářová, V., Elbel, T. Casting routes for porous metals production. Archives of Foundry Engineering. Vol. 12 (2012), Issue 1/1012. p. 71-74. ISSN 1897-3310 (ID286077858)
- [3] Elbel, T., Bednářová, V., Lichý, P.; Lána, I., Výsledky praktických a laboratorních zkoušek vlastností kovových pěn, 50. Slévárenské dny Brno 2013 ISBN 978-80-02-02492-7
- [4] Elbel, T., Bednářová, V., Lichý, P.; Lána, I., Výsledky praktických a laboratorních zkoušek vlastností kovových pěn, 21. Seminář Ekologie a slévárenství Hradec Králové 2013 ISBN 978-80-02-02453-8
- [5] Dorazil, E., Nauka o materiálu 1, učební texty vysokých škol, Brně: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1986, ISBN 05-030-86.
- [6] Skočovský P., Podrábský, T.: Grafitické liatiny, EDIS-ŽU, 2005, ISBN 80-8070-390-6
- [7] Hučka, J., Litiny a jejich vlastnosti, Kurz pro taviče, Sborník přednášek, ČSS Brno 2002, str. 33
- [8] VSCHT, Metalografie II, [online], [cit. 2014-07-10], Dostupný z [www: https://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labor/fm_metalografie_2/teorie.htm](https://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labor/fm_metalografie_2/teorie.htm)
- [9] Wikipedia, EDX analýza [online], [cit. 2014-07-11], \dostupný z [www: http://en.wikipedia.org/wiki/Energy-dispersive_X-ray_spectroscopy](http://en.wikipedia.org/wiki/Energy-dispersive_X-ray_spectroscopy)
- [10] ISO 945-1:2008(E) Graphite classification by visual analysis (klasifikace grafitu dle vizuální analýzy)
- [11] Bednářová, V., Lichý, P.; Lána, I., Kovové pěny, perspektivní materiál s pozitivním účinkem i na ŽP, Sborník 22. Seminář Ekologie a slévárenství str. 51, ISBN 978-80-02-02518-4
- [12] Bednářová, V., Lichý, P., Lité porézní kovy – výroba a vlastnosti, Slévárenství L X leden – únor 2012 1–2, str. 9