



# Ověření optimalizace procesu tepelného zpracování tlakově litých hliníkových odlitků ve Škodě Mladá Boleslav

## Diplomová práce

*Studijní program:*

N2301 Strojní inženýrství

*Studijní obor:*

Strojírenská technologie a materiály

*Autor práce:*

**Bc. Petr Jícha**

*Vedoucí práce:*

Ing. Adam Hotař, Ph.D.

Katedra materiálu

*Konzultant práce:*

doc. Ing. Jiří Machuta, Ph.D.





## Zadání diplomové práce

# Ověření optimalizace procesu tepelného zpracování tlakově litých hliníkových odlitků ve Škodě Mladá Boleslav

*Jméno a příjmení:* **Bc. Petr Jícha**  
*Osobní číslo:* S18000223  
*Studijní program:* N2301 Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* Strojírenská technologie a materiály  
*Zadávající katedra:* Katedra materiálu  
*Akademický rok:* **2019/2020**

### Zásady pro vypracování:

1. Analyzujte po teoretické stránce možnosti tepelného zpracování odlitků litých z Al slitin pod vysokým tlakem.
2. Zdokumentujte stávající stav procesu tepelného zpracování a vliv TZ na vlastnosti a strukturu odlitků. Navrhněte optimalizaci procesu žíhání odlitků bloku válců.
3. Experimentálně ověřte nově získané vlastnosti z hlediska vybraných mechanických vlastností a struktury.
4. Vyhodnoťte proveditelnost procesu TZ a přínosy navržené optimalizace.

*Rozsah grafických prací:* dle potřeby  
*Rozsah pracovní zprávy:* 40 – 50 stran  
*Forma zpracování práce:* tištěná/elektronická  
*Jazyk práce:* Čeština



## Seznam odborné literatury:

- [1] VALECKÝ, Jindřich. *Lití kovů pod tlakem*: Určeno prac. sléváren, konstruktérům a technologům i stud. prům. a vys. škol. 1. vyd. Praha: SNTL, 1963. 450, [2] s. Řada strojír. lit.
- [2] SEDLÁČEK, Vladimír. *Neželezné kovy a slitiny*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979.
- [3] *ASM handbook*. Volume 4, Heat treating. Materials Park: ASM International, 1991. ISBN 0-87170-379-3.
- [4] MICHNA, Štefan. *Aluminium materials and technologies from A to Z*. [Děčín: s.n., 2007]. ISBN 978-80-89244-18-8.

*Vedoucí práce:*

Ing. Adam Hotař, Ph.D.  
Katedra materiálu

*Konzultant práce:*

doc. Ing. Jiří Machuta, Ph.D.

*Datum zadání práce:*

1. listopadu 2019

*Předpokládaný termín odevzdání:* 30. května 2021

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

prof. Ing. Petr Louda, CSc.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2019

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

16. května 2021

Bc. Petr Jícha

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

**Fakulta strojní**

Katedra materiálu

## ANOTACE

Jméno a přímení:	Bc. Petr Jícha
Téma práce:	Ověření optimalizace procesu tepelného zpracování tlakově litých hliníkových odlitků ve Škodě Mladá Boleslav
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Obor:	Materiály a technologie
Vedoucí práce:	Ing. Adam Hotař, Ph.D.
Konzultant DP:	doc. Ing. Jiří Machuta, Ph.D.

V diplomové práci je řešena problematika optimalizace tepelného zpracování bloku motoru z hliníkové slitiny se zaměřením na stanovení optimální žíhací teploty, při které bude dosaženo předepsaných hodnot tvrdosti dle výkresové dokumentace. K vyhodnocení výsledků experimentu je využito zkoušky tvrdosti dle Brinella, světelné a elektronové mikroskopie a rentgenové difrakce pro stanovení zbytkových napětí.

**Klíčová slova:** blok motoru, slitina hliníku, tepelné zpracování, zkouška tvrdosti

Počet stran: 74

Počet obrázků: 40

Počet tabulek: 9

Počet příloh: 2 + přiložené CD

# **TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC**

## **Faculty of Mechanical Engineering**

Department of Materials

### **ANNOTATION**

Name and surname: Bc. Petr Jícha

Thesis topic: Verification of the optimization of the heat treatment process of die-cast aluminum engine block in Škoda Mladá Boleslav

Study program: N2301 Mechanical Engineering

Subject: Materials and technologies

Thesis supervisor: Ing. Adam Hotař, Ph.D.

DP consultant: doc. Ing. Jiří Machuta, Ph.D.

The thesis deals with the optimization of heat treatment of an aluminium alloy engine block with a focus on the determination of the optimum annealing temperature at which the prescribed hardness values according to the drawing documentation will be achieved. Brinell hardness test, light and electron microscopy and X-ray diffraction are used to evaluate the experimental results to determine the residual stresses.

Keywords: engine block, aluminium alloy, heat treatment, hardness test

Number of pages: 74

Number of figures: 40

Number of tables: 9

Number of annexes: 2 + attached CD

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl vyjádřit poděkování mému vedoucímu diplomové práce Ing. Adamovi Hotařovi, Ph.D. a panu doc. Ing. Jiřímu Machutovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné připomínky a rady, dále za poskytnutí podkladů k diplomové práci. Dále bych chtěl poděkovat odpovědným osobám ve Škoda Auto, a.s. za poskytnutí vzorků a laboratorního zázemí v prostorách firmy v Mladé Boleslavi. Nakonec můj dík patří všem, kteří mi byli jakkoli nápomocni při psaní diplomové práce.

## Obsah

Seznam použitých zkratk	10
Úvod	12
1. Teoretická část diplomové práce	14
1.1 Historie používání hliníkových slitin	14
1.2 Výroba hliníku	14
1.3 Slitiny hliníku	17
1.3.1 Rozdělení hliníkových slitin	17
1.4 Tepelné zpracování hliníkových slitin	20
1.4.1 Vytvrzování hliníkové slitiny	22
1.4.1.1 Rozpouštěcí žíhání	23
1.4.1.2 Fáze ochlazování	24
1.4.1.3 Fáze stárnutí	24
1.4.1.4 Precipitace	25
1.5 Vysokotlaké lití slitin hliníku	27
1.5.1 Odlévání bloku motoru ve Škoda Auto, a.s.	28
1.5.2 Tepelné zpracování bloku motoru po odlití, hrubé apretaci a kontrole	30
1.5.3 Finální úprava spalovacího prostoru bloku motoru	31
1.6 Zkoušky pro určení metalografických a mechanických vlastností bloku motoru	32
1.6.1 Světelná (optická) mikroskopie a metalografie	32
1.6.2 Skenovací (rastrovací, řádkovací) elektronová mikroskopie – SEM	33
1.6.3 Zkouška tvrdosti dle Brinella (ČSN EN ISO 6506-1)	33
1.6.4 Rentgenová analýza struktury – rentgenová difrakce	35
1.6.4.1 Měření zbytkového napětí pomocí RTG difrakce	37
1.6.5 Spektrální rentgenová analýza chemického složení	38
2. Experimentální část diplomové práce	39
2.1 Zkoušky mechanických vlastností bloku motoru	40
2.1.1 Měření tvrdosti dle Brinella (EN ISO 6506)	40
2.1.2 Měření zbytkových napětí rentgenovou difrakcí	47
2.2 Strukturní šetření	51
2.2.1 Rentgen – fluorescenční metoda (XRF) stanovení chemického složení Al slitiny bloku motoru – spektrální analýza	51
2.2.2 Studium mikrostruktury vzorků světelným mikroskopem	53
2.2.3 Sledování mikrostruktury vzorků elektronovým mikroskopem	58
3. Závěr	67



Seznam použité literatury .....	70
Seznam obrázků .....	71
Seznam tabulek .....	73
Seznam příloh.....	73

## Seznam použitých zkratk

Al – aluminium – chemická značka hliníku

Cu – cuprum – chemická značka mědi

ČSN – Česká státní norma

EN – Evropská norma

fcc – face-centered-cubik – kubická, plošně centrovaná mřížka

Fe – ferrum – chemická značka železa

GPa – gigapascal – jednotka tlaku

HB – tvrdost podle Brinella

kg – kilogram

m<sup>3</sup> – metr krychlový

Mg – magnesium – chemická značka hořčíku

Mn – manganum – chemická značka manganu

MPa – megapascal – jednotka tlaku

Na – natrium – chemická značka sodíku

O – oxygenium – chemická značka kyslíku

REM – rastrovací elektronová mikroskopie

Rm – mez pevnosti

S – Siemens – jednotka elektrické vodivosti

Si – silicium – chemická značka křemíku

Ti – titanium – chemická značka titanu

TZ – tepelné zpracování

VW – Volkswagen (Německá automobilka)

W – Watt (jednotka výkonu)

Zn – zincum – chemická značka zinku

## Úvod

V současné době stále rostoucí spotřeba energií a surovin klade na všechna průmyslová odvětví výrazný tlak na úspory. Úpravou technologií, a někdy i použitím náhražkových surovin, lze dosáhnout úspor v mnoha oblastech, tzn. nižší energetickou náročnost výrobního procesu, úsporu času v podobě rychlejší výroby polotovarů, či finálních výrobků, a v neposlední řadě i úsporu pracovních sil. Všechny tyto požadavky jsou kladeny i na automobilový průmysl, kde se navíc projevuje tlak i na co nejnižší cenu výrobků při zachování kvality a předepsaných parametrů výrobků. V důsledku toho má každá větší automobilka svůj tým, který se snaží o úspory a optimalizaci výrobního procesu.

Jedním z nejdůležitějších materiálů v automobilovém průmyslu, pro výrobu agregátu automobilu, jsou slitiny neželezných kovů. Z tohoto důvodu se velká část výzkumu a vývoje v automobilovém průmyslu ubírá směrem k metalurgii, a to jak vylepšování vlastností již známých slitin, tak i jejich následnému zpracování. Škoda Auto, a.s. má bohaté zkušenosti s metalurgickou výrobou těch nejnáročnějších tlakových hliníkových odlitků, mezi které patří i blok válců spalovacího motoru. Od roku 1963 se metoda vysokotlakového odlévání hliníkové slitiny používá pro blok válců motoru se všemi dalšími procesy, které s odléváním souvisí. Vlastním vývojem metody se postupně zdokonaloval proces odlévání, až dospěl k počítačovému řízení vstřikovacích tlaků a vakuování dutiny formy. Původně použitá slitina ČSN 42 4338 byla nahrazena v koncernu VW jednotnou obdobnou slitinou EN AC AlSi9Cu3(Fe) s obsahem Mg umožňující dílčí vytvrzení. Celý metalurgický proces výroby končí nízkoteplotním žiháním, které odstraňuje zbytková napětí a optimalizuje zpevnění. Původní žihání 180 °C po dobu 8 hodin bylo již v minulosti optimalizováno na žihání při teplotě 250 °C po dobu 3 hodin. Ani tato optimalizace žihací teploty v souvislosti se změnou technologie výroby bloku motoru (bezvložkový blok motoru) se nejeví v současné době jako ideální z hlediska výsledné tvrdosti po tepelném zpracování (žihání). Volba parametrů teploty a doby žihání umožňuje ovlivňovat výsledné pevnostní hodnoty. Protože bylo potřeba v souvislosti s novou konstrukcí bloku motoru (bezvložkové řešení) zlepšit pevnostní vlastnosti bloku motoru, bylo koncernem VW požadováno upravit režim žihání bloku motoru na teplotu 210 °C po dobu 3 hodin. Vznikla tedy potřeba, laboratorními metodami ověřit, všechny strukturní a napěťové souvislosti mající vliv na mechanické hodnoty výsledného produktu. Proto v rámci spolupráce Škody Auto, a.s. a Technické univerzity v Liberci byla zadána tato diplomová práce.

V teoretické části této diplomové práce je rozebrána problematika slitin hliníku, jejich zpracování se zaměřením na vysokotlaké lití. Dále tato část popisuje tepelné zpracování slitin hliníku litých působením vysokého tlaku. Na konci teoretické části jsou popsány teoretické základy zkušebních metod použitých v experimentální části.

Experimentální část práce je věnována analýze mechanických a metalurgických vlastností odlitku bloku motoru, kdy jako vzorky jsou použity odlité bloky motoru bez tepelného zpracování, které jsou po odlití pouze zachlazeny, jako druhé vzorky jsou použity bloky motoru žíhané na teplotu 210 °C po dobu 3 hodin a jako třetí vzorky jsou použity bloky motoru žíhané na teplotu 250 °C po dobu 3 hodin. Vlastnosti jednotlivých bloků jsou analyzovány pomocí optické a elektronové mikroskopie, zkouškou tvrdosti dle Brinella, rentgenovou difrakcí a spektrální analýzou chemického složení.

## 1. Teoretická část diplomové práce

### 1.1 Historie používání hliníkových slitin

Slévárenství a používání slitin kovů patří mezi nejstarší řemesla. Již v pozdní době kamenné se lidé snažili získat pro své výrobky trvanlivější materiály. V nejstarších dobách se používaly nejčastěji slitiny železa, mědi, stříbra a hliníku. Přestože hliníková ruda (bauxit) je známá relativně dlouhou dobu, její využití v průmyslu a při výrobě slitin, se datuje teprve od konce 19. století. Hliník je třetím nejvíce zastoupeným prvkem v zemské kůře, kdy toto zastoupení činí cca. 8 %. Jeho výroba v evropských podmínkách započala od roku 1886. [3]

Celosvětová výroba hliníku a jeho slitin prudce vzrůstá. Zatímco v roce 1900 bylo vyrobeno 8 000 tun primárního hliníku, v roce 1946 už to bylo 681 000 tun hliníku. V roce 2000 již činila výroba primárního (čistého) hliníku 21 191 000 tun, a v roce 2015 bylo vyrobeno a spotřebováno již 58,456 mil. tun primárního hliníku. S rostoucí spotřebou hliníkových slitin se v posledních letech rozvíjí výrazná snaha o maximální recyklaci čistého hliníku a jeho slitin. Takto recyklovaný hliník se nazývá sekundární hliník. V roce 1999 bylo vyrobeno cca. 7 000 000 tun sekundárního hliníku tzn., že podíl sekundárního hliníku na celosvětové produkci činil přibližně 25 %. U sekundárního hliníku nedochází k významné změně vlastností. [1]

### 1.2 Výroba hliníku

Základní sloučeninou hliníku využívanou v metalurgii je oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) – hliníkový prášek (obr. 1). Existuje celá řada metod výroby čistého oxidu hlinitého z rud, ovšem v metalurgické praxi se využívá pouze několik z nich. Oxid hlinitý vykazuje amfoterní charakter a tím pádem je ho možné získávat z rud kyselými i zásaditými metodami. Další významný způsob výroby oxidu hlinitého je způsob elektrotermický. [1]

V současnosti základní výrobní metodou pro získání oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) jsou metody zásadité. Principem této metody je působení zásad (hydroxidu sodného – NaOH nebo uhličitanu sodného –  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) na bauxitovou rudu. Touto reakcí se váže oxid hlinitý na hlinitan sodný, který je rozpustný ve vodě. Tuto metodu popisují následující chemické rovnice:

- $\text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{NaOH} \rightarrow 2\text{NaAlO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ,
- $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow 2\text{NaAlO}_2 + \text{CO}_2$ .



*Obr. 1 – Hliníkový prášek [7]*

Získaný roztok hlinitanu sodného se oddělí od sraženiny (tzv. červeného kalu). Tento kal se skládá především z oxidů a hydroxidů křemíku, železa a titanu. Následně se roztok hlinitanu sodného rozkládá a vzniká čistý hydroxid hlinitý. Tento alkalický roztok se dále odfiltruje a po nezbytných úpravách se vrací opět do procesu. Hydroxid hlinitý se působením vysokých teplot kalcinuje, tím dochází k odstranění vody a výsledně vzniká čistý, suchý, nehygroskopický  $\alpha$  –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Technicky existuje několik možností, jak výše uvedenou chemickou reakci realizovat. Způsob mokrou cestou tzv. Bayerovým způsobem je proces, kdy se bauxitová ruda sloučí přímo s roztokem hydroxidu sodného. Další možností je tzv. suchá cesta, kdy se bauxitová ruda spéká se solemi alkalických kovů, většinou uhličitany (např.  $\text{N}_2\text{CO}_3$ ) za přítomnosti uhličitany vápenatého v rotačních pecích (Müller-Jarkovinův způsob). Pokud ke spékání používáme elektrické pece, hovoříme o Kuzněcov-Žukovského způsobu. Pro získávání hlinitanu v tuhé formě se používají šachtové pece. [1]

Kyselé způsoby výroby hliníku se v současnosti prakticky nepoužívají, protože jsou tyto procesy technologicky velmi složité a vlastní výrobní proces výrazně prodražují. Je to zejména úplné vyčištění oxidu hlinitého od příměsí železa. Další nevýhodou je kyselinovzdornost aparatury, což znamená, že musí být vyrobená z olova nebo keramiky, která je oproti ocelové aparatuře pro zásadité způsoby, výrazně dražší. V neposlední řadě je regenerace kyselin obtížná a postižena velkými ztrátami. Oproti tomu hydroxidy se regenerují snadněji a prakticky v plné míře se vrátí zpět do výrobního procesu. [1]

Elektrotermické způsoby jsou rentabilní pouze v případě levné elektrické energie, a tudíž se v současnosti využívají pouze výjimečně. [1]

Z takto získaného oxidu hlinitého se čistý hliník získává elektrolýzou. Vlastní proces elektrolýzy má technologicky několik metod: elektrolytický rozklad oxidu hlinitého rozpuštěného v roztaveném kryolitu, trojvrstvá rafinační metoda. Celková efektivita a výtěžnost výroby hliníku závisí zejména na vlastnostech a složení jednotlivých bauxitových rud. Pro zabezpečení maximální kvality hliníku je před jeho odléváním ještě nutné další zpracování, které zajišťuje odstranění nečistot. Toto zpracování se nazývá rafinace. Prvky a sloučeniny tvořící nečistoty v hliníku, kdy tyto zásadním způsobem ovlivňují kvalitu a vlastnosti výsledného produktu. [1]

Tímto výrobním procesem získáme čistý hliník, v technické praxi je technicky čistý hliník 99,5% Al. Čistý hliník má kubickou, plošně centrovanou mřížku (fcc). Tato krystalická struktura má za následek dobré plastické vlastnosti hliníku a jeho slitin, a to jak za studena, tak i za tepla. Na vzduchu je hliník poměrně stabilní kov, a to díky tvorbě pasivní ochranné vrstvy oxidu hlinitého na svém povrchu. Dále hliník patří mezi výborné tepelné a elektrické vodiče. Dosahuje cca 60 % vodivosti čisté mědi. Vlastnosti čistého hliníku (99,5% Al) jsou uvedeny v tab. 1. [1]

*Tab. 1 - Vlastnosti čistého hliníku*

Veličina	Hodnota	Jednotka
Hustota	2690	kg/m <sup>3</sup>
Teplota tání	660,4	°C
Teplota varu	2494	°C
Tepelná vodivost (při 25 °C)	247	W/m
Elektrická vodivost	37,7x10 <sup>6</sup>	S/m
Modul pružnosti v tahu	71	GPa
Mez pevnosti v tahu (vyžíhaný stav)	70	MPa
Mez kluzu (vyžíhaný stav)	20	MPa
Tažnost (vyžíhaný stav)	20-30	%
Tvrdość HB (vyžíhaný stav)	20	

Vzhledem k vlastnostem čistého hliníku (nízká pevnost) je jeho praktické využití omezené. Z tohoto důvodu se mnohem častěji používají slitiny hliníku s přidavkem zinku,



křemíku, manganu, hořčíku či mědi, které dobré vlastnosti hliníku stabilizují nebo dále zlepšují. [1] [6]

## 1.3 Slitiny hliníku

Slitiny hliníku patří po oceli k nejpoužívanějším kovovým, konstrukčním materiálům. První vyvinutou slitinou hliníku je dural. Mezi přednosti slitin hliníku patří jejich nízká měrná hmotnost, poměrně dobrá pevnost, zachovávají si dobrou elektrickou a tepelnou vodivost a vyznačují se dobrou slévateľností. Hliník vytváří s přísadovými kovy tuhé roztoky. [2] [8]

### 1.3.1 Rozdělení hliníkových slitin

Slitiny hliníku je možné dělit dle fyzikálních a chemických vlastností, dle technologických vlastností, dle užití. Nejběžněji se používá dělení dle způsobu zpracování dle ČSN. Z tohoto pohledu dělíme slitiny hliníku pro tváření a slitiny pro odlitky. [9]

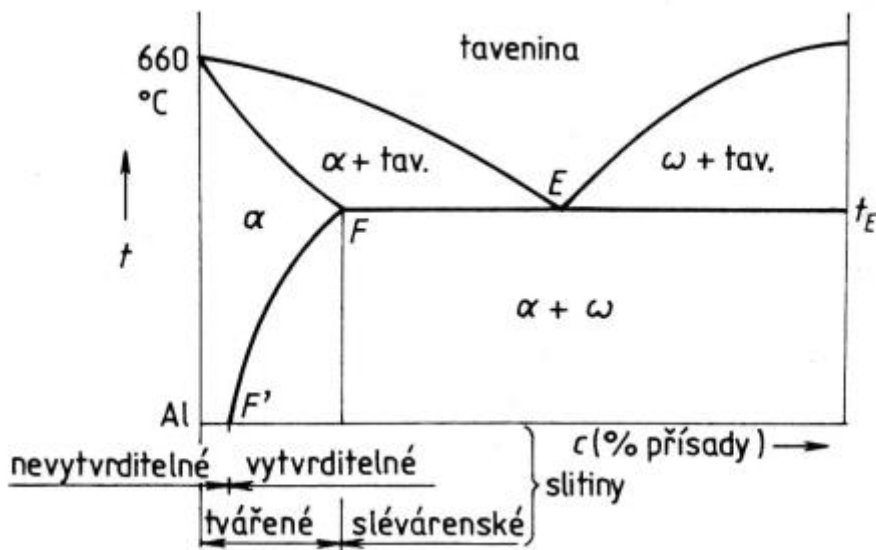
Dle chemického složení dělíme slitiny hliníku na tyto základní skupiny:

- 1) siluminy (Al-Si)
- 2) duraly (Al-Cu)
- 3) hydronaly (Al-Mg)
- 4) tzv. zinkové siluminy (Al-Zn)

Jak bylo výše uvedeno, z technologického hlediska dělíme hliníkové slitiny na slévářenské a slitiny určené k tváření (obr. 2). Nejčastěji používané slévářenské slitiny (siluminy) dále dělíme podle obsahu křemíku v tuhém roztoku na slitiny:

- 1) podeutektické (obsah křemíku 5-11 %)
- 2) eutektické (obsah křemíku 11-13 %)
- 3) nadeutektické (obsah křemíku 13-24 %).

Dle normy ČSN EN 1706 rozlišujeme 29 slitin Al – Si. Siluminy mají optimální mechanické a slévářenské vlastnosti. Některé hliníkové slitiny pro tváření a slévání lze vytvrzovat. [9]



Obr. 2 – Rovnovázný diagram slitin hliníku [18]

Mezi hlavní představitele tvářených slitin hliníku, které vytvrzením zvyšují své mechanické vlastnosti patří: Al – Cu, Al – Cu – Mg, Al – Mg – Si, Al – Zn – Mg, Al – Zn – Mg – Cu. Al – Cu a Al – Cu – Mg, nazýváme je duraly. Duraly obsahují 1–6 % Cu a do 2 % Mg. Tyto slitiny ve vytvrzeném stavu mají velmi dobré mechanické vlastnosti ( $R_m$  až 450 MPa). Nevýhodou duralů, v porovnání s čistým hliníkem, je jejich špatná korozní odolnost. Z tohoto důvodu se duralové výrobky dlouhodobě vystavené povětrnostním vlivům, pokrývají tenkou vrstvou čistého hliníku. Tento proces se nazývá plátování. [6]

Slitina Al – Mg – Si má v porovnání s duraly horší mechanické vlastnosti ( $R_m$  do 350 MPa), ale za to vyšší korozní odolnost. Z tohoto důvodu se používá v automobilovém průmyslu a ve stavebnictví. [6]

Slitiny Al – Zn – Mg a Al – Zn – Mg – Cu (Zn 3-8 %, Mg 1-3 %, Cu do 2 %) dosahují nejvyšších pevností z hliníkových slitin ( $R_m$  až 600 MPa), proto se používají v leteckém a automobilovém průmyslu. [6]

U tvářených nevytvrditelných hliníkových slitin nelze vytvrzováním zlepšovat mechanické vlastnosti. Vyšší pevnost oproti hliníku souvisí se substitučním zpevněním tuhého roztoku. Do této skupiny patří slitiny Al – Mn a Al – Mg (hydranalý).

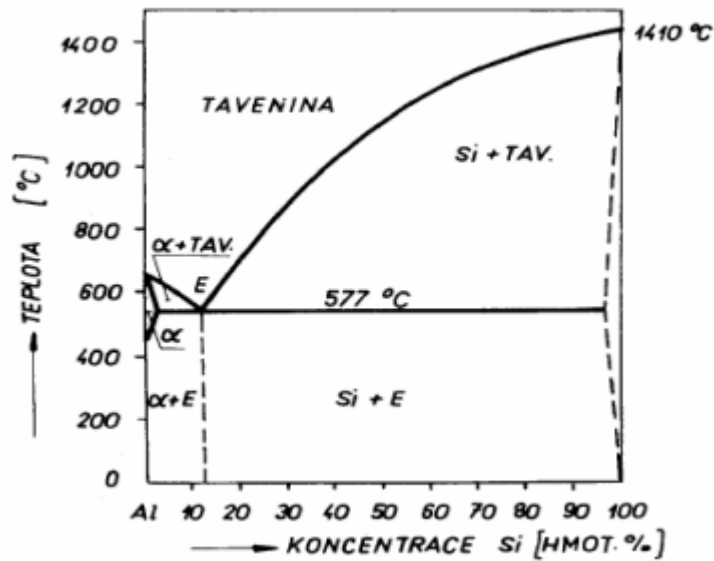
U slitiny Al – Mn je obsah manganu jako legujícího prvku do 1,5 %. Tyto slitiny jsou dobře tvárné a svařitelné s dobrou korozní odolností. Používají se u mechanicky nepříliš

namáhaných součástí v automobilovém, chemickém a potravinářském průmyslu (nápojové plechovky). U hydronalů představuje obsah hořčíku až 9 %. Hydronaly mají velmi dobrou korozní odolnost a jsou velmi dobře svařitelné. Jsou dokonce odolné mořské vodě. Z tohoto důvodu se používají při stavbě lodí a také k výrobě nápojových plechovek. [6]

Slévárenské slitiny hliníku se používají pro výrobu tvarových odlitků gravitačním litím do pískových forem, do kovových forem nebo tlakovým litím. Mechanické vlastnosti takto vyrobených odlitků dosahují nižších hodnot než výrobky zhotovené tvářením. Mechanické vlastnosti odlitku značně závisí na způsobu odlévání. Pevnost v tahu dosahuje max. 250 MPa. Nejnižší pevnostní charakteristika je u odlitků s hrubou strukturou litých do písku, lepších vlastností dosáhneme u odlitků s jemnou strukturou při lití do kovových forem nebo tlakovým litím. Slévárenské slitiny dělíme dle slitinových bází na binární siluminy a speciální siluminy. [5]

Binární siluminy nebo také jednoduché siluminy představují slitinu hliníku a křemíku (Al – Si). Rovnovážný diagram siluminu Al-Si je na obr. 3. Eutektické siluminy mají nejlepší slévárenské vlastnosti. Eutektikum v binárních siluminech představuje směs tuhého roztoku  $\alpha$  a krystalů prakticky čistého křemíku. Díky velkému obsahu eutektika (40 – 75 hm.%) mají binární siluminy vysokou zabíhavost, snižuje se jejich lineární smrštění, je redukován sklon k tvorbě trhlin za tepla a mají výrazně nižší mikroporozitu. Výraznou předností binárních siluminů je dobrá korozní odolnost. Přes tyto dobré slévárenské vlastnosti se čisté binární siluminy pro výrobu tvarových odlitků používají jen zřídka. Nejčastěji se používají jako hliníkové pájky. [5]

Pro odlévání tvarových odlitků se používají siluminy speciální. Nejdůležitější vliv na zlepšení pevnostních charakteristik siluminů mají hořčík a měď. Přidáním těchto legujících prvků vznikají speciální siluminy Al – Si – Mg a Al – Si – Cu, které umožňují siluminy dále vytvrzovat. Speciální siluminy můžeme dlouhodobě mechanicky zatěžovat do teplot 250 – 275 °C. Slévárenské vlastnosti speciálních siluminů v porovnání se siluminy binárními jsou ale horší. Z tohoto důvodu je nutné do speciálních siluminů přidat další legující prvky (Mn, Ti, Zn, Ni), které za vzniku příslušných soustav některé slévárenské vlastnosti zlepšují. Speciální siluminy využíváme k odlévání tvarově složitých a tenkostěnných odlitků včetně odlitků značných rozměrů (např. bloky motorů, skříní převodovek a součásti letadel). [5]



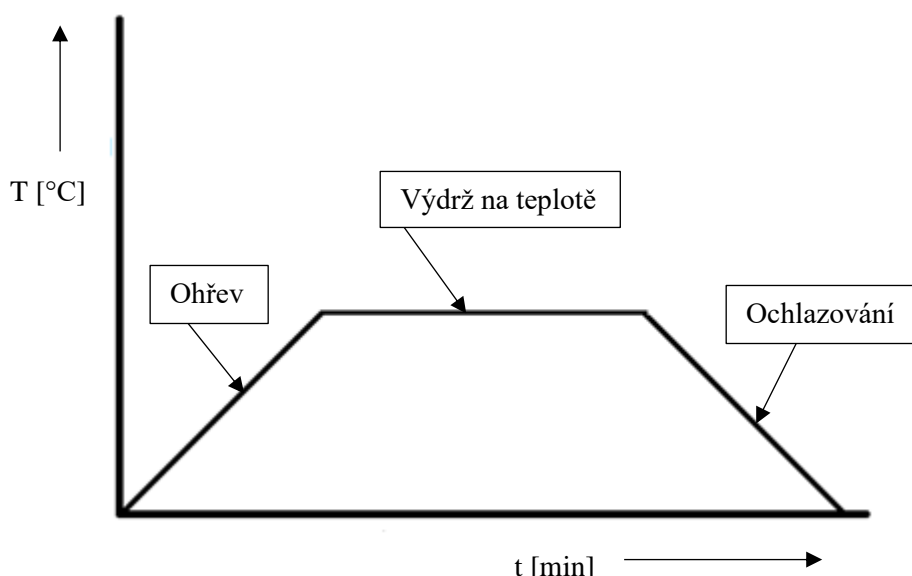
Obr. 3 – Binární rovnovážný diagram soustavy Al – Si [18]

## 1.4 Tepelné zpracování hliníkových slitin

Dle ČSN 42 0056 definujeme tepelné zpracování hliníku a jeho slitin jako proces, kdy je produkt v tuhém stavu podroben jednomu nebo více žihacím cyklům, čímž dosáhneme požadované struktury (rovnovážné) a požadovaných vlastností. Teprve tepelným zpracováním se hliníkové slitiny stávají konstrukčním materiálem s dobrou pevností a zpracovatelností, že mohou nahradit i měkkou a středně pevnou ocel. Proces tepelného zpracování hliníkových slitin má dvě základní operace, a to žihání a vytvrzování. Rozeznáváme čtyři typy žihání, a to žihání na odstranění pnutí, žihání rekrytizační, homogenizační žihání a žihání vytvrzených slitin. Vytvrzování se skládá z procesu rozpouštěcího ohřevu s následným ochlazením, kdy se vytváří metastabilní přesycený tuhý roztok a následně jeho stárnutí. Vytvrzováním se dosáhne vyšší pevnosti a tvrdosti hliníkové slitiny. [1] [4]

Pro pochopení tepelného zpracování hliníkových slitin je třeba definovat několik základních pojmů.

**Žihací cyklus** definujeme jako teplotní změnu v určitém intervalu v závislosti na čase je na obr. 4.



Obr. 4 – Žihací cyklus

**Ohřev** je proces, kterým narůstá teplota produktu na hodnotu nutnou k dalšímu zpracování. Jako **rychlost ohřevu** označujeme růst teploty produktu za časovou jednotku.

**Ochlazování** je proces snižování teploty produktu na požadovanou teplotu. **Rychlost ochlazování** značí pokles teploty ochlazovaného produktu za časovou jednotku. **Kritická rychlost ochlazování** je minimální ochlazovací rychlost, u které po rozpouštěcím žhání nedochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku.

**Výdrž na teplotě (prodleva)** stanoví udržení produktu na určité teplotě na dobu nutnou k provedení daného typu tepelného zpracování. [1]

Pro tepelné zpracování hliníku se nejčastěji používá rekrystalizační žhání.

*Rekrystalizační žhání* je tepelné zpracování výrobků tvářených za studena při teplotě 250–500 °C. Slitina hliníku s manganem (1 % Mn), která se používá pro dobré mechanické vlastnosti, bez snížení tvárnosti, se zahřívá na 400 °C. U rekrystalizačního žhání nastává rekrystalizace a tím pádem obnovení požadované tvárnosti. Ovšem nesmí pokročit příliš daleko, aby nedošlo ke zhrubnutí slitiny. Zhrubnutí slitiny se při následném lisování projeví zvrásněným hrubým povrchem. Volba teploty žhání závisí především na velikosti a způsobu předchozí deformace za studena. Slitiny nevytvrditelné mohou být po skončení rekrystalizace ochlazeny na vzduchu. U slitin vytvrditelných má rekrystalizační žhání odlišný postup. Teplota žhání se zvyšuje na cca 400 – 430 °C a následné ochlazování

probíhá pomalu rychlostí max. 30 °C za hodinu až do teploty 250 °C. Následné ochlazování může probíhat již na vzduchu. [1] [4]

*Homogenizační žihání* (difúzní) – během tuhnutí dochází u některých slitin k oddělení strukturních součástí (odmíšení). Pomocí difúzního žihání dosahujeme lepšího rozpuštění součástí v základním tuhém roztoku prostřednictvím difúze což má za následek vyrovnaní chemického složení ve struktuře. Tohoto se dosahuje delším ohřevem slitiny při vysokých teplotách (485 – 540 °C) a následně pomalým ochlazováním. Homogenizačním žiháním dochází ke snížení nebo odstranění chemické heterogenity výsledného produktu. Doba žihání je závislá na chemickém složení slitiny a její struktuře. Difúzní žihání může být jednostupňové nebo dvoustupňové. U dvoustupňové homogenizace provádíme difúzní žihání ve dvou po sobě jdoucích procesech, a to za různých teplot. [1] [4]

*Žihání k odstranění pnutí* (stabilizační) – tento způsob žihání má snížit vnitřní napětí vzniklé tvářením za studena, tepelným zpracováním, svářením nebo tuhnutím odlitku ve formě. Žihání ovšem nesmí snížit pevnostní charakteristiku takto tepelně zpracovávané slitiny. Stejně tak se obvykle docílí ustálení mechanických, fyzikálních, chemických vlastností a rozměrů výrobků. Tohoto se docílí krátkým ohřevem slitiny na teploty ležící pod teplotou rekrystalizačního žihání tj. 300 - 400 °C. Pokles pnutí začíná již od teplot cca 200 °C. Stabilizační žihání se obvykle používá u odlitků a součástí, které v provozu pracují za zvýšených teplot, které však musí být nižší, než je teplota stabilizačního žihání. [1] [4] [5]

*Žihání vytvrzených slitin* se užívá ke snížení pevnosti v případech, kdy již vytvrzený materiál je třeba dále tvářet. Obvyklá žihací teplota je kolem 350 °C. [5]

### 1.4.1 Vytvrzování hliníkové slitiny

Je proces nazývaný též jako precipitační zpevnění. Principiálně se skládá z rozpouštěcího ohřevu (žihání) s následným ochlazením, při kterém dochází k tvorbě metastabilního přesyceného tuhého roztoku, kdy poté následuje poslední fáze, a to je stárnutí. Při rozpouštěcím žihání dochází k ohřevu slitiny na vhodnou rozpouštěcí teplotu. Na této teplotě je nutné setrvat nezbytně nutnou dobu, aby došlo k rozpuštění jedné nebo více intermetalických fází do tuhého roztoku  $\alpha$  (např.  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ). Následně se provádí rychlé ochlazení kritickou nebo nadkritickou rychlostí, čímž získáme přesycený tuhý roztok  $\alpha'$ . Kritická rychlost ochlazování je minimální rychlost ochlazování z dosažené rozpouštěcí

teploty, při které nedochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku  $\alpha$ . Pro většinu slitin hliníku se k ochlazení používá teplá voda v rozmezí teplot 20 – 40 °C. [1] [5]

Proces vytvrzování můžeme realizovat za následujících podmínek:

- 1) slitina musí mít vhodné složení – tzn. tuhý roztok má pouze omezenou rozpustnost a ta se se snižující se teplotou snižuje
- 2) slitinu je nezbytné ohřívat do oblasti existence tuhého roztoku, dostatečně dlouhým ohřevem a tím dosáhnout homogenního tuhého roztoku
- 3) následně prudkým ochlazením vzniká přesycený metastabilní tuhý roztok při pokojové teplotě
- 4) přesycená složka se extrahuje při pokojové teplotě (stárnutí přirozené) nebo ohřevem za vyšších teplot na teplotu pod čáru solidu (stárnutí umělé).

Tento proces má obrovský technologický význam a je základem tepelného zpracování řady slitin neželezných kovů zejména lehkých kovů. [11]

Stárnutím se nazývá proces, u kterého dochází ke změnám substrukturním a důsledkem toho i ke změnám mechanických, fyzikálních a technologických vlastností. Stárnutí je konečnou fází vytvrzování. Stárnutí se provádí za pokojové teploty, tento proces nazýváme přirozené stárnutí. Druhou možností je realizace tohoto procesu za zvýšených teplot a toto nazýváme stárnutím umělým. U některých výrobků je třeba provádět stupňovité stárnutí. Jedná se o proces tepelného zpracování hliníkové slitiny, kdy rozpouštěcí žíhání je realizováno při dvou nebo více teplotách v rámci jednoho žíhacího cyklu. Doba stárnutí i teplota je pro každou slitinu většinou předepsána. [1] [5]

### **1.4.1.1 Rozpouštěcí žíhání**

Dle rovnovážného diagramu je zřejmé, že oblast pro ohřev slitiny je poměrně úzká. Spodní hranice teplot musí být natolik vysoká, aby se tuhý roztok spolehlivě rozpustil, ovšem horní teplota nikdy nesmí překročit solidus. Pokud by k tomu došlo, je zde nebezpečí vzniku vycezenin. Vycezeniny vznikají v důsledku různé rozpustnosti složek slitiny při přechodu z pevné fáze v kapalnou. Jsou to místa, kde se vyskytuje zvýšená koncentrace příměsí, nečistot

nebo zplodin z proběhlých reakcí. U volby teploty je třeba zohlednit i mechanické vlastnosti slitiny, aby při teplotě ohřevu byla slitina dostatečně únosná, tj. aby vydržela dobu ohřevu bez deformací. Dle typu slitiny se volí teplota ohřevu mezi 440 – 525 °C. Danou teplotu je vždy nutno dodržet s přesností  $\pm 5$  °C. Délka ohřevu je závislá na jemnosti zrna. Z tohoto důvodu odlitky obecně vyžadují delší dobu ohřevu než výrobky z tvářených slitin. [4]

### 1.4.1.2 Fáze ochlazování

Bezprostředně po ukončení ohřevu a výdrži na žíhací teplotě následuje fáze ochlazení. Pro každý typ slitiny je způsob ochlazení přesně definován. Zohledňuje celou řadu podmínek, přihlíží se k odolnosti slitiny proti pnutí při ochlazení, k dosažení vysoké korozivní odolnosti a co nejlepší pevnosti. Ochlazení ve studené vodě se provádí u polotovarů, které se budou následně rovnat a upravovat, nebo v případech, kdy je požadována velká korozní odolnost. Při tomto postupu by neměla teplota vody být vyšší než 30 °C a zároveň jí musí být dostatečné množství, aby teplota v ochlazovací vaně nestoupala více jak o 10 °C. V horké vodě o teplotě mezi 70 – 90 °C se ochlazují odlitky, rozměrnější kusy a výkovky. Pokud ochlazování probíhá v horké vodě, zabraňuje se škodlivému pnutí a tvorbě trhlin. Aby se zabránilo velkým deformacím, používá se jako mírnějšího ochlazovacího média vodní mlhy. Tohoto způsobu není dobré použít u slitin náchylných ke korozi (dural a superdural), jelikož při mírném ochlazení dochází k vyloučení segregátu na hranici zrn. V těchto případech je vhodné použít ochlazování v horké vodě nebo ochlazování v oleji. Velmi důležitým faktorem je též časový interval od vyjmutí z ohřívací pece do ponoření do chladícího média. Tento interval by měl být co nejkratší, např. u duralových slitin nesmí překročit 10 sekund. Moderní ochlazovací vany jsou vybaveny zařízením, které přenos výrobku z ohřívací pece výrazně zkracují. Po vychladnutí a usušení (eventuálně odmaštění) mohou následovat úpravy za studena (rovnání, tažení, překalibrování). Zakalená slitina je měkká a má dobré tvárné vlastnosti. Dle chování po ochlazení rozdělujeme hliníkové slitiny na dva druhy, slitiny přirozeně stárnoucí a slitiny uměle stárnoucí. [4]

### 1.4.1.3 Fáze stárnutí

Poslední fází, kterou se dokončuje vytvrzování, je stárnutí. Slitiny začínají stárnout bezprostředně po prudkém ochlazení a tato fáze je dokončena obvykle během 3 – 5 dnů

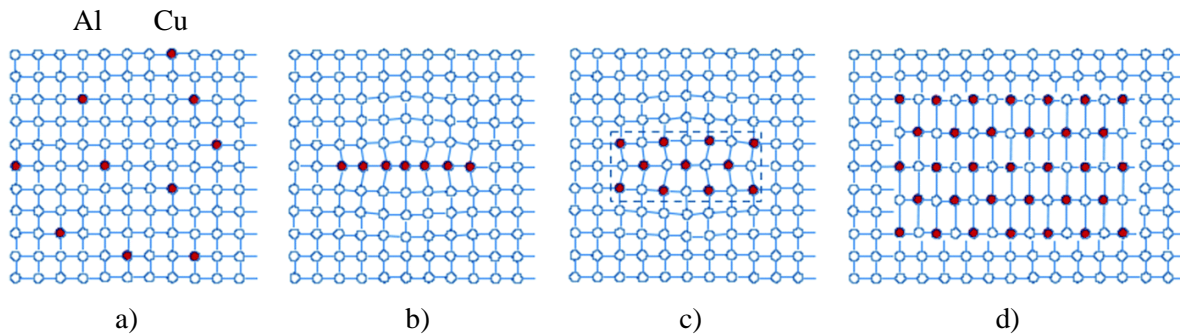


(přirozeně stárnoucí slitiny). Tuto fázi je možno urychlit mírným ohřevem. Běžně se to však neprovádí, aby nedošlo k hrubšímu vyloučení segregátu, které by výrazně snížilo korozní odolnost. Jedinou výjimkou jsou plátované polotovary, kdy je toto riziko výrazně menší, a proto se toto zrychlení užívá. Druhým typem stárnutí je umělé stárnutí. Stejně tak jako pro ochlazovací fázi i pro stárnutí máme pro každý druh slitiny teplotní a časovou charakteristiku stárnutí předepsanou. Teplota pro uměle stárnoucí slitiny je obvykle předepsána mezi 120 – 190 °C. Pokud je zapotřebí dosáhnout stejných a předepsaných výsledků pro daný druh slitiny, musí se dodržet teplota stárnutí v rozmezí  $\pm 2,5$  °C. Standardní doba umělého stárnutí je 6 – 24 hodin. Čím vyšší teplotu použijeme, tím je zapotřebí kratší čas stárnutí. Významné překročení doby stárnutí má za následek hrubší sbalení segregátu a tím dochází ke snížení pevnosti. Ke stejnému efektu dojde i po překročení teploty stárnutí, kdy se jedná o tzv. přestárnutí. U hliníkových slitin se tepelné zpracování dle normy ČSN EN 515 označuje písmenem T a jednou až pěti číslicemi. [1] [4]

#### 1.4.1.4 Precipitace

Podstatou stárnutí je proces precipitace. Tímto procesem se výrazně zlepšují mechanické vlastnosti hotových výrobků z lehkých slitin zejména tvrdost, pevnost a mez kluzu. Průběh procesu se dle podmínek přesycení a výše teploty, za které probíhá rozpad, mění. Pokud dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku za nízkých teplot, zvyšuje se tvrdost. Změna tvrdosti je vyvolána vznikem oblastí, kde jsou nahromaděny atomy přísadového prvku, které nelze v optickém mikroskopu pozorovat. Proces začíná nukleací a následným vznikem koherentních precipitátů tzv. Guinier-Prestonových zón (dále jen G-P zóny) viz obr. 5. a končí vznikem nekoherentního precipitátu. G - P zóny mají specifický tvar dle typu slitiny – destičkovitý, kulovitý. Stejně tak mají i rozdílnou velikost. Například u slitiny Al-Cu mají délku až  $5 \times 10^{-9}$  metru a mají tloušťku několika mřížkových parametrů. Tyto oblasti nemají ostré hranice a plynule přechází do základního tuhého roztoku. V první fázi (G-P zóny I) se nachází tyto zóny statisticky uspořádané v matici. V následující etapě se jednotlivé zóny spojují do větších oblastí (G-P zóny II). Za vyšších teplot dochází k rozpadu za vzniku zárodků přesycené složky a jejich růstem (kontinuální nukleace). „*Při této přeměně se celý objem přesyceného tuhého roztoku dělí na oblasti, v nichž je přesycený tuhý roztok zachován a na oblasti, kdy vzniknou precipitáty vedle původní fáze s rovnovážným nebo zmenšeným obsahem přísadového prvku.*“ [11]

G-P zóny jsou přesně ta místa, kde může vzniknout zárodek kritické velikosti. „Zárodky se krystalograficky orientují na strukturu základního tuhého roztoku, takže v počátečních stádiích probíhá růst zárodků koherentně. V pozdějších stádiích, kdy zárodek naroste do určité velikosti se koherence se základní mřížkou ztrácí a nastane jasné oddělení od základní fáze. Tomuto stádiu říkáme přestárnutí a je spojeno obvykle s poklesem mechanických hodnot ( $R_p$ ,  $R_m$ ).“ [11]



Obr. 5 – Vyloučení precipitační fáze [22]

a) tuhý roztok, b) koherentní precipitát, c) semikoherentní precipitát, d) nekoherentní precipitát

Precipitací se nemění pouze mechanické vlastnosti, ale i vlastnosti fyzikální (magnetické, elektrické atd.). [11]

Teplota rozpadu a stupeň přesycení tuhého roztoku má výrazný vliv na průběh rozpadu. Kritická velikost stabilního zárodku se se snižující se teplotou a rostoucím stupněm přesycení obvykle zmenšuje. Velikost zrna tuhého roztoku je dalším faktorem ovlivňujícím rozpad přesyceného tuhého roztoku. Z toho plyne, že v jemnozrnném materiálu probíhá precipitace výrazně rychleji než v hrubozrnném, jelikož ke vzniků precipitátů dochází v první řadě na hranicích zrn. Následkem toho je, že u precipitace dochází k maximální tvrdosti na hranicích zrn v době, kdy ve zbytku zrna není vytvrzování ještě dokončeno. V době dosažení maximální tvrdosti v zrnech jsou marginální oblasti zrn již ve fázi přestárnutí. V lokalitách, kde probíhá přednostní vytvrzování může docházet ke značnému pnutí, jehož následkem je plastická deformace a následující rekrytalizace. Takové to materiály jsou náchylné ke koroznímu praskání. [11]

## 1.5 Vysokotlaké lití slitin hliníku

Odlitky lité za působení vysokého tlaku se vyrábí zejména u slitin s nižší hustotou nebo teplotou tavení. Jsou to zejména slitiny hliníku, zinku, cínu, hořčíku, mědi (nejčastěji mosazi), zřídka se odlitky vyrábějí ze slitiny olovené. Principem vysokotlakého lití je metoda, kdy na taveninu v tlakové komoře stroje působí vysoký tlak. Tento tlak zapříčiní vysokou rychlost proudění taveniny přes vtokovou soustavu do dutiny kovové formy. Působením tlaku na taveninu ve formě dochází k tuhnutí s velkou intenzitou a u odlitku dochází k jemné krystalizaci. V důsledku toho získává odlitek požadované mechanické vlastnosti. Obecné dělení fází tlakového lití je následující (obr. 6):

- 1) nalití taveniny do komory tlakového licího stroje,
- 2) stlačení taveniny pístem v tlakové komoře, vstříknutí taveniny do dutiny formy, poté následuje dotlak,
- 3) otevření formy a vyjmutí odlitku z formy.

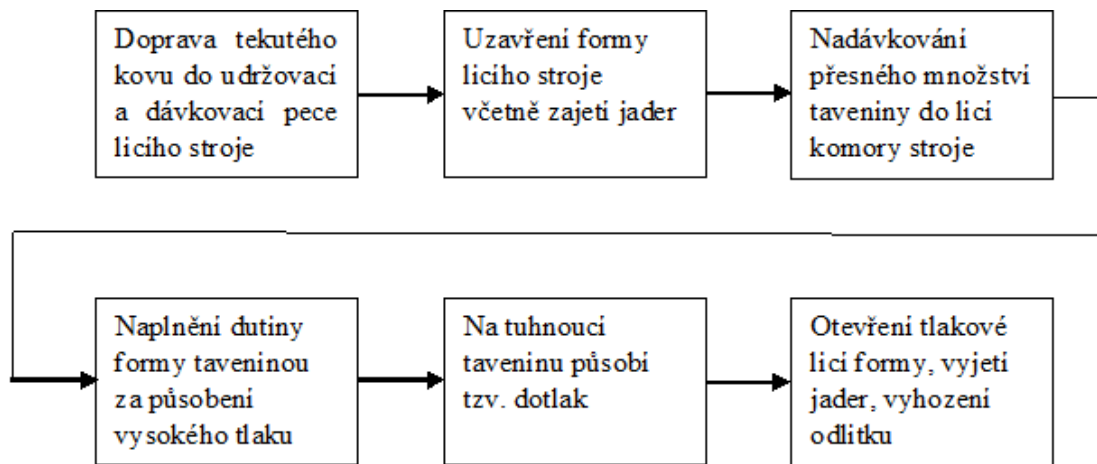
Po vyplnění formy taveninou se píst rychle zbrzdí, až se následně zastaví. Dochází k přeměně kinetické energie na energii tepelnou. V důsledku toho vzroste i teplota odlévaného kovu. Pro překonání odporu tuhnoucího kovu v tenkých průřezích licí formy a k překonání odporu plynů uzavřených v tuhoucím odlitku je nutný metalostatický tlak, kdy tento tlak se přenáší směrem od pístu skrze vtokový systém na tuhoucí odlitek. V důsledku tohoto tlaku se tavenina vtlačí i do nevyplněných prostor odlitku. Stejně tak působením metalostatického tlaku nedochází ke ztuhnutí taveniny ve vtokové soustavě. Vlastní přenos metalostatického tlaku do formy se nazývá dodatečné lisování neboli dotlak. Na jakost odlitku má způsob plnění dutiny formy při tlakovém lití značný význam. Rychlost plnění formy taveninou bývá 0,5 – 120 m/s. Doba plnění dutiny formy je několik setin sekundy, u tenkostěnných odlitků jenom několik tisícín sekund. Pohybu taveniny do dutiny formy závisí na:

- 1) počáteční rychlost plnění taveniny do dutiny formy
- 2) vzájemném poměru tlouštěk zářezů a odlitku ( $\delta_z$  a  $\delta_{od}$ ) nebo poměru jejich ploch ( $S_z$  a  $S_{od}$ )
- 3) povrchovém napětí a viskozitě slitiny

4) tepelných podmínkách vytvořených mezi formou a taveninou.

Obecně rozlišujeme tři vstupní rychlosti a tím i 3 způsoby plnění formy taveninou:

- 1) nízká rychlost, při těchto rychlostech se forma plní laminárním prouděním
- 2) střední rychlost, dochází k plnění dutiny formy souvislým turbulentním prouděním
- 3) vysoká rychlost, zde dochází k disperznímu plnění. [3]



Obr. 6 - Blokové schéma vysokotlakého lití

### 1.5.1 Odlévání bloku motoru ve Škoda Auto, a.s.

V automobilce Škoda Auto, a.s. ve slévárně hliníku se vyrábí bloky motorů se zalitými litinovými vložkami válců a bloky motorů bez zalitých vložek válců (hliníkový monolit), dále skříně převodovky a spojky. V mladoboleslavské slévárně hliníku se vyrábějí tyto součásti pro vozidla Škoda a koncernové vozy. Slévárna hliníku je vybavena čtyřmi pětitudnovými šachtovými plynovými pecemi Striko 5000, jejichž tavicí výkon je 2500 kg taveniny za hodinu. Pec je vybavena udržovacím prostorem na 5000 kg taveniny. V jedné peci se vsázka pěti tun nataví cca. za 2 hodiny. Vstupním materiálem pro tavení je slitina EN AC AlSi9Cu3(Fe) – ČSN EN 1706. Přesný předpis chemického složení uvedené slitiny používané ve Škoda Auto, a.s. je uveden v tab. 2. Slitina se dodává v houskách o hmotnosti max. 10 kg a svazcích do max. hmotnosti 500 kg. Dále vsázku tvoří vratný materiál, jehož množství je maximálně 55 % z celkové hmotnosti vsázky. Vsázka se v peci taví při teplotě

715 – 730 °C. Vylévací teplota taveniny z tavicí pece je 675 – 710 °C. Rozvozní teplota tekutého kovu v přepravní pánvi je 660 – 685 °C. Standardní součástí každé tavby je kontrola chemického složení po vylití do pánve. Po vylití z pece se provádí rafinace slitiny v rafinačním boxu. V této fázi se do taveniny přidá rafinační sůl v granulované formě, a přitom se měří teplota tekutého kovu. Následně se přepraví kov do udržovací a dávkovací pece licího stroje. [10] [13]

*Tab. 2 – Předpis chemického složení používané Al slitiny ve Škoda Auto, a.s.*

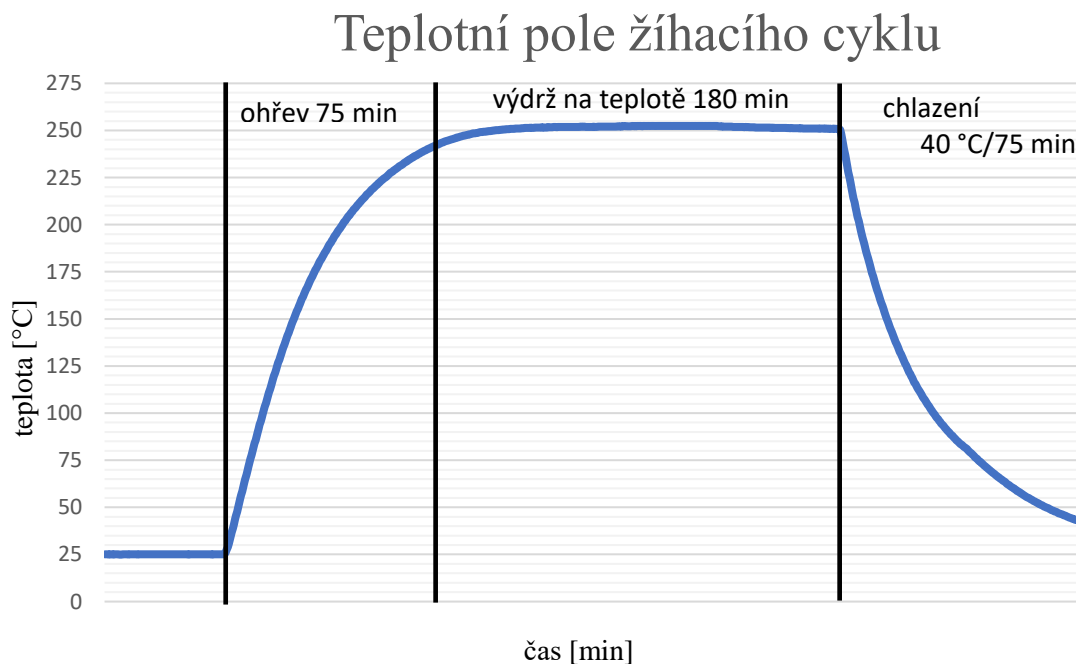
Prvek	Si	Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Ni	Sn	Ti	Pb	Cr	Ostatní
Předpis	8,5-	2-	0,1-	0,1-	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.
[%]	10	3,5	0,5	0,4	1	1,2	0,3	0,1	0,15	0,2	0,05	0,15

Tlakové lití při výrobě bloků válců se provádí na licích strojích IDRA 2000 (uzavírací síla 2100 tun), ITALPRESS 2000 DELL, Frech 1600 (uzavírací síla 1600 – 1900 tun) a Bühler 3500 (uzavírací síla 3500 tun). Licí forma se před odlitím automaticky ošetří bezgrafitovým mazadlem. Forma je temperována na teplotu 200 - 300 °C. Po uzavření formy se naplní zásobník tekutým kovem o teplotě 660 - 685 °C (dle licího stroje) a pod vysokým tlakem 32 – 35 MPa se vstříkuje kov do dutiny formy. Ve formě kov tuhne. V této fázi se provádí dotlačování tuhnucího kovu, aby se eliminovaly vady odlitku. Po ztuhnutí odlitku se forma otevře a robot jej vyjme z formy. Po vyjmutí odlitku z formy se provádí kontrola celistvosti a odlitek je dále zchlazen do vody o teplotě cca 60 °C po dobu 10 sekund. Před zchlazením má odlitek teplotu cca 300 - 350 °C a po zchlazení má teplotu cca 80 – 90 °C. Následně se odděluje vtok a ledvinky z odlitku. Toto se provádí na ostříhovacím hydraulickém lisu. Po této operaci následuje kontrola dílů na slévárenské povrchové vady, rozměrová kontrola a kontrola vnitřní kvality odlitku pomocí RTG. Rentgenová kontrola se provádí na kabinovém rentgenu Seifert X CUBE. K vyhodnocování obrazu je používán program Vista Plus V. Na každé směně a z každého licího stroje se pomocí rentgenového přístroje kontrolují 2 ks řezu bloků motoru. Pokud při kontrole není zjištěna žádná vada, další kusy bloků motoru už se v dané směně nekontrolují. Podle návodky je stanoveno několik kritických míst, na které se obsluha zaměřuje. Rentgen pracuje v manuálním nebo automatickém režimu vyhodnocování. K určování velikosti vnitřních vad se používají drátkové měrky dle EN 462-1. Rozměrová kontrola odlitků je prováděna na zařízení SCANMAX. Komplexní

trojrozměrná kontrola dílů se provádí na zařízení ZEISS Prismo 7 s komparací s CAD modelem odlitku. [10][12][13]

## 1.5.2 Tepelné zpracování bloku motoru po odlití, hrubé apretaci a kontrole

Tepelné zpracování po odlití, hrubé apretaci odlitku a kontrole odlitku se provádí v průběžných žihacích pecích. Slévárna ve Škoda Auto, a.s. je vybavena dvěma žihacími průběžnými pecemi od firmy Realistic. Tepelné zpracování se v obou pecích provádí za stejných teplotních a časových podmínek. První fází žihání je postupný ohřev na žihací teplotu  $250\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$  trvající 60 – 75 minut, následuje samotné žihání bloků motorů při teplotě  $250\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$  při výdrži na této teplotě po dobu 180 minut. Konečnou fází celého procesu žihání je postupné ohlazování v peci na teplotu cca.  $40\text{ °C}$  trvající cca. 75 minut (obr. 7).



*Obr. 7 - Časová závislost teplot v průběhu žihacího cyklu bloků motorů*

Po tepelném zpracování je odlitek předobroben a následně kontrolován. Provádí se kontrola rozměrová, vizuální, kontrola tvrdosti a kontrola tlaková. Tlaková kontrola těsnosti se provádí u každého odlitku. [10][12]

### 1.5.3 Finální úprava spalovacího prostoru bloku motoru

Mnoho firem při konstrukci motoru s hliníkovým blokem se snažilo z technických i ekonomických důvodů vypustit zalévání litinových vložek válců do bloku motoru. Řešení, které zavádí u svých motorů automobilka Škoda Auto, a.s. spočívá v odlití bloku motoru jako monolitu z hliníkové slitiny. Tento postup však klade vyšší nároky na povrchovou úpravu vnitřní plochy válců, kdy tato úprava spočívá v úpravě válcové plochy tlakově odlévaného bloku z hliníkové slitiny plazmovým nástřikem – APS v ochranné atmosféře inertního směsného plynu argonu. Aplikování plazmového nástřiku představuje proces nanášení práškového povlaku. Materiál ve formě ocelového prášku je vstříknut do plazmového plamene, kde je tento prášek nataven a tryskou stříknut na povrch vnitřní plochy válce. [23]

V principu proces probíhá v těchto krocích:

- zdrsnění - za účelem zlepšení přilnavosti vrstev je potřeba vytvořit optimální povrch spalovacího prostoru bloku válců. Toho lze dosáhnout tryskáním korundového prášku, vodním paprskem nebo mechanicky. U motorů EA211 je použit proces zdrsňování pomocí laserového paprsku. Vzniklé oxidy jsou následně odsávány,
- proces nanášení - plazmový nástřik probíhá v ochranné atmosféře inertního plynu s využitím práškových plniv. Plazmový hořák má wolframovou katodu a měděnou anodu, kde mezi nimi je pomocí vyšší frekvence generován elektrický oblouk. Pracovní plyn je ionizován a po přidání prášku a při teplotě krátkodobě 1500 stupňů a rychlosti 300 m/s dochází k nástřiku. Proces se nazývá Rota Plasma a byl vyvinut fy. Oerlikon Metco,
- honování – u dané technologie je použito třístupňové honování, které zajistí požadovanou mikrogeometrii povrchu nutnou pro mazání a vysokou životnost ploch.
- kontrolní operace - kontrolní operace vychází ze systému řízení kvality a zahrnují procesy rozměrových kontrol, kontrol pevnosti, drsnosti a metalografické analýzy. [23]

## 1.6 Zkoušky pro určení metalografických a mechanických vlastností bloku motoru

### 1.6.1 Světelná (optická) mikroskopie a metalografie

Světelná mikroskopie patří mezi základní metody, kterými lze studovat celé spektrum materiálů. Pomocí světelné mikroskopie studujeme povrchy materiálů, které pozorujeme v odraženém světle. Výhodou metody je, že za určitých okolností vypovídá i o mikrostruktúře materiálů. Z tohoto důvodu je nutné dbát na co nejpreciznější přípravu povrchu pozorovaného materiálu. Pro provádění světelné mikroskopie je důležitá jak osvětlovací soustava, tak kvalitní zobrazovací soustava. Pro světelný zdroj platí, že v ideálním případě by tento měl být monochromatický, bodový s dostatečnou intenzitou světla. Standardně používané žárovky a výbojky toto úplně nespĺňují. Nejlepším zdrojem světla je laser, který se však používá pouze v konfokální mikroskopii. Kromě zdrojů světla je nedílnou součástí osvětlovací soustavy systém filtrů a iluminátorů. Filtry neutrální slouží k zeslabení intenzity procházejícího světla a neabsorbují paprsky některých vlnových délek. Filtry barevné propouští světlo o určité vlnové délce, většinou takové, které odpovídá barvě filtru. Dle účelu dělíme filtry na kompenzační absorbující světlo o vlnové délce, pro které nejsou korigovány objektivy. Dalším typem filtrů jsou filtry kontrastní, kterými snižujeme nebo zvětšujeme kontrast některých struktur. Dále existují ještě filtry polarizační a tepelné (zachycující IR oblast spektra). Poslední součástí světelného zdroje jsou iluminátory obracející tok optického svazku, aby byl zaostřen na povrch a následně odražen do objektivu. [16]

Druhou důležitou součástí světelného mikroskopu je zobrazovací soustava. Jedná se v zásadě o sady objektivů a okulárů. Objektivy dělíme na čočkové a reflexní (zrcadlové). Pro pozorování struktury je nutné vytvořit metalografický vzorek. Vzorek ze zkoumaného materiálu nejprve odebereme a následně brousíme a leštíme. U některých vzorků pro lepší pozorování mikrostruktury povrchové vrstvy je vhodné vzorky pokovit (Ni, Cu, Cr). Po mechanické úpravě vzorku (broušení, leštění) je při pozorování v optickém mikroskopu kontrast velmi slabý. Z tohoto důvodu je nutné provést zviditelnění struktury, a to buď chemickým leptáním (např. nitalem) nebo elektrolytickým leptáním. Podstatou chemického leptání jsou oxidačně redukční procesy. Při elektrolytickém leptání je elektrochemický



potenciál udržen katodou v požadovaných mezích. Pro zajištění konstantní hodnoty potenciálu na jeho povrchu je nutné kromě anody, použít třetí referenční elektrodu [16]

## **1.6.2 Skenovací (rastrovací, řádkovací) elektronová mikroskopie – SEM**

Principem skenovací elektronové mikroskopie je získání zvětšeného obrazu povrchu vzorku pomocí ostře fokusovaného svazku primárních elektronů. Tento svazek primárních elektronů je usměrněn na povrch vzorku, kde interaguje s elektrony na povrchu zkoumaného vzorku při vzniku specifických fyzikálních signálů. „*Princip řádkovacího mikroskopu pro případ tlustého vzorku. Ze zdroje elektronů je získán svazek anodou urychlených primárních elektronů, který je elektromagnetickými čočkami fokusován na povrch vzorku. Obraz vzniká tak, že synchronně s fokusovaným svazkem primárních elektronů, který bod po bodu a řádek po řádku prochází (řádkuje) zvolenou oblast povrchu vzorku, je vychylován zobrazovací svazek elektronů, řádkující obrazovku přístroje. Bodu na vzorku tak vždy odpovídá určitý bod na obrazovce přístroje. Jas obrazu je modulován vybraným fyzikálním signálem pomocí detektoru, který je po zesílení přeměněn na signál elektrický.*“ [16]

Pro rastrovací elektronovou mikroskopii platí striktní požadavky na přípravu vzorků. Jejich povrch musí být bez cizorodých částic např. prachových zrn, musí být suchý. Další podmínkou je stabilita vzorku ve vakuu a při jeho ozáření svazkem elektronů. Dále by vzorek měl být vodivý. Pro zvýšení povrchové vodivosti se vzorky mohou pokrýt tenkou vrstvou kovů (zlato, platina). Pokovování vzorků se provádí trojím způsobem: vakuovým napařováním, iontovým napařováním a impregnací. Výstupem rastrovací elektronové mikroskopie je zkoumání rozměrů částic, dále studium povrchů vzorků a jejich struktur a v neposlední řadě lze metodou SEM pomocí detektoru EDX určit prvkové spektrum vzorku. [21]

## **1.6.3 Zkouška tvrdosti dle Brinella (ČSN EN ISO 6506-1)**

„*Tvrdost je definována jako odpor proti vnikání cizího tělesa do povrchu zkoušeného materiálu.*“ [11] Hodnotíme ji dle velikosti vtisku, který vznikl vniknutím přesně definovaného tvaru tělesa (jehlan, kulička, kužel), tvořeného tvrdým materiálem, který musí

mít vyšší tvrdost, než zkoušený materiál (diamant, kalené oceli, slinuté karbidy). Zkouška tvrdosti dělíme na vnikací, odrazové a vrypové. Dále dělíme zkoušky tvrdosti dle charakteristiky zátěžové síly na dynamické a statické. [11]

Zkouška tvrdosti dle Brinella patří do skupiny vnikacích zkoušek, statických. Tento typ zkoušky patří mezi nejčastěji používané. Principem Brinellovy zkoušky je zatlačení ocelové kalené kuličky o přesně definovaném průměru ( $D$ ) pomocí přesně definované síly ( $F$ ) do zkoušeného materiálu. „*Tvrdost se vyjadřuje poměrem zatížení k ploše kulovitého vtisku a stanoví se ve vztahu (1). Tvrdost má sice rozměr napětí, vyjadřuje se však bez rozměrů v jednotkách tvrdosti.*“ [11]

$$HB = \frac{0,102 * F}{A} = \frac{0,102 * F}{\frac{\pi * D}{2} * (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

$F$  – zatěžující síla (N)

$A$  – plocha vtisku ( $\text{mm}^2$ )

$d$  – průměr vtisku (mm)

$D$  – průměr kuličky (mm)

Jednotky tvrdosti dle Brinella se označují HB (Brinell hardness). V případě použití kuličky z kalené oceli se používá zkratka HBS, v případě použití kuličky ze slinutých karbidů se používá označení HBW. Používají se standardizované průměry kuliček  $d = 10$  mm, 5 mm, 2,5 mm, 2 mm a 1 mm. Kalené ocelové kuličky se používají do tvrdosti 400 HB. U vyšších tvrdostí se používají kuličky ze slinutých karbidů. Mezní hodnotou tvrdosti pro zkoušku dle Brinella je 450 HB, u hodnot nad tuto mez není provádění této zkoušky již vhodné. [11]

Hodnotu zatížení stanovíme jako násobek čtverce průměru kuličky ( $F = K * D^2$ ). U oceli je běžně  $K = 30$ , u slitin a neželezných  $K = 10$ . Pro kompozity a měkké kovy  $K = 2,5$ . Při dodržení těchto podmínek lze považovat výsledky za srovnatelné. Standardní čas zatěžování bývá u litin a ocelí 10 – 15 sekund a u neželezných kovů 10 – 180 sekund. Pro rychlé vyhodnocení tvrdosti se používají standardizované tabulky. [11]

„*Průměr vtisku  $d$  se měří vhodným měřicím přístrojem ve dvou na sebe kolmých směrech. Rozdíl mezi oběma naměřenými hodnotami nesmí překročit 5 %. Měření musí dále splňovat*

*tyto podmínky: povrch zkoušeného předmětu musí být rovný, hladký, bez okují a nečistot. Tloušťka předmětu nesmí být menší než osminásobek hloubky vtisku. Vzdálenost středu vtisku od kraje vzorku má být minimálně 2,5d u ocelí a litin, 3d u neželezných kovů, přičemž musí být splněna i podmínka  $0,25D < d < 0,6D$ .*“ [11]

Měření tvrdosti podle Brinella se upřednostňuje u hliníkových slitin z důvodu, že vtlačováním kuličky do zkoušeného materiálu vzniká vtisk o větší ploše než například u vtlačování jehlanu u zkoušky tvrdosti dle Vickerse.

### **1.6.4 Rentgenová analýza struktury – rentgenová difrakce**

Jedná se o nedestruktivní metodu zkoumání pro určení struktury a zbytkových napětí zkoumaných látek. Jak prohlásil Williem L. Bragg: „*VRTG difrakčním obrazci je zakódována informace o vnitřní struktuře.*“ [14]

Princip této metody využívá interakce záření o vysoké energii nebo částic s atomy zkoumaného vzorku. V důsledku interakce dochází k vysokoenergetické ionizaci atomů. Touto ionizací je vyražen elektron na některé z interních hladin atomů „prázdné místo“ místo po vyraženém atomu je zaplněno elektronem z energeticky vyšší hladiny. Rozdíl energií je emitován jako foton nebo Augerův elektron. U rentgenové difrakce musí být splněna Braggova podmínka spočívající ve srovnatelných rozměrech krystalové mřížky a vlnové délky vlnového záření (obr. 8). Vše je vyjádřeno tzv. Braggovou rovnicí (2):

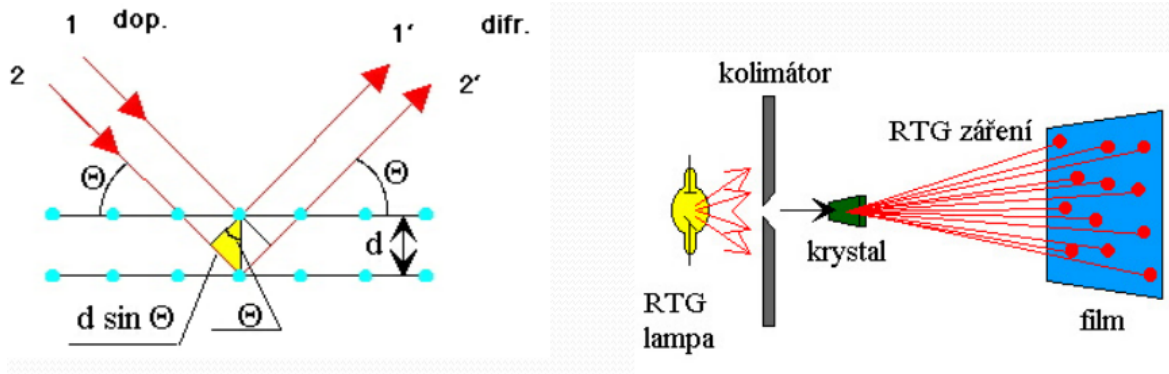
$$2 * d * \sin \theta = n * \lambda \quad (2)$$

$\lambda$  – vlnová délka RTG

$\theta$  – úhel, který svírá paprsek záření s rovinou krystalu

$d$  – určuje vzdálenost dvou paralelních rovin

$n$  – řád spektra (ovlivňuje šíři spektra – úhel dopadu i odrazu paprsku) [14]



Obr. 8 – Schéma rentgenové difrakce [20]

Po odlévání, tepelném zpracování, obrábění, svařování atd. v materiálu vznikají zbytková napětí uvnitř i na povrchu zpracovávaného výrobku. Významným faktorem, který ovlivňuje vlastnosti celého výrobku je distribuce zbytkových napětí. Tento faktor provází každý technologický proces. Při překročení meze pevnosti dochází k nehomogenní plastické deformaci vlivem účinku zvýšené teploty. Vzhledem k významnému faktoru – plastická deformace, který provází celý výrobní proces, je nutné mít ve spektru diagnostických metod i metodu k měření zbytkových napětí. Jednou z metod je rentgenová difrakce. [15]

Nehomogenní plastickou deformací vzniká elastická napjatost krystalové mřížky, která je dána velikostí zbytkových napětí. Zbytková napětí dělíme na makroskopická a mikroskopická dle velikosti objemů, v kterých se plastickou deformací ustanoví rovnováha mezi zbytkovými napětími. „Makroskopická napětí zasahují velký počet zrn, takže můžeme předpokládat víceméně rovnoměrnou změnu vzdáleností difraktujících rovin, projevující se posunem polohy čárové reflexe. Dojde-li ke zvětšení mezirovinné vzdálenosti oproti nenapjatému stavu ( $d_1 > d_0$ ), čárová reflexe se posouvá ve shodě s Braggovým zákonem k menším úhlům ( $2\vartheta_1 < 2\vartheta_2$ ) a naopak. Přitom se intenzitní profil výrazně nemění. Mikroskopická napětí vyvolaná zejména přítomností dislokací, deformují krystalovou mřížku tak, že vzdálenosti difraktujících rovin  $d_1$  a  $d_2$  v okolí poruchy se mění kolem hodnoty  $d_0$ . Můžeme si představit, že výsledný intenzitní profil je obalovou křivkou mnoha profilů odpovídajících jednotlivým mezirovinným vzdálenostem v intervalu  $d_1$  až  $d_2$ .“ [16]

### 1.6.4.1 Měření zbytkového napětí pomocí RTG difrakce

Mechanická napětí působící uvnitř tělesa (uzavřený systém) bez působení vnějších sil se nazývají zbytková napětí. Pokud napětí je vyvoláno působením nemechanických účinků (teplotní gradient) hovoříme o „vložených napětích“ a to i přesto, že se jedná o stacionární dlouhodobě se neměící podmínky. *„Vnitřní síly a (nebo) momenty spojené se zbytkovým napětím jsou v rovnováze. Pevné látky bez zbytkových napětí principiálně neexistují. Zbytková napětí jsou vždy důsledkem nehomogenních elastických nebo elasticko – plastických deformací. V materiálech užívaných technickou praxí vzniká technologií výroby i dalším zpracováním celá řada různých stavů zbytkové napjatosti.“* [19]

Zbytková napětí dělíme z hlediska velikosti objemů, u nichž se nemění napětí ve směru ani velikosti na:

- a) zbytkové napětí I. druhu je homogenní ve velké oblasti (ve velkém množství krystalů – zrn) materiálů při působení sil na rovnováhu materiálu, dochází ke změnám jeho makroskopických rozměrů.
- b) zbytkové napětí II. druhu je homogenní s oblastí přibližně velkou jako jednotlivé krystaly. Při narušení rovnováhy nemusí docházet k tvarovým změnám tělesa.
- c) zbytkové napětí III. druhu je nehomogenní, a to i v oblasti internukleárních vzdáleností. Při narušení rovnováhy sil nedochází k tvarovým změnám tělesa.

Zbytková napětí v konkrétním bodě jsou vždy superpozicí všech tří výše definovaných druhů. Mřížkovou deformaci definujeme jako relativní změnu internukleární vzdálenosti (vzdálenost atomových mřížkových rovin). [19]

RTG difrakční analýza napětí je v porovnání s jinými tenzometrickými metodami specifická. Tuto metodu můžeme použít pouze na měření krystalických látek nebo krystalických fází parciálně amorfních materiálů. Při měření tenké povrchové vrstvy se jedná metodu nedestruktivní. Pokud je třeba měřit zbytkové napětí v hlubších vrstvách, je nutno tuto metodu kombinovat s postupným odleptáváním povrchu. Vzdálenosti, na kterých lze měřit zbytkové napětí RTG difrakcí jsou v porovnání s mechanickými a elektromechanickými tenzometrickými metodami o cca 8 řádů nižší. Při měření vícefázových soustav je možno tuto metodu použít pro měření mřížkové deformace u krystalů každé fáze. [19]

## 1.6.5 Spektrální rentgenová analýza chemického složení

Spektrální rentgenová analýza je metoda využívající rentgenové záření a slouží k zjišťování obsahu prvku kovů v materiálu, a to na podkladě analýzy odražených paprsků. Jedná se o nedestructivní metodu zjišťování chemického složení materiálu. Výhodou této metody je i možnost využít ruční spektrometry (méně přesné), což umožňuje přenášení měřicího zařízení (např. u rozměrných výrobků) a dále vyhodnocení chemického složení materiálu během několika sekund. Krystalické látky mají unikátní charakteristické uspořádání atomů, iontů a molekul. V mřížkové struktuře se vyskytují rovnoběžné plochy o přesně daných vzdálenostech – krystalových konstantách. Každá krystalová konstanta je charakteristická pro krystal dané látky. Hodnoty konstant určujeme pomocí Braggovy rovnice uvedené v kapitole 1.6.4. Při známé vlnové délce  $\lambda$  určujeme dle úhlu  $\vartheta$  hodnotu  $d$  tj. vzdálenost atomárních nebo molekulárních vrstev krystalu. Difraktogram je analyzovaný záznam z měření, který identifikuje a stanovuje krystalické látky. Tato metoda umožňuje analýzu kvalitativní (obsažené prvky) i kvantitativní (procentuální zastoupení prvků). [17]

## 2. Experimentální část diplomové práce

Experimenty prováděné v rámci této diplomové práce byly zaměřeny na sledování výsledných vlastností materiálu bloku motoru po tepelném zpracování – žíhání. V rámci diplomové práce byly zkoumány tři sady bloků motoru 1.0 MPI, TSI. Bloky motorů byly vyrobeny ve firmě Škoda Auto, a.s. ze slitiny AlSi9Cu3(Fe).

První sada bloků motoru byla po odlití pouze zachlazená – **vzorek A (blok č. 1, 2 ,3)**, druhá sada bloků motoru byla po odlití zachlazená a následně žíhána při teplotě 210 °C po dobu 3 hodin – **vzorek B (blok č. 4, 5, 6)**, třetí sada bloků motoru byla po odlití zachlazená a následně žíhána při teplotě 250 °C po dobu 3 hodin – **vzorek C (blok č. 7, 8, 9)**. Soupis jednotlivých vzorků je uveden v tab. 3.

U takto zhotovených bloků byla sledována tvrdost podle Brinella, zbytkové napětí, mikrostruktura a chemické složení v lokálních místech sledovaných vzorků.

*Tab. 3 – Zkoumané vzorky a provedené analýzy (označené X)*

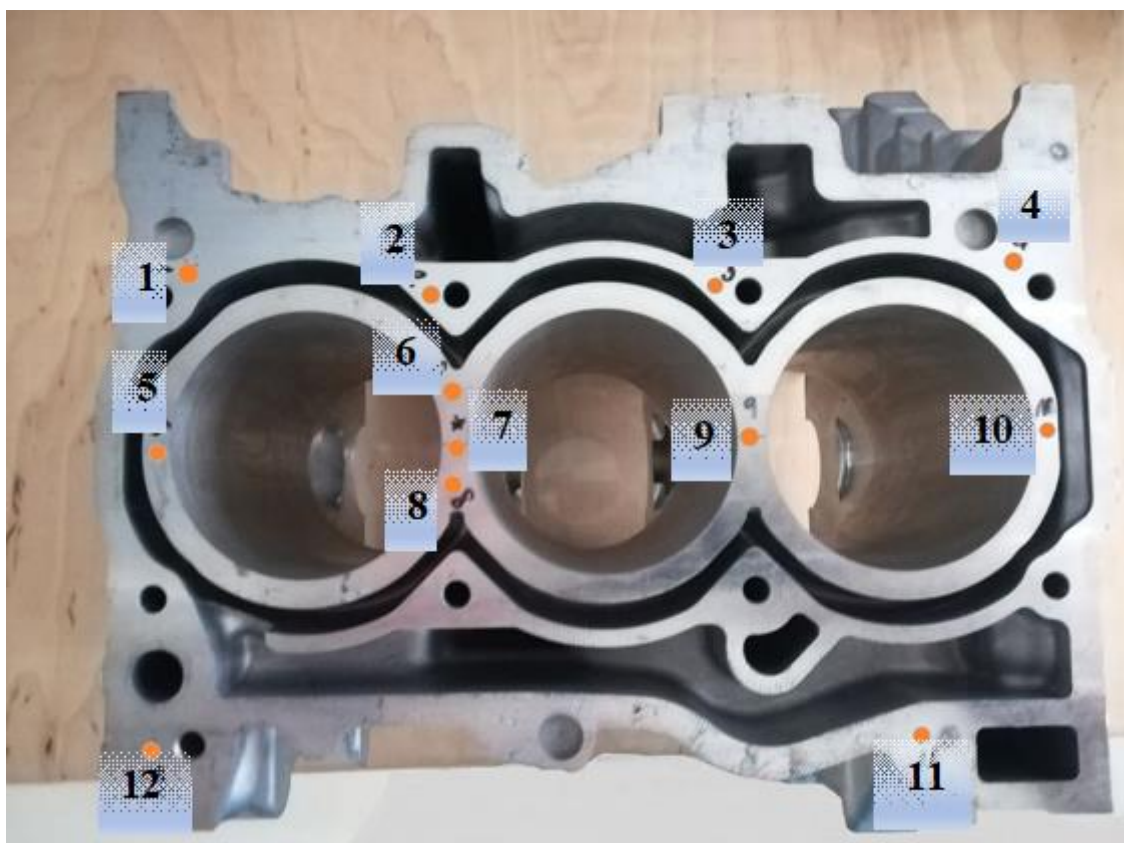
	Číslo bloků	Měření tvrdosti dle Brinella	Měření zbytkových napětí	Světelná mikroskopie	REM	Spektrální analýza
Bloky motorů zachlazené, dále nežíhané <b>Vzorky A</b>	1	X	X	X	X	X
	2	X				
	3	X				
Bloky motorů zachlazené, dále žíhané při teplotě 210 °C/ 3 h <b>Vzorky B</b>	4	X				
	5	X	X	X		X
	6	X				
Bloky motorů zachlazené, dále žíhané při teplotě 250 °C/ 3 h <b>Vzorky C</b>	7	X	X	X	X	X
	8	X				
	9	X				

## 2.1 Zkoušky mechanických vlastností bloku motoru

### 2.1.1 Měření tvrdosti dle Brinella (EN ISO 6506)

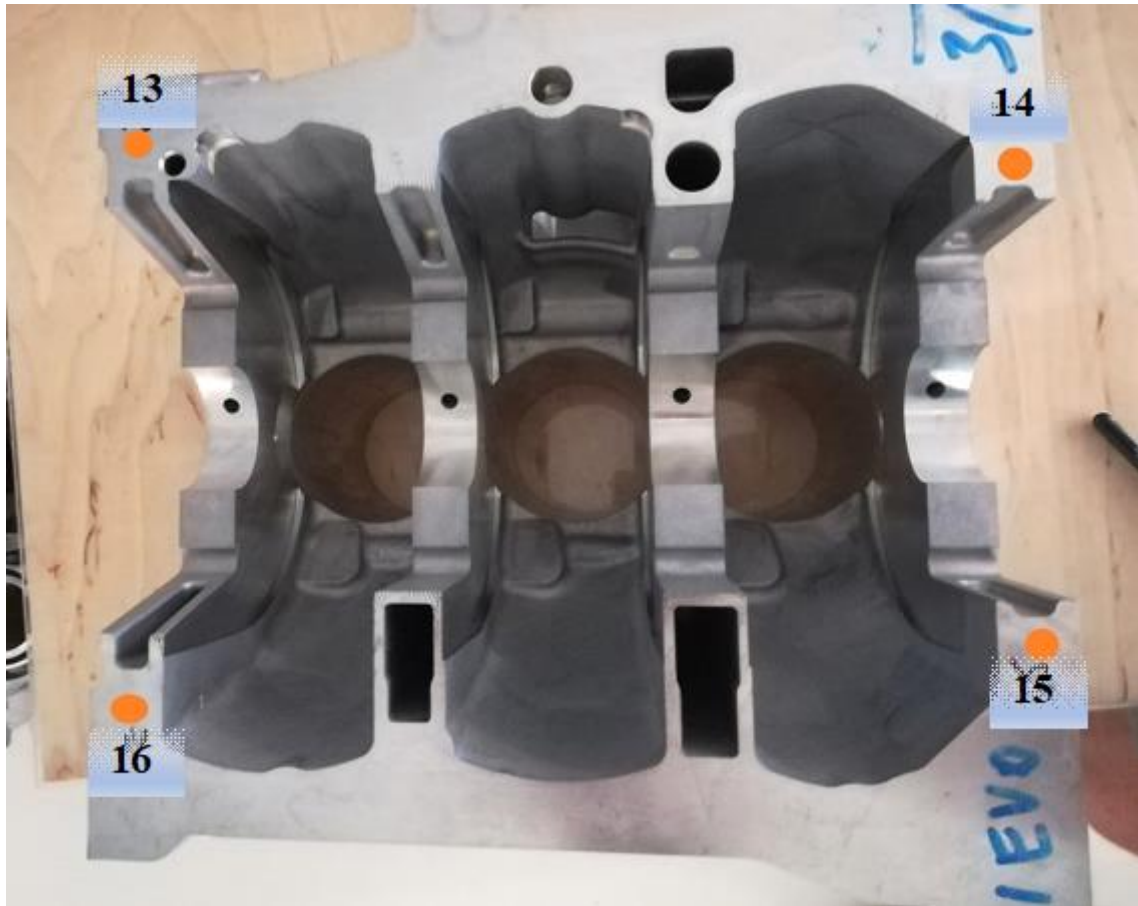
Pro měření zkoušky tvrdosti podle Brinella bylo použito celkem 9 bloků motoru ve třech různých stavech viz tab. 3.

Na každém z devíti bloků bylo stanoveno 16 pozic (oranžové body), kde byla provedena zkouška tvrdosti HBS 250. Dvanáct pozic bylo stanoveno v dělicí rovině mezi blokem motoru a hlavou válců (pozice 1 až 12 - viz obr. 9). V dělicí rovině u klikového hřídele byly stanoveny čtyři pozice pro měření tvrdosti (pozice 13 až 16 – viz obr. 10)



*Obr. 9 – Vyznačení pozic pro měření tvrdosti v dělicí rovině mezi blokem motoru a hlavou válců*





*Obr. 10 – Vyznačení pozic pro měření tvrdosti v dělicí rovině u klikového hřídele*

Měření tvrdosti bylo prováděno v centrální laboratoři firmy Škoda Auto, a.s, na měřícím přístroji – tvrdoměru INSTRON WOLPERT, ev. č. 30018278 viz obr. 11.

Měření probíhalo při pokojové teplotě a standardní vlhkosti. Ještě před samotným měřením tvrdosti bloků motoru bylo provedeno zkušební měření tvrdosti na kalibrační desce, u které je známá tvrdost HB. Vlastní měření tvrdosti bloků motoru bylo provedeno na všech šestnácti zvolených měřících pozicích u všech devíti bloků motoru následujícím způsobem: k měření byla použita ocelová kalená kulička průměr 5 mm, náběhový čas na hlavní zatížení činil 4 s, hlavní zatížení trvalo 10 s, zatěžující síla působící na vlačovanou kuličku byla 2452 N.



*Obr. 11 – Měřicí přístroj INSTRON WOLPERT - tvrdoměr*

Po uplynutí hlavního zatížení se na zvětšovací skle zobrazil vtisk kuličky. Tento byl manuálně pomocí příloženého pravítka změřen. U vtisku se měřil jeho vnější průměr ve dvou na sebe kolmých osách, každá z těchto hodnot byla zaznamenána přístrojem, který následně provedl výpočet výsledné tvrdosti. Výsledky všech měření jsou zaznamenány v tab. 4.

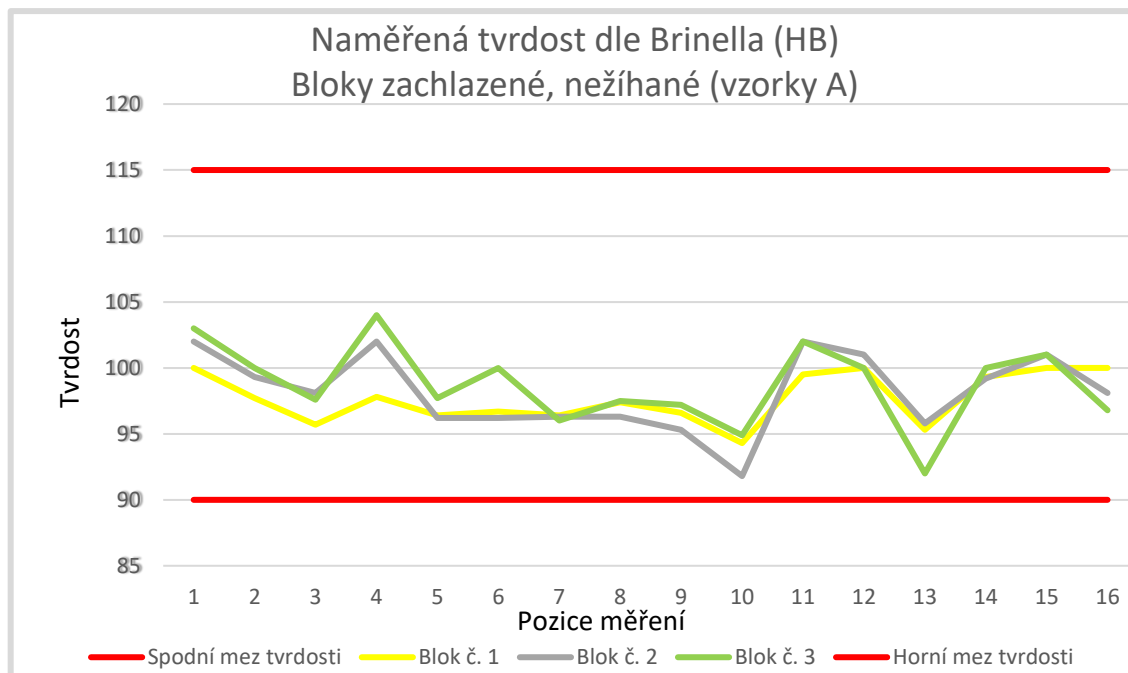
Předepsaná hodnota tvrdosti pro bloky motoru z hliníkové slitiny po tepelném zpracování je v intervalu 90 HB – 115 HB.

Tab. 4 – Naměřené hodnoty ze zkoušky dle Brinella (HBS/250)

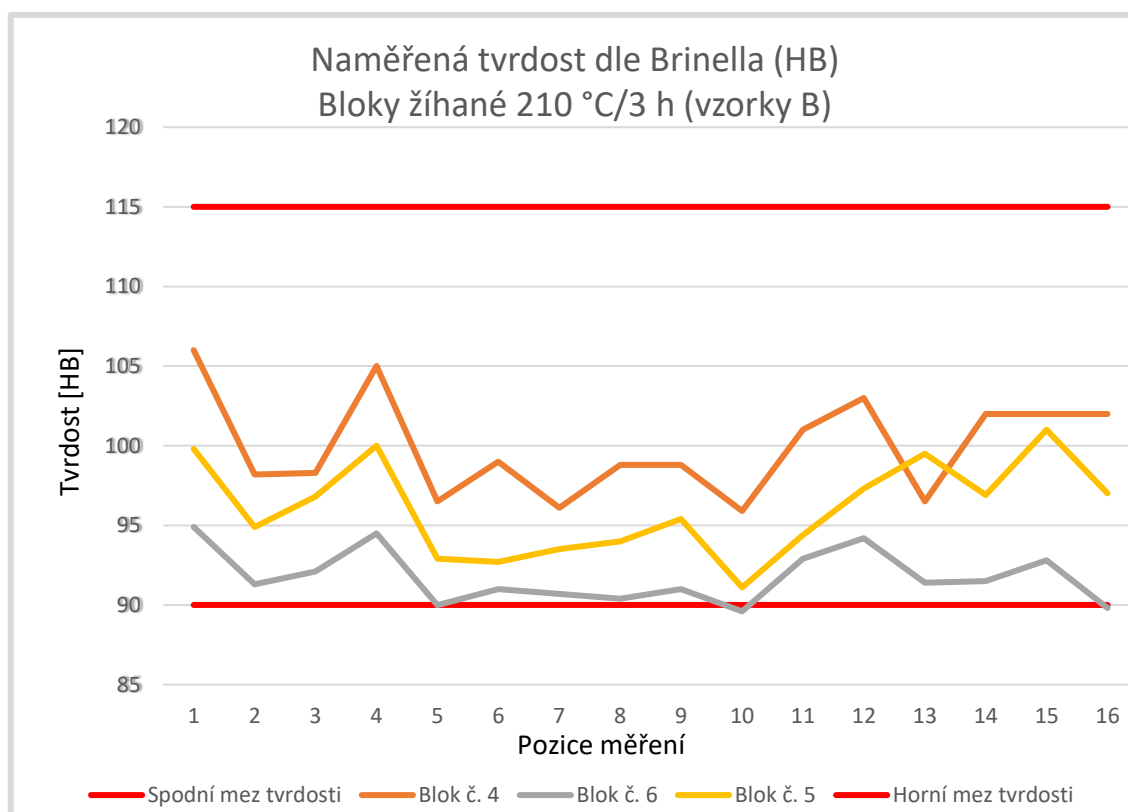
Blok válců	Pozice měření															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Zachlazený, nežíhaný, blok č. 1	100	97,7	95,7	97,8	96,4	96,7	96,4	97,4	96,6	94,3	99,5	100	95,3	99,3	100	100
Zachlazený, nežíhaný, blok č. 2	102	99,3	98,1	102	96,2	96,2	96,3	96,3	95,3	91,8	102	101	95,8	99,2	101	98,1
Zachlazený, nežíhaný, blok č. 3	103	100	97,6	104	97,7	100	96	97,5	97,2	94,9	102	100	92	100	101	96,8
Zachlazený, žíhaný 210°C/3hod., blok č. 4	106	98,2	98,3	105	96,5	99	96,1	98,8	98,8	95,9	101	103	96,5	102	102	102
Zachlazený, žíhaný 210°C/3hod., blok č. 5	94,9	91,3	92,1	94,5	90	91	90,7	90,4	91	89,6	92,9	94,2	91,4	91,5	92,8	89,8
Zachlazený, žíhaný 210°C/3hod., blok č. 6	99,8	94,9	96,8	100	92,9	92,7	93,5	94	95,4	91,1	94,4	97,3	99,5	96,9	101	97
Zachlazený, žíhaný 250°C/3hod., blok č. 7	89,6	84,4	87,6	89	84,5	85,6	82,1	84,5	84,9	80,7	85,6	89,1	82,9	84,9	85,5	84,5
Zachlazený, žíhaný 250°C/3hod., blok č. 8	88,5	87,1	89,6	89,1	84,5	85,5	85,6	87,8	90,8	86,7	88,9	88,9	87,6	85,3	85,3	85,8
Zachlazený, žíhaný 250°C/3hod., blok č. 9	87,7	87,9	89,4	89,3	86	89,6	88,3	89,6	90,6	85,6	89,5	87,1	85,6	87,4	88,7	86

V tabulce 4 jsou zeleně zvýrazněny naměřené hodnoty tvrdosti vyhovující předpisu dle výkresové dokumentace. Červeně jsou zvýrazněny hodnoty mimo předepsaný limit.

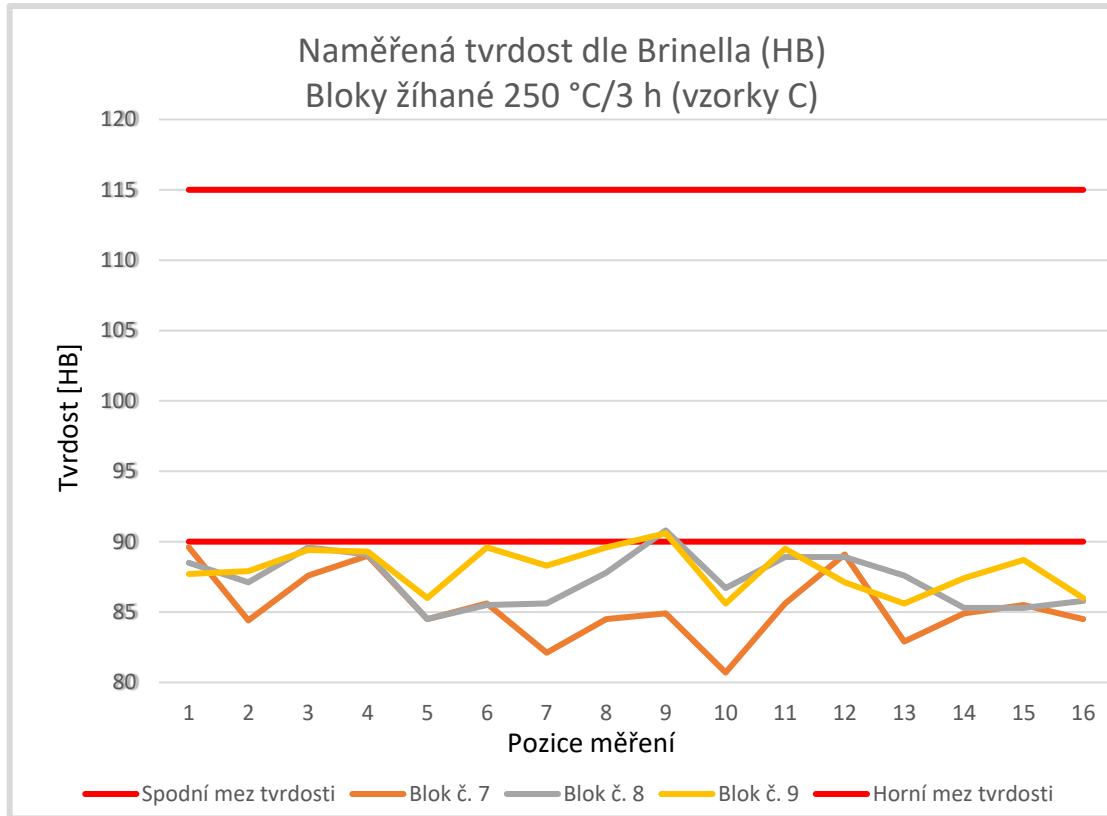
Na obrázcích 12, 13, 14 jsou zaznamenány hodnoty měření, dle jednotlivých typů vzorků.



Obr. 12 – Naměřené hodnoty tvrdości u vzorků A (bloky 1, 2, 3 – zchlazené, dále nežíhané)



Obr. 13 – Naměřené hodnoty tvrdości u vzorků B (bloky 4, 5, 6 – zchlazené, dále žíhané při teplotě 210 °C po dobu 3 hodin)



Obr. 14 – Naměřené hodnoty tvrdosti u vzorků C (bloky 7, 8, 9) – zchlazené, dále žíhané při teplotě 250 °C po dobu 3 hodin

Z obrázků 12, 13 a 14 je patrný minimální rozptyl naměřených hodnot u jednotlivých typech vzorků, a proto si pro další vyhodnocování zkoušky tvrdosti mezi jednotlivými typy vzorků můžeme dovolit použít průměrné hodnoty. Výpočet průměrné hodnoty je uveden ve vzorci (3). Toto tvrzení také potvrzují hodnoty mediánu vypočteného dle vzorce (4), které se blíží k hodnotám aritmetického průměru a nízké hodnoty směrodatné odchylky vypočtené dle vzorce (5). Vypočítané hodnoty jsou shrnuty v tabulce 5.

Výpočet průměrné hodnoty tvrdosti:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (3)$$

Stanovení mediánu hodnoty tvrdosti:

$$\tilde{x} = \frac{x_{(\frac{n}{2})} + x_{(\frac{n}{2}+1)}}{2} \quad (4)$$

Výpočet směrodatné odchylky:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

*Tab. 5 – Statistické vyhodnocení naměřených hodnot*

Blok válců	Medián	Průměrná hodnota tvrdosti (HB)	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota tvrdosti ze všech měření jedné skupiny vzorků (HBS)
Zachlazený, nežíhaný, blok č. 1	97,55	97,7	± 1,9	98,2
Zachlazený, nežíhaný, blok č. 2	98,1	98,2	± 2,9	
Zachlazený, nežíhaný, blok č. 3	98,85	98,7	± 3,1	
Zachlazený, žíhaný 210°C/3hod., blok č. 4	98,9	99,9	±3,1	95,9
Zachlazený, žíhaný 210°C/3hod., blok č. 5	91,35	91,8	± 1,7	
Zachlazený, žíhaný 210°C/3hod., blok č. 6	96,1	96,1	± 2,9	
Zachlazený, žíhaný 250°C/3hod., blok č. 7	84,9	85,3	± 2,4	86,9
Zachlazený, žíhaný 250°C/3hod., blok č. 8	87,35	87,3	± 1,8	
Zachlazený, žíhaný 250°C/3hod., blok č. 9	88,1	88,0	± 1,6	

## 2.1.2 Měření zbytkových napětí rentgenovou diffrakcí

Analýza zbytkového napětí rentgenovou diffrakcí vzorků byla provedena za použití konvenčního difraktometru PROTO iXRD COMBO, ev. číslo 57055 v laboratoři rentgenové difrakce na katedře strojírenské technologie FS TU v Liberci viz obr. 15. Analýza byla provedena na vzorcích z bloku motoru č. 1, č. 5 a č.7, kdy byly použity pouze řezy bloků v ose prvního válce viz obr. 16.

Předmětné vzorky nebylo možné analyzovat v krátkém časovém sledu po odlití. Měření bylo provedeno až po cca 14 dnech po odlití.



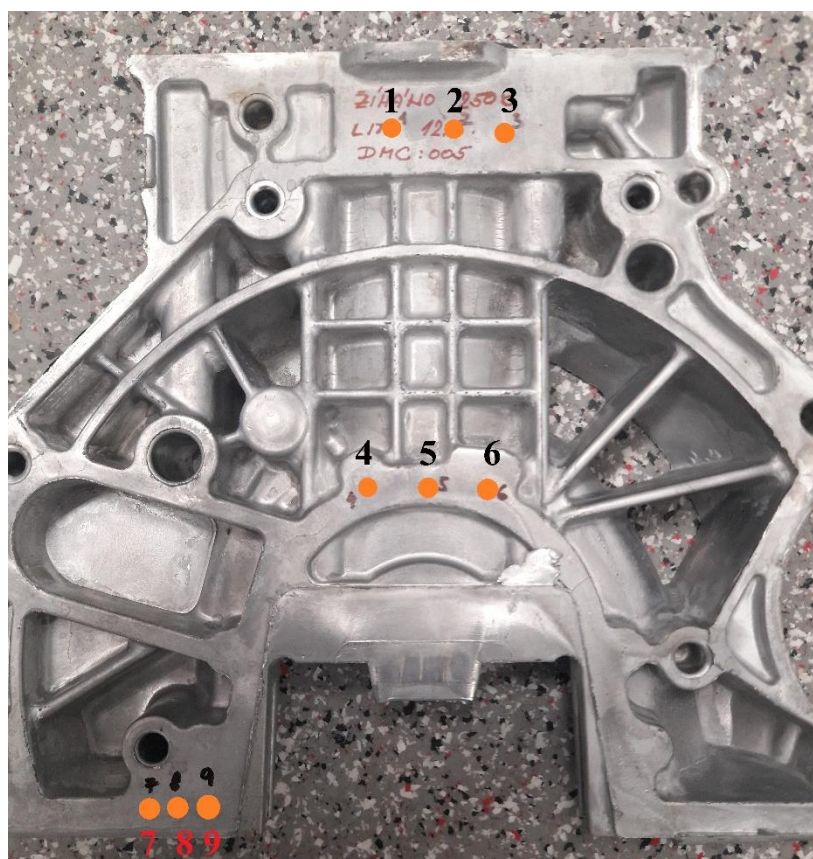
*Obr. 15 – Konvenční difraktometr*

Na vzorcích bylo stanoveno 9 pozic měření pro každý vzorek viz obr. 16. Měření každého vzorku bylo provedeno samostatně, a to za následujících parametrů:

- k RTG difrakci byla použita chromová rentgenka
- clona o průměru 1 mm

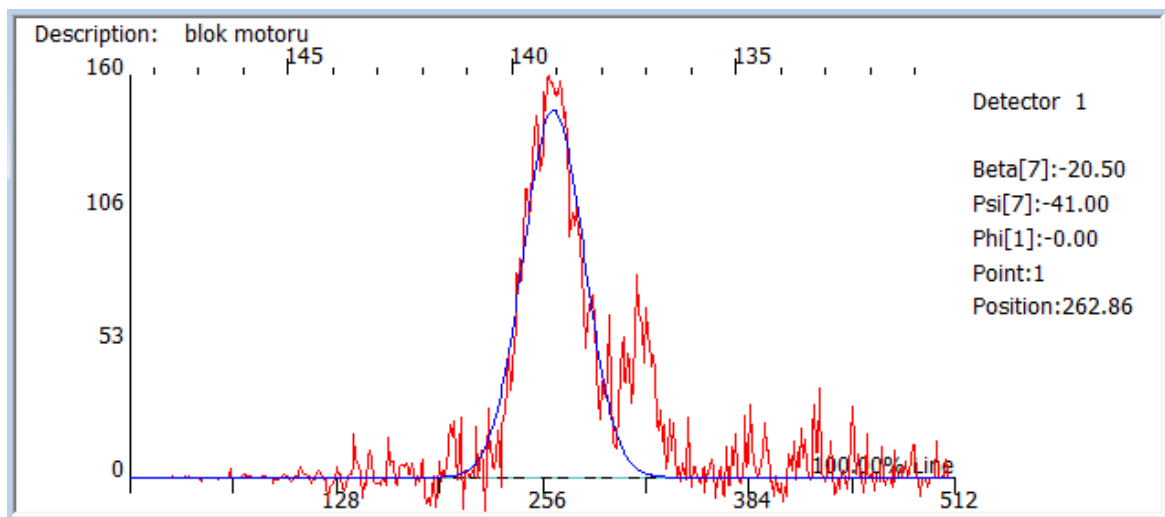
- oscilace rentgenky v ose x byla  $\pm 1$  mm
- úhlová oscilace rentgenky byla  $5^\circ$

Před samotným měřením každého vzorku byla přesně nastavena osa z. Před měřením byla použita kalibrace přístroje na kalibračním prášku, u něhož bylo známé napětí  $0 \pm 30$  MPa. V každé ze stanovených pozic bylo následně provedeno měření s jedenácti různými úhly náklonu rentgenky, aby byla zvýšena pravděpodobnost splnění Braggovy podmínky. Tato měření byla zaznamenána softwarem počítače. Výsledkem měření vzorků jsou peaky intenzity, kdy výslednice peaku intenzity (červená linie) je proložena matematickým modelem (modrá linie) jak je znázorněno na obrázku 17.



Obr. 16 – Vyznačené pozice pro měření zbytkových napětí na řezu bloku motoru





Obr. 17 - Výstup měření zbytkového napětí pro jednotlivou pozici

Výsledky měření jednotlivých vzorku A – blok č. 1, vzorku B – blok č. 5 a vzorku C – blok č. 7 jsou uvedeny v tabulkách 6, 7, 8:

Tab. 6 – Zbytková napětí pro vzorek A – blok č. 1

Pozice měření	osa x	osa y	osa z	Zbytkové napětí	Odchylka měření
1	0	0	0	-14,4	5,5
2	20,84	0	0,03	-13,3	6,9
3	39,82	-1,31	0,05	-9,8	4,7
4	-8,01	-126,76	0,71	-11	4,3
5	11,91	-126,76	0,71	-25,9	3,9
6	31,06	-126,76	0,73	-8,1	4,4
7	-86,29	-230,61	1,16	-36	6,3
8	-75,37	-230,61	1,19	-28,4	5,7
9	-65,6	-230,61	1,18	-24,2	4,4

Průměrná hodnota zbytkového napětí pro blok č. 1 je -19,01 MPa.

Tab. 7 – Zbytková napětí pro vzorek B – blok č. 5

Pozice měření	osa x	osa y	osa z	Zbytkové napětí	Odchylka měření
1	0	0	0	0	4,3
2	20,74	0	0,02	-1,4	3,8
3	39,84	0	0,07	-4,1	4,5
4	-7,33	-126,76	-1,38	-8,9	4,5
5	12,98	-126,76	-1,32	-11,8	3,8
6	32,47	-126,76	-1,3	-5,6	5,2
7	-88,06	-229,93	-2,76	-8,9	3,7
8	-77,49	-229,93	-2,67	-10,5	3,7
9	-67,79	-229,93	-2,64	-2,2	3,9

Průměrná hodnota zbytkového napětí pro blok č. 5 je -5,93 MPa.

Tab. 8 – Zbytková napětí pro vzorek C – blok č. 7

Pozice měření	osa x	osa y	osa z	Zbytkové napětí	Odchylka měření
1	0	0	0	-43,1	6,1
2	20,19	0	0,12	-23,3	6,1
3	40,12	-1,63	0,19	-45,5	5,8
4	-8,59	-125,74	-0,68	-26,5	4,2
5	11,8	-127,03	-0,64	-43	4,4
6	31,16	-127,03	-0,51	-34,3	3,4
7	-82,69	-232,61	-2,06	-32,3	5,6
8	-72,09	-232,61	-1,98	-30,9	3,3

Průměrná hodnota zbytkového napětí pro blok č. 7 je -31,92 MPa.

Výsledkem provedených měření na všech vzorcích je zjištění, že ve vzorcích je tlakové zbytkové napětí. Pokud při měření vyjde kladná hodnota zbytkového napětí, znamená to, že v analyzovaném materiálu je tahové napětí.

## 2.2 Strukturní šetření

Pro provedení optické a elektronové mikroskopie je nutné nejprve provést přípravu vzorků. Postup přípravy vzorků u daných experimentů se skládá z několika navazujících kroků: odběr vzorků z bloku motoru, zapouzdření vzorku do pryskyřice, broušení a leštění a zviditelnění struktury leptáním pomocí suspenze OP – S (suspenze koloidního křemíku) od firmy STRUERS. Odběr vzorků z bloku motoru byl proveden pomocí strojní pásové pily ze tří různých odlitků bloku motoru: z bloku č. 1, č. 5 a č. 7. Rozměr vzorků byl o velikosti 15 x 10 x 10 mm.

Pomocí lisu SimpliMet 1000 bylo provedeno zapouzdření každého vzorku do vytvrditelné bakelitové pryskyřice s uhlíkovým plnivem zn. PolyFast. Do přístroje byl vložen vzorek, zasypán přesně stanoveným množstvím pryskyřice PolyFast. K zapouzdření vzorku dochází při působení tlaku 25 MPa za současného působení teploty 180 °C po dobu 4,5 minuty. Poté následuje ochlazení vzorku na pokojovou teplotu trvající 3,5 minuty.

V dalším kroku bylo provedeno broušení vzorků. Broušení probíhalo na brusce SAPHIR 550. Po upevnění vzorků do upínací hlavy byly tyto postupně broušeny na brusných papírech od drsnosti 180 dále 400, 800 a 1200. Broušení při každé drsnosti probíhalo 90 s, přítlak na vzorky byl nastaven na 30 N a otáčky brusného papíru byly 300 ot/min. Na stejném přístroji následovalo leštění vzorků pomocí leštících kotoučů s použitím leštící diamantové suspenze.

Nejprve byla použita leštící suspenze o velikosti částice 3 μm a následně 1 μm. Poslední fází bylo omytí vzorku lihem a následné osušení proudem horkého vzduchu. Tímto postupem byly připraveny vzorky pro elektronovou mikroskopii, spektrální analýzu. Po provedení uvedených analýz byly vzorky následně přešetřeny a leptány za použití suspenze OP – S z důvodu dalšího zkoumání na optickém mikroskopu.

### 2.2.1 Rentgen – fluorescenční metoda (XRF) stanovení chemického složení Al slitiny bloku motoru – spektrální analýza

Spektrální analýza chemického složení hliníkové slitiny používané pro bloky motorů byla provedena ručním rentgenovým spektrometrem Delta INNOV-X obr. 18 v laboratoři na katedře materiálu FS TU v Liberci. Analýza byla provedena na vzorcích z bloku motoru č. 1, č. 5 a č.7. Ručním analyzátozem byly naměřeny hodnoty v uvedené v tabulce 9.



Obr. 18 - Rentgenovým spektrometr Delta INNOV-X

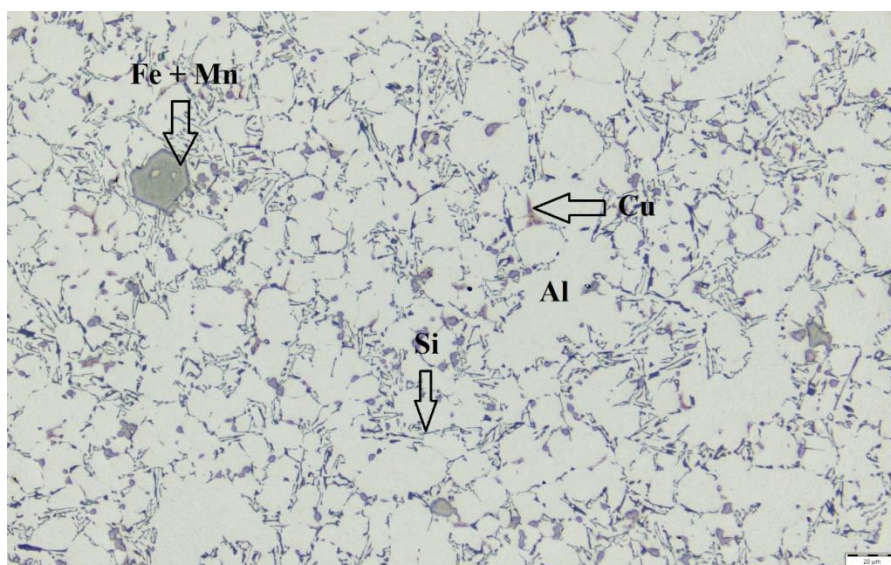
Tab. 9 – Naměřené hodnoty chemického složení ručním analyzátozem u vzorků A (blok č. 1), B (blok č. 5) a C (blok č. 7)

Chemické složení	Blok. č. 1 [%]	Blok č. 5 [%]	Blok č. 7 [%]
Al	84,67	83,19	83,22
Si	12,84	11,48	13,17
Mn	0,15	0,26	0,18
Fe	0,61	0,73	0,71
Ni	0,03	0,04	0,03
Cu	1,16	2,26	1,36
Zn	0,49	0,87	0,59
Zr	0,005	0	0,004
Pb	0,03	0,06	0,04
Bi	0,01	0	0,004
Mg	0	1,11	0,68
Cr	0	0	0,02

## 2.2.2 Studium mikrostruktury vzorků světelným mikroskopem

Metalografická analýza vzorků byla provedena za použití světelného (optického) metalografického mikroskopu Olympus GX-71, ev. číslo 30025753 v centrální laboratoři firmy Škoda Auto. Analýza byla provedena na vzorcích z bloku motoru č. 1, č. 5 a č.7.

Každý vzorek byl umístěn do optického mikroskopu a struktura byla zkoumána při zvětšeních 100x, 500x a 1000x. Optický obraz byl přes připojené snímací zařízení přenesen na monitor připojeného počítače. Výsledný obraz byl vyhodnocen a uložen. Pro názornost následuje obrázek 19, kde ve zvětšení 500x jsou popsány jednotlivé prvky nacházející se ve zkoumané struktuře vzorku A – blok č. 1. Tyto prvky byly stanoveny na základě analýzy REM.



Obr. 19 – Mikrostruktura slitiny hliníku  $AlSi_9Cu_3(Fe)$  s vyznačením jednotlivých chemických prvků

Struktura slitiny hliníku ( $AlSi_9Cu_3(Fe)$ ) byla sledována na světelném mikroskopu přímo v místě výrobce bloku motoru. Současně na elektronovém mikroskopu byl analyzován vzorek, jehož analýza potvrdila, že ve struktuře slitiny hliníku se nachází ojedinělé fáze bohaté na železo a mangan, které jsou rozloženy v matici tvořené tuhým roztokem  $\alpha$  (Al) (světle šedé oblasti ve struktuře), a drobnými jehlicemi tuhého roztoku  $\beta$  (Si) (tmavé oblasti) a dále zde jsou patrné částice mědi.

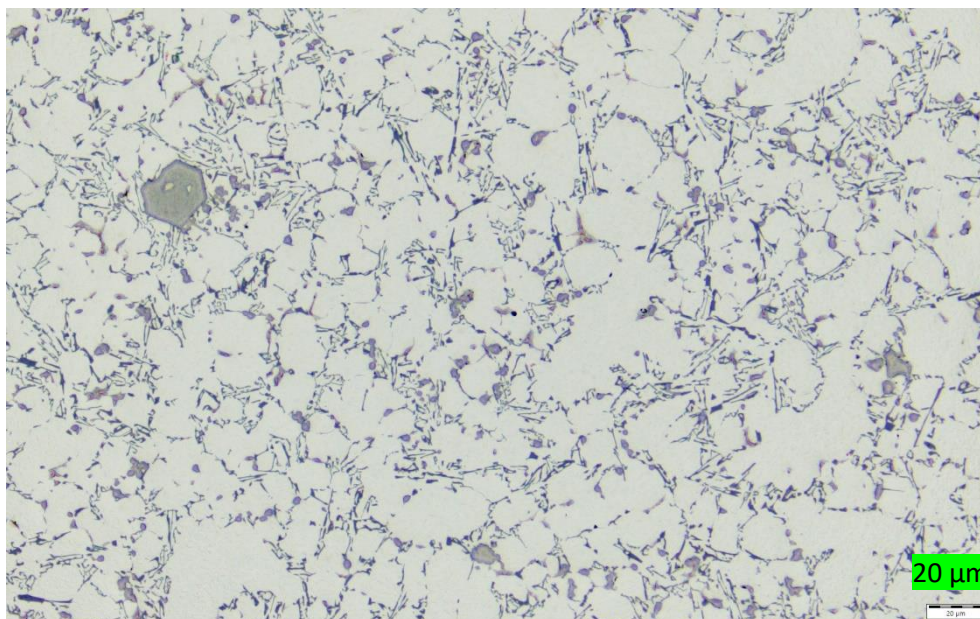
Struktury metalografických vzorků jednotlivých bloků jsou uvedeny na obrázcích 20 až 28. Jednotlivé metalografické vzorky a jejich struktury byly sledovány při různém zvětšení.



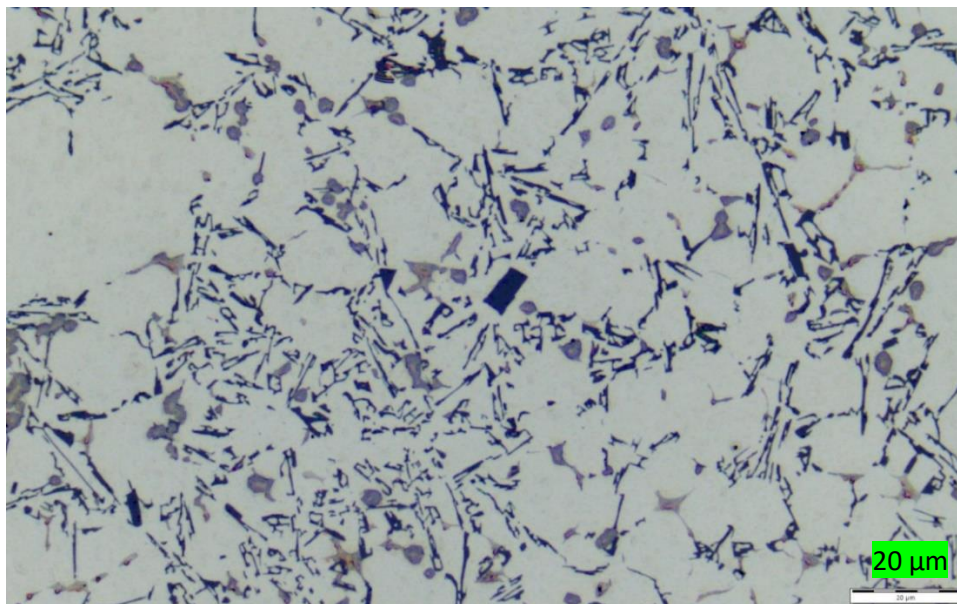
*Obr. 20 - Mikrostruktura bloku motoru, vzorek A, blok motoru č. 1, zvětšeno 100x (bez tepelného zpracování)*

Z obr. 20 je zřejmé, že se jedná o mikrostrukturu slitiny hliníku  $\text{AlSi9Cu3(Fe)}$ , světlejší oblasti jsou tuhý roztok  $\alpha$  (Al) a tmavé oblasti jsou tuhý roztok  $\beta$  (Si). Drobné černé oblasti je možno považovat za drobnou porozitu odlitku vzniklou v důsledku použité technologie vysokotlakého lití.

Na obr. 21 v levém části se nachází drobná fáze Fe a Mn, dále tato struktura je tvořena tuhým roztok  $\alpha$  (Al), světlé oblasti a tmavé oblasti jsou tuhý roztok  $\beta$  (Si).



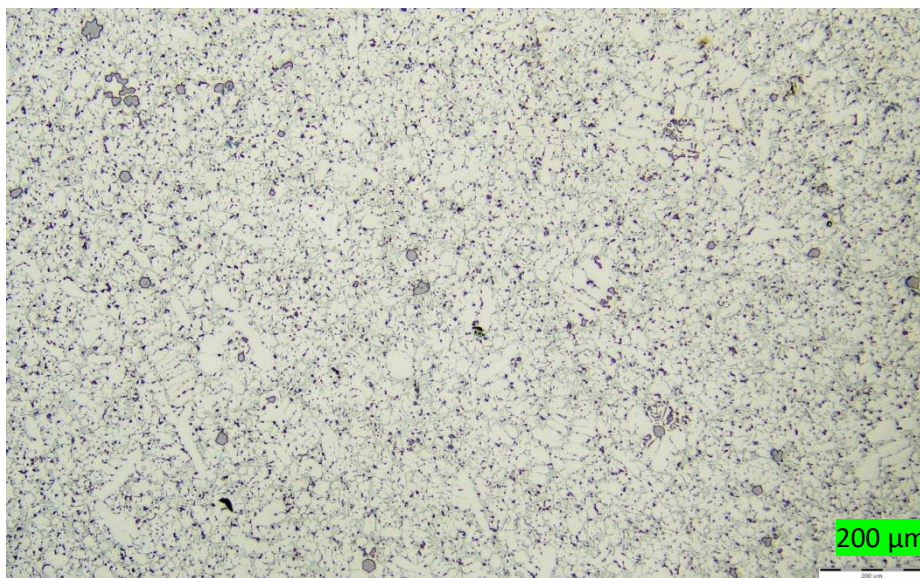
*Obr. 21 - Mikrostruktura bloku motoru, vzorek A, blok motoru č. 1, zvětšeno 500x (bez tepelného zpracování)*



*Obr. 22 - Mikrostruktura bloku motoru, vzorek A, blok motoru č. 1, zvětšeno 1000x (bez tepelného zpracování)*

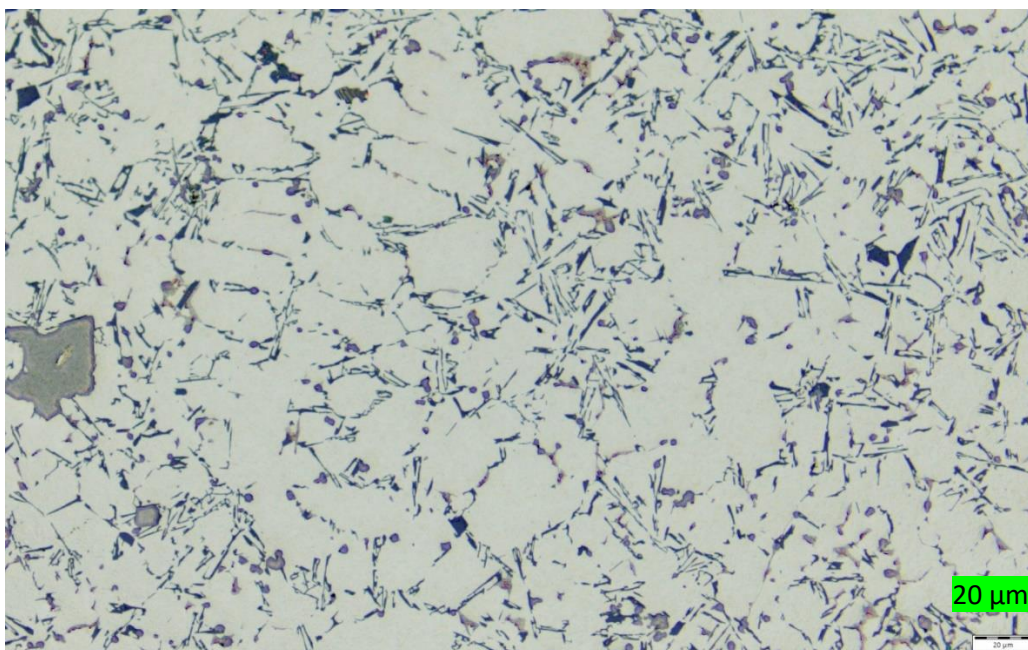
Z obr. 22 je patrná struktura slitiny  $\text{AlSi9Cu3(Fe)}$ , která je tvořena tuhým roztok  $\alpha$  (Al), světlé šedé oblasti a tmavé oblasti jsou tuhý roztok  $\beta$  (Si). V této struktuře se nachází ojedinělé drobné vyloučeniny nerozpuštěného křemíku (ostře tmavé obdélníkové útvary).

Na obr. 23 je mikrostruktura vzorku B (blok motoru č. 5), který byl žíhán v peci na teplotu  $210\text{ }^{\circ}\text{C}$  po dobu 3 hodiny.

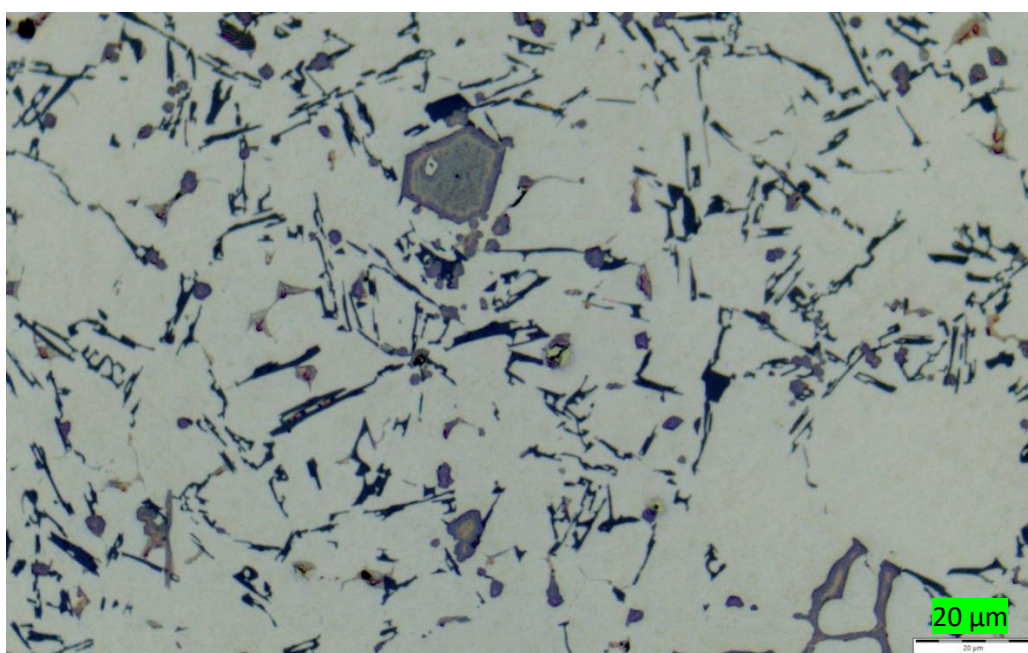


*Obr. 23 - Mikrostruktura bloku motoru, vzorek B, blok motoru č. 5, zvětšeno 100x (tepelně zpracováno, ohřev na teplotu  $210\text{ }^{\circ}\text{C}$  po dobu 3 hodin)*

Z obr. 23 je možno sledovat jemnozrnnou mikrostrukturu slitiny  $AlSi9Cu3$ , která je tvořena tuhým roztok  $\alpha$  (Al), světlé oblasti. Tmavé oblasti jsou tuhý roztok  $\beta$  (Si). Ve vzorku je dále možno pozorovat několik drobných vyloučenin Fe a Mn, kdy tyto částice mají velikost  $36 \mu m$  a menší. Částice tuhého roztoku  $\alpha$  (Al) jsou velmi jemné, dosahují velikosti kolem  $18 \mu m$ , největší částice dosahují cca  $55 \mu m$ .



Obr. 24 - Mikrostruktura bloku motoru, vzorek B, blok motoru č. 5, zvětšeno 500x (tepelně zpracováno, ohřev na teplotu  $210 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 3 hodin)

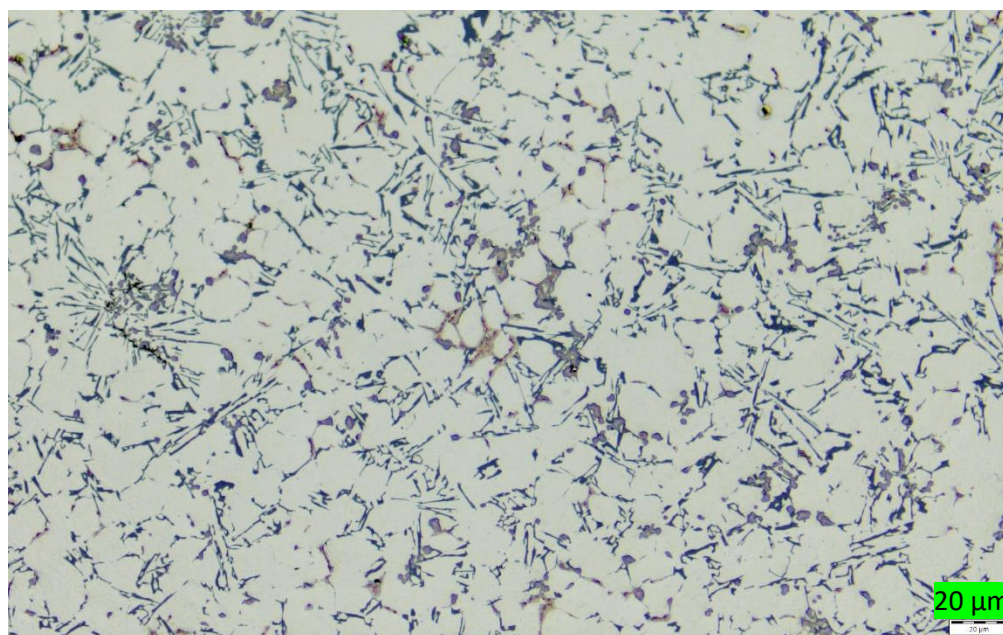


Obr. 25 - Mikrostruktura bloku motoru, vzorek B, blok motoru č. 5, zvětšeno 1000x (tepelně zpracováno, ohřev na teplotu  $210 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 3 hodin)

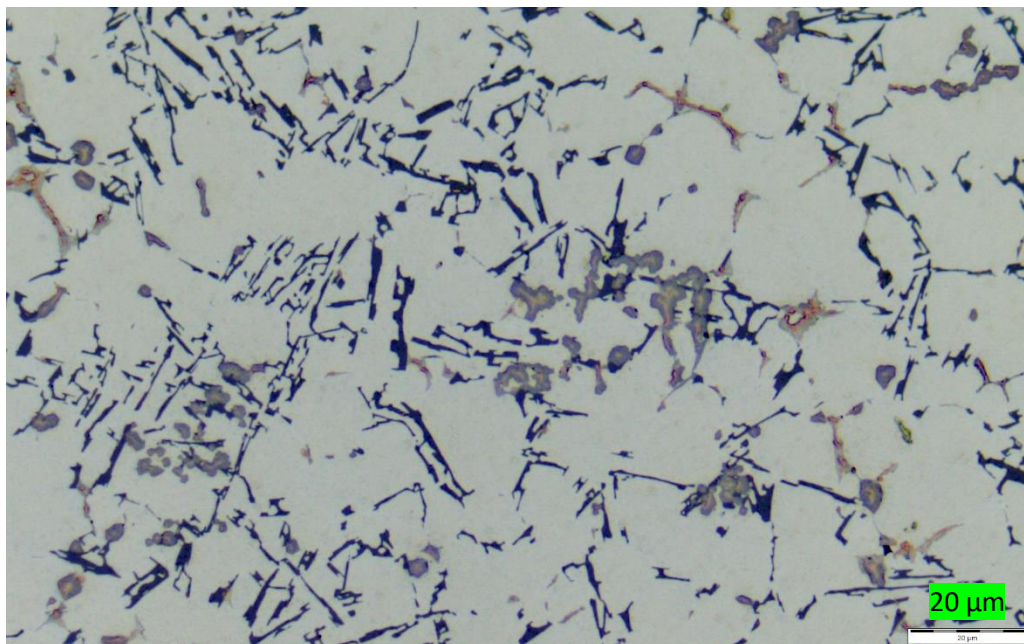




Obr. 26 - Mikrostruktura bloku motoru, vzorek C, blok motoru č. 7, zvětšeno 100x (tepelně zpracováno, ohřev na teplotu 250 °C po dobu 3 hodin)



Obr. 27 - Mikrostruktura bloku motoru, vzorek C, blok motoru č. 7, zvětšeno 500x (tepelně zpracováno, ohřev na teplotu 250 °C po dobu 3 hodin)



*Obr. 28 - Mikrostruktura bloku motoru, vzorek C, blok motoru č. 7, zvětšeno 1000x (tepelně zpracováno, ohřev na teplotu 250 °C po dobu 3 hodin)*

Z mikrostruktur všech vzorků je patrné, že se v metalografických vzorcích bloků motoru nachází tuhý roztok  $\alpha$  (Al) – světle šedé oblasti a tuhý roztok  $\beta$  (Si) – tmavé jehlicovité oblasti. Dále se ve strukturách nacházejí vyloučeniny Fe a Mn. Světle červené oblasti jsou oblasti, kde se nachází Cu.

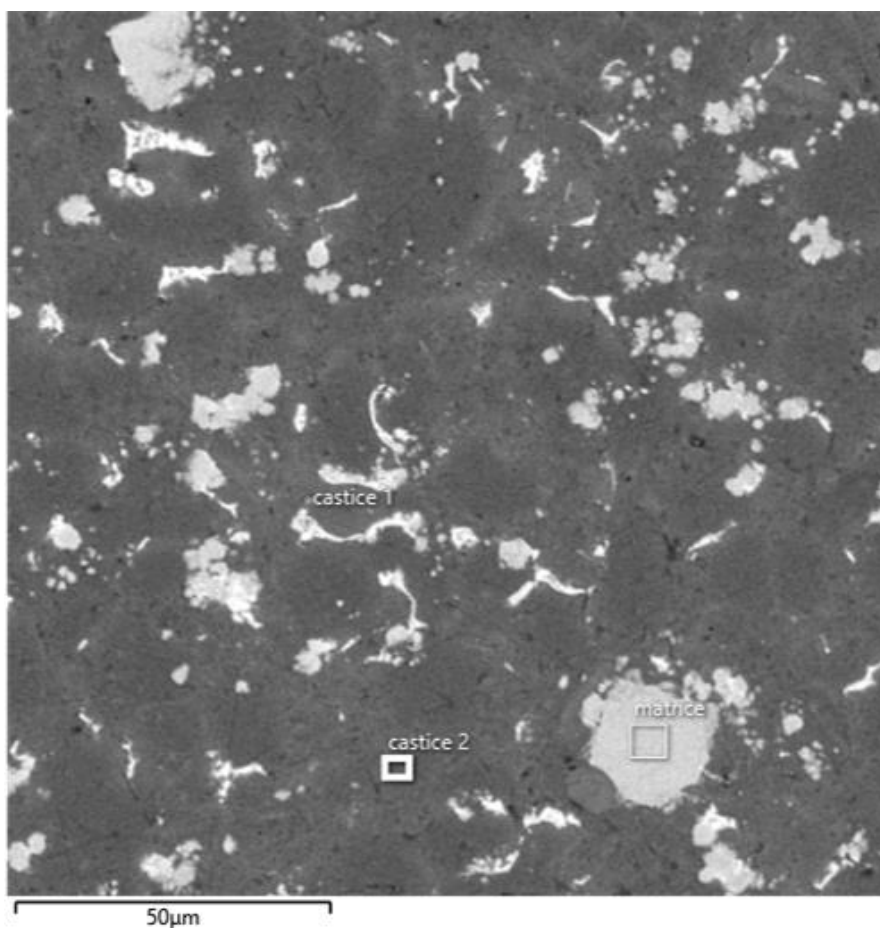
### **2.2.3 Sledování mikrostruktury vzorků elektronovým mikroskopem**

Chemická a strukturní analýza vzorků byla provedena za použití elektronového rastrovacího mikroskopu TESCAN MIRA3, ev. číslo 57884 v laboratoři elektronové mikroskopie na Katedře strojírenské technologie FS TU v Liberci. Analýza byla provedena na vzorku A – blok motoru č. 1 a vzorku B – blok motoru č. 7.

Analýza vzorku byla prováděna detektorem BSE, který poskytuje chemický kontrast při tvorbě obrazu. Provedená elektronová mikroskopie byla zaměřena na zjištění chemického složení jednotlivých fází slitiny.

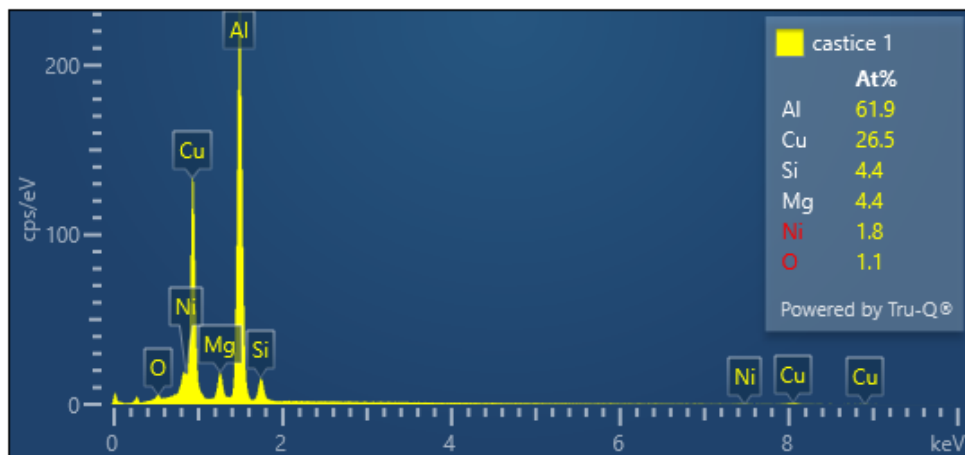
Na obr. 29 je zobrazena lokální oblast metalografického vzorku A (blok č. 1) u něhož bylo metodou EDX stanoveno chemické složení jednotlivých částic. Z obr. 29 jsou na sledované mikrostruktúře vyznačené částice 1, částice 2 a matrice.

### Vzorek A – blok motoru č. 1

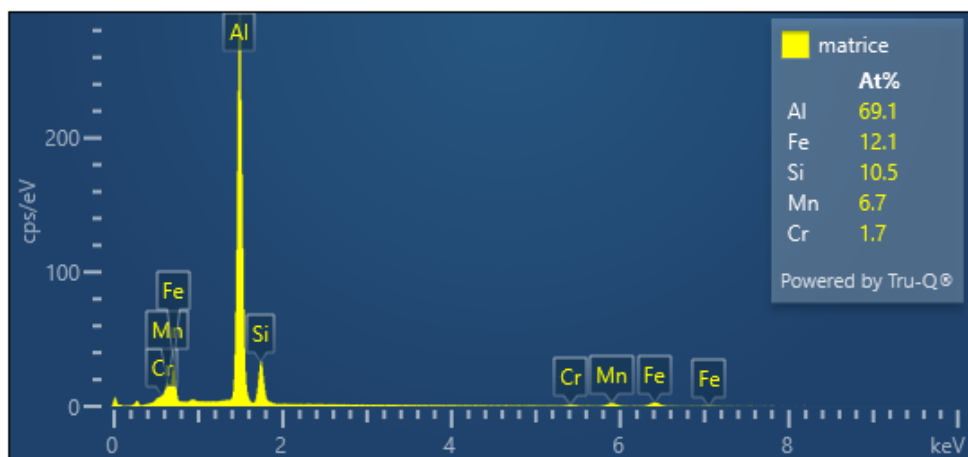


*Obr. 29 – Lokalizace oblastí, u nichž bylo metodou EDX stanoveno chemické složení metalografického vzorku A – blok č. 1*

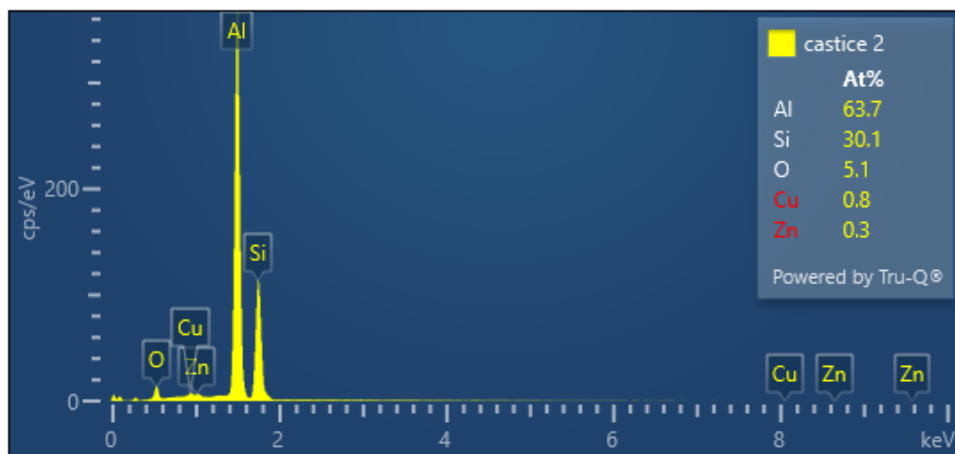
Na obr. 30, obr. 31 a obr. 32 jsou uvedena spektra zjištěných prvků na základě kterých bylo stanoveno chemické složení, pro částici 1, částici 2 a matrici.



Obr. 30 – Bodové EDX spektrum z částice 1, která je vyznačená na obr. 29

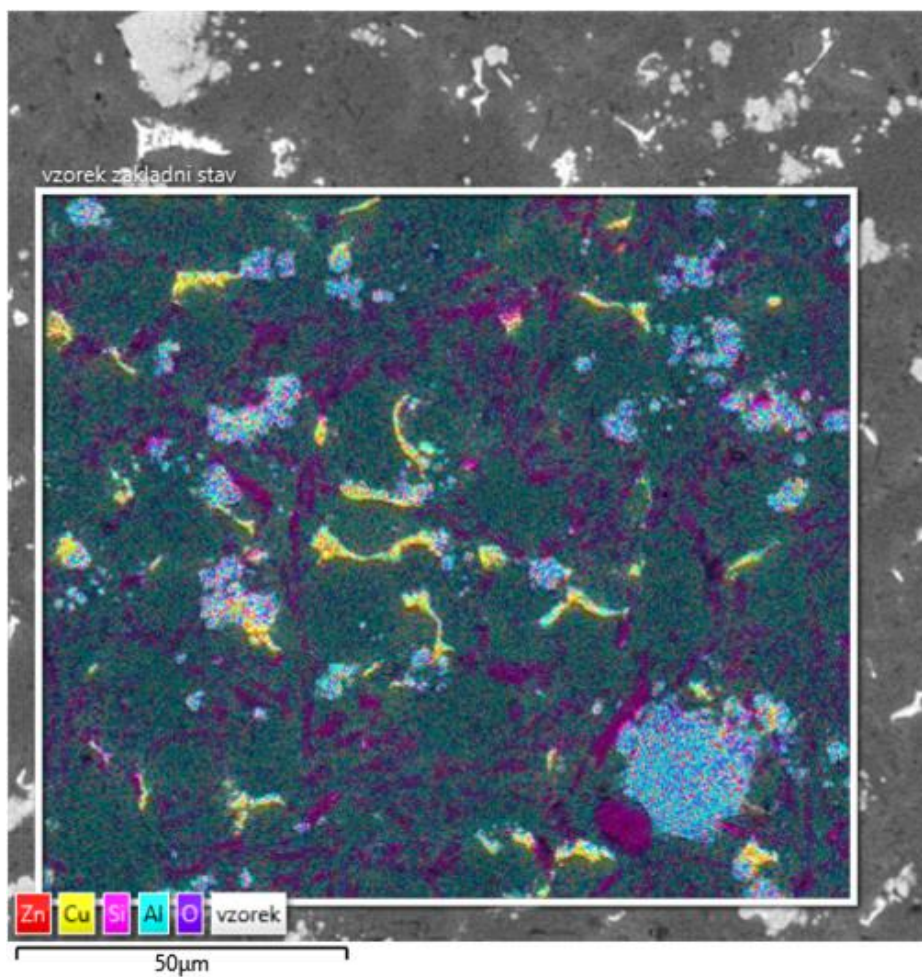


Obr. 31 – Bodové EDX spektrum matrice vyznačené na obrázku 29

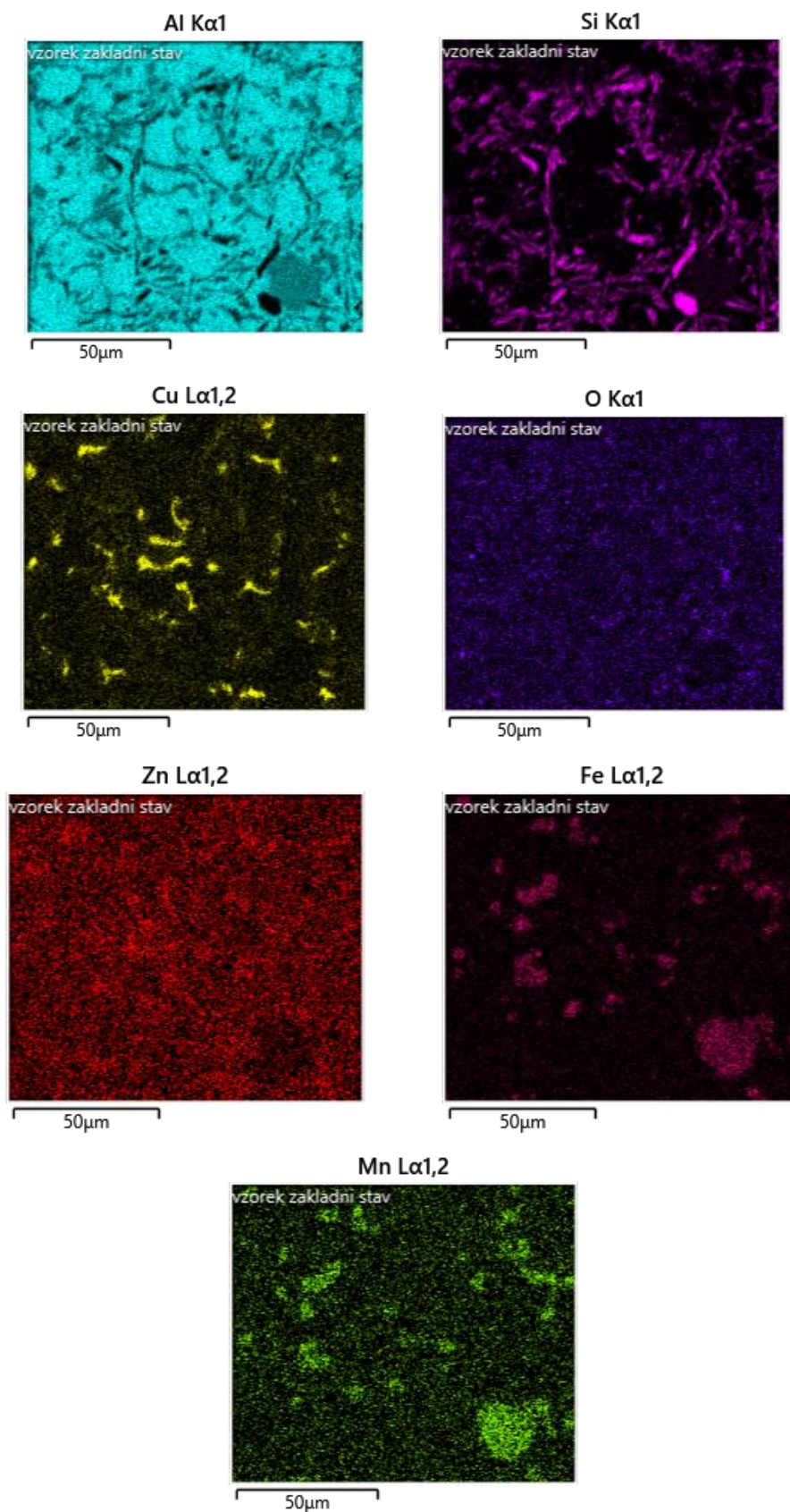


Obr. 32 – Bodové EDX spektrum z částice 2 vyznačené na obrázku 29

Dále byla provedena plošná chemická analýza (EDX mapa) viz obr. 33 a obr. 34. Uvedené obrázky zobrazují rozložení jednotlivých prvků ve sledované oblasti metalografického vzorku.

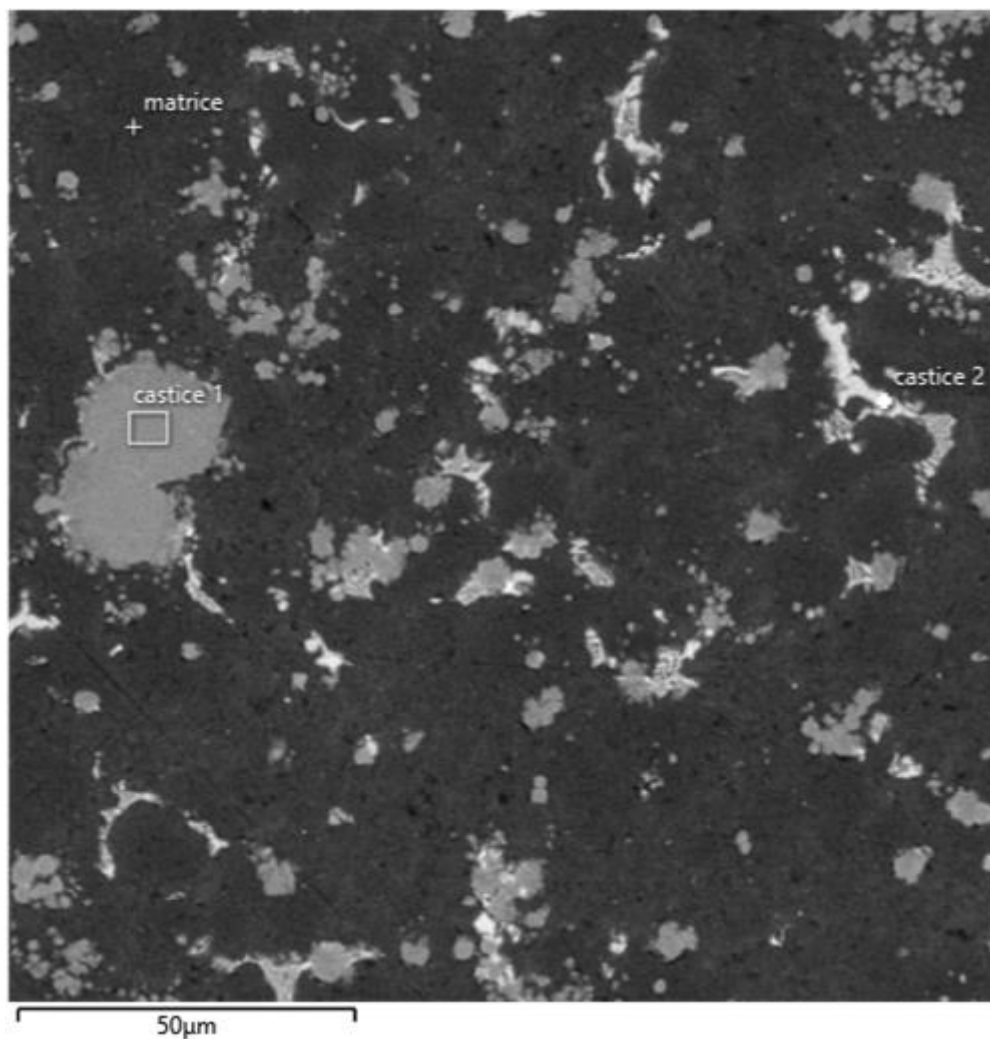


*Obr. 33 – Plošná chemická analýza na metalografickém vzorku pomocí REM*



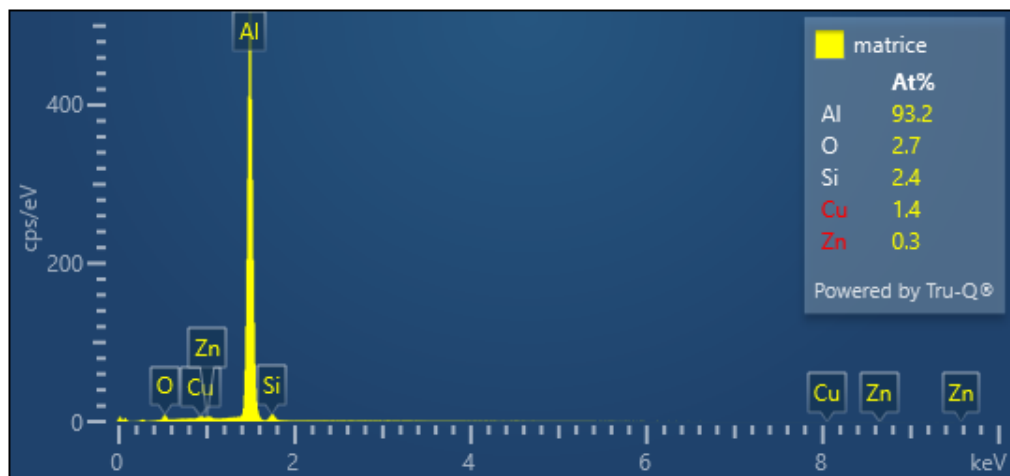
Obr. 34 – Rozložení jednotlivých chemických prvků v oblasti, viz obr. 33

### Vzorek C – blok motoru č. 7

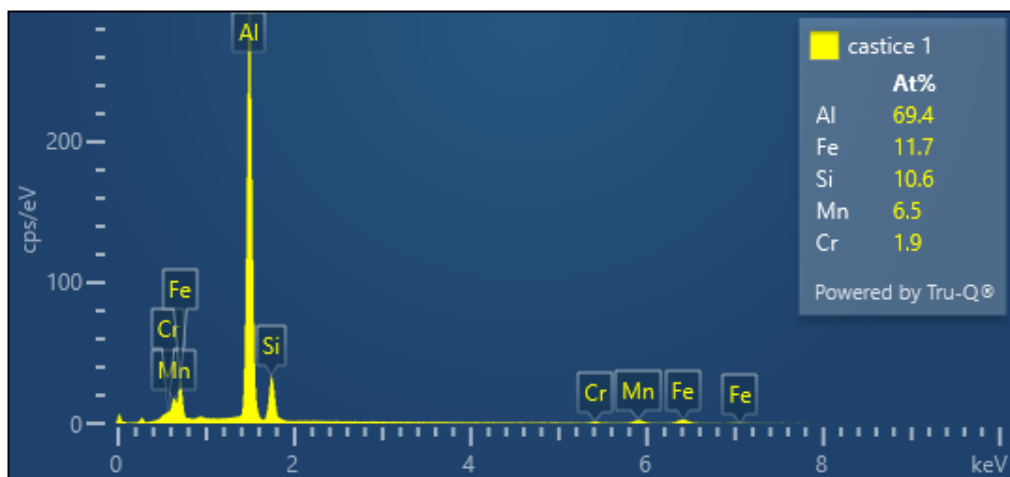


*Obr. 35 – Lokalizace oblastí, u nichž bylo metodou EDX stanoveno chemické složení metalografického vzorku C – blok č. 7*

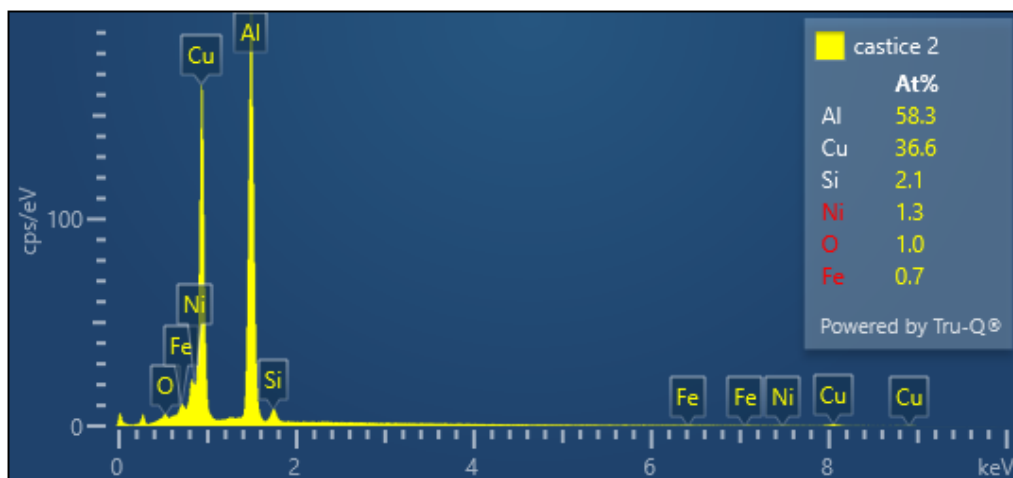
Na obr. 36, obr. 37 a obr. 38 jsou uvedena spektra zjištěných prvků na základě kterých bylo stanoveno chemické složení, pro částici 1, částici 2 a matici.



Obr. 36 – Bodové EDX spektrum matrice vyznačené na obrázku 35



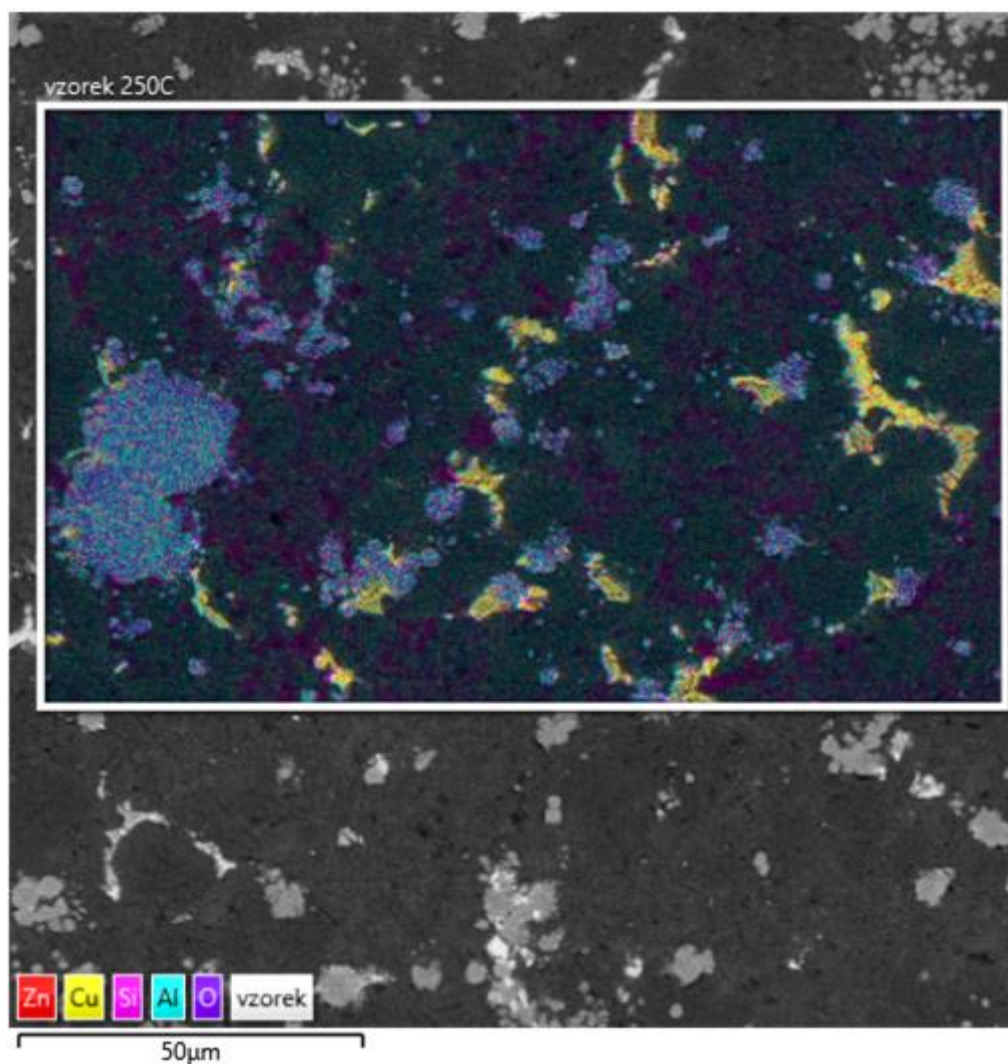
Obr. 37 – Bodové EDX spektrum částice 1 vyznačené na obrázku 35



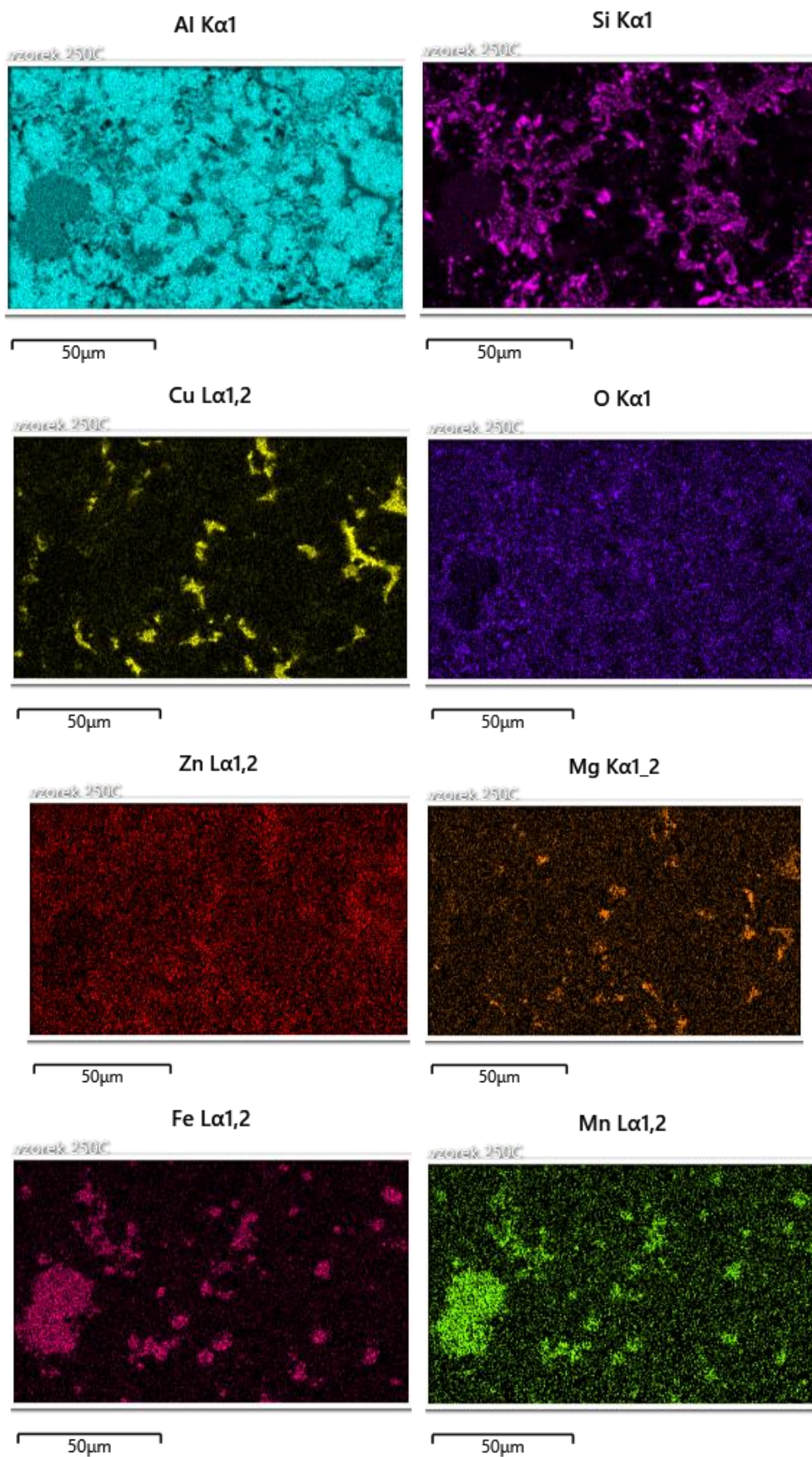
Obr. 38 – Bodové EDX spektrum částice 2 vyznačené na obrázku 35



Dále byla provedena plošná chemická analýza (EDX mapa) viz obr. 32 a 33. Uvedené obrázky zobrazují rozložení jednotlivých prvků ve sledované oblasti výbrusu.



*Obr. 39 – Plošná chemická analýza na metalografickém vzorku pomocí REM*



Obr. 40 – Rozložení jednotlivých chemických prvků v oblasti, viz obr. 39

### 3. Závěr

Diplomová práce, která byla zpracována na téma Ověření optimalizace procesu tepelného zpracování tlakově litých hliníkových odlitků ve Škodě Mladá Boleslav se skládá za dvou hlavních částí, teoretické a experimentální. Část teoretická obsahuje charakteristiku slitin hliníku, technologii vysokotlakého lití slitin hliníku, tepelné zpracování slitin hliníku a popis teoretických základů použitých měřících metod použitých následně v experimentální části.

Hlavní experimentální část diplomové práce je zaměřena na sledování vlastností bloků motorů ze slitiny  $AlSi9Cu3(Fe)$  bez tepelného zpracování a s tepelným zpracováním – žíháním.

V experimentální části diplomové práce bylo provedeno ověření změny struktury a mechanických a metalurgických vlastností u bloků motorů mezi standardně prováděnou tepelnou úpravou (žíhání při  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  po dobu 3 hodiny) - vzorky C a bloků motorů vyráběných podle inovovaného technologického postupu (žíhání při  $210\text{ }^{\circ}\text{C}$  po dobu 3 hodin) - vzorky B. Jako referenční vzorek byl zvolen blok motoru bez tepelného zpracování - vzorky A. Byly provedeny následující analýzy a měření: zkouška tvrdosti dle Brinella, světelná mikroskopie, elektronová rastrovací mikroskopie, rentgenová difrakce k měření zbytkového napětí a spektrální analýza chemického složení.

Pro výrobu bloků spalovacích motorů pomocí metody vysokotlakého lití má největší praktický význam hodnota napět'ového stavu vyrobeného odlitku a stabilita jeho tvrdosti.

Na základě získaných výsledků lze formulovat tyto dílčí závěry:

1) Analýzou vzorků A, B, C rentgenovou difrakcí byly zjištěny hodnoty zbytkového napětí. Naměřené hodnoty zbytkového napětí ukázaly nejnižší průměrnou hodnotu zbytkového napětí u vzorku B a to  $-5,93\text{ MPa}$ , u vzorku A průměrná hodnota činila  $-19,01\text{ MPa}$  a u vzorku C činila  $-31,92\text{ MPa}$ . Z výsledků plyne, že u všech vzorků byl charakter zbytkového napětí tlakový. Vzhledem k nízkým naměřeným hodnotám zbytkového napětí byl proveden pokus, kdy do jednoho z bloků bylo uměle vneseno napětí úderem kladiva a poté bylo v daném místě provedeno kontrolní měření, kdy v tomto místě bylo naměřena hodnota zbytkového napětí  $-127,3\text{ MPa}$ . Z tohoto kontrolního pokusu bylo zjevné, že naměřené hodnoty u vzorků odpovídají. Nízké hodnoty zbytkového napětí lze vysvětlit časovou

prodlevou mezi odlitím bloků motoru a prováděním analýzy, kdy ve slitině dochází poměrně rychle k relaxaci zbytkového napětí. Zjištěná nejvyšší průměrná hodnota napětí u vzorku C neodpovídá předpokladu, že žíháním při vyšší teplotě dochází k vyššímu snížení zbytkového napětí. Dle výsledků analýzy můžeme říci, že z hlediska zbytkového napětí je blok vyrobený optimalizovaným tepelným zpracováním žíháním při 210 °C po dobu 3 hodin nejvhodnější. Ovšem je nutné mít na zřeteli, že přesnost této metody je  $\pm 30$  MPa, tudíž naměřené hodnoty zbytkového napětí jsou blízké nulovému stavu (napětí stihla vyrelaxovat).

2) Měření tvrdosti dle Brinella všech devíti vzorků (A, B, C) bylo potvrzeno, že vzorky A a B odpovídají předepsané tvrdosti dle výkresové dokumentace. Vzorky C (žíháno na 250 °C po dobu 3 hodin) tento předpis tvrdosti nesplňují. Měření a výpočty bylo zjištěno, že vzorky A mají průměrnou hodnotu tvrdosti 98,2 HB. Vzorky B mají průměrnou hodnotu tvrdosti 95,9 HB a vzorky C mají průměrnou hodnotu tvrdosti 86,9 HB. Z tohoto plyne, že vzorky A a B vyhovují předepsanému rozmezí tvrdosti dle výkresové dokumentace. Průměrná hodnota tvrdosti vzorků C leží pod spodní mezí tvrdosti dle výkresové dokumentace, tj. 90 HB. Z toho plyne, že doposud používaná žíhací teplota 250 °C po dobu 3 hodin vede k poklesu tvrdosti pod spodní hranici tvrdosti, která je dána výkresovou dokumentací, a tudíž je z hlediska tvrdosti nevyhovující. Horší mechanické hodnoty jsou dány přestárnutím slitiny žíhané při 250 °C / 3 h. Vzorky B splňují z hlediska tvrdosti požadované hodnoty dané výkresovou dokumentací. Při měření bloku č. 5 byly naměřeny 2 hodnoty pod hranicí 90 HB, což může být dáno nepřesným odečtem. I tyto dvě hodnoty se limitně blíží hranici 90 HB, a tudíž jsou zanedbatelné. U vzorků A je průměrná naměřená hodnota v intervalu dle výkresové dokumentace, ovšem použití bloků motoru bez tepelného zpracování není vhodné. Experimentem bylo ověřeno, že optimalizovaný způsob tepelného zpracování, žíhání při 210 °C po dobu 3 hodin, dosáhne lepších výsledků tvrdosti než tepelné zpracování – žíhání na 250 °C po dobu 3 hodin.

3) Použitím rentgen fluorescenční metody (XRF) - spektrální analýza, bylo určeno chemické složení vzorku v jeho lokální oblasti. Cílem bylo ověření, zda vzorky z bloku motoru odpovídají normovanému chemickému složení dané slitiny a zda tepelné zpracování ovlivňuje chemické složení slitiny. Měření byly zjištěny drobné odchylky oproti normovanému složení slitiny (naměřené hodnoty Si), které mohou být způsobeny lokálními nehomogenitami chemického složení v objemu materiálu. Dále jak vyplývá z tabulky č. 9.

teplým zpracováním nedochází ke změně chemického složení slitiny, jelikož při tepelném zpracování se slitina nedostává do oblasti likvidu.

4) Na základě zkoumání vzorků světelnou mikroskopií byla hodnocena mikrostruktura mezi vzorky A, B, C. Sledováním mikrostruktury těchto vzorků bylo ověřeno, že jednotlivá tepelná zpracování nemají významný vliv na výslednou mikrostrukturu, popř. na rozložení či velikost sekundárních částic. Ze získaných mikrostruktur je patrné, že slitina AlSi9Cu3(Fe) je tvořena tuhým roztokem  $\alpha$  (Al), světle šedé oblasti a tuhým roztokem  $\beta$  (Si) drobné tmavé oblasti – útvary v mikrostruktuře. Dále se objevovaly ojediněle vyloučeniny Fe a Mn, a fáze bohaté na Cu a oblasti s nerozpuštěným křemíkem.

5) Na základě elektronové mikroskopie, resp. s uplatněním EDX analýzy bylo zjištěno chemické složení lokálních míst vzorků A a C. Z pohledu analýzy chemického složení elektronovou mikroskopií vzorků A a C tepelné zpracování chemické složení neovlivňuje.

Na základě výsledků experimentu lze učinit následující závěr. Dle popsaných výsledků je zřejmé, že upravený technologický postup – žíhání bloku motoru při teplotě 210 °C po dobu 180 minut oproti žíhání při 250 °C po dobu 180 minut, vede ke zlepšení mechanických vlastností – zvýšení tvrdosti a snížení napětového stavu.

Z hlediska metalografické analýzy zkoumaných vzorků je možné učinit závěr, že snížením žíhací teploty z 250 °C na žíhací teplotu 210 °C nedošlo k výrazné změně vnitřní struktury. Z toho plyne, že modifikovaný technologický postup zlepšuje vlastnosti výrobku, dále snižuje energetickou zátěž výrobního procesu a tím i snižuje jeho cenu. Pro tento typ výrobku se jedná v současné době o optimální řešení, které je výsledkem optimalizačního procesu.

## Seznam použité literatury

- [1] MICHNA, Štefan, a kol. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, s.r.o., 2005.  
ISBN 80-89041-88-4
- [2] SEDLÁČEK, Vladimír. *Neželezné kovy a slitiny*. Praha: SNTL, 1979.
- [3] MICHNA, Š., NOVÁ, I. *Technologie a zpracování kovových materiálů*. Prešov: Adin, s.r.o. 2008. ISBN 978-80-89244-38-6
- [4] KORECKÝ, Jan. *Tepelné zpracování železných a neželezných kovů*. Praha: SNTL, 1960.
- [5] PTÁČEK, L., a kol. *Nauka o materiálu II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. ISBN 80-7204-248-3
- [6] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: VŠCHT, 2006.  
ISBN 80-7080-600-1
- [7] *EO Aluminium products* [online]. [cit. 2021-4-2]. Dostupné z: <http://cz.eo-aluminum.com/aluminum-material/aluminum-powder/high-purity-aluminum-powder.html>
- [8] SKÁLOVÁ, J., KOUTSKÝ, V., MOTYČKA, V. *Nauka o materiálech*. Plzeň: ZČU, 2000. ISBN 80-7082-677-0
- [9] VALECKÝ, Jindřich, a kol. *Lití kovů pod tlakem*. Praha: SNTL, 1963
- [10] MACHUTA, Jiří. *Ústní předání*. Mladá Boleslav, 2020
- [11] PLUHAŘ, Jaroslav, a kol. *Nauka o materiálech*. Praha: SNTL, 1989
- [12] JÍCHA, Petr. *Bakalářská práce Technická univerzita v Liberci*. Liberec, 2008
- [13] ŠKODA AUTO, a.s. *Postup výroby bloků válců EA 211*. Podniková dokumentace.
- [14] *Stanovení struktury látek* [online]. Olomouc, 2015 [cit. 2021-2-24]. Dostupné z: [https://fch.upol.cz/wp-content/uploads/2015/11/stanoveni\\_struktury.pdf](https://fch.upol.cz/wp-content/uploads/2015/11/stanoveni_struktury.pdf)
- [15] KAMIL, Kolařík, a kol. *Rtg difrakční diagnostika povrchových vrstev obrobených strojních součástí* [online]. Plzeň, 2009 [cit. 2021-3-11]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/16429/1/Kolarik.pdf>
- [16] MACEK, K., HNILICA, F., STARÝ, V., *Experimentální metody v materiálovém inženýrství*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03934-2
- [17] *Rentgenová spektrální analýza* [online]. [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: [http://fzp.ujep.cz/ktv/uc\\_texty/IIAME/5aIAME-rtg.pdf](http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/IIAME/5aIAME-rtg.pdf)

- [18] KRÍŽ, R., VÁVRA, P. *Strojírenská příručka – 3. svazek*. Praha: Scientia, 1993. ISBN 80-85827-23-9
- [19] GANEV, N., KRAUS, I., *Rentgenová difrakční technika měření makroskopických zbytkových napětí*, Materials Structure, vol. 9, number 2, 2002
- [20] MATĚJKA, Pavel. *Metody strukturní a povrchové analýzy* [online]. Praha [cit. 2021-3-10]. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/anl/matejka/05-RTG-difrakce-09.pdf>
- [21] ŠAFÁŘOVÁ, Klára. *Skenovací (rastrovací) elektronová mikroskopie* [online]. Olomouc [cit. 2021-4-2]. Dostupné z: [http://nanosystemy.upol.cz/upload/18/safarova\\_sem.pdf](http://nanosystemy.upol.cz/upload/18/safarova_sem.pdf)
- [22] GORNOSTYREV, Y., KATSNELSON, I. *Misfit stabilized embedded nanoparticles in metallic alloys* [online]. [cit. 2021-4-5]. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C5CP04641F>
- [23] BORTFELDT, M, a kol. *Atmosférický plazmový nástřik (APPS) pro vložky válců*. Podniková dokumentace VW, 2018

## Seznam obrázků

Obr. 1 – Hliníkový prášek [7].....	15
Obr. 2 – Rovnovážný diagram slitin hliníku [18].....	18
Obr. 3 – Binární rovnovážný diagram soustavy Al – Si [18].....	20
Obr. 4 – Žíhací cyklus .....	21
Obr. 5 – Vyloučení precipitační fáze [22] .....	26
Obr. 6 - Blokové schéma vysokotlakého lití .....	28
Obr. 7 - Časová závislost teplot v průběhu žíhacího cyklu bloků motorů.....	30
Obr. 8 – Schéma rentgenové difrakce [20].....	36
Obr. 9 – Vyznačení pozic pro měření tvrdosti v dělicí rovině mezi blokem motoru a hlavou válců .....	40
Obr. 10 – Vyznačení pozic pro měření tvrdosti v dělicí rovině u klikového hřídele .....	41
Obr. 11 – Měřicí přístroj INSTRON WOLPERT -tvrdoměr .....	42
Obr. 12 – Naměřené hodnoty tvrdosti u vzorků A (bloky 1, 2, 3 – zchlazené, dále nežíhané) .....	44

Obr. 13 – Naměřené hodnoty tvrdosti u vzorků B (bloky 4, 5, 6 – zachlazené, dále žíhané při teplotě 210 °C po dobu 3 hodin.....	44
Obr. 14 – Naměřené hodnoty tvrdosti u vzorků C (bloky 7, 8, 9) – zachlazené, dále žíhané při teplotě 250 °C po dobu 3 hodin .....	45
Obr. 15 – Konvenční difraktometr .....	47
Obr. 16 – Vyznačené pozice pro měření zbytkových napětí na řezu bloku motoru.....	48
Obr. 17 - Výstup měření zbytkového napětí pro jednotlivou pozici .....	49
Obr. 18 - Rentgenovým spektrometr Delta INNOV-X .....	52
Obr. 19 – Mikrostruktura slitiny hliníku AlSi9Cu3(Fe) s vyznačením jednotlivých chemických prvků.....	53
Obr. 20 - Mikrostruktura bloku motoru, vzorek A, blok motoru č. 1, zvětšeno 100x (bez tepelného zpracování).....	54
Obr. 21 - Mikrostruktura bloku motoru, vzorek A, blok motoru č. 1, zvětšeno 500x (bez tepelného zpracování).....	54
Obr. 22 - Mikrostruktura bloku motoru, vzorek A, blok motoru č. 1, zvětšeno 1000x (bez tepelného zpracování).....	55
Obr. 23 - Mikrostruktura bloku motoru, vzorek B, blok motoru č. 5, zvětšeno 100x (tepelně zpracováno, ohřev na teplotu 210 °C po dobu 3 hodin).....	55
Obr. 24 - Mikrostruktura bloku motoru, vzorek B, blok motoru č. 5, zvětšeno 500x (tepelně zpracováno, ohřev na teplotu 210 °C po dobu 3 hodin) .....	56
Obr. 25 - Mikrostruktura bloku motoru, vzorek B, blok motoru č. 5, zvětšeno 1000x (tepelně zpracováno, ohřev na teplotu 210 °C po dobu 3 hodin) .....	56
Obr. 26 - Mikrostruktura bloku motoru, vzorek C, blok motoru č. 7, zvětšeno 100x (tepelně zpracováno, ohřev na teplotu 250 °C po dobu 3 hodin) .....	57
Obr. 27 - Mikrostruktura bloku motoru, vzorek C, blok motoru č. 7, zvětšeno 500x (tepelně zpracováno, ohřev na teplotu 250 °C po dobu 3 hodin) .....	57
Obr. 28 - Mikrostruktura bloku motoru, vzorek C, blok motoru č. 7, zvětšeno 1000x (tepelně zpracováno, ohřev na teplotu 250 °C po dobu 3 hodin).....	58
Obr. 29 – Lokalizace oblastí, u nichž bylo metodou EDX stanoveno chemické složení metalografického vzorku A – blok č. 1 .....	59
Obr. 30 – Bodové EDX spektrum z částice 1, která je vyznačená na obr. 29.....	60
Obr. 31 – Bodové EDX spektrum matrice vyznačené na obrázku 29.....	60
Obr. 32 – Bodové EDX spektrum z částice 2 vyznačené na obrázku 29 .....	60



Obr. 33 – Plošná chemická analýza na metalografickém vzorku pomocí REM .....	61
Obr. 34 – Rozložení jednotlivých chemických prvků v oblasti, viz obr. 33 .....	62
Obr. 35 – Lokalizace oblastí, u nichž bylo metodou EDX stanoveno chemické složení metalografického vzorku C – blok č. 7.....	63
Obr. 36 – Bodové EDX spektrum matrice vyznačené na obrázku 35 .....	64
Obr. 37 – Bodové EDX spektrum částice 1 vyznačené na obrázku 35 .....	64
Obr. 38 – Bodové EDX spektrum částice 2 vyznačené na obrázku 35 .....	64
Obr. 39 – Plošná chemická analýza na metalografickém vzorku pomocí REM .....	65
Obr. 40 – Rozložení jednotlivých chemických prvků v oblasti, viz obr. 39 .....	66

## Seznam tabulek

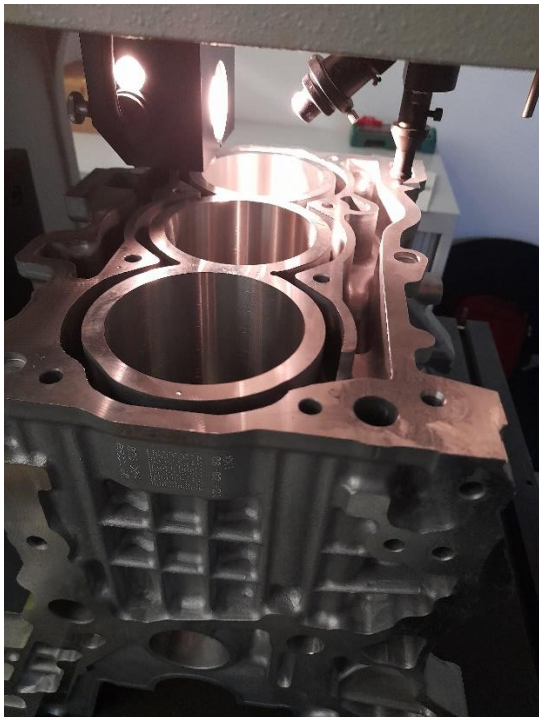
Tab. 1 - Vlastnosti čistého hliníku.....	16
Tab. 2 – Předpis chemického složení používané Al slitiny ve Škoda Auto, a.s.....	29
Tab. 3 – Zkoumané vzorky a provedené analýzy (označené X) .....	39
Tab. 4 – Naměřené hodnoty ze zkoušky dle Brinella (HBS/250) .....	43
Tab. 5 – Statistické vyhodnocení naměřených hodnot .....	46
Tab. 6 – Zbytková napětí pro vzorek A – blok č. 1 .....	49
Tab. 7 – Zbytková napětí pro vzorek B – blok č. 5 .....	50
Tab. 8 – Zbytková napětí pro vzorek C – blok č. 7 .....	50
Tab. 9 – Naměřené hodnoty chemického složení ručním analyzátozem u vzorků A (blok č. 1), B (blok č. 5) a C (blok č. 7).....	52

## Seznam příloh

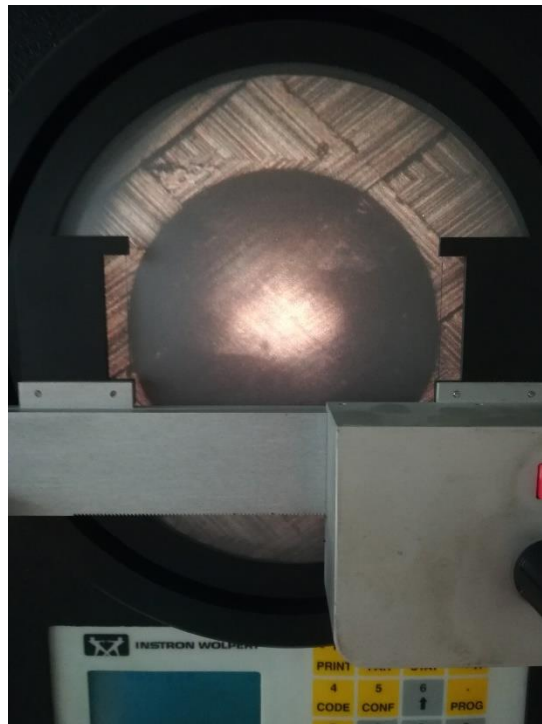
Příloha A – Měření tvrdosti dle Brinella .....	74
Příloha B – Výstup z ručního spektrálního analyzátozu.....	74

## Příloha A – Měření tvrdosti dle Brinella

### A.1- Průběh měření tvrdosti dle Brinella



### A.2 – Odměrování průměru vtisku



## Příloha B – Výstup z ručního spektrálního analyzátoru

