



**Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

# **INTEGRITA POVRCHU PO BROUŠENÍ SUPERSLITIN**

**Bakalářská práce**

**Autor: Vladimír Boháč**

**Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika ve strojírenství**

**Vedoucí práce: Ing. Jiří Kyncl**

**Praha 2016**

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

.....

podpis

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Jiřímu Kynclovi, za rady a připomínky, které mi pomohly při zpracování této bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Zdeňkovi Pitrmucovi, který mi pomohl při získávání dat v praktické části práce.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá broušením superslitin. V první části byla zpracována teorie zabývající se broušením, brusnými nástroji, problematikou superslitin, destruktivními a nedestruktivními analytickými metodami integrity povrchu.

V praktické části byly provedeny navrhované analytické zkoušky integrity povrchu, které jsem vyhodnotil jako správné z rešeršní části práce, na vzorcích lopatek do plynových turbín z materiálu Inconel 718 dodaných První brněnskou strojírnou a.s. Na zámcích lopatek byla provedena kapilární zkouška za účelem detekce porušení integrity povrchu, dále na vzorcích, kde byly vady detekovány, jsem provedl zkoušku makrostruktury. Jako poslední jsem ze vzorků lopatek vybral místa s porušením integrity povrchu a tato místa jsem podrobil zkoušce mikrotvrdosti za účelem zjištění změny tvrdosti materiálu v závislosti na hloubce pod povrchem vzorku.

## **Klíčová slova**

Broušení, superslitiny, destruktivní zkoušky, defektoskopie

## **Anotation**

This bachelor paper deals with superalloys grinding. The first part of the paper deals with theory of grinding, grinding tools, superalloys issues, destructive and non-destructive analytical methods of surface integrity.

In the practical part of the paper suggested analytical tests of surface integrity were performed. The tests were evaluated as correct based on the research part of the paper. Samples of gas turbine blades made of Inconel 718 were used. The samples were supplied by První brněnská strojírna a. s. Capillary test was performed on the locks of the blades to detect integrity surface damage. On the samples detected as damaged test of macrostructure was performed. Finally test of microhardness was performed on parts with damaged surface integrity to find out changes of hardness of the material depending on depth under the surface of the sample.

## **Key words**

Grinding, superalloys, destructive methods, defektoskopy

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>- 6 -</b>
<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>- 8 -</b>
<b>2 TEORIE BROUŠENÍ</b> .....	<b>- 9 -</b>
2.1 Technologie broušení .....	- 9 -
2.2 Kinematika broušení.....	- 13 -
2.3 Brusné nástroje .....	- 14 -
2.4 Brusné materiály .....	- 15 -
2.5 Přírodní brusné materiály .....	- 16 -
2.6 Syntetické brusné materiály .....	- 16 -
2.6.1 Umělý diamant.....	- 17 -
2.6.2 KNB – Kubický nitrid boru .....	- 18 -
2.6.3 Umělý korund (Elektrokorund).....	- 19 -
2.6.4 Karbid křemíku.....	- 19 -
2.6.5 Karbid boru .....	- 19 -
2.7 Pojiva.....	- 19 -
<b>3 PROBLEMATIKA BROUŠENÍ SUPERSLITINY INCONEL 718</b> .....	<b>- 20 -</b>
3.1 Superslitiny.....	- 21 -
3.2 Inconel 718 .....	- 23 -
Historie a využití Inconelu 718.....	- 23 -
Vlastnosti Inconel 718.....	- 23 -
Fyzikální a mechanické vlastnosti.....	- 25 -
Struktura Inconelu 718.....	- 25 -
Obrobitelnost Inconelu 718.....	- 25 -
<b>4 INTEGRITA POVRCHU</b> .....	<b>- 26 -</b>
4.1 Nedestruktivní defektoskopie.....	- 29 -
4.2 Zkoušení kapilárními metodami .....	- 29 -
Postup zkoušky.....	- 29 -

4.3	Zkouška ultrazvukem .....	- 31 -
<b>5</b>	<b>DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY .....</b>	<b>- 32 -</b>
5.1	Zkoušky tvrdosti .....	- 32 -
5.1.1	Zkoušky vnikající .....	- 33 -
	Historie vývoje zkoušek .....	- 33 -
	Zkouška dle Brinella .....	- 33 -
5.1.2	Zkouška dle Rockwella .....	- 35 -
5.1.3	Zkouška tvrdosti dle Vickerse .....	- 37 -
5.2	Mikrotvrdost .....	- 37 -
5.3	Metalografie .....	- 38 -
	Světelná mikroskopie .....	- 39 -
	Osvětlování a pozorování vzorků .....	- 39 -
	Příprava vzorku pro metalografii .....	- 40 -
	Dělení vzorku a preparace .....	- 40 -
5.4	Zhodnocení a výběr zkoušek pro praktickou část .....	- 41 -
<b>6</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>- 42 -</b>
6.1	Měření mikrotvrdosti .....	- 44 -
6.1.1	Příprava vzorku .....	- 44 -
	Broušení vzorku .....	- 46 -
	Měření .....	- 48 -
6.1.2	Vzorek číslo 1 .....	- 48 -
6.1.3	Vzorek číslo 2 .....	- 49 -
6.1.4	Závěr měření .....	- 51 -
6.2	Analýza makrostruktury .....	- 52 -
6.2.1	Příprava vzorku .....	- 52 -
6.2.2	Vyhodnocení zkoušky .....	- 52 -
6.3	Kapilární zkouška .....	- 54 -
6.3.1	Postup zkoušky .....	- 54 -
6.3.2	Vyhodnocení zkoušky .....	- 55 -
6.4	Vyhodnocení výsledků .....	- 57 -
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>- 58 -</b>
<b>8</b>	<b>ZDROJE .....</b>	<b>- 59 -</b>

# 1 Úvod

Superslitiny, které se začaly vyvíjet koncem 40. let, jsou v dnešní době nepostradatelnou součástí leteckého průmyslu. Proudový letecký motor tvoří z padesáti procent celkové hmotnosti právě superslitiny na niklové bázi, tudíž zákazníci kladou vysoké nároky na jejich mechanické vlastnosti, životnost a spolehlivost. Jejich kvalita je úzce spojená s naší každodenní bezpečností. V případě poškození leteckého motoru může dojít k fatálním následkům.

Moje práce je rozdělena na dvě části, a to část teoretickou a část praktickou.

V teoretické části jsem se zaměřil na popis problematiky broušení. Jak už průběhu broušení, tak i jeho kinematice, používaných brusiv, pojiv, kotoučů. Dále jsem se věnoval niklovým superslitinám, a to konkrétně Inconelu 718. Posledním, čím jsem se v teoretické části zabýval, jsou analytické metody vyhodnocení integrity povrchu. Jedná se jak o zkoušky destruktivní, tak i o metody nedestruktivní defektoskopie.

V druhé, praktické části práce, jsem provedl analýzu a vyhodnocení integrity povrchu zámků lopatek z materiálu Inconel 718, který se řadí mezi superslitiny. Zámky lopatek jsou broušeny na brusce s CNC řízením. Na vzorcích dodaných firmou První brněnská strojírna a.s., jsem provedl 3 analytické zkoušky. Na dvou vzorcích jsem pomocí kapilární zkoušky detekoval místa poškození povrchu, která vznikla při procesu broušení. V těchto místech jsem posléze provedl zkoušku mikrotvrdosti. Na dalších vzorcích byly vizuálně detekované neidentifikovatelné mapy, u nichž byla provedena analýza makrostruktury, která měla určit, zda je souvislost mezi vznikem mapy a hranicí zrna materiálu.

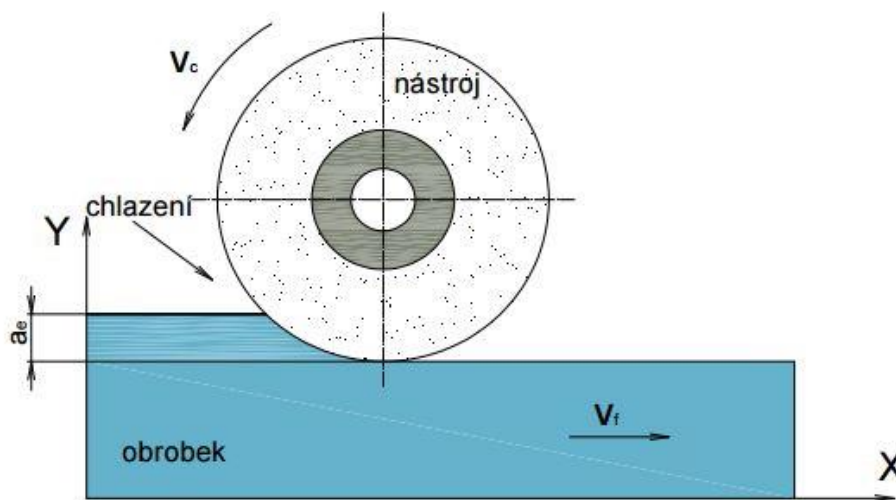


## 2 Teorie broušení

V této kapitole se budu věnovat problematice broušení. Zejména popisu tohoto procesu, typům broušení, brusným materiálům a kotoučům využívaných v této technologii.

### 2.1 Technologie broušení

Broušení patří k jedné z nejstarších metod k opracování materiálu a řadíme jej mezi abrazivní obrábění. První zmínky o broušení jsou zhruba 200 let př.n.l., kdy se používaly v Římské říši železné pilníky. Největší rozvoj v oblasti broušení nastal v období po 2. světové válce, kdy se začaly využívat nové druhy tvrdých keramických materiálů, které byly odolné proti otěru, a to zejména oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), dnes známý jako umělý korund. Dalším důležitým milníkem je rok 1955, kdy v USA vynalezli první synteticky vyrobený průmyslový diamant o velikosti 0,01 až 1,2 mm. Vývoj se však nezastavuje ani dnes, stále se na trhu objevují nové materiály a roste i rychlost pracovního nástroje. [15]



Obr. 2.1 základní schéma rovinného broušení [34]

„Broušení je obrábění mnoho-břítým nástrojem s odlišnou geometrií jednotlivých břitů. Břity jsou vytvořeny hranami zrn brusného materiálu. Jednotlivá zrna nástroje jsou zafixována v pojícím materiálu“. [15] Řezná geometrie není přesně dána a definovatelná. Broušení se využívá jak pro hrubování, tak i pro dokončovací operace u všech druhů materiálů i těch velmi tvrdých, kde použití třískových metod je velice obtížné. [15]

Broušením lze obrábět v podstatě plochy všech druhů (tvarové, rovinné, vnější i vnitřní). Jako nástroj se využívá buď brusný kotouč složený z malých segmentů spojených pojivem, nebo brusný pás. Rotující kotouč odebírá materiál obvodem či čelem. Řezná rychlost se pohybuje od 20 do 200 m.s<sup>-1</sup>, což může být příčinou vysokých teplot při obrábění, a to od 300 až do 1000 °C. Obvodová rychlost kotouče s keramickým pojivem se běžně pohybuje od 20 do 35 m.s<sup>-1</sup>, u speciálních 80 m.s<sup>-1</sup> a u rozbrušovacích dokonce až 100 m.s<sup>-1</sup> [14].

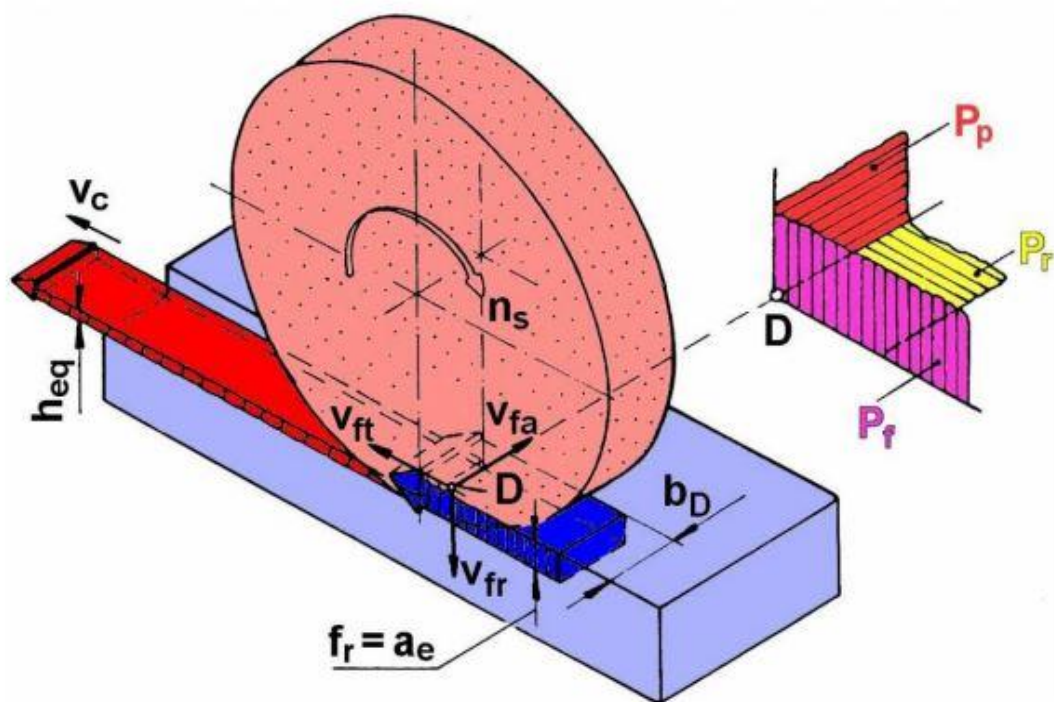
Při pohybu nástroje vůči broušené ploše (rotační hlavní pohyb, přísuv případně posuv jako vedlejší pohyby) dochází k pěti typům působení nástroje na broušený povrch:

- Elastická deformace obráběné plochy.
- Plastická deformace povrchu (hrnutí materiálu) bez odběru třísky.
- Plastická deformace obráběné plochy s následným odříznutím třísky (řezání).
- Rytí povrchu (odběr třísky při její tloušťce velikosti μm).
- V důsledku některého z těchto jevů ke tření zrna o materiál za vzniku tepla[15].

Významným faktorem, který ovlivňuje kvalitu broušeného povrchu a úběr kotouče, je použití řezných kapalin, jejichž použití je jak čistící, tak i zejména chladící. Například u slitin Mg a Ti, kde hrozí vznícení třísek. [15]

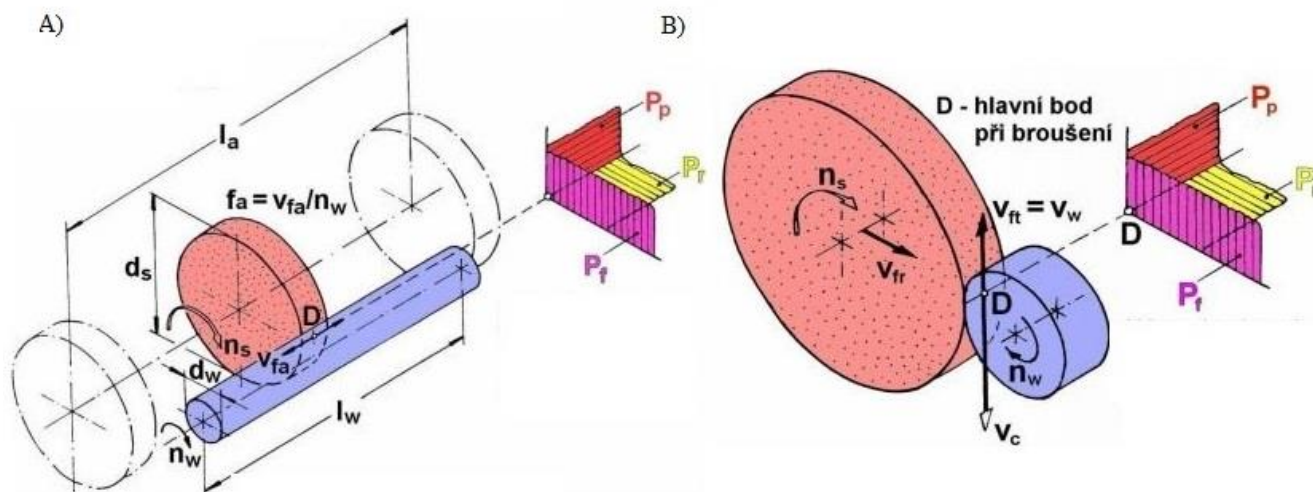
Proces broušení lze uskutečnit několika různými metodami, které se určují podle kritérií tvaru obrobeneho povrchu a způsobu jeho vytváření, a to: [16]

- Rovinné broušení (výsledek = rovinná plocha)



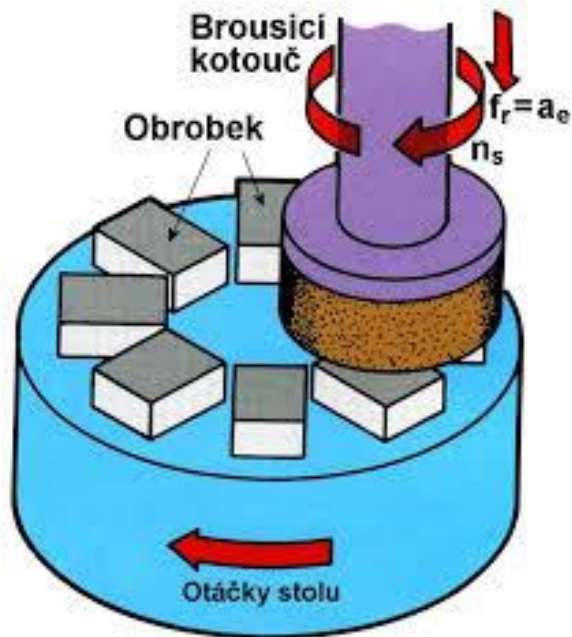
Obr. 2.2 Rovinné broušení [34]

- Broušení do kulata (výsledek = rotační povrch)



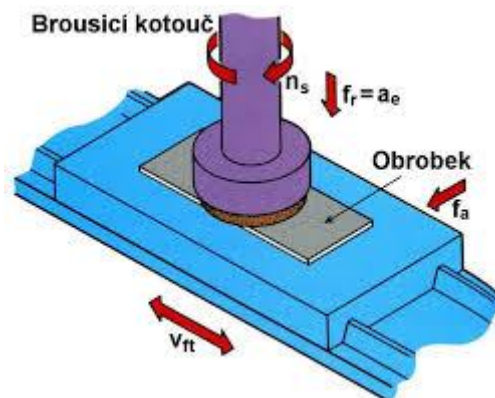
Obr. 2.3 A) broušená do kulata axiální. B) broušení do kulata radiální [34]

- Broušení na otáčivém stole (broušení s rotačním posuvem)



Obr. 2.4 Broušení na otáčivém stole [34]

- Kopírovací broušení (broušení s řízenou změnou posuvu)
- Tvarové broušení (broušení ozubených kol nebo závitů)
- Broušení tvarovými brusnými kotouči (konečný profil je určen profilem kotouče)
- Obvodové broušení (obvodem kotouče)
- Čelní broušení (čelem kotouče kolmým k ose obrobku)



Obr. 2.5 Čelní broušení [34]

- Vnější broušení (broušení vnější části obrobku)
- Vnitřní broušení

„Podle hlavního pohybu posuvu stolu vzhledem k broušicímu kotouči (termínem „stůl“ se označuje pohyblivá část broušicího stroje vzhledem k jeho základu, na stůl brusky se upevňuje obrobek nebo broušící vřeteník) se definuje“ [16] :

- Axiální broušení (osa kotouče je rovnoběžná s hlavním posuvem stolu)
- Tangenciální broušení („hlavní posuv stolu je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče ve zvoleném bodě D“) [16]
- Radiální broušení (posuv stolu v bodě D je radiální vůči kotouči)
- Čelní zapichovací broušení (posuv stolu je plynulý axiální) [16]

## 2.2 Kinematika broušení

Rychlosti posuvu a pohyby jsou definovány při broušení na základě způsobů broušení. Kupříkladu pro obvodové vnější broušení do kulata platí tento vzorec pro řeznou rychlost:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \text{ [m s}^{-1}\text{]} \text{ [16]}$$

Kde  $d_s$  [mm] je průměr kotouče a  $n_s$  [ $\text{min}^{-1}$ ] je frekvence otáčení kotouče.

U tohoto způsobu broušení se řezná rychlost pohybuje mezi 30 až 35  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Pro rychlostní broušení je nutná aplikace speciálního kotouče se speciálním druhem pojiva a řezná rychlost ve speciálních případech dosahuje až 180  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Vztah pro obvodovou rychlost obrobku  $v_w$  pro broušení do kulata je:

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{1000} \text{ [m min}^{-1}\text{]} \text{ [16]},$$

Kde platí:  $d_w$  [mm] je průměr obrobku a  $n_w$  [ $\text{min}^{-1}$ ] je frekvence otáčení obrobku. [16]

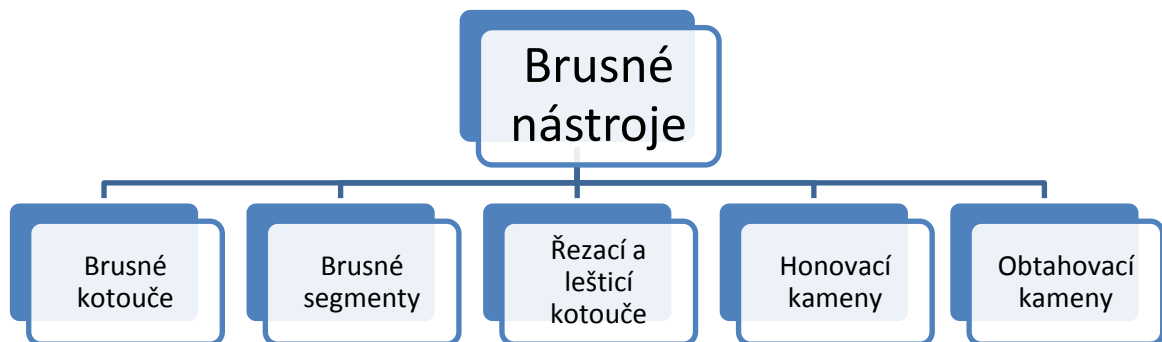
Vztah pro stanovení měrné řezné síly:

$$F_c = k_c \cdot a_e \cdot f_a \cdot \frac{v_w}{60 \cdot v_c} \text{ [N]} \text{ [15]}$$

Kde platí:  $f_a$  [ $\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ] je axiální posuv,  $a_e$  [mm] je radiální záběr a  $k_c$  je měrná řezná síla. [15]

## 2.3 Brusné nástroje

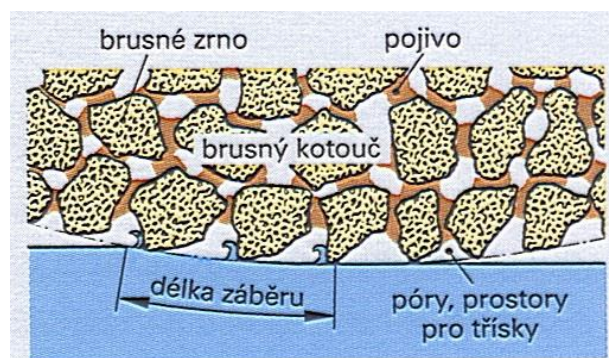
Brusné nástroje rozdělujeme na brusné kotouče, brusné segmenty, řezací a lešticí kotouče, honovací kameny a obtahovací kameny (Obr. 2.6), jejichž základními elementy jsou brusné materiály a pojiva. Výsledným výrobkem je brusný nástroj, který může mít podobu brusného kotouče, tělíška, segmentu nebo pásu. Tyto nástroje nemají využití pouze při broušení kovů, ale i při broušení dřeva, skla nebo přírodních minerálů. V následující kapitole blíže popíšeme značení, druhy, brusné materiály a pojiva, které se využívají při výrobě brusných kotoučů.



Obr. 2.6 Základní rozdělení brusných nástrojů

### Brusné kotouče

Tento řezný nástroj se skládá ze dvou základních surovin, a to brusného materiálu (zrn) a pojiva (Obr. 2.7), které utvoří výsledný kotouč. Každý brusný nástroj je charakterizován velikostí, geometrickým tvarem, pojivem, zrnitostí, tvrdostí, strukturou, koncentrací brusiva a jeho druhem. [30]



Obr. 2.7 Struktura brusného kotouče [33]

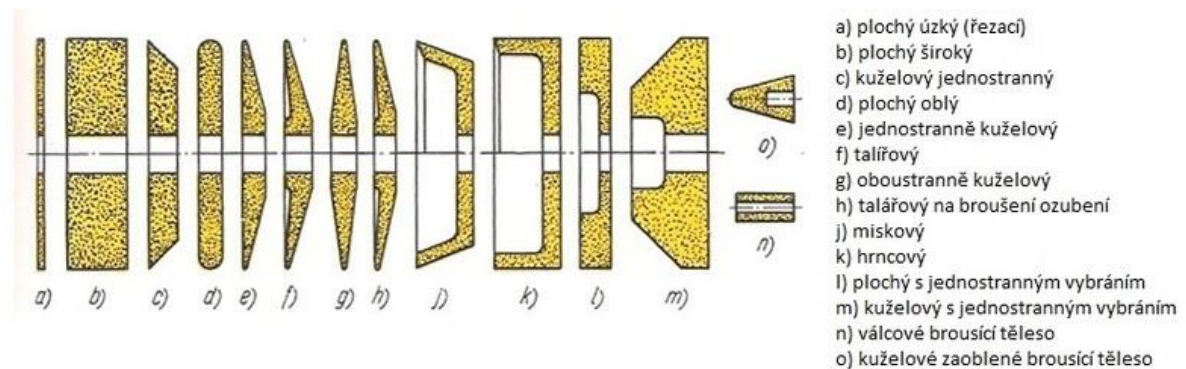
### Značení a tvar kotoučů

Každý prodávaný brusný kotouč má své přesné označení, ze kterého lze snadno poznat, o který druh kotouče se jedná, jako je například jeho tvar (Obr. 2.9), rozměry, použité brusivo a pojivo. Tento systém značení se zavedl pro lepší orientaci v širokém sortimentu brusných nástrojů.

Příklad:

BRUSNÝ KOTOUČ ISO 603-1 -1- 450x80x127 – A60K8V – 40

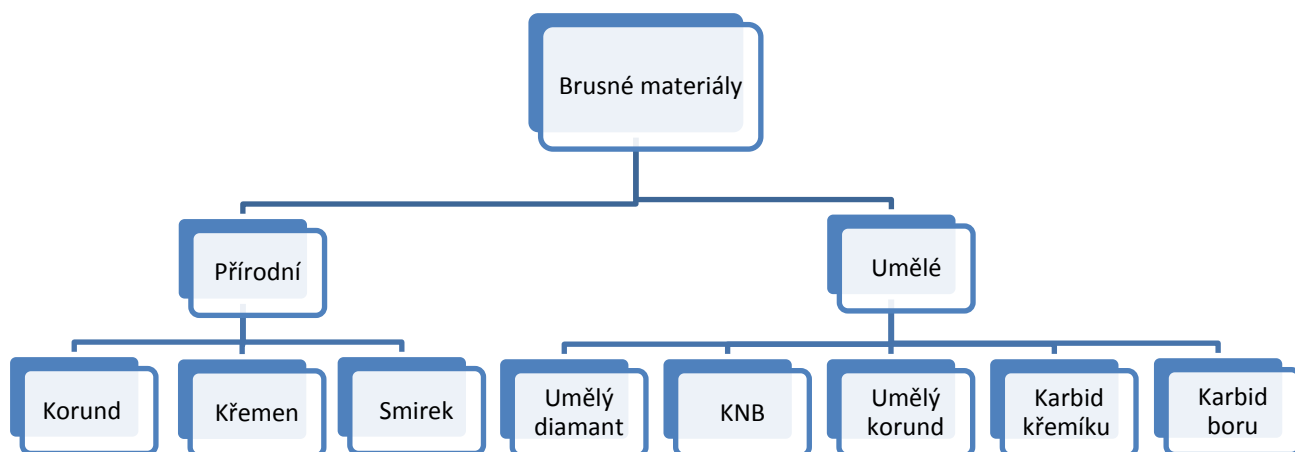
- Označení kotouče
- Tvar Kotouče (1=ploché brusný kotouč)
- Rozměry kotouče (vnější průměr x šířka x díra)
- Brusivo (A=korund)
- Zrnitost
- Tvrdost
- Struktura (8 jemná pórovitá)
- Pojivo
- Maximální použitelná rychlost



Obr. 2.9 Tvary brusných kotoučů pro kov [33]

## 2.4 Brusné materiály

Následující kapitola se věnuje rozdělení brusných materiálů. V první části popíši přírodní materiály a ve druhé části se zaměřím na synteticky vyráběná brusiva a jejich využití. Brusné materiály značně ovlivňují obráběcí proces, díky své odlišené tvrdosti, zrnitosti nebo chemické netečnosti vůči určitým materiálům.



Obr. 2.10 Základní rozdělení brusných materiálů

## 2.5 Přírodní brusné materiály

Mezi přírodní materiály řadíme křemen, korund a smirek, avšak v průmyslové výrobě jsou spíše nahrazeny syntetickými materiály [28]

- **Korund**  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (E): Minerál skládající se zejména z krystalického oxidu hlinitého, obsahem 80 až 90% + další minerály. Korund je velmi tvrdý a nepříliš křehký. V přírodě se vyskytuje velké množství druhů korundu. „Přírodní korund krystalizuje v hexagonální krystalové soustavě ve tvaru protáhlých dipyramidálních hranolovitých, klencových a pinakonálních krystalů“ [28]
- **Smirek** (N): Minerál krystalického oxidu hlinitého, obsahující maximálně 60%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Další různé příměsi snižují oproti korundu brusné vlastnosti. [28]
- **Křemen** (Kr): Tento minerál obsahuje zejména oxid křemičitý ( $\text{SiO}_2$ ) a příměsi dalších minerálů. [28]

## 2.6 Syntetické brusné materiály

Vývoj těchto materiálů vznikl za účelem zvýšení produktivity broušení. Broušení přírodními materiály v průběhu 30. let již dostatečně nepokrylo poptávku a na řadu se dostal vývoj syntetických materiálů, který se s neustálým zvyšováním řezných rychlostí nezastavil dodnes.



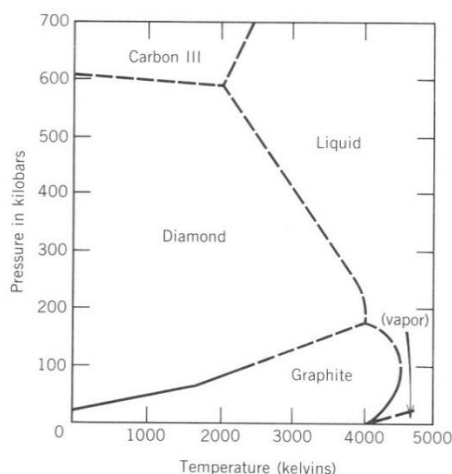
## 2.6.1 Umělý diamant

První synteticky vyrobený diamant se objevil na konci 19. století. Tento materiál měl primárně sloužit pro šperkařský průmysl, avšak v tomto odvětví nenalezl očekávané využití. Ve strojírenském průmyslu však našel své využití a dodnes je velmi využívaným materiálem, který nalezneme nejen v brusných nástrojích, ale například i ve vrtácích.

### Výroba umělého diamantu

Tento brusný materiál se vyrábí za pomoci katalyzátoru z materiálu, který obsahuje uhlík. Výchozí materiál pro výrobu umělého diamantu je grafit, v minulosti též saze nebo dřevěné uhlí. Jako katalyzátor se využívají kovy, jako například Ni, Cr, Co nebo Fe. [28]

Za vysokého tlaku a teploty se katalyzátor taví a atomy uhlíku v grafitu mění svou strukturu z hexagonální na krychlovou, která je charakteristická pro diamant. Z rovnovážného diagramu diamant-grafit (Obr. 2.11) se stanoví mez tlaku a teploty potřebné k přetvoření struktury za pomoci určitého katalyzátoru. Určení tlaku a teploty je velmi důležité, protože snadno může dojít k tvorbě diamantu a metastabilního grafitu namísto čistě diamantu. Tyto hodnoty však vidíme na křivce v diagramu. Syntéza grafitu probíhá při tlaku 10 000 až 20 000 MPa a teploty 1500 – 2500°C v době jedné minuty. Jako produkt vznikne 0,2 až 0,8 karátový krystalek diamantu s příčným rozměrem až 1mm. Při syntéze existuje nepřímá úměra: Čím vyšší tlak, tím nižší teplota. [28]



Obr. 2.11 Rovnovázný diagram diamant-grafit [30]

### Rozdělení umělých diamantů

Dle normy GOST9 206-70 se z umělého diamantu vyrábí 5 základních druhů (uvedených výše) brusných prášků, které se liší především mechanickými vlastnostmi jako je křehkost, pevnost, tvar povrchu a drsnost.

- **ASO:** Tento prášek je běžné pevnosti s drsným povrchem, zvýšenou křehkostí a dobře se upevňuje v organickém pojivu. Využívá se pro broušení na čisto.
- **ASR:** Prášek se zvýšenou pevností a nižší drsností. Oproti ASO se hůře upevňuje do pojiva.
- **ASP:** Prášek s hladším povrchem než ASR, vysokou pevností, nižší křehkostí než u ASO. Vhodný pro kovové pojivo a práci při zvýšeném tlaku.
- **ASK:** Krystalický prášek o velmi vysoké pevnosti a nejnižší křehkosti. Vhodný pro nástroje s kovovým pojivem a broušení ve velmi obtížných podmínkách.
- **ASS:** Jeho zrna se vyznačují blokovým tvarem a s nejvyšší relativní pevností. Největší uplatnění tohoto materiálu je při broušení těžkoobrobitelných materiálů, jako jsou superslitiny, rubíny nebo korundy. [28]

## 2.6.2 KNB – Kubický nitrid boru

Kubický nitrid boru je velice tvrdý materiál, který byl vynalezen roku 1957. Jeho obsah ze 43,6% tvoří bor a z 56,4% dusík. Jeho krystalická mřížka je svojí stavbou identická s mřížkou diamantu, ale obsahuje atomy boru a dusíku. Velikost mřížky je podstatně větší, což vysvětluje menší tvrdost tohoto materiálu v porovnání s AS. [28]

Výroba KNB je založena na syntéze šesterečného nitridu boru v přítomnosti katalyzátoru ve speciálních kontejnerech v hydraulických lisech, které garantují vysoký tlak 300 až 980 MPa a teplotu zhruba 2000°C. Vysoká tepelná vodivost, velká tvrdost a především netečnost vůči železu dělá z kubického nitridu boru důležitý materiál na obrábění slitin obsahujících železo, jako jsou například legované nebo těžkoobrobitelné oceli. [28]

V 80. letech minulého století byl včas vyvinut nový typ KNB a to PTNB – polykrystalický technický nitrid boru, který se využívá pro výrobu jednobřítých nástrojů.

### 2.6.3 Umělý korund (Elektrokorund)

Elektrokorund, neboli umělý korund, je krystalický oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), který se vyrábí vytavením látek, který obsahují tento oxid (např. bauxit) v elektrických pecích. Podle obsahu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se mění barva elektrokorundu, ale také struktura a vlastnosti.

- Elektrokorund normální: S příměsí strusky a feroslitiny. Je vhodný k broušení materiálů s vysokou pevností v tahu, jako je temperovaná litina, bronz nebo ocel.
- Elektrokorund bílý: Tento typ korundu má v porovnání s normálním elektrokorundem vyšší homogenitu chemického složení a fyzikálních vlastností.
- Monokorund: Obsahuje 99% krystalického oxidu hlinitého. Jeho největší využití je při broušení kalených a legovaných ocelí nebo materiálu s nízkou tepelnou vodivostí. [30]

### 2.6.4 Karbid křemíku

Karbid křemíku ( $\text{SiC}$ ) je sloučenina křemíku s uhlíkem. Vyrábí se tavením v elektrických pecích za teploty 2100 až 2250 °C. Jako suroviny slouží látky obsahující uhlík, koks, antracit a křemenný písek. Rozlišujeme 2 základní skupiny:

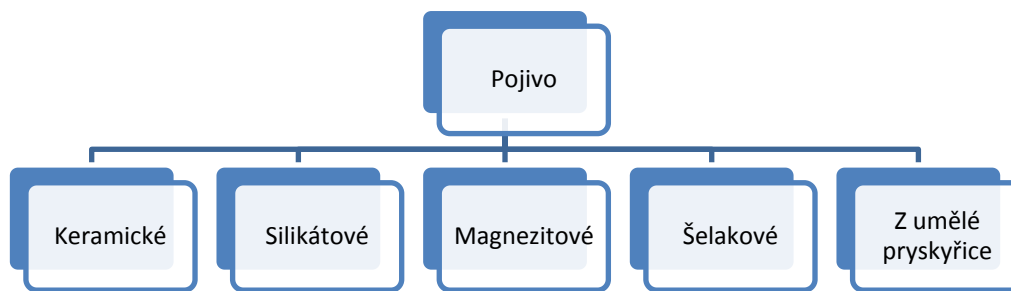
- **Zelený karbid křemíku:** Tento karbid obsahuje minimálně 97%  $\text{SiC}$ . Je tvrdší, ale křehký. Nejvíce se využívá k ostření nástrojů ze slinutého karbidu.
- **Černý karbid křemíku:** Obsah karbidu křemíku je minimálně 95%. Využívá se k broušení bílých litin, mosazi, mědi nebo hliníku. [28]

### 2.6.5 Karbid boru

„Vyrábí se v elektrických pecích z technické kyseliny borité a uhlíčitého materiálu s malým obsahem popela ropného koku“. [28] Je tvrdší než karbid křemíku, lze s ním nahradit i umělý diamant. Vyznačuje se vysokou pevností v tlaku, má vysoký bod tání, odolává vysokému žáru a vzdoruje chemickým vlivům. Využívá se však jen v podobě prášku k lapování slinutých karbidů. [30]

## 2.7 Pojiva

Pojivo slouží jako vazba brusných materiálů. Pomocí pojiva můžeme změnit tvrdost nástroje ze stejně tvrdých zrn. [30]



Obr. 2.12 Rozdělení pojiv pro brusné kotouče

- **Keramické pojivo:** Toto pojivo se vyrábí z čistých ohnivzdorných hlín a dalších přísad. Keramické pojivo je nejrozšířenější pro broušení kovových materiálů do rychlosti  $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (až z 90%). Keramické pojivo odolává vodě, kyselinám i olejům. Kotouče se při výrobě pēchují, lisují nebo nejčastěji lijí a po vysušení se posléze vypalují.
- **Silikátové pojivo:** Neboli křemičité pojivo ze směsi hlíny a křemičitého prachu. Výroba je totožná s výrobou keramických pojiv s tím rozdílem, že se vypaluje v teplotách pouze do  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Díky tomu je včas měkčí a využívá se spíše pro broušení dřeva a papíru a rychlosti do  $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .
- **Magnezitové pojivo:** Vyrábí se z chloridu vápenatého ( $\text{CaCl}_2$ ) a magnezitu. Využívá se k broušení za sucha (díky vlhkosti ztrácí pevnost) do rychlosti  $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .
- **Šelakové pojivo:** Vyrábí se z taveného rostlinného šelaku. Používá se pro kotouče na jemné broušení do rychlosti  $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a ostřicí kotouče.
- **Pojivo z umělé pryskyřice:** Toto pojivo se hodí i pro rychlostní broušení při rychlostech  $80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  na přesné broušení i broušení závitů. Pojivo z umělé pryskyřice je velmi pórovité, a proto se nezahřívá, avšak nesnese vyšší teplotu než  $180 \text{ }^\circ\text{C}$ . [30]

### 3 Problematika broušení superslitiny Inconel 718

Materiál Inconel řadíme mezi těžko obrobitelné slitiny na bázi niklu. Díky svým vlastnostem, jako je například nízká tepelná vodivost, vznikají při procesu obrábění značné teplotní gradienty s vysokými vloženými napětími, momenty i silami, které vedou ke změně mikrostruktury materiálu. Tyto změny značíme jako tenké bílé vrstvy, v některých případech může poškození vniknout hluboko pod povrch, a tím degradovat provozní funkčnost. Bílá vrstva je tenká křehká oblast, ve které může snadno docházet ke vzniku dislokací, které se mohou materiálem dále šířit, proto se je snažíme odstranit procesem broušení. [2]

Vlastnosti materiálu Inconel nedovolují provést broušení za vysokých rychlostí. Pokud by byl tento materiál broušen při rychlostech pohybujících se v rozmezí  $60$  až  $80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,

nedokázali bychom proces dostatečně efektivně chladit, ale ani by nám však nemusel stačit výkon a tuhost stroje, oba tyto parametry musí dosahovat dostatečných hodnot. [28]

Doporučované hodnoty rychlosti pro broušení superslitin:

- Řezná rychlost  $v_c$ : 15-25 m.s<sup>-1</sup>

Dříve byly pro těžkoobrobitelné materiály doporučovány kotouče z kubického nitridu boru s organickým pojivem, které byly efektivnější než běžná diamantová brusiva. Nevýhodou těchto kotoučů byla však vysoká pořizovací cena a nízká produktivita v porovnání s běžnými brusivy. [28]

V dnešní době je však trend odebírat materiál metodou CD (Conditionius Dressing), což je broušení kotoučem ze zušlechtěného korundu (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). [29]

### **3.1 Superslitiny**

Mezi superslitiny řadíme zejména slitiny na bázi Co a Ni. Obě tyto skupiny mají společný jmenovatel, a to austenitickou strukturu, díky níž jsou tyto slitiny korozivzdorné. Nikl i kobalt mají podobnou teplotu tání i hustotu s jedním rozdílem, že nikl nemá alotropickou schopnost (alotropie je schopnost měnit svou krystalovou mřížku při změně teploty.)

Tuto kapitolu věnuji zejména niklovým superslitinám, a to konkrétně materiálu Inconel 718, který je předmětem mé práce, avšak část kapitoly věnuji i kobaltovým slitinám.

#### **Kobalt a jeho superslitiny**

Kobalt je feromagnetický kov s namodralým nádechem. Vyznačuje se svojí alotropickou modifikací. Do teploty 417 °C má stabilní hexagonální modifikaci. Při překročení této teploty rekrystalizuje na modifikaci plošně středěnou. Kobalt se nejčastěji využívá jako legující prvek do rychlořezných a nástrojových ocelí.

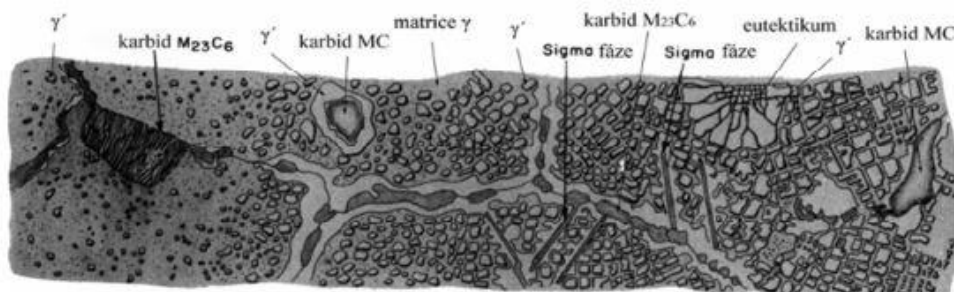
Kobaltové superslitiny se na rozdíl od slitin na bázi niklu nevyznačují tak vysokou žáruvzdorností, což způsobuje právě alotropie kobaltu. Celá skupina kobaltových superslitin vznikla jako alternativa superslitin niklových. Tyto slitiny dokáží pracovat i v prostředí, kde je přítomna síra nebo sodík. V tomto prostředí niklové slitiny podléhají korozi. [2]

#### **Nikl a jeho superslitiny**

Nikl se společně s železem, kobaltem a gadoliniem řadí mezi přechodové kovy (přechodové kovy se vyznačují vysokou pevností v tahu, vysokou hustotou, teplotou tání a varu). Tyto kovy jsou magnetické za pokojové teploty, ale tuto vlastnost ztrácí nad teplotou 355 °C. Krystalograficky se nikl řadí do prostorové grupy č. 225. Společně s mědí a kobaltem je jejich struktura označována jako kubická plošně středěná Bravaisova mřížka s bází tvořenou jedním atomem. Její mřížkový parametr dosahuje hodnoty  $a = 0,35238$  nm, a tím pádem se přibližuje k hodnotě kobaltu  $a = 0,35447$  nm. Toto přiblížení přináší problém rozlišit tyto dva kovy při RTG difrakci, a proto je třeba k difrakci provést další metodu, jako například EDX (Energy dispersive x-ray spectroscopy) či fluorescenční spektroskopii. [11]

Superslitiny (Ni-base superalloys) jsou vysoce teplotně odolné slitiny. Mají širokou škálu využití, zejména v leteckém a kosmickém průmyslu, jaderných reaktorech, plynových turbínách nebo petrochemickém průmyslu. Niklové superslitiny se obvykle řadí do tří skupin, a sice ty se základem Ni, Ni-Fe a Co. Slitiny dále obsahují vysoký podíl Cr, Ti a Al. Důvodem je umožnění vzniku precipitátů (v tuhém roztoku dochází k vylučování velice jemných částic o velikosti desítek až stovek nm, které představují účinnou překážku pro skluz dislokací, a tím dochází ke zvýšení pevnosti  $R_m$  a tvrdosti HV). Precipitační zpevnění dále podporují Mo, Zr a B. Z velké rozmanitosti prvků těchto superslitin nám vyplývá složitost mikrostruktury. Vysoká pevnost a odolnost vůči teplu superslitin je dosažena i při pracovních teplotách 760 až 980 °C, přičemž je zachována korozní odolnost i rezistence vůči vzniku oxidů. U superslitin se setkáváme se třemi krystalickými fázemi (Obr. 3.1) [11]

- $\gamma$  fáze - struktura austenitu, kubická plošně středěná
- $\gamma'$  fáze – hlavní precipitační fáze, kubická plošně středěná.
- Karbidická fáze – různé typy, nejčastěji  $M_{23}C_6$  a  $MC^4$  (M=metal)



Obr. 3.1 mikrostruktura Ni-superslitin. [24]

Na Obr. 3.1 můžeme vidět výskyt karbidů na hranici zrn, které označujeme jako „GB Carbides“ (GB= grain boundary – hranice zrn). Tyto karbidy ovlivňují houževnatost, teplotní pevnost a creep. [11]

U skupiny superslitin, které jsou označeny jako Ni-Fe je Ni nahrazen Fe, a tím pádem dochází ke zhoršení vlastností při vysokých teplotách. Nahrazení niklu železem se využívá z důvodu vysoké ceny niklu. Ni-Fe slitiny mají 25-40% Ni a až 60% hmotnosti je tvořeno Fe. Pokud má slitina nejvyšší podíl Ni (40%), je použitelná až do teplot 815 °C. Představitelé této skupiny jsou superslitiny Inconel 707, 718 a 901. Složení mikrostruktury je austenitické, plošně středěné, matrice je zpevněná tuhým roztokem Mo, Cr, Ni a Fe, dále dochází k precipitačnímu zpevnění za přítomnosti Ti, Al a Nb vytvářející intermetalické fáze. [4]

### **3.2 Inconel 718**

Tato kapitola pojednává o superslitině Inconel 718, která se řadí mezi těžkoobrobitelné slitiny. Z tohoto materiálu jsou vyrobeny vzorky, kterým se budu věnovat v praktické části této práce.

#### **Historie a využití Inconelu 718**

Materiál byl vynalezen ve 40. letech minulého století po 2. světové válce týmem inženýrů v Herefordu ve Velké Británii na podporu vývoje prvních leteckých proudových motorů. Součásti ze slitiny Inconel 718 najdeme nejčastěji ve spalovacích turbínách proudového leteckého motoru, kde tvoří 50% celkové hmotnosti. Svoje využití však našly i v kosmických programech [26]

#### **Vlastnosti Inconel 718**

Inconel 718 je vysokopevnostní materiál odolný proti korozi s možností pracovat ve vysokém rozsahu teplot od -180 °C do 720 °C a udržet si stále vlastnosti. „Při vysokých teplotách, kdy hliník a ocel ztrácejí pevnost a nejsou schopné plnit funkci, Inconel dosahuje neměnných vlastností, díky malému množství niobu, který společně s niklem (Ni) tvoří intermetalickou sloučeninu  $Ni_3Nb$  v podobě malých kubických krystalů zabraňujících deformaci při zvýšených teplotách“. [27] (Tab. 3.1, Tab 3.2). Při ohřátí na vyšší teplotu vznikne na povrchu Inconelu 718 tlustá stabilní oxidická vrstva, která chrání materiál před korozi. Složení Inconelu 718 je znázorněno v Tab. 3.2. Tato superslitina je nejčastěji využívána v prostředí vysokého tlaku, teploty a namáhání. [25]

Tabulka 3.1 – závislost Youngova modulu, torzní pevnosti a Poissonova čísla na teplotě [25]

Teplota °C	Youngův modul GPa	Torzní pevnost MPa	Poissonovo číslo (Bezrozměrná)
-180	31,3	12,5	0,25
-65	30,6	11,8	0,30
21	29,0	11,6	0,29
37	29,8	11,5	0,30
93	29,4	11,3	0,31
149	28,8	11,1	0,30
204	28,5	10,9	0,31
260	28,0	10,6	0,32

Tabulka 3.2- Složení Inconelu 718 [25]

Prvek	Podíl v %	Prvek	Podíl v %
<b>Ni</b>	50-55	<b>C</b>	0,08
<b>Cr</b>	17-21	<b>Mn</b>	0,35
<b>Fe</b>	Zbytek	<b>Si</b>	0,35
<b>Nb</b>	4,75-5,5	<b>P</b>	0,015
<b>Mo</b>	2,8-3,3	<b>S</b>	0,015
<b>Ti</b>	0,65-1,15	<b>B</b>	0,006
<b>Al</b>	0,2-0,8	<b>Cu</b>	0,3
<b>Co</b>	1	/	/



## Fyzikální a mechanické vlastnosti

Tabulka 3.3 – Vlastnosti materiálu Inconel 718 [24]

<b>Mez kluzu Re:</b>	<b>829-1393 MPa</b>
<b>Mez pevnosti Rm:</b>	<b>1117-1551 MPa</b>
<b>Tvrdość:</b>	<b>24-45 HRC</b>
<b>Prodloužení v tahu:</b>	<b>16-31 %</b>
<b>Hustota:</b>	<b>8190 kg/m<sup>3</sup></b>
<b>Bod tání:</b>	<b>1336</b>
<b>Koeficient roztažnosti:</b>	<b>13.0 <math>\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}</math></b>
<b>Modul pružnosti v tahu:</b>	<b>204,9 GPa</b>

Z těchto hodnot je patrné, že Inconel 718 je vysokopevnostní materiál odolný za vysokých teplot i tlaků. Tyto vlastnosti ho předurčují k jeho hlavnímu využití, a to ve spalovacích komorách a turbínách v proudových motorech.

### Struktura Inconelu 718

Inconel 718 obsahuje austenitickou matici  $\gamma$ , ve které jsou rozpuštěny sekundární fáze. Faktorem zpevnění je precipitace fáze  $\gamma''$ , která vytváří lamely. Ty jsou s austenitickou maticí koherentní. Intermetalická fáze  $\gamma''$  ( $\text{Ni}_3\text{Nb}$ ) má tetragonální strukturu. Fáze  $\gamma''$  se vytváří procesem precipitačního vytvrzování.(24) V tomto procesu probíhá rozpouštěcí žíhání při teplotě 970-1175 °C. Žíhání je prováděno ve vakuu nebo v netečném (inertním) prostředí. V další fázi probíhá při teplotách 600 - 815 °C jeden nebo více precipitačních ohřevů, který má za následek vznik velkých zrn v mikrostruktuře obsahující precipitační fázi  $\text{Ni}_3\text{Nb}$ , dále vzniká výskyt karbidů na hranici zrn. Díky tomu dosahuje Inconel 718 svých fyzikálních hodnot uvedených výše. [24]

### Obrobitelnosti Inconelu 718

Inconel 718 řadíme mezi těžkoobrobitelné materiály díky nízké tepelné vodivosti, tendenci se zpevňovat, tvrdosti a abrazivitě. K mechanickému zpevnění dochází již při prvním kontaktu nástroje s obrobkem. Obrobený materiál je lehce plasticky deformován a je podstatněji tvrdší než materiál před obráběním. „To má za následek tvoření otěrových vrubů na řezném nástroji při následném obrábění.“(24). Tento problém lze však vyřešit pozitivní geometrií VBD bříty, doporučená hodnota je 8°. Tento úhel zajistí plynulejší tvorbu třísky a zamezí kolísání

řezných sil. K faktu, že Inconel 718 řadíme mezi těžkoobrobitelné slitiny, přispívá jeho tažnost, která již při teplotě 800 °C dosahuje hodnoty 28 %. Dalším problémem je špatná tepelná vodivost tohoto materiálu, jelikož jeho využití je především v žáruvzdorných podmínkách. Teplo, které vzniká v místě řezu, se u ostatních konvenčních materiálů odvádí pomocí utvářené třísky, avšak niklové slitiny všeobecně vytváří dělené třísky. Pokud není obráběcí proces řádně chlazen, mohou teploty v řezu dosáhnout hodnoty 1100 až 1300 °C, což má za následek nižší životnost nástroje nebo deformaci obrobku. [24]

Z dostupných zdrojů a literatury je zjevné, že materiál Inconel 718 patří mezi těžkoobrobitelné slitiny, které vyžadují velice přesnou technologii frézování, soustružení i broušení. Velkým problémem při obrábění Inconelu 718 je jeho špatná tepelná vodivost, která způsobuje změnu integrity povrchu po procesu obrábění. Problém s tepelnou vodivostí poukazuje, že vysoké řezné rychlosti nejsou vhodné pro obrábění tohoto materiálu. Pro obrábění je doporučován pomalý a silový řez s velmi dobrým chlazením. Dále je to jeho vysoká pevnost, nízká tažnost za běžné teploty, která způsobuje „vylamování“ zrn i jeho vysoká tvrdost, která vyžaduje vysoký výkon a tuhost strojů.

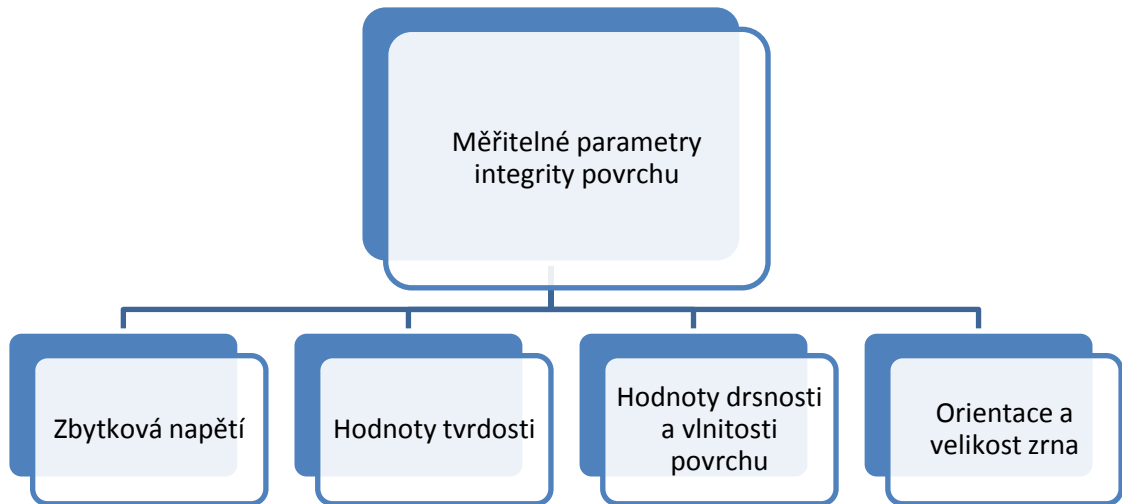
## 4 Integrita povrchu

Tento pojem byl poprvé použit v roce 1964 M. Fieldem a J. Kahlesem a je spjatý se stavem povrchové vrstvy po obráběcích procesech. Pojem se zavedl z důvodu dokonalejšího popisu kvality a stavu povrchových a podpovrchových vrstev. Ve chvíli, kdy zákazník zastává názor, že stav povrchu ovlivňuje chování výrobku v provozu, tak nám pojem integrita povrchu udává soubor parametrů, podle kterých se zákazník společně s dalšími kritérii, jako je například cena, může rozhodnout o koupi výrobku. [12]

Obráběcí proces nám může ovlivnit celou řadu faktorů, jako jsou tření a oteřuvzdornost, vznik a šíření dislokací, povrchová a hloubková distribuce zbytkových napětí, které ovlivňují životnost a cyklickou únavu, vzhled, chování povrchu při dalších operacích (nanášení dalších vrstev, povlaků), přenos tepla, elektrickou vodivost. [12]

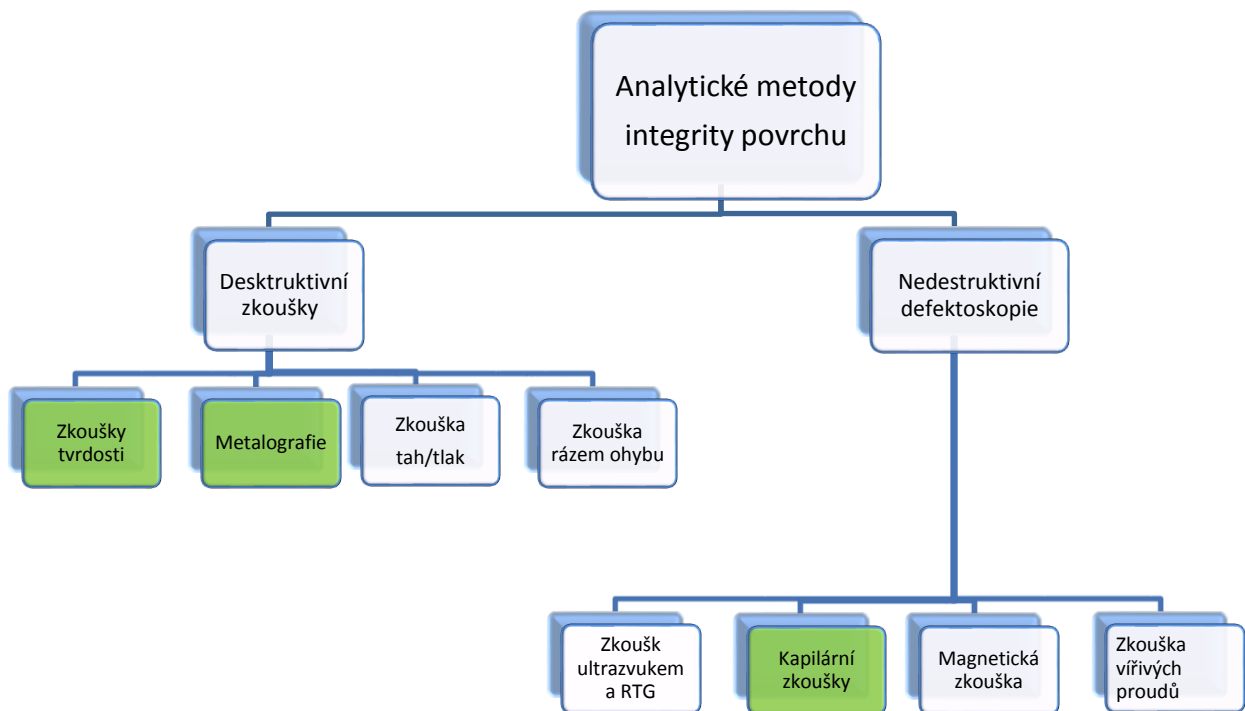
Povrch kovu má obecně po obráběcím procesu tenkou kontaminovanou chemicky vysoce aktivní vrstvu v řádu jednotek nm, pokud není daný výrobek obráběný ve vakuu či v inertním prostředí. Po obráběcím procesu se mohou vyskytovat oblasti tepelně ovlivněné, oduhličené, přetavené a jiné. Mezi měřené, simulované nebo matematicky modelované

parametry integrity nejčastěji výrobce a zákazníci řadí tvrdost, mikrotvrdost, zbytková napětí, detekci trhlin, drsnost a vlnitost, texturu (orientace zrn), velikost zrn a hustotu dislokací. [13]



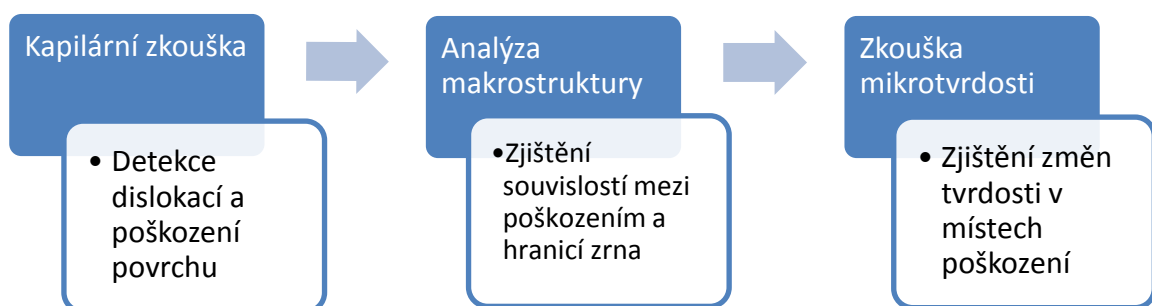
Obr. 4.1 Schéma měřitelných hodnot integrity povrchu

- **Zbytková napětí:** Tato napětí souvisí s výskytem plastické deformace. Jejich odstranění lze odstranit rekrytalizačním žíháním. [MPa]
- **Hodnoty tvrdosti:** Popis tohoto parametru je popsán v kapitole 5.1
- **Hodnoty drsnosti a vlnitosti:** Hodnoty drsnosti se uvádějí v několika parametrech, jako Rz, Ry a nejčastěji používaná hodnota Ra. Vlnitost povrchu udávají hodnoty Wa a Wc. [um]
- **Orientace a velikost zrna:** Mikro a makrostruktura materiálu je uvažována již při výběru materiálu, ze kterého bude konečný výrobek vyroben. Hodnoty velikosti zrna se též udávají v [um]



Obr. 4.2 Schéma analytických metod popsanych v řešeršní části práce

Ve výše uvedeném schématu na Obr. 4.2 jsou zeleně vyznačeny zkoušky, které jsem vyhodnotil jako vhodné pro praktickou část práce. Jedním z důvodů je návaznost těchto zkoušek (Obr. 4.3).



Obr. 4.3 Schéma návaznosti vybraných zkoušek

## 4.1 Nedestruktivní defektoskopie

Nedestruktivní zkoušky materiálu (bez porušení) v dnešní době neodmyslitelně patří k našim každodenním životům, aniž bychom si to uvědomovali. Tyto zkoušky zaručují jakost, bezproblémové používání strojů a hlavně naši bezpečnost. Denně miliony lidí létají, jezdí automobilem nebo cestují na lanové dráze. Všechny tyto výrobky a stroje podstoupily minimálně jednu či více defektoskopických zkoušek. Tyto zkoušky nám mohou odhalit různé defekty, od vady v odlitku až k pevnosti a kvalitě svaru.

Mezi nedestruktivní zkoušky řadíme:

- Kapilární zkoušku
- Zkoušku vířivých proudů
- Zkoušku ultrazvukem
- Magnetickou zkoušku
- Přímou a nepřímou vizuální kontrolu

## 4.2 Zkoušení kapilárními metodami

Metoda kapilární zkoušky zahrnuje dva typy této zkoušky, a to fluorescenční metodu a penetrační metodu. Obě metody v dnešní době nahrazují již zastaralou petrolejovou metodu. Kapilárními metodami se zjišťují vady a nečistosti povrchu materiálu. Nespornou výhodou této metody je fakt, že se jedná o nedestruktivní defektoskopickou zkoušku. Využití najdeme jak u feromagnetických, tak u nemagnetických materiálů, ale také u skla nebo glazované keramiky. Zkoušejí se odlitky, výkovky a často i těsnost svarů u tlakových nádob[1]. Hlavní podmínkou materiálu pro provedení kapilární zkoušky je neporéznost povrchu. Porézní povrch by nám mohl zkreslit výsledné hodnocení. Kapilární metody jsou však velmi citlivé na preciznost provedení všech fází postupu zkoušky. Pokud není povrch dostatečně očištěn, odmaštěn nebo není správně dodržen čas penetrace, může dojít k nesprávnému výsledku a mylné informaci o jakosti zkoušeného povrchu. [5]

### Postup zkoušky

Celý princip zkoušky je velmi jednoduchý. „Kapilární metody jsou založeny na využití charakteristických vlastností kapalin, tzv. kapilárních jevů. Nejdůležitější z nich jsou povrchové napětí, viskozita, krajový úhel, kapilární elevace a kapilární tlak“ [1].

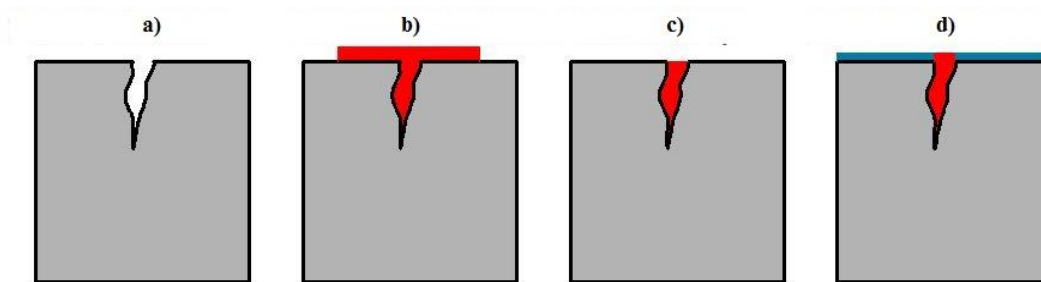
Prvním krokem je očištění povrchu, pokud je pokryt okujemi či rzí, nejlépe tryskáním nebo železným kartáčem, dále následuje důkladné odmaštění, které nám zajistí otevření vad, které chceme indikovat (Obr. 4.4a). Pro odmaštění se využívají běžná tekutá odmašťovadla nejčastěji v podobě spreje. [5]

Po odmaštění následuje nanesení detekční tekutiny, která se u menších součástí nanáší ponořením, u větších součástí nanese sprejem, houbou nebo štětcem. Detekční tekutinu necháme působit v rozmezí 20 až 40 minut (Obr. 4.4b), aby měla možnost dokonale vniknout do všech dislokací. V kapilární metodě se musí dbát i na teplotu prostředí, ve kterém zkoušku provádíme, jelikož kinematická viskozita, která je podílem dynamické viskozity a hustoty kapaliny (jednotka  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) nám klesá se zvýšením teploty o 1 °C zhruba o 2%. Doporučená teplota pro zkoušku je 20 °C. [5]

Po uplynutí času přichází očištění přebytečné tekutiny (Obr. 4.4c). Tato operace je velice choulostivá na pečlivé provedení, protože neúplné očištění znamená detekci trhlin tam, kde ve skutečnosti nejsou, a naopak přílišné očištění nám může způsobit odstranění tekutiny z vad[1]. Tuto operaci lze provést pod proudem vody, tím však riskujeme vymytí kapaliny, proto se doporučuje čištění suchým kusem savého textilu. [5]

V dnešní době se k odstranění kapaliny využívají tzv. emulgátory. Jedná se v podstatě o rozpouštědla, která nám usnadňují snazší očištění penetrantu z povrchu [1]. Na trhu jsou k dostání dva druhy, a to lipofilní, která jsou rozpustné v tucích a nejsou biologicky odbouratelné, a hydrofilní, která jsou rozpustné ve vodě a jsou biologicky odbouratelné. Základem emulgátorů je triethanolamin, kyseliny oleinová a kyselina adipová. [5]

Po očištění nanese vývojku, která pomáhá ke vzlínání detekční kapaliny z vad, a tím i označí vadu, nejčastěji ve formě spreje. „Vývojka je na bázi oxidu hořečnatého, který se rozptýluje v lehce se odpařující kapalině, lihu nebo acetonu“[5]. Po odpaření tekutiny vytvoří oxid hořečnatý (MgO) na povrchu tenkou bílou vrstvou. Do určité míry vývojka funguje i jako savý papír, který nasaje barevnou penetrační kapalinu, která nám s dalšími částmi kapilárního systému pomáhá ke vzlínání vad na povrch (Obr. 4.4d). Bílá vrstva, kterou vytvořil oxid hořečnatý, napomáhá k lepší indikaci vad díky barevnému kontrastu vůči okolnímu prostředí.



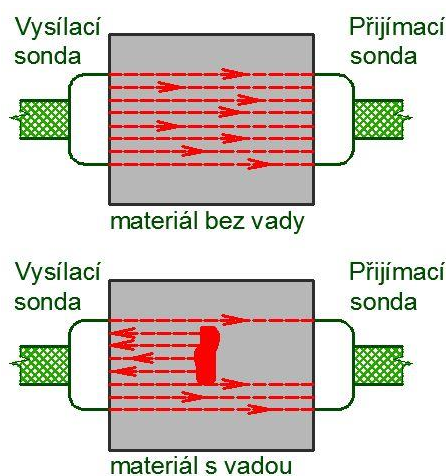
Obr. 4.4 a) očištění a odmaštění povrchu, b) aplikace detekční tekutiny, c) odstranění přebytku tekutiny, d) nanesení vývojky a indikace vady. [21]

### 4.3 Zkouška ultrazvukem

Ultrazvuk je akustické vlnění nad hranicí lidské slyšitelnost nad 20 kHz. Při zkoušce ultrazvukem využíváme příčných a podélných vln v rozmezí 1 až 10 MHz a je založena na fyzikálním šíření vln v materiálu. Využívá se pro zjišťování povrchových vad materiálu buď po obrábění, svařování, tloušťky stěn, nebo již při počáteční kontrole materiálu. Výhodou této zkoušky je, že poskytuje informace jak o samotné přítomnosti vady, tak i o její velikosti a poloze. [7]

Pomocí ultrazvukového měniče se vyšle UZ vlna a vyhodnocuje se velikost odražených vln zpět do ultrazvukového defektoskopu. Pokud vlna dopadá na určitý defekt, její odraz se nerovná úhlu dopadu a dochází k jejímu vychýlení, lomu i ohybu vlny, jelikož vlnová délka defektu je jiná než u neporušeného materiálu (Obr. 4.5) [7].

Tato zkouška nebyla předmětem mé práce, ale navrhuji ji jako další možnost, která by se dala využívat při kontrole zámků lopatek v První brněnské strojírně a.s.



Obr. 4.5 Schéma lomu vln při střetu s defektem. [21]

## 5 Destruktivní zkoušky

V další části mé práce popíši část analytických metod, které se v praxi běžně používají a které jsem provedl ve své praktické části. Zdůvodnění výběru těchto zkoušek je v kapitole 4.

Mezi destruktivní zkoušky řadíme zkoušky, u kterých vzniká trvalé poškození, nebo ze zkoumaného vzorku musíme vyjmout element, který chceme prozkoumat. Mezi destruktivní zkoušky řadíme na 4 základní skupiny zkoušek, a to:

- 1) Zkoušky pevnosti:
  - Na tah
  - Na tlak
  - Na ohyb
  - Na krut
  - Na stříh
- 2) Zkoušky dynamické
  - Rázem v ohybu
  - Cyklické (únavové zkoušky)
- 3) Zvláštní technologické zkoušky
  - Tvrdosti (Brinell, Vickers, Rockwell, mikrotvrdost)
  - Metalografie
- 4) Zkoušky tvárnosti [23]

### 5.1 Zkoušky tvrdosti

Tvrdost materiálů lze zjistit pomocí čtyř základních typů statických mechanických zkoušek, které jsou založeny na vtisknutí tělesa (indentoru) do zkoušeného materiálu, kde se vyhodnocují velikosti trvalé deformace po vtisknutí indentoru. Jsou to zkoušky dle Vickerse, Brinella, Ludwika a Rockwella. Na zkoušce dle Vickerse je založena i zkouška mikrotvrdosti, která bude popsána níže. Dále existují zkoušky dynamické (Poldi kladivo, duroskop), které se netýkají mé praktické části, proto se jimi nebudu dále zabývat. [5]

Definice tvrdosti: „Tvrdost materiálu je chápána jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa“. [5]

Hodnoty, které značí tvrdost jsou buďto bezrozměrné, nebo v jednotkách  $N.mm^2$ , kterou však mnohdy lze zaměnit za pevnost materiálu.



### 5.1.1 Zkoušky vnikající

Odolnost vůči vnikání indentoru je dána velikostí sil, pomocí kterých jsou atomy v kovovém materiálu navzájem vázány. U kovové vazby, která umožňuje plastickou deformaci, vznikají deformace tím snadněji, čím více jsou vazebné síly vyrovnané. Hlavními rozhodujícími činiteli jsou:

- Tvar krystalových elementů
- Jemnost krystalizace: při jemnozrnné struktuře je v objemu více krystalografických rozhraní, které více zamezují vnikání indentoru, z čehož vyplývá, že jemnozrnná struktura vykazuje větší tvrdost
- Teplota: Čím více teplota stoupá, stávají se vazby méně pevné a kov má menší tvrdost. Teplotu je nutno uvažovat relativně s ohledem na bod tání (kovy s nízkým bodem tání jsou při stejné krystalizaci za normální teploty měkčí než kovy tající při vysoké teplotě).(17)
- Cizí příměsi: Každá příměs snižuje plasticitu kovu, a tím zvyšuje tvrdost kovu.
- Vnitřní pnutí: Tvrdost materiálu mění i různé typy pnutí, jako je například tváření za studena, nesouměrné chladnutí odlitku nebo nestabilními fázemi. [17]

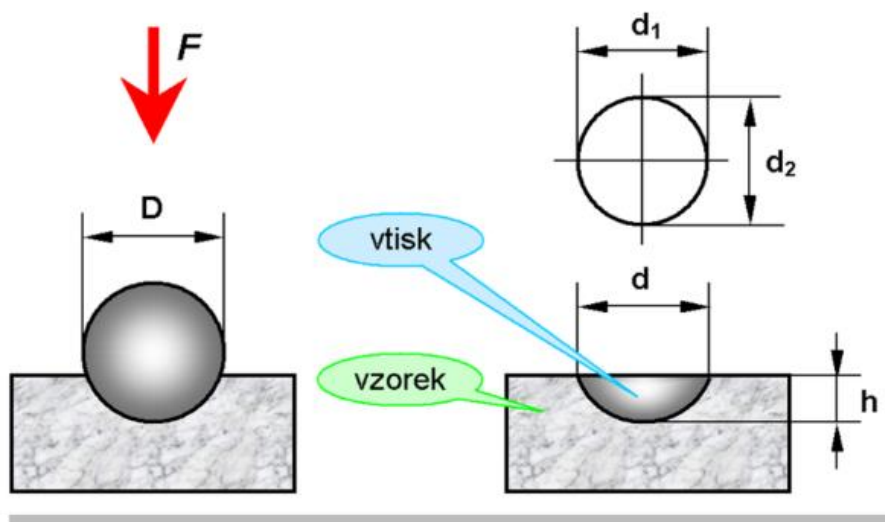
### Historie vývoje zkoušek

Prvním průkopníkem těchto metod byl v roce 1891 Kirsh, který navrhl vtačování válcového indentoru se zvyšující se silou vtačování do okamžiku, kdy se objeví první trvalý vtisk. Síla, která byla potřebná ke vzniku vtisku, byla míra tvrdosti materiálu. Další vývoj se zabíral vztahem mezi tvrdostí a mezí kluzu, z čehož vzniklo zatěžování kuličkou ve stejném místě v několika stupních, přičemž po zatěžování bylo provedeno rekrystalizační žíhání a proces se opakoval do té doby, než se vtisk přestal po zatížení zvětšovat. Daná tvrdost byla označována jako Hanriot. Tato metoda byla však velmi zdlouhavá a nebyla zcela přesná, proto z požadavků praxe vznikly dnes již standardizované metody, které popíši níže. [17]

### Zkouška dle Brinella

V roce 1900 se v Paříži konal druhý mezinárodní kongres, kde švédský inženýr Brinell představil svoji metodu měření tvrdosti materiálu, která se používá dodnes a je normována dle ČSN 42 0371. Tato zkouška je vhodná pro materiály s nižší tvrdostí.[17]

„Podstatou Brinellovy zkoušky je zatlačování ocelové kalené kuličky průměru  $D$  do vyleštěné plochy zkoušeného kovu konstantním zatížením“ (Obr. 5.1). [17]



Obr. 5.1 Průběh zkoušky dle Brinella [18]

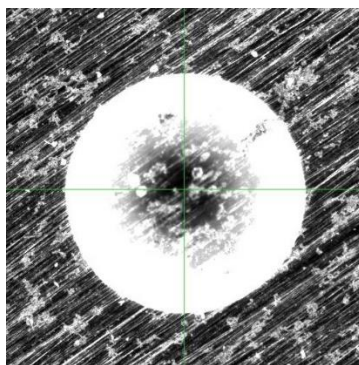
Vztahy pro vyjádření tvrdosti dle Brinella:

$$HB = \frac{F}{S} \quad [17]$$

$$S = \pi Dh = \pi D 0,5(D - (D^2 - d^2)^{0,5}) \quad [17]$$

Kde  $F$  je síla vtisku,  $S$  je plocha vtisku,  $D$  je průměr kuličky,  $d$  je průměr vtisku a  $h$  je hloubka vtisku.

Po odlehčení indentoru měříme průměr vtisku pomocí mikroskopu nebo tzv. Brinellovy lupy. Přesnost měření je na setiny mm. Oproti měření průměru vtisku je měření hloubky vtisku mnohem složitější a zdlouhavé. Stejně tak při sériových zkouškách je odečítání pomocí mikroskopu pomalé, proto jsou tyto tvrdoměry konstruovány tak, aby se dala hloubka  $h$  odečítat přímo na přístroji. Výsledky ze sériových tvrdoměrů jsou však z důvodu možného vzniku valů kolem vtisku vhodné pouze pro stanovení poměrné tvrdosti a pro přesný výsledek musíme změřit průměr  $d$  vtisku (Obr. 5.2). [3]



Obr. 5.2 ukázka pohledu na vtisk [19]

Při zkoušce je třeba dodržovat zkušební podmínky z důvodu srovnatelnosti naměřených výsledků. Výsledek nejvíce ovlivňuje správně zvolené zatížení a velikost kuličky. Při příliš velkém zatížení a malém průměru kuličky může nastat situace, kdy se bude rovnat průměr indentoru a vtisku. Rozmezí průměru správného vtisku musí být mezi hodnotami 0,25 až 0,6D. [17]

Povrch pro provedení zkoušky musí být hladký, rovný, bez nečistot a okují a nejlépe odmaštěný. Tloušťka vzorku musí být minimálně osminásobkem hloubky vtisku a vzdálenost vtisku od středu musí být 2,5d u ocelí a 3d u neželezných kovů.

Průměr indentorů využívaných při zkoušce: 10; 5; 2,5; 1,25; 0,625 mm

Zatížení volíme vztahem:  $F=KD^2$  [17]

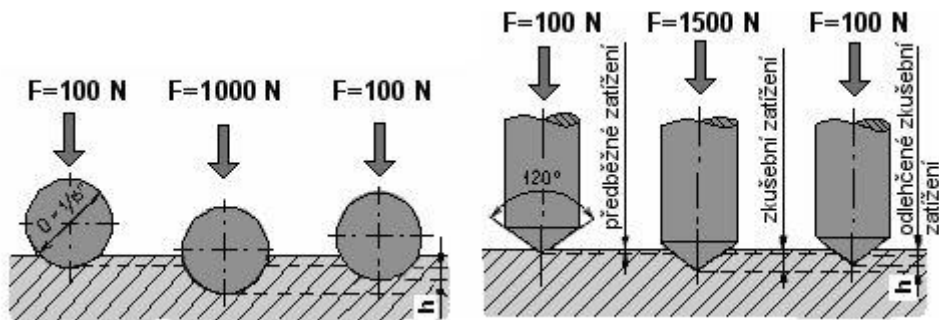
Koeficient **K** volíme pro ocel **30**, pro neželezné kovy a slitiny **10** a pro kompozity **2,5**. Doba zatížení se poté volí u ocelí a litin 10 s, u neželezných kovů může být doba zatížení až 180 s. [17]

„Výsledek zkoušky za normálních podmínek, tj. při  $\varnothing D = 10$  mm,  $F = 29\,430$  N (300kp) a době zatížení 10 až 15 s, se označuje pouze číslem tvrdosti a písmeny HB, tedy např. HB= 280. Jestliže byly podmínky zkoušky jiné, uvádějí se za označením HB v pořadí:  $\varnothing D$  (mm), F (kp), doba zatěžování (s), např. HB 5/750/20=280“ [17].

### 5.1.2 Zkouška dle Rockwella

Zkouška je založena na vtisknutí buď diamantového kuželu s vrcholovým úhlem  $120^\circ$  a měřitelnou hloubkou 0,2 mm, která je rozdělena na 100 dílků, nebo ocelové kuličky s průměrem 1,5875 mm do zkoušeného povrchu. Tato metoda byla vynalezena pro sériové zkoušení tepelně zpracovaných, zušlechťovaných nebo kalených ocelí.

U této zkoušky není potřeba upraveného povrchu jako u zkoušky podle Brinella, neboť při předběžném zatížení 98N se hloubkoměr nastaví do nulové hodnoty a zatíží se hlavní silou (Obr. 5.3). Poté se zatížení odlehčí na výchozích 98N. Kdybychom odečítali hloubku vpichu při hlavním zatížení, výsledek by byl zkreslený z důvodu elastické deformace, tuhosti podložky i samotného stroje. Např. při zatížení 1400 N je celkové zatížení 1498 N (1400+98). Výsledná tvrdost za použití diamantového kuželu se označuje **HRC** (cone), pro tenké vrstvy a slinuté karbidy se využívá též diamantový kužel s označením tvrdosti **HRA**, při použití kuličky značíme **HRB** (ball). [17]



Obr. 5.3 Schéma zkoušky dle Rockwella [20]

Nejměkčí kov, který lze touto metodou měřit, je materiál s pevností 80MPa. Minimální tvrdost, kterou můžeme měřit **HRC** je dle normy HRC 20, přestože se doporučuje měřit od tvrdostí HRC 30. V rozmezí 20-30 nejsou výsledky tak přesné. Pro měkké materiály se doporučuje použití metody s kuličkou HRB a menším zatížením (Tab. 5.1). [17]

Tab. 5.1: tabulka normalizovaných hodnot pro měření dle Rockwella [17]

Stupnice	Indentor	Zatížení [N]			Rozsah měřitelné stupnice		Použití
		F <sub>0</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>c</sub>	Počet	Hloubka [mm]	
C	Dia- manto- vý kužel	98,07	1373	1471	100	0,20	Tepelně zpracované ocele a litiny
A			490,3	588,4			Slabé průřezy tvrdých kovů, slinuté karbidy
			D	29,42			117,7
30N		264,8				294,2	
45N		411,9	441,3				
B	Ocelo- vá kulička Ø 1,588 mm	98,07	882,6	980,7	130	0,26	Neželezné kovy a oceli bez tepelného zpracování
G			1373	1471			Měkké oceli, neželezné kovy
			F	29,42			117,7
15T		264,8				294,2	
30T	411,9	441,3					
45T							
H	Ocelo- vá kulička Ø 1,588 mm	98,07	490,3	588,4	130	0,26	Hliník, cín, olovo
E			882,6	980,7			Litiny, hliníkové slitiny, ložiskové materiály a jiné měkké materiály
			K	1373			1471

### 5.1.3 Zkouška tvrdosti dle Vickerse

U této zkoušky vyhodnocujeme povrch trvalého vtisku, který zanechal indentor ve tvaru čtyřbokého diamantového jehlanu na povrchu zkoušeného materiálu. Při této zkoušce se měří úhlopříčky vtisku po odlehčení indentoru, který byl vtačen silou 9,8 až 980 N. Nejčastěji používanou silou je síla 294 N. Vztah pro tuto zkoušku vyjadřuje vzorec

$$HV = \frac{F}{A} = 0,189 \frac{F}{d^2} \quad [5]$$

kde F je síla tlačení v N, A je povrch vtačeného vtisku v mm<sup>2</sup> a d je aritmetický průměr úhlopříček d<sub>1</sub> a d<sub>2</sub>, které jsme odečetli pomocí mikroskopu s přesností 0,001 mm. Konečný zápis této zkoušky je např. 345 HV. [10]

## 5.2 Mikrotvrdot

Tato zkouška je založena na stejném principu jako zkouška dle Vickerse, ale měříme zde tvrdost v mikroskopických objemech. Pro zkoušku mikrotvrdoti nepřichází v úvahu žádná

jiná metoda než vnikající pomocí diamantového indentoru. Díky této zkoušce lze určit tvrdost strukturních částí materiálu nebo i tvrdost jednotlivých zrn. Pojem mikrotvrdost vznikl pro tvrdost určenou velmi malým zatížením. Hranice mezi makrotvrdostí a mikrotvrdostí se uvádí 19,8 N. [5]

Mikrotvrdost nelze určovat konvenčními tvrdoměry, jako jsou pro zkoušku dle Brinella nebo dle Rockwella, neboť je požadována mnohem větší přesnost jak při zatěžování, tak i při měření velikosti vtisku. Zatěžování je zajištěno závažím nebo cejchovanou pružinkou. Poté pomocí přesné optiky odečteme hodnotu úhlopříček. [17]

„Jednou z nejpřesnějších konstrukcí je u nás používaný Hanemannův mikrotvrdoměr. Vnikací tělísko – Vickersův jehlan – je usazeno přímo do speciálního objektivu, který se vloží místo normálního objektivu do metalografického mikroskopu. Objektiv je zavěšen na pružných membránách, které dovolují pohyb ve směru optické osy. Prohnutí membránových pružin, kterému odpovídá zatížení působící na diamant, se měří na obrazu zatěžovací stupnice uvnitř objektivu.“(17) Po odlehčení zatížení zaostříme pomocí okuláru na vtisk, kde odečteme hodnoty vtisku. Výslednou mikrotvrdost vypočítáme ze vztahu:

$$HV = 0,189 \frac{F}{u^2} [17]$$

Kde F je síla zatížení [N] a u je průměrná hodnota úhlopříček [mm]

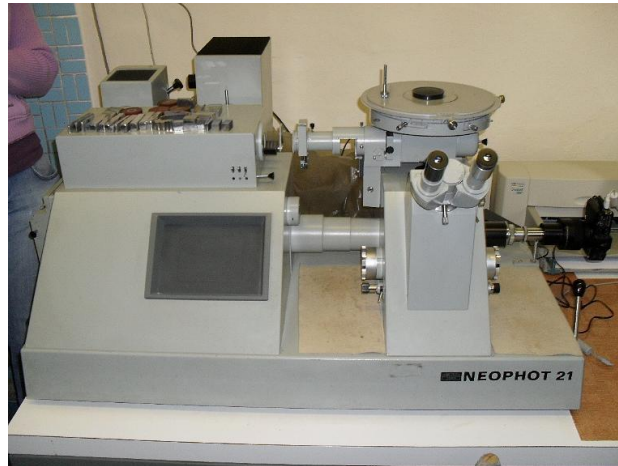


Obr. 5.4 Mikrotvrdoměr s podporou PC [9]

### 5.3 Metalografie

Jak z názvu vyplývá, metalografie se zabývá zviditelňováním struktury kovových materiálů a jejich vnitřní stavbě, která má přímý vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti

materiálu. Strukturu materiálu ovlivňuje celá řada prvků jako mechanické nebo tepelné zpracování výrobku. K pokusu využíváme světelné metalografické mikroskopy (Obr. 5.5), elektronové mikroskopy jak rastrovací, tak transmisní. Jedná se o destruktivní defektoskopickou zkoušku. [7]



Obr. 5.5 Metalografický mikroskop

### **Světelná mikroskopie**

„Existují tři hlavní zákony geometrické optiky: zákon o přímočarém šíření světla, zákon o nezávislosti světelných paprsků zákon o odrazu a lomu.“ [5]. Mikroskop se skládá ze dvou základních částí, a to okuláru a objektivu. Obě dvě části jsou sestaveny z čoček, které známe pod názvem spojky a rozptylky. Rozptylky mají tenčí střed a tlustší okraje. Odražené světelné paprsky rovnoběžné s osou, které na ní dopadají, se za čočkou rozbíhají a jsou dány záporným ohniskem  $-F$ . U spojek je princip naprosto opačný a paprsky se spojí v kladném ohnisku  $+F$ , přičemž tento bod je obrazové ohnisko a bod  $-F$  je předmětové ohnisko[5]. Vzdálenosti mezi ohnisky se nazývá ohnisková vzdálenost  $f$ . Zvětšení mikroskopu stoupá se snižující se ohniskovou vzdáleností okuláru a objektivu. Funkcí objektivu je zvětšovat zkoumaný obraz vzorku a okulár pouze zvětšuje obraz vytvořený objektivem bez možnosti upřesňování detailu. [7]

### **Osvětlování a pozorování vzorků**

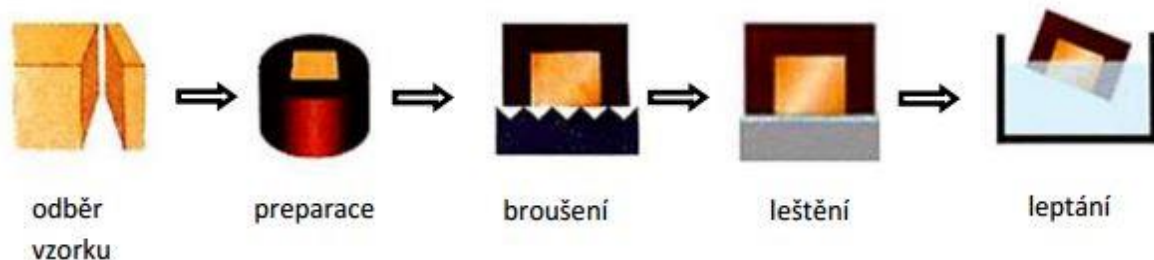
V metalografii využíváme pozorování v odraženém světle, jak již bylo uvedeno výše. Nejčastěji se využívá pozorování ve světlém poli, ale ne všechny paprsky, které dopadnou na povrch vzorku, se odrazí zpět do objektivu, důsledkem je přímé osvětlení vzorku, při kterém

nevznikají stíny a výsledkem je obraz s nízkým kontrastem. I přes tyto problémy se využívá kvůli ostrým obrysům pozorovaného vzorku. [5]

Druhým nejvyžívanějším způsobem, je pozorování v tmavém poli. „Uskutečňuje se osvětlením vzorku pomocí kondenzoru. Rozdíl proti pozorování ve světlém poli, kdy je osvětlováno zorné pole, je v tom, že při pozorování v tmavém poli je zorné pole tmavé a je osvětlen předmět“[5]. Paprsky světla dopadající v šikmém úhlu na vzorek zvyšují kontrast a rozlišovací schopnost. Při pozorování v tmavém poli lze pozorovat části struktury, které v pozorování ve světlém poli nebyly vidět. Nejčastěji tak pozorujeme nekovové vměstky v kovech, které mohou vzniknout například při odlévání polotovaru. [5]

### **Příprava vzorku pro metalografii**

Příprava vzorků pro metalografii má pět základních kroků, a to odběr vzorku (dělení), preparaci, broušení, leštění a leptání. Všechny tyto kroky jsou detailně popsány v kapitole 6.1.1 Příprava vzorku.



Obr. 5.6 Schéma přípravy vzorků pro metalografickou zkoušku [7]

### **Dělení vzorku a preparace**

Dělení vzorku provádíme nejčastěji na kotoučových rozbrušovacích pilách. Ovšem než začneme s dělením materiálů, musíme součást řádně označit a označit i vzorek, který oddělíme a zaevidovat. Dalším parametrem, který zaneseme do zápisu je místo a prostorová orientace vzorku, kterou měl vzorek v původní součásti. Pro lepší výstupní hodnoty lze i celou evidenci doplnit fotografickou dokumentací. Při dělení je velmi důležité dbát na dostatečné chlazení, které zamezí popalům, které by znehodnotili vzorek (Obr. 5.7). Pokud nám okolnosti dovolí, doporučuje se zajistit rozměry sledované plochy 2 až 4 cm<sup>2</sup>. [8]





Obr. 5.7 Porovnání správně a nesprávně chlazeného řezu [7]

#### 5.4 Zhodnocení a výběr zkoušek pro praktickou část

Z výše popsaných defektoskopických a destruktivních metod jsem pro praktickou část vybral tři analytické metody, které využiju pro vyhodnocení integrity povrchu vzorků v praktické části práce.

Z defektoskopických metod jsem jako první vybral kapilární zkoušku za účelem detekce poškození integrity povrchu vzorku. Dále provedu metalografickou zkoušku, konkrétně leptání na hranici zrna a pozorování makrostruktury, díky níž zjistím, zda je souvislost mezi výskytem porušení povrchu a hranicí nebo orientací materiálu zrna Inconel 718.

Jako poslední provedu zkoušku tvrdosti materiálu, pro tuto zkoušku jsem vybral metodu měření mikrotvrdosti. Důvodem je vysoká tvrdost tohoto materiálu a možnost zjištění změny tvrdosti v závislosti na podpovrchové hloubky měření.

## 6 Praktická část

V této části práce se budu věnovat analýze integrity povrchu dodaných vzorků. Vzorky dodala První Brněnská strojírna a.s. Cílem mé práce je řešení problému neshody výroby zámků lopatek turbín z materiálu Inconel 718. Současná technologie je založena na rovinném broušení tvarovým kotoučem, který udává konečný tvar zámku lopatky. Broušení se provádí na brusce s CNC řízením **Magerle MFP 125**, kotoučem s korundovým brusivem a keramickým pojivem Tyrolit Strato ultra SU33A 702 GG 11 VB1 (Obr. 6.2). Kotouč je rovnán pomocí diamantového orovnávače. Sada lopatek je upnuta do přípravku po 5 kusech (Obr. 6.1.)

Polotovary pro broušení jsou vyrobené technologií voskové vytavitelné licí metody.

V této části práce jsem provedl 3 analytické metody vyhodnocení integrity povrchu, první jsem provedl kapilární zkoušku, kterou jsem zjistil, který ze vzorků nese známky poškození. U vzorků, kde byly identifikovány známky dislokací a popalů (Obr. 6.1), jsem provedl zkoušku mikrotvrdosti. Jako třetí jsem provedl analýzu makrostruktury materiálu. Tato zkouška byla provedena za účelem zjištění souvislosti mezi vznikem map a hranicí zrna materiálu.

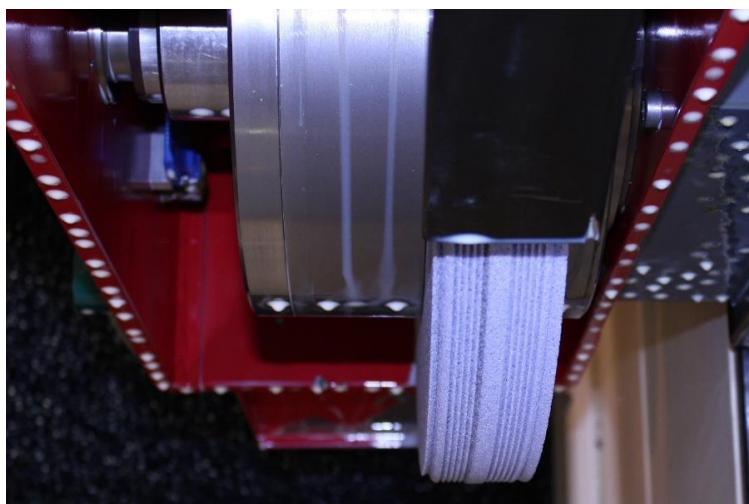
Pojem popal z dostupné literatury je charakterizován jako místo se změnou integrity povrchu po procesu broušení v důsledku nedokonalého chlazení při obrábění. Tato místa jsou charakterizována změnou barvy na tmavě hnědou až černou a zvýšenou hrubostí.

Tab. 6.1 řezné podmínky

	$v_c$ [m/s]	$f$ [mm/min]	$a_p$ [mm]	Orovnání	Y souřadnice
Hrubování 1	16 (743 ot/min)	190	Proměnlivá 0 až 1,5 mm	Ano, před	+0,8 mm
Hrubování 2	15 (697 ot/min)	260	0,715	Bez	+0,085 mm
Na čisto 1	22 (1022 ot/min)	600	0,055	Ano, před	+0,03 mm
Na čisto 2	22 (1022 ot/min)	600	0,03	Ano, před	0



Obr. 6.1 Přípravek s upnutými lopatkami. Pátá lopatka s označením popalu



Obr. 6.2 Detail kotouče po orovnění



Obr. 6.3. Lopatky upnuté do přípravku

## 6.1 Měření mikrotvrdomosti

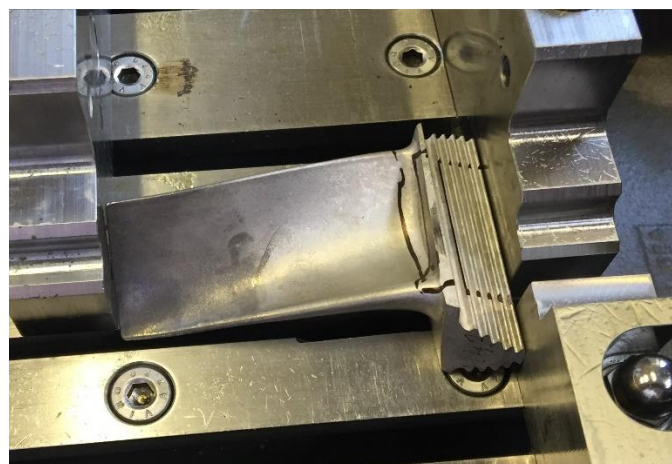
V této zkoušce jsem se zabýval měřením mikrotvrdomosti v zámku lopatky v závislosti na hloubce měření. Zkoušku jsem provedl na 2 vzorcích, na kterých byly zjevné popaly od předchozího broušení (Obr. 6.4). Obě lopatky byly upnuty jako páte (poslední) v řadě v přípravku.



Obr. 6.4 Vzorek č.1 a č.2 s označenými místy popalu

### 6.1.1 Příprava vzorku

Ze vzorků jsem preparoval část vzorku, kde se vyskytl zjevný popal a bylo nutné zjistit změnu mikrotvrdomosti v této oblasti. Vyznačil jsem místo, které jsem chtěl získat (Obr. 6.5). Celý vzorek jsem řezal na metalografické pile Struers Discotom 6.

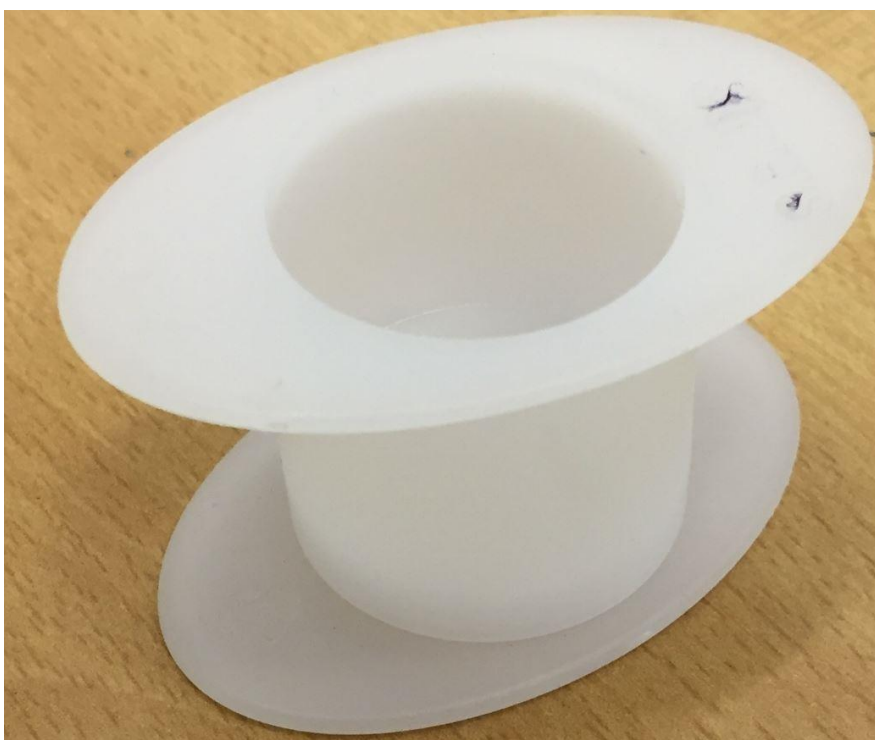


Obr. 6.5 Vyznačení popalů a příprava na řezání vzorku

Preparované vzorky jsem umístil do úhlového přípravku, též od firmy Struers (Obr. 6.6). Dále jsem umístil vzorek do připravené formy (Obr. 6.7). Posléze jsem vzorek zalil ve formě speciální směsí. Po vytvrnutí směsi byl vzorek připraven k broušení. Příprava vzorku byla provedena o 3 dny dříve než broušení vzorku.



Obr. 6.6 Úhlový přípravek s preparovaným vzorkem



Obr. 6.7 Forma pro přípravu vzorku

## Broušení vzorku

Broušení vzorků jsem provedl na CNC řízené metalografické brusce Struers Tegramin-25 (Obr. 6.8). Připravené vzorky (dva testovací + jeden kontrolní) jsem upnul do speciálního přípravku této brusky (Obr. 6.9). Při upínání vzorků byl přípravek podložen 3 mm podložkou, jelikož jsem potřeboval dosáhnout přesahu vzorků vůči přípravku. Pro broušení byly použity celkem 4 kotouče.



Obr. 6.8 Metalografická bruska Tegramin-25



Obr. 6.9 Přípravek se vzorky

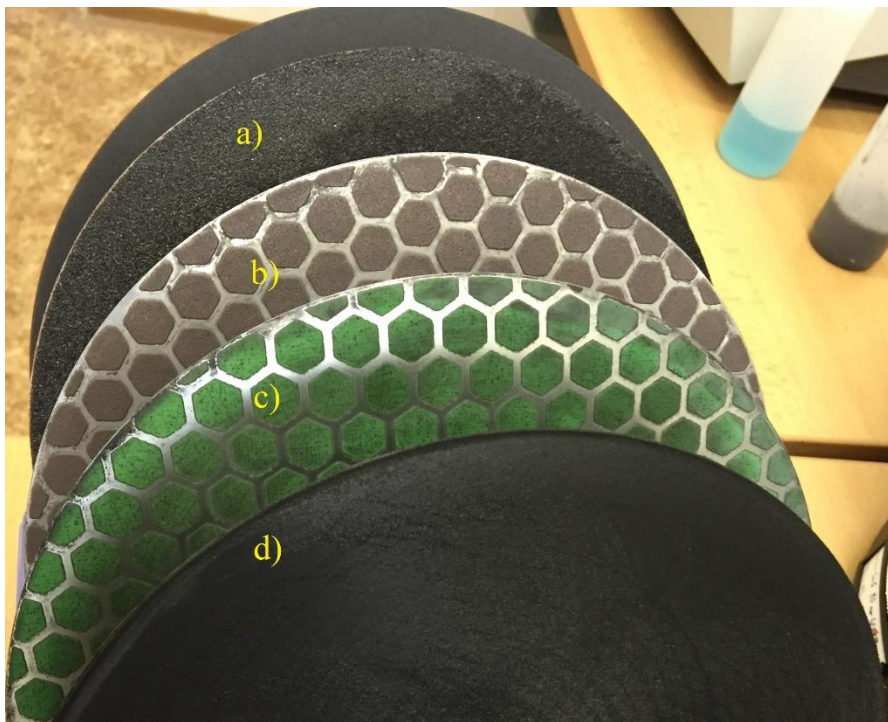
V prvním kroku byl použit hrubý brusný kotouč obr. 6.10 a). Vzorek jsem brousil do té doby, dokud nebyly patrné obrysy vzorku a úhlového přípravku. Čas broušení byl v tomto

případě 3x120 sekund s přítlačnou silou 240 N (na jeden vzorek výrobce doporučuje přítlačnou sílu 80N), která byla v průběhu všech operací totožná, a s vodním chlazením. Po vyjmutí jsem se ujistil, zda jsou dostatečně vidět plochy vzorku a úhlového přípravku (Obr. 6.11). Poté následovalo důkladné opláchnutí pod proudem vody.

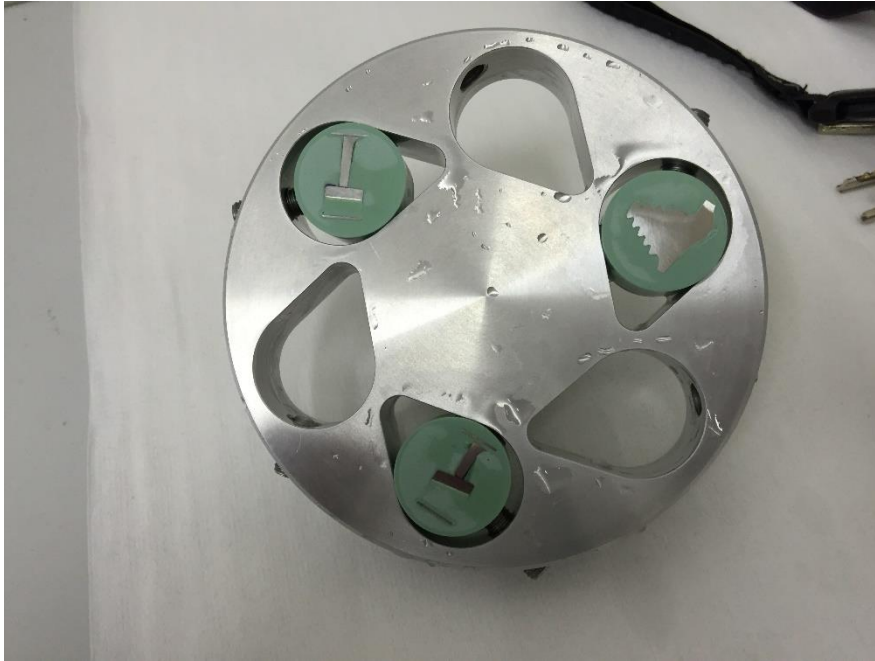
Druhý krok byla výměna kotouče za kotouč se zrnitostí 7  $\mu\text{m}$  (Obr. 6.10b). Při broušení tímto kotoučem bylo vypnuté automatické chlazení vzorku, místo vody jsem ručně použil emulzi se zrnitostí 7  $\mu\text{m}$  a speciální kapalinu na lihové bázi, kterou jsem v průběhu broušení pravidelně vlhčil kotouč, aby nedošlo k vysušení. Doba broušení byla tentokrát 4x120 sekund. Po vyjmutí opět následoval důkladný oplach.

Ve třetím kroku jsem vyměnil kotouč se zrnitostí 7  $\mu\text{m}$  za kotouč jemnější, který měl zrnitost 3  $\mu\text{m}$  (Obr. 6.10c). Postup byl prakticky identický jako v kroku číslo 2. Jediná změna proběhla v použití emulze, kde byla použita emulze se zrnitostí 3  $\mu\text{m}$ . Doba broušení byla 3x120 sekund. Po vyjmutí opět následoval důkladný oplach.

V posledním kroku byl vyměněn brusný kotouč za kotouč leštící, který vytvořil hodnoty  $R_a$  blížící se k nule (Obr. 6.10d). Byla použita 3  $\mu\text{m}$  emulze a lihový roztok. Doba leštění byla 180 sekund. Po oplachu jsem se vizuálně ujistil, zda je vzorek připraven na měření.



Obr. 6.10 Kotouče použité při broušení vzorků



Obr. 6.11 Kontrola viditelnosti vzorků

## Měření

Měření mikrotvrdomosti jsem provedl na mikrotvrdoměru Future Tech FM-APS 900 s PC podporou.

Jako první vzorek byl použit zkušební vzorek číslo 3, který sloužil pouze ke správnému nastavení zatěžovací síly. Síla byla nastavena na 300N. Velikost kontrolních vpichů byla zhruba 40 um, tato hodnota vyhovovala dalšímu měření.

### 6.1.2 Vzorek číslo 1

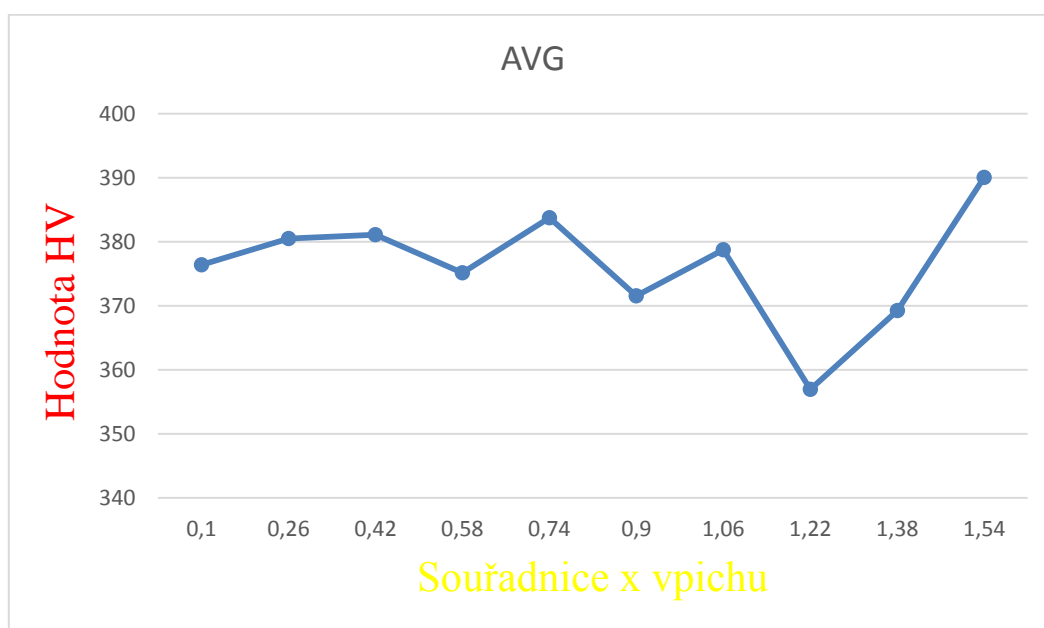
V dalším měření již byl použit vzorek, který obsahoval popaly od broušení zámku lopatky. U toho vzorku bylo provedeno celkem 30 vpichů. Nastavena matice byla v souřadnici  $x=3$  vpichů a  $y=10$  vpichů. První souřadnice  $y$  byla 100 um od okraje vzorku, další souřadnice pokračovala v hodnotách 160 um.



Naměřené hodnoty:

Tab. 6.1 Průměrné hodnoty HV v souřadnici x

X (mm)	0,1	0,26	0,42	0,58	0,74	0,9	1,06	1,22	1,38	1,54
HV1	385,99	385,98	378,67	382,31	375,08	376,88	382,31	349,77	362,94	419,62
HV2	364,65	376,88	387,85	371,55	399,31	368,07	384,12	368,08	371,56	384,15
HV3	378,66	378,67	376,88	371,55	376,86	369,79	369,8	352,99	373,32	366,37
AVG	376,43	380,51	381,13	375,14	383,75	371,58	378,74	356,95	369,27	390,05



Graf 6.1 Průměrné hodnoty HV v grafické závislosti

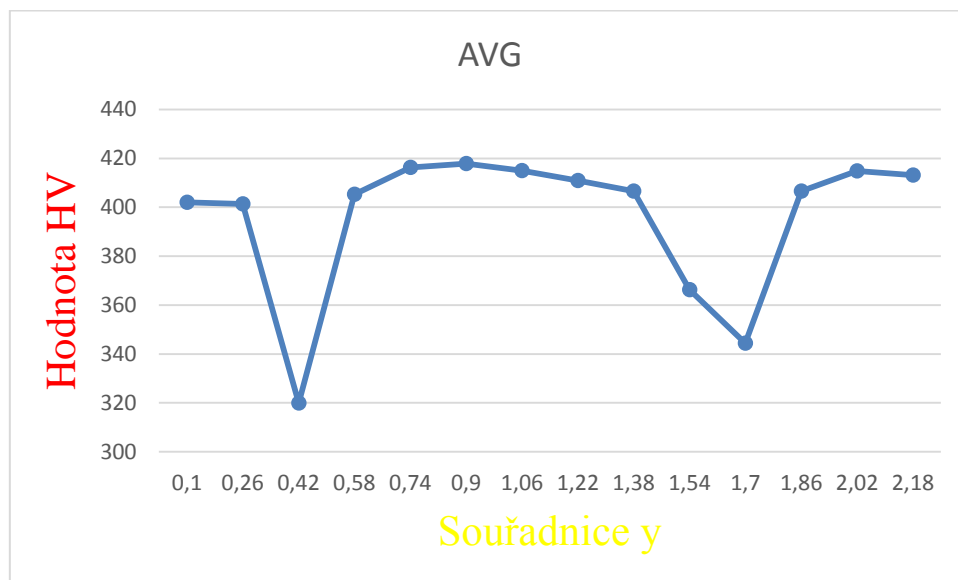
### 6.1.3 Vzorek číslo 2

V dalším měření byla matice nastavena na hodnotu 3x14 vpichů se stejným rozptylem vzdáleností. Z důvodu ne příliš velkých rozdílů v hodnotách HV u prvního vzorku jsem přidal další 4 souřadnice y, abych se ujistil, že hloubka, ve které byl vzorek měřen, nemění hodnoty mikrotvrdosti.

Naměřené hodnoty:

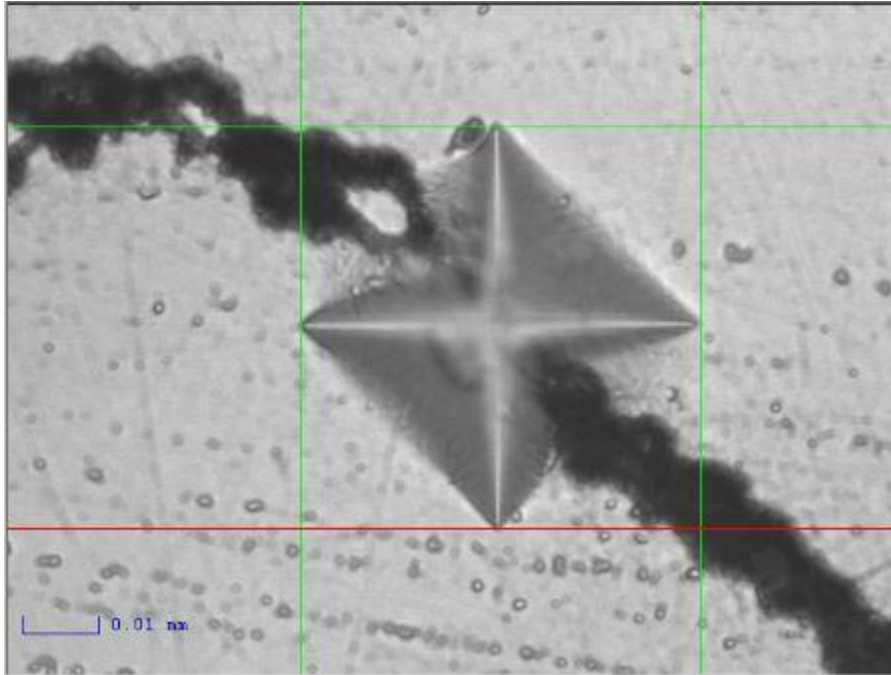
Tab. 6.2 Průměrné hodnoty HV v souřadnici x

X mm	0,1	0,26	0,42	0,58	0,74	0,9	1,06
HV1	409,25	407,24	395,43	411,26	403,25	397,36	421,69
HV2	397,37	391,61	204,87	401,27	423,81	430,3	425,97
HV3	399,31	405,22	359,52	403,24	421,66	425,96	397,37
AVG	401,98	401,36	319,94	405,26	416,24	417,87	415,01
X mm	1,22	1,38	1,54	1,7	1,86	2,02	2,18
HV1	393,52	405,24	395,41	417,47	407,23	428,09	434,69
HV2	425,95	407,25	283,97	208,5	399,3	409,23	407,27
HV3	413,34	407,24	419,57	407,22	413,33	407,23	397,36
AVG	410,94	406,58	366,32	344,4	406,62	414,85	413,11

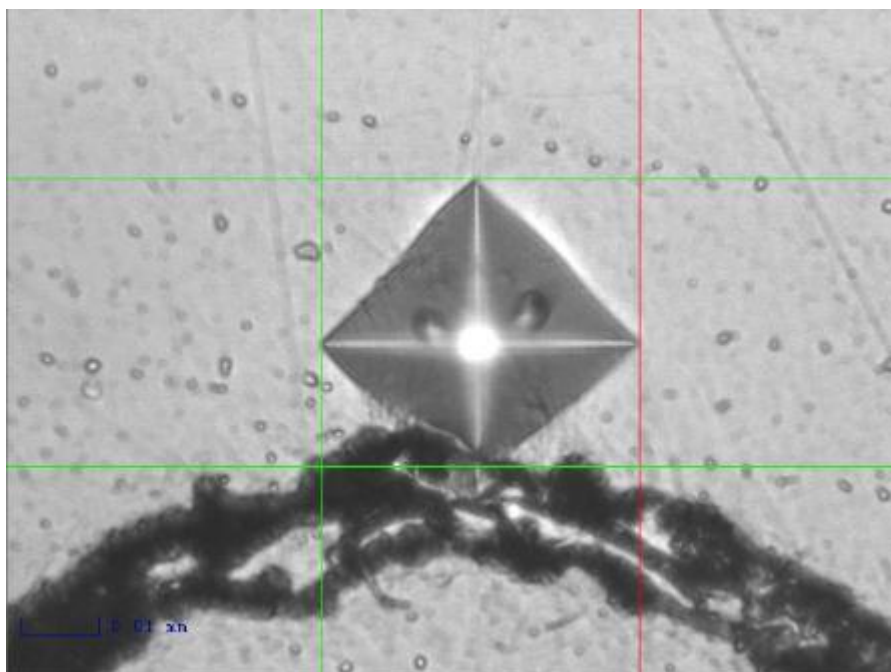


Graf 6.2 Hodnoty HV vzorku č.2

U tohoto vzorku je zjevný propad hodnoty HV v souřadnici  $y=0,42$  mm a  $y = 1,7$ . Tento jev však není vinou změny integrity povrchu po broušení, ale však licí vadou. V těchto hodnotách byla pod mikroskopem zjevná plena strusky, která vznikla při lití odlitku (Obr 6.13). Díky těmto plenám byla hodnota HV nižší než v případě, kde byl vpich v celistvém materiálu, kde byla velikost vpichu v průměru 38-40  $\mu\text{m}$  a hodnota HV 400 až 410. Hodnoty vpichů do plen byly  $d = 50$   $\mu\text{m}$  a hodnoty HV 200-250.



Obr. 6.12 Vpich v souřadnici  $y = 0,42$  mm do licí vady



Obr. 6.13 Vpich v souřadnici  $y = 1,7$  do licí vady.

#### 6.1.4 Závěr měření

Mikrotvrdotost byla měřena na 2 vzorcích, které měly zjevné popaly od předešlého broušení zámku. U prvního vzorku, kde jsem provedl 10 vpichů v souřadnici  $y$ , jsem se dostal díky uhlovému přípravku do hloubky 0,365 mm pod povrch, u druhého vzorku do hloubky

0,511 mm. Všechny hodnoty se nijak markantně neliší, kromě deviací, které vznikly vpichem do míst, kde byla licí vada. Z tohoto důvodu usuzuji, že hodnota mikrotvrdosti se v místech popalu nijak nemění vůči místům, kde materiál není nijak porušený od dokončovacích metod.

## **6.2 Analýza makrostruktury**

K této zkoušce jsem dostal k dispozici sadu 15 lopatek. Mým úkolem bylo zjistit, zda mapy na zámku lopatky, které bohužel fotoaparát nezachytil, jsou ovlivněny hranicemi zrn struktury Inconelu 718. Pro představu, mapa měla lehce tmavší odstín, oproti okolnímu materiálu a na pohmat byla zjevná zvýšená hrubost.

### **6.2.1 Příprava vzorku**

Sada 15 lopatek byla již očištěna předem. U každé lopatky, která měla na zámku zjevný popal nebo mapu, jsem tato místa označil pomocí elektropopisovacího pera.

### **Leptání**

Leptání proběhlo pomocí směsi kyseliny chlorovodíkové (HCl) a peroxidu vodíku (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) v poměru 70% peroxidu a 30% kyseliny. Toto leptání se nazývá chemické leptání na hranice zrn.

Lopatky jsem pomocí kleští máčel v této směsi po dobu zhruba jedné minuty. Po vyjmutí z kyseliny následoval dvojitý oplach v čisté vodě. Po oplachu jsem lopatky vložil do kádě s vodou, aby bylo jisté, že při další manipulaci nebudou na lopatkách zbytky kyseliny.

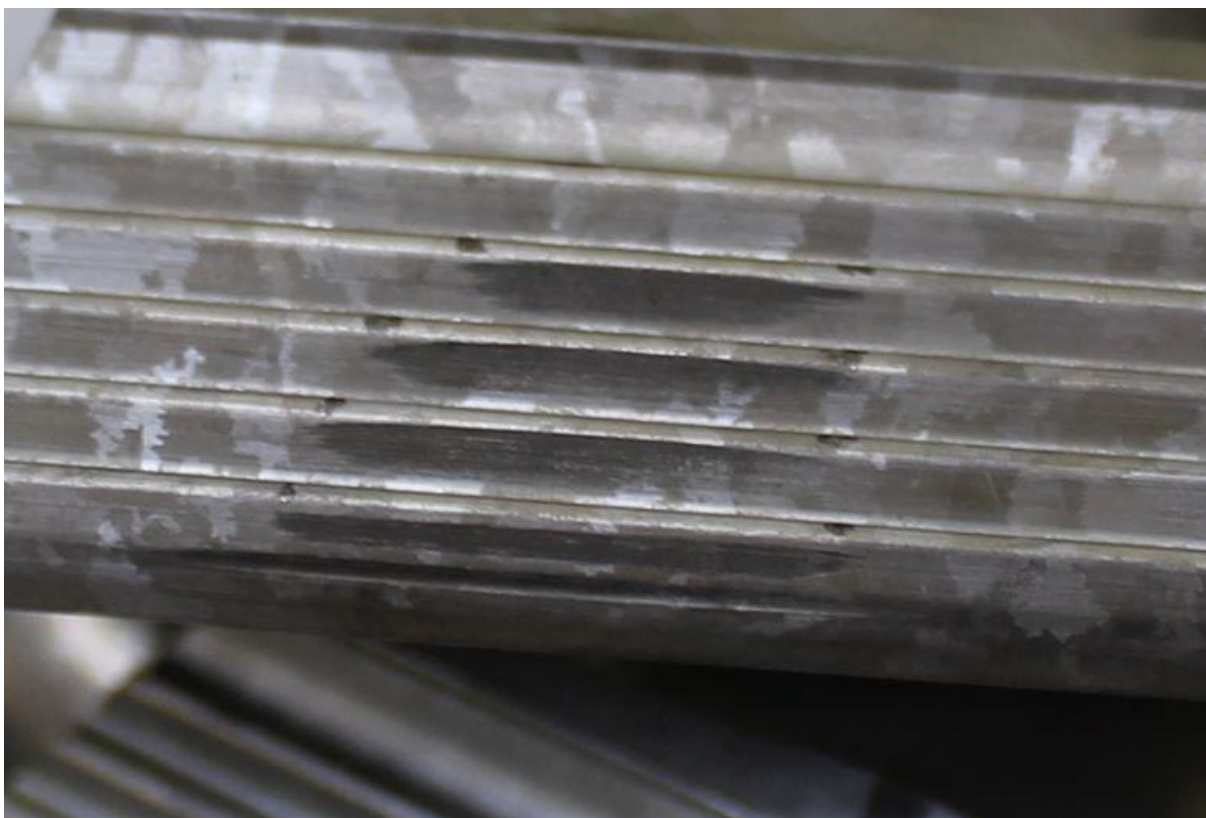
### **6.2.2 Vyhodnocení zkoušky**

Po leptání všech 15 lopatek následovalo vyjmutí z kádě a následné osušení (Obr. 6.14). Po osušení jsem se zaměřil na lopatky, které jsem měl označené elektroperem, abych zjistil, zda je přímá souvislost s hranicí zrna a vzniku mapy, či dislokace.

Po zhodnocení všech vzorků, které byly označeny, jsem nezjistil žádnou souvislost mezi hranicí zrna materiálu a vznikem popalu či mapy (Obr. 6.15). Z toho usuzuji, že vznik popalů ani map nemá nic společného s makrostrukturou materiálu, a tím pádem ani s orientací zrn.



Obr. 6.14 Sada 15 lopatek po procesu leptání



Obr. 6.15 Detail popalu a struktury materiálu

### **6.3 Kapilární zkouška**

Na tuto zkoušku jsem dostal k dispozici sadu 10 lopatek, na kterých jsem provedl kapilární zkoušku. Všechny lopatky byly ze dvou sad, které byly společně broušené. Zkouška se opět prováděla na broušeném zámku.

#### **6.3.1 Postup zkoušky**

Všechny lopatky jsem pečlivě odmastil a vyčistil chemickým čističem určeným pro tuto zkoušku. Před nanesením penetrantu jsem se vizuálně ujistil, zda na lopatkách nejsou zbytky mastnoty či jiných nežádoucích nečistot.

Po důkladném očištění následovalo nanesení detekční tekutiny (Obr. 6.16). Všechny prostředky, které jsem využíval při této zkoušce, byly ve formě spreje. Detekční tekutinu jsem nechal působit 45 minut, abych měl jistotu, že se tekutina dostala do všech případných dislokací.



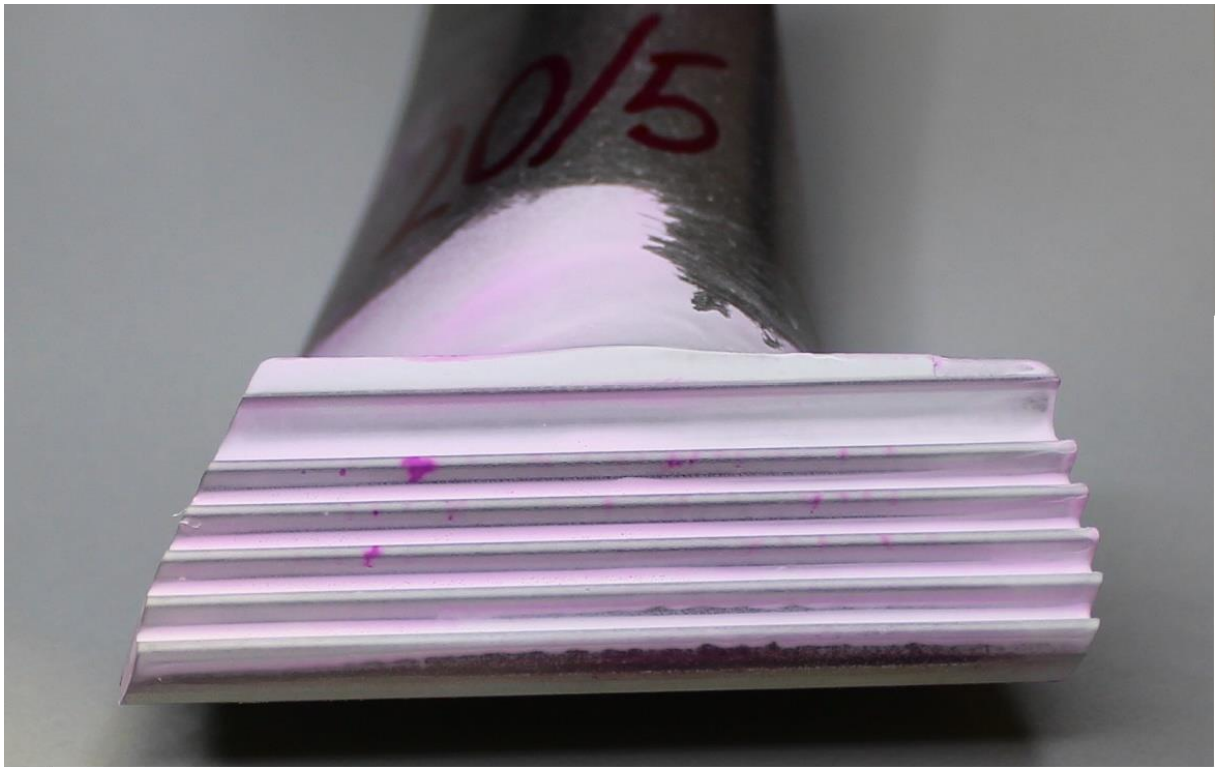
Obr. 6.16. Lopatka 15/5 po nanesení detekční tekutiny

Následné čištění přebytečné detekční tekutiny jsem provedl pomocí hadříku bez použití tekoucí vody nebo chemického čističe, které urychlují proces čištění, ale v případě přehnaného použití mohou detekční tekutinu odstranit i z vad a degradovat tuto zkoušku, proto jsem se rozhodl je nepoužít.

V posledním kroku následovalo nanesení vývojky, kterou jsem nechal působit 30 minut, jak je doporučeno výrobcem.

### 6.3.2 Vyhodnocení zkoušky

Z celkového počtu 10 lopatek nebylo u 8 lopatek zjištěno žádné poškození. U lopatek 10/5 a 20/5 se však objevily stopy poškození. Již při čištění bylo zjevné, že tyto lopatky na svých zámcích nesou stopy popalů. Kapilární zkouška potvrdila, že v místech popalů vznikají trhliny a poškození materiálu. (Obr. 6.17, Obr. 6.18).



Obr. 6.17 Detail lopatky 20/5 při vyhodnocování zkoušky



Obr. 6.18 Detail lopaty 10/5 při vyhodnocování zkoušky



## 6.4 Vyhodnocení výsledků

Současná technologie broušení zámku lopatek z materiálu Inconel 718 je založena na broušení pěti lopatek v jednom přípravku upnutých v řadě za sebou. Lopatky, u kterých jsem zjistil vadu v podobě popalu, byla vždy pátá lopatka v řadě přípravku. Jako hlavní důvod vzniku změny integrity povrchu na zámku lopatky jsem vyhodnotil nedostačující chlazení v průběhu broušení spojené s nízkou tepelnou vodivostí tohoto materiálu. Ke konci tohoto procesu již může být teplota kotouče vysoká, a tím pádem dojde ke vzniku tohoto poškození. Dalším možným důvodem je těžká obrobiteľnosť materiálu a jeho uplívání na nástroji, díky němuž mohou být páté lopatky tímto faktem poškozeny. Lopatky, které jsou broušeny na začátku této řady, nejsou nijak poškozené. Důvodem může být proces orovnávaní kotouče diamantovou rolnou před začátkem procesu broušení.

Mapy, které vznikají v průběhu broušení, nijak nesouvisí se strukturou materiálu a jejich vznik jsem vyhodnotil jako náhodný, bez spojitosti s procesem broušení.

Mikrotvrдость materiálu není nijak ovlivněna broušením a teplotními změnami, oproti mikrotvrđosti materiálu, který broušen nebyl.

## 7 Závěr

Cílem mé práce bylo popsat problematiku broušení, broušení superslitin, problematiku superslitin, popis analytických metod pro vyhodnocení integrity povrchu a provedení těchto zkoušek na vzorcích lopatek z materiálu Inconel 718 dodaných První brněnskou strojírnou a.s., kde byly shledány neshody při broušení zámků lopatek.

V první části práce jsem se věnoval nastudování teoretických znalostí v oblasti broušení, brusných materiálů, pojiv, kotoučů, problematiky superslitin a analytických metod pro určení integrity povrchu.

Z této části práce jsem vyhodnotil, zdali byly použity vhodné nástroje a podmínky pro broušení těchto superslitin. V dalším kroku jsem vybral tři analytické metody, kterými jsem určil integritu povrchu zámků dodaných vzorků. Konkrétně z nedestruktivních defektoskopických zkoušek byly vybrány dvě zkoušky, a to kapilární zkouška, která určila poškození integrity povrchu na dvou lopatkách, a zkouška makrostruktury (leptání na hranici zrna materiálu), pomocí které jsem vyhodnocoval souvislost mezi vznikem neidentifikovatelných map a orientací a hranici zrna.

Jako poslední jsem provedl měření mikrotvrdomosti. Tímto měřením jsem chtěl zjistit, zdali proces broušení ovlivňuje hodnotu mikrotvrdomosti a pokud ano, do jaké míry a hloubky.

V praktické části práce jsem vzorky podrobil všem výše uvedeným zkouškám. Kapilární zkouška poukázala porušení integrity povrchu zejména na dvou vzorcích, které byly upnuté v přípravku jako páté (poslední). Na vzorcích jsem dále provedl zkoušku pozorování na hranici zrna, abych zjistil souvislost mezi neidentifikovanými mapami a místy, které jsem diagnostikoval jako popal a hranice zrna. Tato zkouška však tuto souvislost nepotvrdila. Měření mikrotvrdomosti také nepotvrdilo změnu tvrdosti broušených ploch vzorků. Všechny tyto zkoušky jsem provedl v laboratoři fakulty strojní, ČVUT.

## 8 Zdroje

- [1] VĚCHET, Mojmir, Jaroslav KESL, Lumír ŠPIKA a Vladimír EDER. *DEFEKTOSKOPIE v otázkách a odpovědích*. První vydání. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1989.
- [2] VEČERA, Jiří. *MATERIÁLY POUŽÍVANÉ V LETECKÉM PRŮMYSLU* [online]. Brno, 2011 [cit. 2016-06-14]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=41555](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41555). Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Simona Pospíšilová.
- [3] *DEFEKTOSKOPIE ODLITKŮ V PRAXI*. První vydání. Brno: ČVST Dům techniky Brno, 1975.
- [4] PLUHARĚ, Jaroslav. *NAUKA O MATERIÁLECH*. První vydání. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1989.
- [5] SILBERNAGEL, Arnošt, Vojtěch HRUBÝ, Miroslav GREGER a Jiří NĚMEC. *STRUKTURA, VLASTNOSTI, ZKOUŠENÍ A POUŽITÍ KOVŮ*. První vydání. Ostrava: KOVOLIS, 2011. ISBN 978-80-903694-6-7, 2011.
- [6] MACHÁČ, Miroslav. *MĚŘENÍ TVRDOSTI MATERIÁLŮ A ZPRACOVÁVÁNÍ ZJIŠTĚNÝCH HODNOT* [online]. BRNO, 2010 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=27306](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27306). VUT.
- [7] MICHNOVÁ, Lenka. *ÚVOD DO METALOGRAFIE: Metodická příručka*. Praha: Centrum pro studium vysokého školství, 2015. ISBN 978-80-86302-71-3.
- [8] MICHNA, Š., KUŠMIERCZAK, S. *Praktická metalografie*. Ústí nad Labem: UJEP, 2012, 245 s., ISBN 978-80-7414-503-2
- [9] AUTOR NEUVEDEN. *Labormechine* [online]. [cit. 15.6.2016]. Dostupný na WWW:  
[https://www.google.cz/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&act=8&ved=0ahUKEwiq7KvBuqnNAhXQhRoKHcXzAegQjRwIBw&url=http%3A%2F%2Flabormachine.cz%2Fnovinky%2Fmikro-tvrdomer-vickers-schv-v3-0s%2F&psig=AFQjCNHwDThr2QAp\\_rx6Ke6gRWCoK7L7dA&ust=1466060326826991](https://www.google.cz/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&act=8&ved=0ahUKEwiq7KvBuqnNAhXQhRoKHcXzAegQjRwIBw&url=http%3A%2F%2Flabormachine.cz%2Fnovinky%2Fmikro-tvrdomer-vickers-schv-v3-0s%2F&psig=AFQjCNHwDThr2QAp_rx6Ke6gRWCoK7L7dA&ust=1466060326826991)
- [10] MĚŘENÍ TVRDOSTI [online]. [cit. 2016-06-05]. Dostupné z: <http://www.merenitvrlosti.cz/tvrlost.html>
- [11] VOJTĚCH D.: *KOVOVÉ MATERIÁLY*. 1. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-600-1.

- [12] INTEGRITA POVRCHU. *Ateam ZČU* [online]. Plzeň: Západočeská Univerzita [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/download/Integrita\\_Urban1.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/download/Integrita_Urban1.pdf)
- [13] *INTEGRITA POVRCHU A JEJÍ VÝZNAM PRO POSOUZENÍ VHODNOSTI DANÉ PLOCHY PRO JEJÍ FUNKCI* [online]. In: BUMBÁLEK, Bohumil. Brno: VUT [cit. 2016-07-10]. ISBN 978-80-214-4352-5. Dostupné z: [http://cp.forever.cz/sites/default/files/8s\\_Bumbalek\\_integrita.pdf](http://cp.forever.cz/sites/default/files/8s_Bumbalek_integrita.pdf)
- [14] MÁDL, Jan, Jindřich KAFKA, Martin VRABEC a Rudolf DVOŘÁK. *TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ: 3. díl*. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 8001020916.
- [15] HOLEŠOVSKÝ, František. *ABRAZIVNÍ METODY DOKONČOVÁNÍ POVRCHU* [online]. Praha: Centrum pro studium vysokého školství, v.v.i., 2015 [cit. 2016-06-24]. ISBN 978-80-86302-68-3.
- [16] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 3. část* [online]. In: . Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2005 [cit. 2016-06-25]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci\\_a\\_nekonvencni\\_metody\\_obrabeni/TI\\_TO-3.cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf)
- [17] *ZKOUŠKY TVRDOSTI* [online]. Plzeň: ZČU [cit. 2016-06-25]. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky\\_tvrlosti.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf)
- [18] [online]. In: . [cit. 2016-06-25]. Dostupné z: [https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/images/23032/content\\_TvrlostHB.png](https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/images/23032/content_TvrlostHB.png)
- [19] *SYSTÉM KRUHOVÉHO SVĚTLA PRO OPTIMÁLNÍ ZKOUŠKY PODLE BRINELLA* [online]. [cit. 2016-06-25]. Dostupné z: [http://www.duravision.com/cz/duravision\\_side2\\_ringLightSystem.html](http://www.duravision.com/cz/duravision_side2_ringLightSystem.html)
- [20] *ZKOUŠKA TVRDOSTI DLE ROCKWELLA* [online]. 2002 [cit. 2016-06-25]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrlost-rockwell.htm>
- [21] *NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY MATERIÁLU* [online]. [cit. 2016-06-26]. Dostupné z: [http://uvp3d.cz/drtic/?page\\_id=2056](http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2056)
- [22] *ULTRAZVUKOVÉ ZKOUŠKY MATERIÁLU A VÝKOVKŮ* [online]. [cit. 2016-06-26]. Dostupné z: <http://www.triangolo.cz/vyrobni-moznosti/ultrazvukove-zkousky-vykovku.html>

- [23] VÍTÁMVÁS, Zdeněk. *MODERNÍ DIAGNOSTICKÉ METODY POUŽÍVANÉ V DEFEKTOSKOPII* [online]. Brno, 2009 [cit. 2016-06-26]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=15173](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15173). Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Ing. MARTIN JULIŠ, Ph.D.
- [24] BULA, Tomáš. *RACIONALIZACE VÝROBY SOUČÁSTI Z NIKLOVÉ SLITINY* [online]. Brno, 2014 [cit. 2016-06-28]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=85918](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=85918). Vedoucí práce Ing. OSKAR ZEMČÍK, Ph.D.
- [25] *INCONEL 718* [online]. [cit. 2016-06-28]. Dostupné z: <http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20718.pdf>
- [26] *INCONEL HISTORY* [online]. [cit. 2016-06-28]. Dostupné z: <http://www.specialmetals.com/history.php>
- [27] SLABÝ, Ondřej. *SESTAVENÍ TECHNOLOGIE ROTAČNÍ*
- [28] *SOUČÁSTI Z MATERIÁLU INCONEL V PODMÍNKÁCH FIRMY FRENCKEN BRNO* [online]. Brno, 2009 [cit. 2016-06-28]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=17059](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17059). Bakalářská. VUT. Vedoucí práce ING. MILAN KALIVODA.
- [29] MASLOV, J.N. *TEORIE BROUŠENÍ KOVŮ*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1989.
- [30] ROWE, Brain. *PRINCIPLES OF MODERN GRINDING TECHNOLOGY*. Druhé. Oxford: Elsevier Inc., 2014. ISBN 978-0-12-32324271-4.
- [31] Fázové diagramy. *MINERALOGIE* [online]. [cit. 2016-06-30]. Dostupné z: [http://mineralogie.sci.muni.cz/kap\\_6\\_5\\_diagram/kap\\_6\\_5\\_faz\\_diagram.htm](http://mineralogie.sci.muni.cz/kap_6_5_diagram/kap_6_5_faz_diagram.htm)
- [32] DOBROVOLNÝ, Bohumil. *BROUŠENÍ KOVŮ*. Druhé přepracované vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962.
- [33] *ZNAČENÍ BRUSNÝCH KOTOUČŮ* [online]. [cit. 2016-07-01]. Dostupné z: <http://zozei.sssebrno.cz/brouseni---podstata-brousici-nastroje-tvary-a-znaceni-kotoucu/>
- [34] *TŘÍSKOVÉ BROUŠENÍ* [online]. [cit. 2016-07-01]. Dostupné z: [https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/images/10731/content\\_tvary\\_brusnych\\_kotoucu.jpg](https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/images/10731/content_tvary_brusnych_kotoucu.jpg)
- [35] DÖMÉNY, Tibor. *ANALÝZA VLIVU PARAMETRŮ PROCESU BROUŠENÍ NA INTEGRITU OBROBENÉ PLOCHY SE ZAMĚŘENÍM NA ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ* [online]. Brno, 2009 [cit. 2016-07-03]. Dostupné z:

[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=18781](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18781).  
Diplomová práce. VUT.