



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# INTEGRITA POVRCHU PŘI VYSTRUŽOVÁNÍ S VYUŽITÍM VYSTRUŽOVACÍ HLAVICE MT3

SURFACE INTEGRITY AT REAMING WITH MODERN REAMING HEAD MT3

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. Luboš HAVLÍK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Karel KOUŘIL, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Luboš Havlík

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Integrita povrchu při vystružování s využitím vystružovací hlavice MT3**

v anglickém jazyce:

### **Integrity surface at reaming with modern reaming head MT3**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zaměří na sledování a hodnocení integrity nově vzniklého povrchu po operaci přesného vystružování, při využití moderních vystružovacích hlavic MT3 fy HAM-FINAL. Povrch bude vyhodnocován z hlediska profilu povrchu, mechanických vlastností a dále rozměrové přesnosti vystruženého otvoru. Na základě provedených měření budou vyvozeny závěry.

Cíle diplomové práce:

Student by se měl seznámit s problematikou vysoce produktivního přesného vystružování při využití moderních vystružovacích MT3 hlavic fy HAM-FINAL. Cílem práce je vyhodnocení vlivu MT3 hlavice s břity a vodítky na obrobený povrch prostřednictvím hodnocení integrity nově vzniklého povrchu. Ze zjištěných poznatků budou vyvozeny závěry.

Seznam odborné literatury:

BUMBÁLEK, B. Vysoce přesné metody obrábění a jejich fyzikální podstata. Brno: Vysoké učení technické v Brně. 2004.

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM Brno s.r.o. 2006. ISBN 80-214-2374-9.

SHAW, MILTON C. Metal Cutting Principles. New York, Oxford: Oxford University Press, 2005.

ZETEK, M., KRÍŽ, A., ŠKARDA, J. Řezné síly při vrtání těžkoobrobitelných materiálu o vysoké pevnosti a tvrdosti. České Budějovice: Příspěvek na Mezinárodní konferenci při příležitosti 55. výročí založení fakulty strojní VŠB-Technická univerzita. 2005.

ČERMÁK, J. Soudobé otěruvzdorné povlaky a jejich vliv na efektivní využití řezných nástrojů ze slinitých karbidu. Brno: Vysoké učení technické v Brně. 2009, ISBN 978-80-214-3901-6.

KOVÁŘ, L. Hodnocení deformačního chování materiálu při řezání na základe stability a nestability plastické deformace a smykového napětí v primární oblasti plastické deformace. Brno: VUT v Brně. 2002.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Kouřil, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 21.11.2011

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## ABSTRAKT

Diplomová práce se zaměřuje na problematiku integrity povrchu při vystružování s využitím vysoce produktivní vystružovací hlavice MT3 firmy HAM-FINAL. V teoretické části práce je kladen hlavní důraz na rozbor nejčastěji hodnocených parametrů integrity povrchu a jejich možný vliv na funkční vlastnosti obrobených součástí. V teoretické části práce je rovněž uvedena stručná charakteristika vystružovacího procesu, vystružovacích nástrojů a představení konstrukčního řešení vystružovací hlavice MT3 a její praktické aplikace ve firmě Sauer Danfoss. Cílem experimentální části práce je hodnocení integrity povrchu obrobených zkušebních otvorů vystružovací hlavicí MT3 po dobu její trvanlivosti dle vybraných parametrů integrity povrchu.

### Klíčová slova

Integrita povrchu, vystružování, vystružovací nástroj

## ABSTRACT

The Master's thesis is focused on surface integrity at reaming with high productive reaming head MT3 made by HAM-FINAL. Theoretical part of thesis aims at analyse of the most frequently evaluated surface integrity parameters and its possible influence on functional performance of machined components. Next theoretical parts are aimed at reaming process, reaming tools characteristics, detailed reaming head MT3 characteristics and its application in company Sauer Danfoss. The aim of experimental part of thesis is surface integrity of holes reamed MT3 during its tool life evaluation.

### Key words

Surface integrity, reaming, reaming tool

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HAVLÍK, Luboš. *Integrita povrchu při vystružování s využitím vystružovací hlavice MT3*. Brno 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 88 s. přílohy 3. Vedoucí práce Ing. Karel Kouřil, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Integrita povrchu při vystružování s využitím vystružovací hlavice MT3** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum

.....  
Bc. Luboš Havlík

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto Ing. Karlu Kouřilovi, Ph.D. za čas věnovaný konzultacím a za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Další mé poděkování patří firmě HAM-FINAL, která mi umožnila realizovat tuto diplomovou práci.

**OBSAH**

<b>ABSTRAKT .....</b>	<b>4</b>
<b>PROHLÁŠENÍ.....</b>	<b>5</b>
<b>PODĚKOVÁNÍ .....</b>	<b>6</b>
<b>OBSAH .....</b>	<b>7</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>1 INTEGRITA POVRCHU A JEJÍ SOUVISLOSTI.....</b>	<b>10</b>
1.1 Parametry integrity povrchu .....	10
1.2 Historie integrity povrchu .....	12
1.3 Integrita povrchu a obráběcí proces .....	13
<b>2 NEJČASTEJI HODNOCENÉ PARAMETRY INTEGRITY POVRCHU A JEJICH VLIV NA FUNKČNÍ VLASTNOSTI .....</b>	<b>15</b>
2.1 Textura povrchu.....	15
2.1.1 2D Hodnocení textury povrchu.....	16
2.1.2 3D hodnocení textury povrchu .....	20
2.1.3 Vliv textury povrchu na funkční vlastnosti součástí .....	21
2.2 Zbytková napětí .....	24
2.2.1 Příčiny vzniku zbytkových napětí .....	24
2.2.2 Zbytková napětí po sérii operací .....	26
2.2.3 Vliv zbytkových napětí na funkční vlastnosti součástí .....	27
2.2.4 Měření zbytkových napětí .....	31
2.3 Deformační zpevnění.....	32
2.3.1 Měření mikrotvrdosti.....	34
2.3.2 Základní průběhy tvrdosti v povrchové vrstvě po obrábění .....	36
2.3.2 Faktory ovlivňující deformační zpevnění obrobené plochy.....	37
2.3.4 Vliv deformačního zpevnění na funkční vlastnosti součástí .....	39
2.4 Strukturní, fázové a chemické změny v povrchové vrstvě .....	39
<b>3 VYSTRUŽOVÁNÍ A VYSTRUŽOVACÍ NÁSTROJE.....</b>	<b>41</b>
3.1 Kinematika vystružovacího procesu .....	42
3.2 Stanovení velikosti přídávku pro vystružování.....	43
3.3 Trvanlivost vystružovacího nástroje.....	44
3.4 Výpočet strojního času vystružování .....	44
3.5 Druhy vystružovacích nástrojů.....	45
3.6 Geometrie a tolerance vystružovacího nástroje.....	47
3.7 Řezné materiály vystružovacích nástrojů .....	49
3.8 Procesní kapaliny při vystružování .....	51

<b>4</b>	<b>VYSTRUŽOVACÍ HLAVICE MT3 FIRMY HAM-FINAL .....</b>	<b>52</b>
4.1	Představení firmy HAM-FINAL .....	52
4.2	Konstrukční provedení vystružovací hlavice MT3.....	52
4.2	Konstrukční provedení nástrojů podobných MT3 u jiných firem .....	55
4.3	Praktická aplikace vystružovací hlavice MT3 ve firmě Sauer Danfoss .....	56
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....</b>	<b>59</b>
5.1	Návrh experimentu .....	59
5.2	Zhotovení otvorů.....	60
5.2.1	Polotovar .....	60
5.2.2	Obráběcí stroj .....	60
5.2.3	Postup obrábění a použité nástroje.....	61
5.2.4	Obrobené otvory .....	61
5.3	Vyhodnocení otvorů.....	62
5.3.1	Měření průměru, kruhovitosti a válcovitosti .....	62
5.3.2	Měření drsnosti povrchu.....	63
5.3.3	Příprava vzorků.....	65
5.3.4	Hodnocení povrchových defektů pod elektronovým mikroskopem .....	66
5.3.5	Měření mikrotvrdosti.....	71
5.3.6	Metalografická analýza příčného výbrusu .....	74
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>79</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....</b>	<b>81</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>86</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>88</b>



## ÚVOD

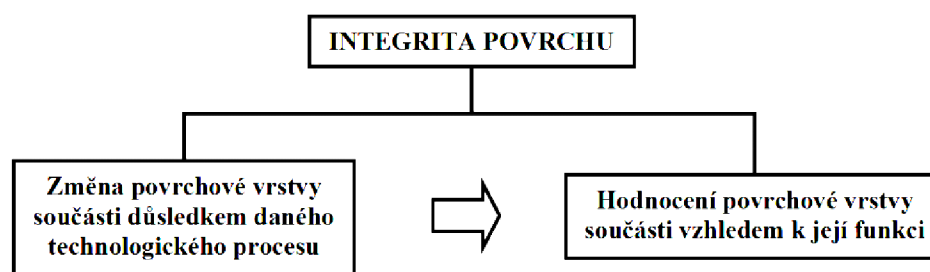
Ve všech výrobních odvětvích je možno v současné době vidět snahu o zvyšování efektivity a produktivity výroby společně se zvyšováním kvality výrobků. Konkrétně u technologie obrábění jsou díky pokrokům v konstrukci obráběcích strojů a rezných nástrojů zaváděny do výroby stále modernější, výkonnější a přesnější stroje a nástroje, které umožňují aplikovat vysoké rezné podmínky a obrábět s vysokou přesností a produktivitou. S ohledem na trend zvyšování kvality vyráběných součástí je třeba si klást otázku, zda čím dál vyšší rezné podmínky, aplikované při obrábění, neovlivňují vlastnosti obrobeného povrchu. Výsledky experimentů i poznatky z praxe ukazují, že ovlivňují a to významně. V průběhu transformace polotovaru na hotovou součást dochází ve výrobním procesu nejen k vytvoření tvaru, rozměru a drsnosti povrchu, které jsou v současnosti u součástí běžně měřeny a hodnoceny, ale i ke změně struktury a vlastností uvnitř povrchu obrobené součásti. Právě tyto změny uvnitř obrobeného povrchu, způsobené deformačními a teplotními jevy v průběhu procesu obrábění, mohou velice negativně ovlivnit funkční chování součásti v provozu. Je statisticky doloženo, že počátek poškození součástí v provozu nastává většinou právě na povrchu, nebo těsně pod ním. Tyto poznatky dokládají nutnost sledování stavu povrchové vrstvy a řízení jejích vlastností zvláště v případech, kdy součásti pracují za podmínek vysokého namáhání a je od nich vyžadována vysoká životnost a spolehlivost. Příkladem mohou být součásti v leteckém, automobilním průmyslu a další. Výsledky odborných publikací i poznatky z praxe ukazují nutnost hodnotit stav povrchu u těchto součástí, jako výsledek určitého technologického procesu, ve vztahu ke konkrétním funkčním podmínkám povrchu v provozu. Takovýto pohled na hodnocení povrchu je dnes často označován integritou povrchu. Řada parametrů integrity povrchu je již dnes zjišťována. Je však třeba, aby byly tyto parametry posuzovány nejen z hlediska dosažených hodnot, ale hlavně z hlediska následných vazeb na výslednou funkci povrchu v provozu<sup>1,6,11,14</sup>.

Pojem integrity povrchu se v praxi do povědomí firem, vyrábějících špičkové strojní součásti, dostává v poslední době spolu s rostoucí snahou o další zvýšení kvality a užitečných vlastností jejich výrobků a uplatnění v zahraniční konkurenci. Tento trend zaznamenávají i výrobci rezných nástrojů, jimž dá znalost ovlivnění materiálu obráběných dílců jejich nástroji, prostřednictvím hodnocení integrity povrchu, nespornou výhodu oproti nástrojům konkurence. Zmíněné skutečnosti si uvědomují i pracovníci firmy HAM-FINAL, vyvíjející vystružovací nástroje, a jeden z nástrojů této firmy, vysoce produktivní vystružovací nástroj MT3, bude testován v experimentální části této práce, kde bude hodnocen vliv tohoto nástroje na povrch obrobených otvorů dle vybraných parametrů integrity povrchu. Vystružovací nástroj MT3 je z konstrukčního hlediska řešen jako tří břitý se dvěma vodítky a lze očekávat ovlivnění povrchové vrstvy obrobených otvorů plastickou deformací a teplotním působením nejen v důsledku řezání břitů nástroje, ale i tváření povrchu vodítky zachycujícími rezné síly břitů. Operace vystružování je většinou dokončovací operací obrábění otvorů a tedy i nejvíce ovlivňuje výsledný stav povrchu. Problematika integrity povrchu po vystružování je však v odborné literatuře, vzhledem k ostatním technologiím obrábění, zmiňována jen ve velice omezené míře. To bylo rovněž dalším důvodem, proč se řešená problematika integrity povrchu týká právě technologie vystružování.

## 1 INTEGRITA POVRCHU A JEJÍ SOUVISLOSTI

S ohledem na vývoj a výrobu stále komplikovanějších zařízení a stálému zvyšování požadavků na jejich životnost a spolehlivost, vzrůstají rovněž požadavky na kvalitu jejich součástí. Kvalitu součástí lze obecně posuzovat dle rozměrové přesnosti, tvarové přesnosti, textury povrchu a vlastností povrchové vrstvy<sup>1,2</sup>.

Jak již bylo zmíněno a později bude dále rozpracováno, obráběcí proces významným způsobem ovlivňuje povrchovou vrstvu obráběné součásti a mění její vlastnosti. Tyto změny v povrchové vrstvě mohou být dány následně do vztahu s budoucí funkcí obrobené plochy a tímto způsobem využity k hodnocení její integrity. Integrity povrchu je tedy odrazem podmínek, za kterých funkční plocha vzniká, bere v úvahu důsledky působení technologických metod na kvalitu obrobené plochy a dává je do vztahu k jejím funkčním požadavkům viz. obr. 1.1<sup>2</sup>.



Obr. 1.1 Podstata integrity povrchu.

### 1.1 Parametry integrity povrchu

Odborná literatura se často liší v představě o integritě povrchu a parametrech povrchu, které zahrnuje. Např. literatura<sup>11</sup> uvádí dva soubory parametrů integrity povrchu viz tab. 1.

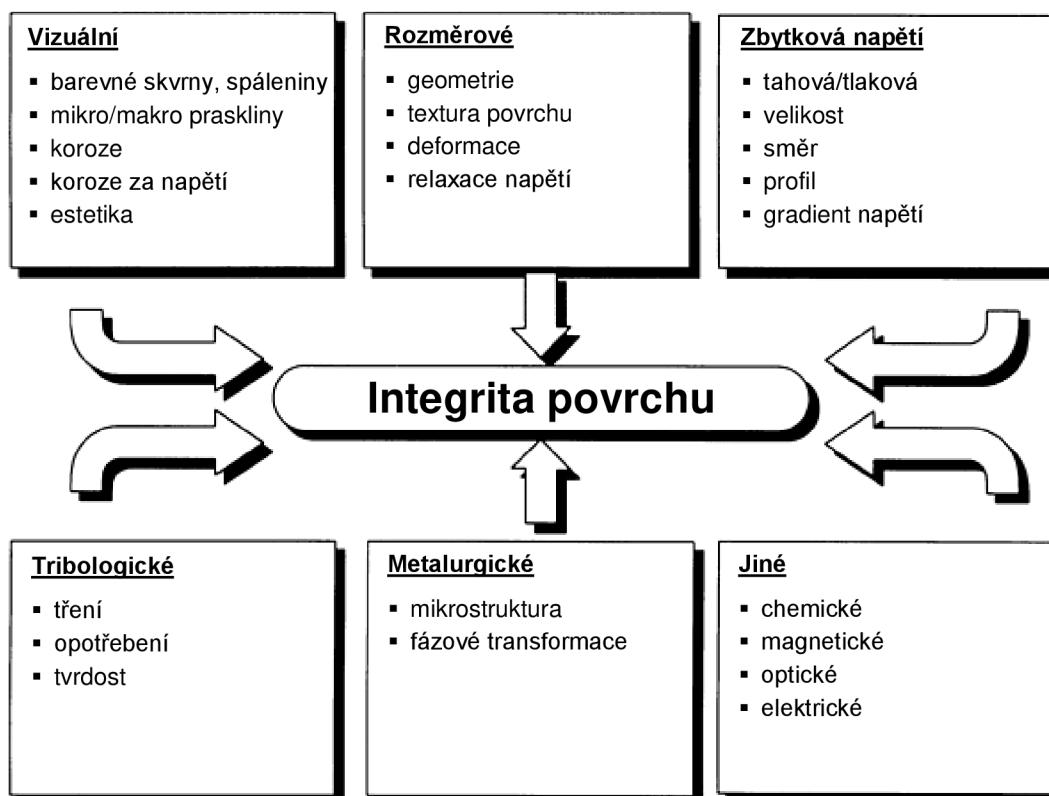
Tab. 1.1 Soubory parametrů pro identifikaci integrity povrchové vrstvy<sup>11</sup>

Základní soubor parametrů	
1. Topografie povrchu	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ drsnost povrchu</li> <li>▪ kontrola existence trhlinek</li> <li>▪ kontrola řádkovací mikroskopii</li> </ul>
2. Metalurgická kontrola povrchu	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ mikrostrukturní změny</li> <li>▪ mikrotrhlinky</li> <li>▪ vměstky</li> <li>▪ mezikrystalická koroze, oxidace</li> <li>▪ průběh mikrotvrdosti</li> </ul>
Úplný soubor parametrů	
Základní soubor parametrů doplněný o následující	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ velikost a průběh zbytkových napětí</li> <li>▪ hodnota vysokocyklové únavy při souměrném střídavém ohybu</li> <li>▪ sklon ke korozi pod napětím</li> </ul>	

Za nejvýznamnější a nejčastěji sledované parametry, které charakterizují integritu povrchu, literatura<sup>11</sup> považuje následující:

- mikrogeometrie obrobeného povrchu
- stupeň a hloubka zpevnění povrchové vrstvy
- strukturní, fázové a chemické změny v povrchové vrstvě
- smysl, velikost a gradient zbytkových napětí

Literatura<sup>8</sup> poskytuje širší pohled na integritu povrchu a uvádí šest skupin klíčových složek, které definují integritu povrchu vyrobené součásti viz obr. 1.2.



Obr. 1.2 Klíčové složky integrity povrchu<sup>8</sup>

Obecně lze shrnout, že integrita povrchu může zahrnovat celou řadu parametrů. Jaké konkrétní parametry integrity povrchu budou vybrány pro hodnocení povrchu, závisí na tom, jaké funkční požadavky bude mít vyrobená součást v provozu. Je třeba detailně znát konkrétní provozní podmínky součásti a tomu přizpůsobit volbu hodnocených parametrů integrity povrchu.

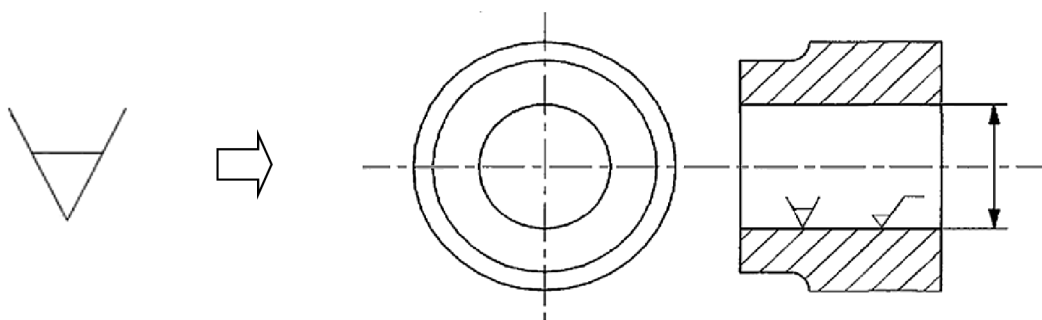
Funkce povrchů mohou být poměrně rozmanité. Některé povrchy mají mechanickou funkci (schopnost snášet mechanické zatížení), tepelnou funkci (tepelná odolnost, tepelná vodivost), tribologickou funkci (odval, kluz, těsnost), optickou funkci (odrazivost) apod<sup>12</sup>. Neexistuje však žádný soubor praktických doporučení, který by udával, jaké parametry integrity povrchu se mají hodnotit při dané konkrétní funkci součásti.

## 1.2 Historie integrity povrchu

Pojem „*integrita povrchu*“ poprvé prezentovali již v roce 1964 Field a Kahles při studiu procesu obrábění vysocepevných ocelí. Integrita povrchu byla definována jako „*podstatná, nebo zdokonalená podmínka vyrobeného povrchu při obrábění, nebo jiných technologických operacích*“<sup>1</sup>.

Následné práce z oblasti studia obrobených povrchů zahrnovali přehled a podstatu změn v povrchové vrstvě obrobku při různých obráběcích procesech a rozbory nových metod a zařízení použitelných pro jejich vyhodnocování. Typické změny povrchu byly identifikovány jako plastická deformace, mikrotrhliny, fázové transformace, změny tvrdosti, přítomnost částí nárustku a zbytková napětí<sup>1,3</sup>.

V roce 1972 Field, Khales a Camet prezentovali detailní popis měřících metod pro hodnocení integrity povrchu. Ve své práci rovněž navrhli soubory parametrů integrity povrchu pro její hodnocení. Tato jejich práce se stala základem pro normu ANSI (The American National Standard for Surface Integrity) B211.1 vydanou v roce 1986. V této normě byl kromě jiného uveden i symbol značení integrity povrchu ve výkresové dokumentaci viz obr. 1.3. Uvedené označení integrity povrchu se na výkresech mělo uvádět spolu s běžným označením drsnosti povrchu<sup>3,4</sup>.



Obr. 1.3 Symbol integrity povrchu a jeho aplikace ve výkresové dokumentaci<sup>4</sup>

Zmíněná norma ANSI B211.1 byla však v roce 1996 bez náhrady zrušena a tudíž v současné době není žádná platná norma definující co je integrita povrchu a jak se má hodnotit. Tomu odpovídají i dříve zmíněné odlišnosti v pojetí integrity povrchu v odborných publikacích<sup>3</sup>.

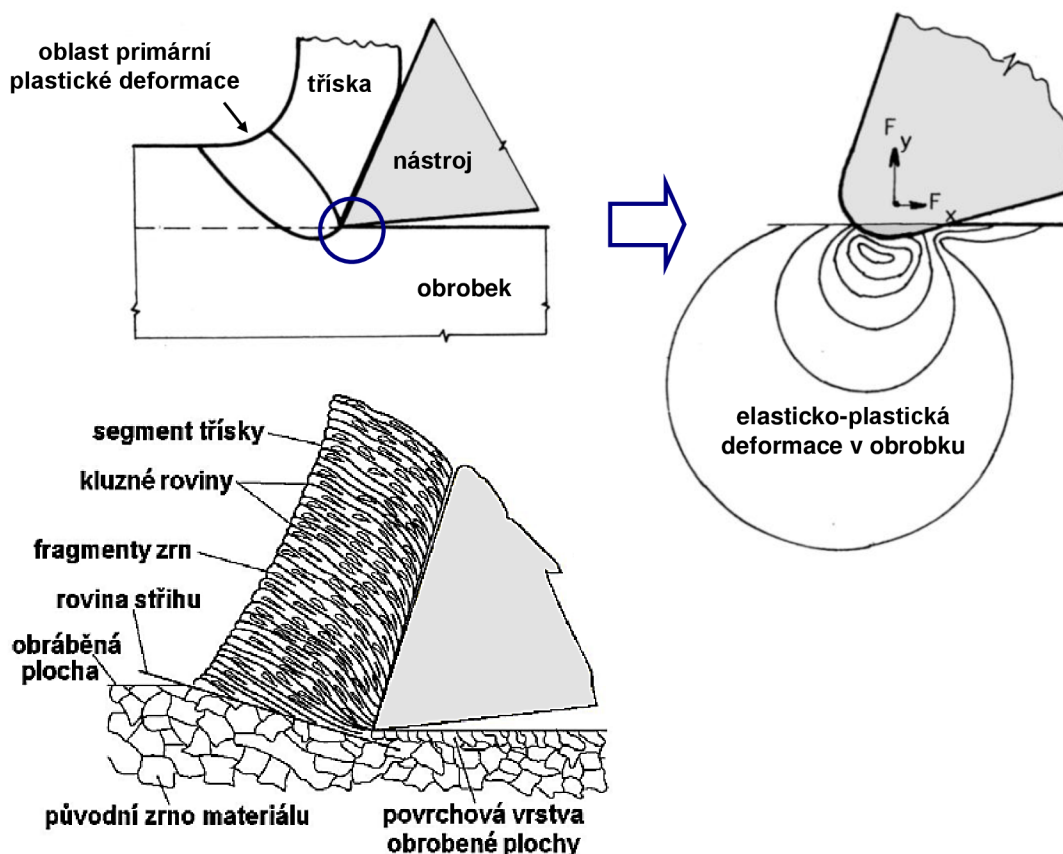
V posledních deseti letech vznikla řada publikací zabývajících se integritou povrchu. Mnoho z nich se zaměřuje na slitiny titanu nebo niklu, které se využívají při stavbě leteckých motorů, a dále také na obrábění kalených ocelí (frézování, soustružení, broušení a jejich porovnání). Tyto materiály jsou využívány pro vysoce namáhané konstrukce s požadavky na vysokou životnost a spolehlivost<sup>3</sup>.

V roce 2008 byla v mezinárodní organizaci CIRP, sdružující přední výzkumné pracovníky z oboru strojírenské technologie, založena pracovní skupina CWG (Collaborative Working Group on Surface Integrity and Functional Performance of Components) a na přelomu ledna a února 2012 se konala 1. konference organizace CIRP k problematice integrity povrchu<sup>3</sup>.

Za hlavní cíle do budoucna si skupina CWG klade vytváření a využívání nových experimentálních nástrojů a technik pro komplexní hodnocení integrity povrchu a dále vývoj modelů umožňujících predikci a vzájemnou souvislost řady parametrů integrity povrchu s funkčním chováním součástí vyráběných obráběcími procesy<sup>3</sup>.

### 1.3 Integrita povrchu a obráběcí proces

Při zkoumání vlastností povrchů strojních součástí je třeba začít u samotné technologie výroby. Zejména je třeba věnovat pozornost vzniku nového povrchu u technologie obrábění, protože právě obrábění se nejvíce podílí na dokončování nejrůznějších strojních součástí a tedy i na konečném stavu povrchu. Každá technologie obrábění na povrchu zanechává určité charakteristické znaky a formuje konkrétní stav povrchu. Na obrobené ploše vznikají nerovnosti. Silovým účinkem řezného nástroje se při obrábění deformuje nejen materiál odcházející ve formě třísky, ale i tenká povrchová vrstva pod obrobeným povrchem viz obr. 1.4. V důsledku deformace a ohřevu teplem, které proces obrábění provází, se v této vrstvě tvoří zbytková napětí a mění se její fyzikálně-mechanické vlastnosti<sup>1,7</sup>.

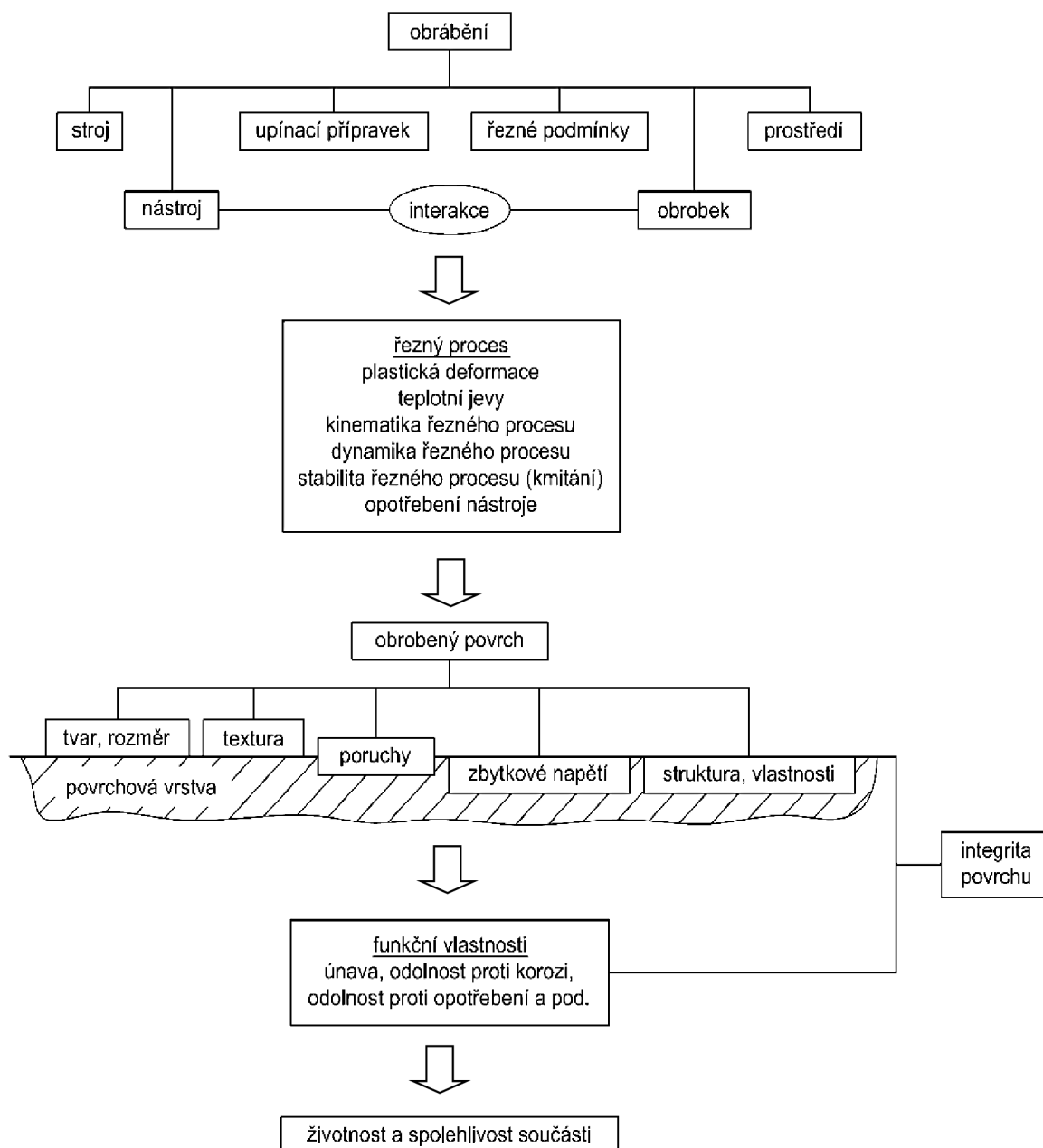


Obr. 1.4 Plastická deformace při procesu řezání<sup>9,10,11</sup>

Při posuzování nově vytvářeného povrchu je nutno vycházet z toho, že v případě řezného procesu se jedná o technologický proces, jehož fyzikální podstatou je plastická deformace, která je nejvíce ovlivňována rychlostí deformace a teplotou<sup>1</sup>.

Mají-li být zabezpečeny funkční vlastnosti výrobku, je nutno volit takové technologické metody, které dávají předpoklady pro dosažení těchto vlastností. Výsledkem těchto metod je povrch, který tvoří rozhraní vyrobené součásti s okolním prostředím<sup>1</sup>.

Schéma postupu vytváření obrobeného povrchu, spolu s naznačením souvislostí integrity povrchu je uvedeno na obr. 1.5.



Obr. 1.5 Postup vytváření nového povrchu při obrábění<sup>7</sup>

## 2 NEJČASTEJI HODNOCENÉ PARAMETRY INTEGRITY POVRCHU A JEJICH VLIV NA FUNKČNÍ VLASTNOSTI

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, mezi nejčastěji hodnocené parametry integrity povrchu patří: mikrogeometrie (textura) povrchu, zpevnění povrchové vrstvy, strukturní změny v povrchové vrstvě a zbytková napětí. Tyto parametry jsou v následujících podkapitolách podrobněji rozebrány spolu s jejich možným vlivem na funkční vlastnosti obrobených součástí.

### 2.1 Textura povrchu

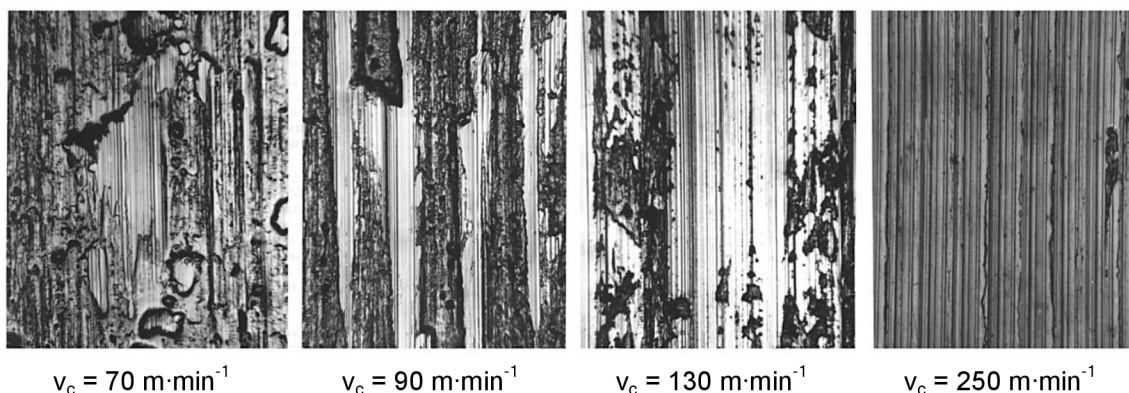
Při procesu obrábění zanechává každá technologická operace na obrobeném povrchu mikronerovnosti, které mají z hlediska jeho budoucí funkce podstatný význam. Charakter nerovností závisí na mnoha vlivech procesu obrábění: geometrie nástroje a kinematika procesu, řezné podmínky, obráběný materiál, procesní kapalina, kmitání soustavy stroj – nástroj – obrobek, opotřebení nástroje apod<sup>5,7</sup>.

V odborné literatuře se lze setkat s pojmy teoretická a skutečná drsnost. Teoretická drsnost odpovídá geometrickým a kinematickým vztahům nástroje a obrobku. Tato drsnost je určena stopou po špičce řezného nástroje pohybujícího se po dané trajektorii. Ze známých geometrických a kinematických poměrů lze teoretickou drsnost určit výpočtem. Vypočtená teoretická drsnost může ale sloužit pouze pro základní náhled na tvorbu povrchu, protože se kromě zmíněných geometrických a kinematických vlivů uplatňují ještě další vlivy a naměřená skutečná hodnota drsnosti i tvar nerovností se může značně lišit<sup>7,18</sup>.

Příčiny změny tvaru profilu a zvýšení skutečné drsnosti obrobeného povrchu oproti vypočteným teoretickým hodnotám drsnosti jsou dány dalšími materiálovými a technologickými vlivy. Z pohledu materiálových vlivů je třeba vycházet z toho, že podstatou řezného procesu je plastická deformace. Do technologických vlivů lze zahrnout kmitání soustavy stroj – nástroj – obrobek, tření hřbetu nástroje po obrobené ploše, nerovnosti ostří řezného nástroje a jejich změny v důsledku opotřebení, řezné prostředí apod. Na zhoršení skutečné drsnosti povrchu se nejvíce podílí materiálové vlivy. Příčinou rozdílnosti teoretické a skutečné drsnosti je deformační proces probíhající před břitem nástroje, který je nejvíce ovlivňován vlastnostmi obráběného materiálu a pracovními podmínkami. Z hlediska vzniku povrchu je nutno se zaměřit na poslední fázi procesu tvoření třísky – lom. Druh a charakter lomu závisí na krystalické stavbě obráběného materiálu a na podmínkách deformace, které jsou dány hlavně řeznými podmínkami<sup>18</sup>.

Z hlediska obráběného materiálu se při obrábění může jednat o materiál, který svými vlastnostmi vykazuje změnu mechanismu tvoření třísky při změně deformační rychlosti, jako je tomu u materiálů s krystalickou BCC mřížkou. U těchto materiálů se při nízkých řezných rychlostech vyskytuje z hlediska hodnocení obrobeného povrchu (lomové plochy) tvárný lom. Při zvyšování řezné rychlosti lom štěpný, při dalším zvýšení se při určité rychlosti začnou tvořit na obrobeném povrchu lesklá místa, která jsou způsobena vyhlazováním plastického povrchu obrobku ostřím nástroje. Při nejvyšších rychlostech je celá obrobená plocha lesklého vzhledu se stopami po nerovnostech ostří řezného

nástroje. Příklad změny textury obrobeného povrchu oceli 12050.1 po soustružení v závislosti na řezné rychlosti je uveden na obr. 6<sup>18</sup>.

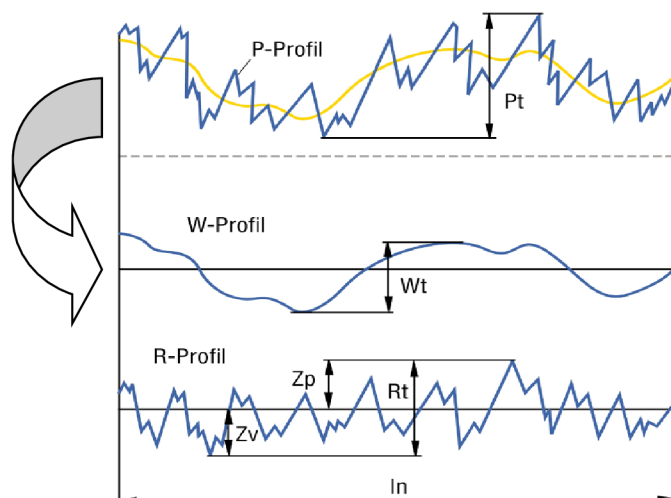


Obr. 2.1 Vliv řezné rychlosti na změnu textury obrobeného povrchu<sup>32</sup>

U materiálů, u kterých nedochází ke změně mechanismu tvorby třísky v závislosti na řezné rychlosti, se dosahuje v podstatě stále stejné drsnosti povrchu s výjimkou drsnosti při nízkých řezných rychlostech, kdy se může tvořit nárustek, který je příčinou zhoršení drsnosti. Tento případ nastává u materiálů s krystalickou mřížkou FCC, kdy oddělování třísky probíhá v celém rozsahu řezných rychlostí stejným způsobem (tvárným lomem) se stopami po nerovnostech ostří nástroje na obrobené ploše<sup>18</sup>.

### 2.1.1 2D Hodnocení textury povrchu

Pro hodnocení textury povrchu jsou nejčastěji využívány normalizované parametry stanovené pro dvourozměrné měření profilu povrchu (2D). Norma ČSN EN ISO 4287:1997 zahrnuje 3 skupiny po 14 parametrech, vypočtených ze základního profilu (P), z profilu drsnosti (R) a z profilu vlnitosti (W) viz obr. 2.2. Uvedená norma stanovuje, že standardní vyhodnocovaná délka pro parametry drsnosti  $l_n$  se skládá z pěti základních délek  $l_r$  ( $l_n = 5 \times l_r$ )<sup>15</sup>.



Obr. 2.2 Profily povrchu<sup>19</sup>

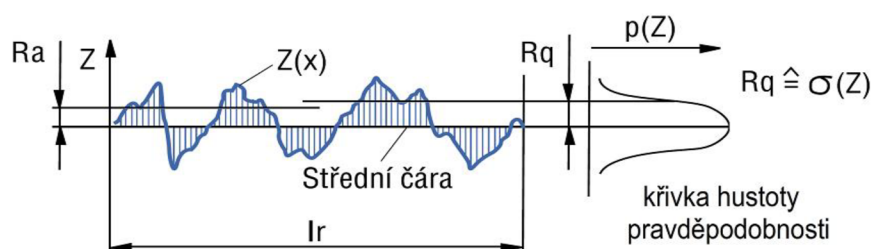


Průzkum organizace CIRP v 284 průmyslových podnicích v 18 zemích světa<sup>16</sup>

- celkem pro hodnocení textury povrchu využíváno 63 parametrů ISO
- normalizované parametry ISO využívá 95 % výrobců, nenormalizované 23%
- z normalizovaných parametrů nejrozšířenější  $Ra$  (92%), již neplatný  $Rz$  z deseti bodů (56%),  $Rz$  (49%) a  $Rt$  (40%)
- pouze parametr  $Ra$  využívá 13% podniků

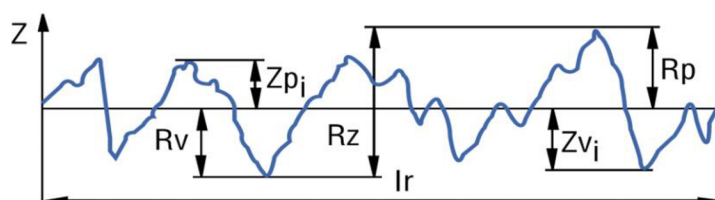
**Průměrná aritmetická úchylna profilu –  $Ra$**  (viz obr. 2.3) je nejčastějším hodnotícím parametrem textury povrchu, nedává však žádné informace o tvaru nerovností povrchu (při stejné hodnotě  $Ra$  se mohou povrchy lišit nejen tvarem, ale i maximální výškou mezi výstupky a prohlubněmi). Z definice vyplývá, že  $Ra$  nerozlišuje mezi výstupky a prohlubněmi<sup>16</sup>.

**Průměrná kvadratická úchylna profilu –  $Rq$**  (viz obr. 2.3) se uplatňuje při statistickém pozorování profilu, protože odpovídá standardní odchylce ze souřadnic profilu<sup>16</sup>.



Obr. 2.3 Znárodnění parametrů profilu  $Ra$  a  $Rq$ <sup>19</sup>

**Největší výška profilu –  $Rz$**  (viz obr. 2.4) je součet výšky největšího výstupku  $Rp$  a hloubky nejhlubší prohlubně  $Rv$  v rozsahu základní délky  $lr$ <sup>15</sup>.

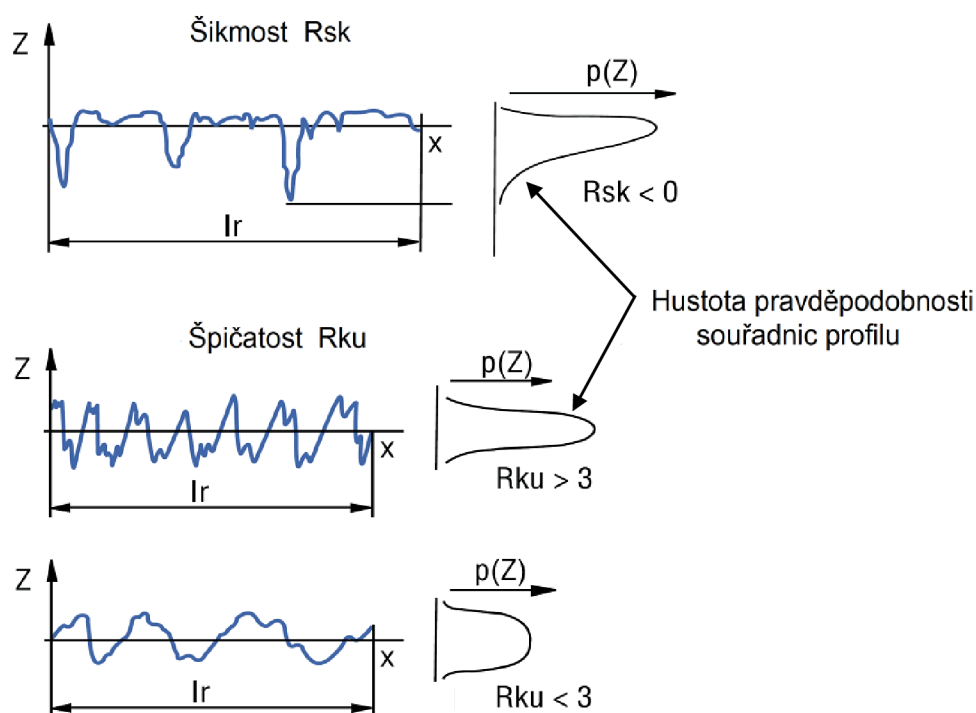


Obr. 2.4 Znárodnění parametrů profilu  $Rz$ ,  $Rp$  a  $Rv$ <sup>19</sup>

**Celková výška profilu –  $Rt$**  (viz obr. 2.2) je součet výšky největšího výstupku  $Zp$  a hloubky nejhlubší prohlubně  $Zv$  v rozsahu vyhodnocované délky  $ln$ <sup>15</sup>.

Analýzy profilu povrchu, získané z měření standardními přístroji, nabízejí mimo běžně užívaných parametrů i řadu netradičních parametrů, které rozšiřují možnosti hodnocení textury povrchu, ale zatím nejsou příliš využívány. Jsou to např. parametry odvozené z křivky hustoty pravděpodobnosti souřadnic, křivky materiálového poměru profilu apod<sup>16</sup>.

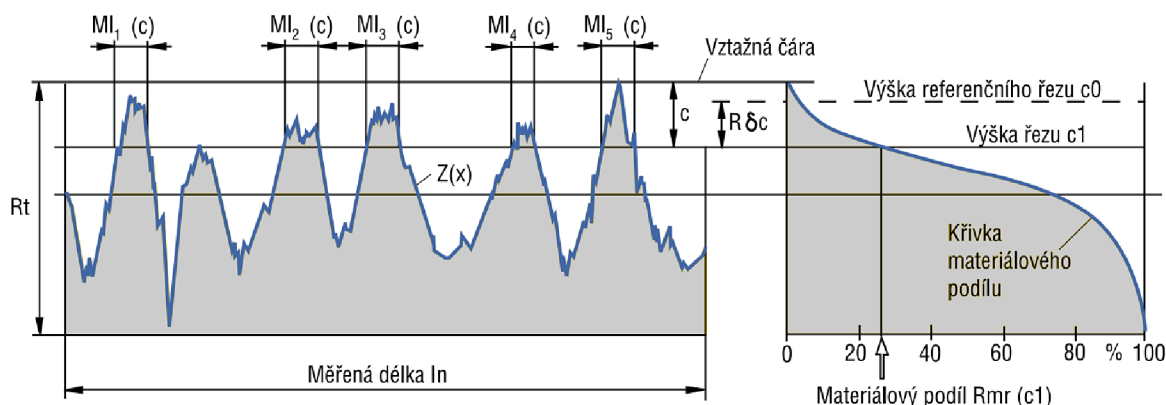
**Hustota pravděpodobnosti souřadnic profilu** se zobrazuje v závislosti na jeho výšce. Tvar křivky hustoty pravděpodobnosti lze posad parametry  $Rsk$  - šikmost posuzovaného profilu a  $Rku$  - špičatost posuzovaného profilu viz obr. 2.5. Tvar rozdělení hustoty pravděpodobnosti je velmi důležitý pro funkci povrchu a v průběhu provozu se mění. Je-li vrchol křivky posunut směrem k výstupkům nerovností  $Rsk < 0$ , profil vykazuje členitější a větší prohlubně. Opačné posunutí vrcholu křivky  $Rsk > 0$  odpovídá povrchu s více a členitějšími výstupky. Šikmost umožňuje rozlišit dva povrchy se stejnou hodnotou  $Ra$ , ale rozdílným tvarem profilu. Prakticky šikmost udává polohu maxima souřadnic bodů profilu povrchu v rozmezí největší výšky nerovností povrchu a špičatost určuje množství těchto souřadnic<sup>16</sup>.



Obr. 2.5 Šikmost a špičatost profilu<sup>19</sup>

U vysoce pórovitých litých nebo spékaných materiálů (např. litiny, slinutých karbidů, apod.) dosahuje šikmost vysokých hodnot. Přesahuje-li šikmost  $\pm 2$ , nepopisuje již hodnota  $Ra$  reálné vlastnosti povrchu a je třeba pro hodnocení využít jiný parametr. Záporná hodnota šikmosti  $Rsk < 0$  ukazuje na povrch s málo výstupky, které se rychle opotřebí, tudíž bude vhodný jako nosná plocha. Naopak u povrchu s kladnou hodnotou šikmosti  $Rsk > 0$  lze předpokládat více výstupků, které mohou zvyšovat přilnavost, a tedy mohou být výhodné v případě nanášení nátěrů nebo povlaků<sup>16</sup>.

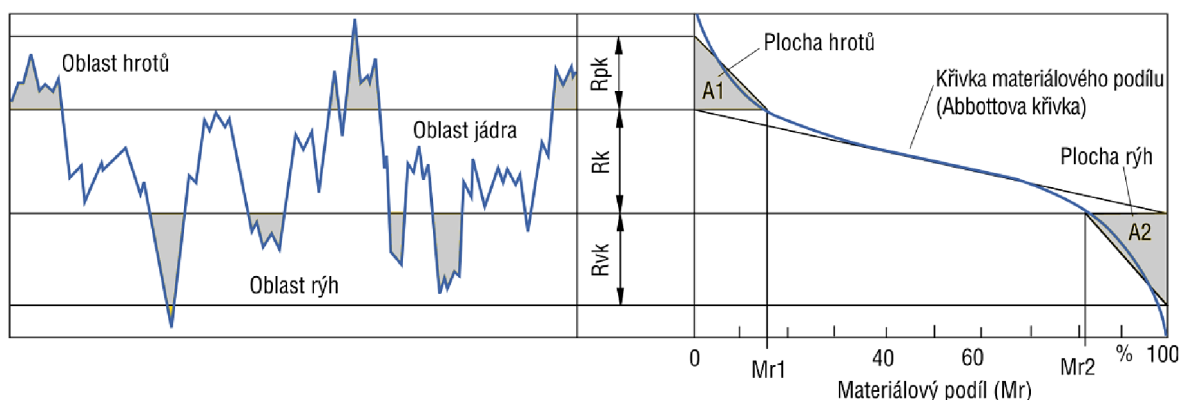
**Materiálový poměr profilu (nosný podíl) –  $R_{mr}$**  (viz obr. 2.6) je procentuální podíl součtu délek materiálových elementů  $MI(c)$  v dané výšce profilu  $c$  k měřené délce  $ln^{15}$ .



Obr. 2.6 Materiálový poměr profilu<sup>19</sup>

Křivka materiálového podílu (nosná křivka), charakteristická pro jednotlivé metody dokončování, hraje důležitou roli z hlediska únosnosti, tření, opotřebení a celkové funkce obrobeného povrchu v tribologii. Tato křivka prakticky ukazuje, jak narůstá nosná délka povrchu směrem dovnitř materiálu napříč celým profilem drsnosti a v provozu také jak se zvětšuje nosná délka povrchu s postupujícím opotřebením<sup>7,17</sup>.

Pro praktické využití je nosná křivka nahrazována přímkami a popsána dalšími parametry, horní část  $R_{pk}$  odpovídá výstupkům povrchu, střední část  $R_k$  odpovídá jádru profilu a spodní část křivky  $R_{vk}$  popisuje velikost a četnost prohlubní na povrchu viz obr. 2.7<sup>17</sup>.



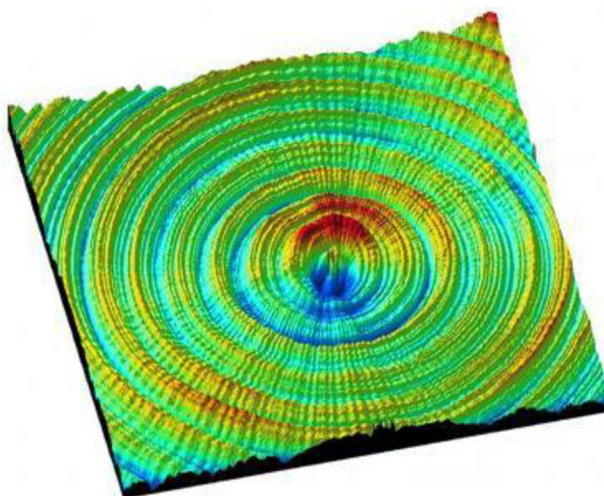
Obr. 2.7 Parametry odvozené z nosné křivky<sup>19</sup>

Hodnota  $R_{pk}$  představuje část profilu povrchu, která se při zatížení rychle opotřebovává a je využitelná pro posuzování charakteru i rychlosti např. zabíhání kluzných i valivých ložisek. Cílem technologie výroby by mělo být z tohoto hlediska dokončení funkčního povrchu s minimální hodnotou  $R_{pk}$ <sup>17</sup>.

### 2.1.2 3D hodnocení textury povrchu

V minulosti byla standardním způsobem měření textury povrchu dotyková metoda, při které byl zaznamenáván vertikální pohyb posunujícího se snímacího hrotu po povrchu. Ze získaných dat byly posuzovány vlastnosti měřeného povrchu. Zpravidla se měřil jeden profil povrchu, což poskytovalo omezené informace pro kontrolu a zejména úpravy výrobního procesu. I když měření jednoho profilu povrchu může poskytnout některé dílčí informace k jeho funkci, je zřejmé, že komplexnější informace o funkci lze získat jen trojrozměrným, tedy prostorovým měřením profilu povrchu. Analýza prostorové charakteristiky povrchu umožní výrobcům vyhodnocovat a ovlivňovat interakci parametrů povrchu s funkčním prostředím. Tak lze zajistit přípravu povrchu s požadovanými optickými, tribologickými, biologickými a dalšími vlastnostmi<sup>20</sup>.

Prostorové měření textury povrchu, v porovnání s hodnocením jednoho profilu zajišťuje objektivnější prezentaci kontrolovaného povrchu, s výrazně vyšším statistickým významem získané charakteristiky. Jednotlivé prostorové parametry textury jsou stanovovány z podstatně většího množství dat, jejich interval spolehlivosti je užší a hodnota parametru přesnější. Prostorové analýzy textury povrchu nabízí mimo početního hodnocení i grafické zobrazení profilu formou axonometrického pohledu, topografické mapy nebo záznamu rozdělení souřadnic viz obr. 2.8<sup>20,21</sup>.



Obr. 2.8 Příklad 3D zobrazení textury soustruženého čela obrobku<sup>20</sup>

Charakteristiky povrchu plochy, např. počet, velikost, tvar a rozložení výstupku a prohlubní profilu, nejen zvyšují objektivitu hodnocení povrchu, ale lze je využít i pro predikci vlastností funkčně zatíženého povrchu a jejich změn v průběhu provozu. Právě rozšíření možností kvantitativního posuzování funkčních vlastností povrchu, např. průběhu opotřebení, tření, podmínek mazání, únavových vlastností, těsnění stykových ploch, připravenosti povrchu pro nanášení povlaku a nátěru, odrazových vlastností, procesu stárnutí, koroze, apod., patří mezi hlavní přednosti prostorového hodnocení textury povrchu<sup>21</sup>.

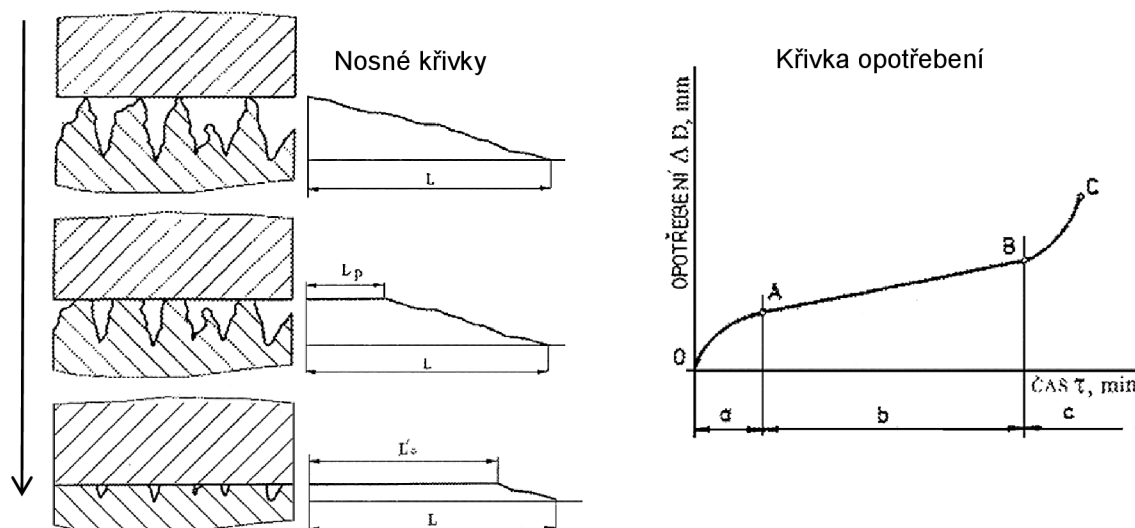
I když je zřejmé, že prostorové (3D) hodnocení povrchu je z hlediska posuzování jeho funkčních vlastností podstatně přínosnější, stále se udržují a modernizují způsoby hodnocení povrchu pouze s využitím hodnoty  $Ra$  (průměrná aritmetická úchylna posuzovaného profilu). Tuto tendenci podporují následující důvody: průměrné hodnoty drsnosti jsou snadno měřitelné, uvedené parametry jsou mezinárodně normalizovány, srozumitelné a celá metrologie povrchu je na nich od počátku postavena. Přestože parametr  $Ra$  zůstává užitečný jako obecná směrnice pro hodnocení textury povrchu, pro posuzování jeho funkčních vlastností je využitelný méně<sup>22</sup>.

### 2.1.3 Vliv textury povrchu na funkční vlastnosti součástí

Textura (mikrogeometrie) obrobeneho povrchu je faktor, který zasahuje do funkčnosti strojních součástí ve více směrech. S drsností úzce souvisí procesy opotřebení povrchu. V oblasti mikrogeometrie povrchu vznikají zárodky únavových lomů. Na drsnosti závisí rovněž pevnost lisovaných spojení apod.<sup>7</sup>

#### *Vliv na procesy tření a opotřebení*

V provozu dvou třecích se součástí je rozhodující, za jaký čas a při jaké hodnotě opotřebení se na funkčních površích vytvoří tzv. optimální nosný podíl povrchu. Obr. 2.9 ukazuje postup opotřebení povrchu v profilu jeho drsnosti spolu s křivkou opotřebení obrobeneho povrchu<sup>7</sup>.



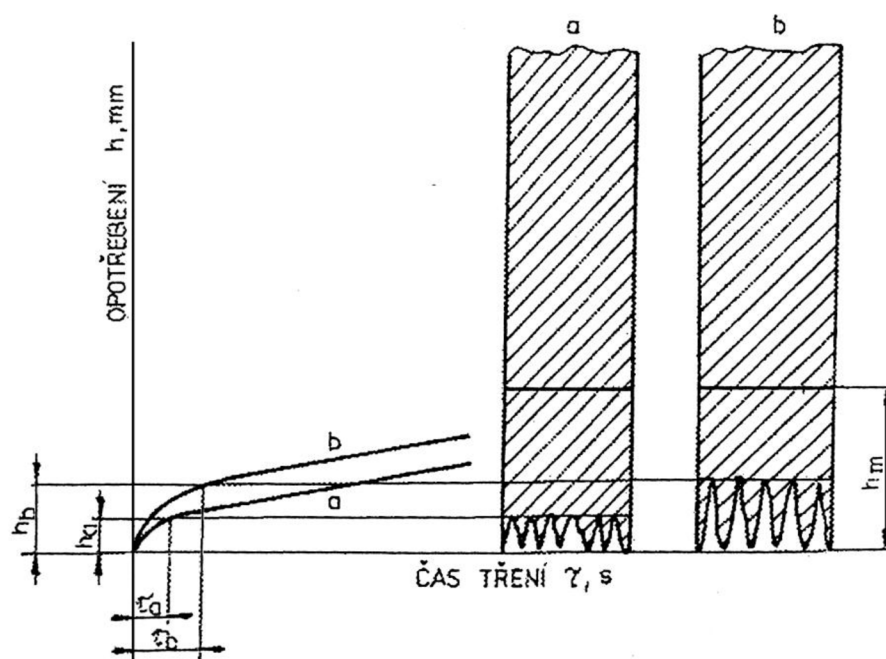
Obr. 2.9 Opotřebení obrobeneho povrchu<sup>7</sup>

Pro zjednodušení je povrch protikusu považován za ideálně hladký. Na začátku tření na sebe oba povrchy dosedají v oblasti vrcholů nerovností na velmi malých plochách. V důsledku toho vzniká ve styku povrchů vysoký měrný tlak, který ani za přítomnosti maziva nedovolí vytvořit olejový film mezi povrchy. Díky tomu probíhá intenzivní opotřebení, na křivce opotřebení znázorněno od bodu O<sup>7</sup>.

Postupně, jak se povrch dále opotřebovává, narůstá jeho nosný podíl (podle nosné křivky znázorněné na obr. 2.9 vlevo) a zvětšují se dosedací plochy mezi povrchy. V důsledku toho klesá měrný tlak ve styku povrchů, zlepšují se podmínky mazání, a tím se zpomaluje opotřebení povrchů (opotřebení postupně přechází do bodu A). Důležitým momentem je, když nosný podíl naroste a měrný tlak klesne natolik, že se mezi třecími se povrchy vytvoří olejový film, který je od sebe oddělí. Jedná se o moment, kdy je záběh ukončen a povrch je schopen normálního provozu (obr. 2.9 bod A). Dále je závislost opotřebení na čase lineární. Nosný podíl, který umožní vytvoření olejového filmu (kapalinné tření) mezi třecími se povrchy, je nazýván optimální (obr. 2.9 vpravo dole)<sup>7</sup>.

Experimenty ukazují, že podmínky pro vytvoření a zároveň i dobré ukotvení olejového filmu na povrchu vytváří 75 až 80% nosný podíl profilu drsnosti povrchu, kdy na povrchu zůstávají zbytky (rýhy) původní drsnosti, které zabezpečují ukotvení olejového filmu. Větší nosný podíl už není vhodný, protože olejový film není dobře ukotvený a olej vytéká z třecích se ploch<sup>7</sup>.

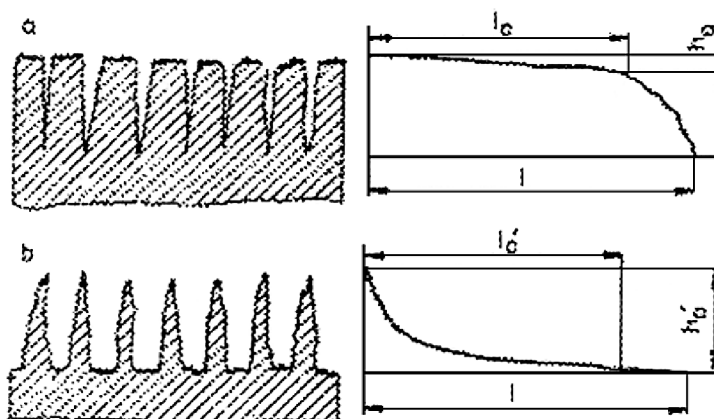
Pro tvorbu optimálního nosného podílu platí pravidlo, že s vyšší drsností povrchu se povrch hůře a zdlouhavěji přizpůsobuje provozním podmínkám. To má samozřejmě vliv i na celkovou časovou využitelnost povrchu v provozu. Pro ilustraci lze uvést obr. 2.10, na kterém jsou vyznačeny křivky opotřebení dvou povrchů s různými hodnotami drsnosti.



Obr. 2.10 Postup opotřebení dvou povrchů s různou drsností<sup>7</sup>

Na obr. 2.10 lze vidět, že průběh opotřebení u povrchu *a* s nízkou drsností vykazuje rychlý záběh  $T_a$ , menší opotřebení v průběhu záběhu  $h_a$  a delší životnost do mezního opotřebení  $h_m$ . Oproti tomu povrch *b* s vyšší drsností znamená delší dobu záběhu  $T_b$ , větší opotřebení v průběhu záběhu  $h_b$  a kratší životnost do mezního opotřebení  $h_m$ <sup>7</sup>.

Vytvoření optimálního nosného podílu je kromě hodnoty drsnosti povrchu dále závislé na tvaru profilu drsnosti a na tvaru nosné křivky viz obr. 2.11.



Obr. 2.11 Profily dvou povrchu se zcela odlišnými nosnými křivkami<sup>7</sup>

Povrchy s širokými výstupky a úzkými prohlubněmi (obr. 2.11a), které mají konkávní nosnou křivku, umožňují vytvoření optimální nosné délky  $l_o$  velmi rychle, při malém opotřebení povrchu  $h_o$ . Oproti tomu povrchy, které mají úzké vrcholky nerovností a široké prohlubně (obr. 2.11b), nosnou křivku konvexní, umožňují vytvoření optimální nosné délky za delší dobu a při velkém rozměrovém opotřebení. Navíc vzniká v průběhu záběhu nebezpečí zadření. Velikost opotřebení (v případě obr. 2.11b) může rovněž přesáhnout mezní hodnoty tolerance rozměru, čímž uložení ztrácí správnou funkčnost<sup>7</sup>.

Z uvedených poznatků lze shrnout, že provozu nejlépe vyhovují profily drsnosti s vysokým nosným podílem a konkávní nosnou křivkou<sup>7</sup>.

### ***Vliv na dynamické namáhání součástí***

Snižování drsnosti povrchu zvyšuje spolehlivost součástí při rázovém zatížení. Příznivě se projevuje hlavně při periodických rázech. Zvláště příznivě působí snižování drsnosti povrchu při rázovém zatížení na odolnost proti lámavosti za nízkých teplot<sup>7</sup>.

Drsnost povrchu nabývá značného významu i pro mez únavy materiálu. U cyklicky namáhaných součástí, nebo namáhaných proměnným zatížením, mohou velké hodnoty drsnosti povrchu (rýhy po obrábění) způsobit koncentraci napětí, které přesáhnou mez pevnosti materiálu. Výraznější vliv na únavu materiálu je však připisován zbytkovým napětím po obrábění<sup>7</sup>.

## 2.2 Zbytková napětí

Zbytková napětí jsou jedním z projevů použité technologie obrábění. Zůstávají v součástech a konstrukcích i po skončení výrobního procesu a působí v nich stále i bez vnějšího zatížení<sup>7</sup>.

### 2.2.1 Příčiny vzniku zbytkových napětí

Zbytková napětí vznikají obecně v tělese v důsledku vzniku časově proměnných a prostorově nerovnoměrných napěťových a teplotních polí. Zbytková proto, protože zůstávají v materiálu i po odstranění příčin, které je vyvolaly. Podmínkou jejich vzniku jsou rozdílné trvalé změny v jednotlivých objemech daného tělesa, vzniklé během technologického procesu. V případě obrábění se jedná o rozdílné změny ve vrstvách pod povrchem obrobené součásti. Průběh zbytkových napětí se mění s hloubkou vrstvy podle toho, jakou kombinaci příčin vyvolá výrobní operace, a která z příčin je převažující<sup>23,13</sup>.

Hlavní příčiny jsou následující:<sup>13,6,26</sup>

- nerovnoměrná plastická deformace
- teplotní roztažnost při nerovnoměrném ohřevu a ochlazování
- vznik struktur s rozdílnými měrnými objemy
- chemické procesy

Zbytková napětí, vzniklá v důsledku nerovnoměrné plastické deformace, jsou typická pro technologické procesy, při nichž vzniká pružně - plastický stav. To je rovněž případ třískového obrábění, kdy je povrchová vrstva obrobené plochy v průběhu řezání plasticky deformována a zpevněna, zatímco vrstvy pod ní jsou deformovány elasticky. Po odlehčení se pružně deformované spodní vrstvy snaží vrátit do svého původního stavu a tlačí na horní plasticky zdeformovanou vrstvu, ve které vzniká napětí tlakové, zatímco ve spodních vrstvách tahové<sup>23,13,12</sup>.

Současně s plastickou deformací je povrchová vrstva obrobené plochy vystavena tepelnému účinku tepla vznikajícího při obrábění. Povrchová vrstva se při obrábění ohřívá a zvětšuje svůj objem. Spodní chladnější vrstvy tomu brání a v ohřáté vrstvě vznikají napětí tlaková. Protože je ohřátá vrstva dostatečně plastická, tlaková napětí okamžitě mizí. Při ochlazování má tato vrstva snahu zmenšit svůj objem, čemuž opět brání spodní studené vrstvy. V chladnoucí povrchové vrstvě tak vznikají napětí tahová a ve spodních vrstvách tlaková<sup>23,13,12</sup>.

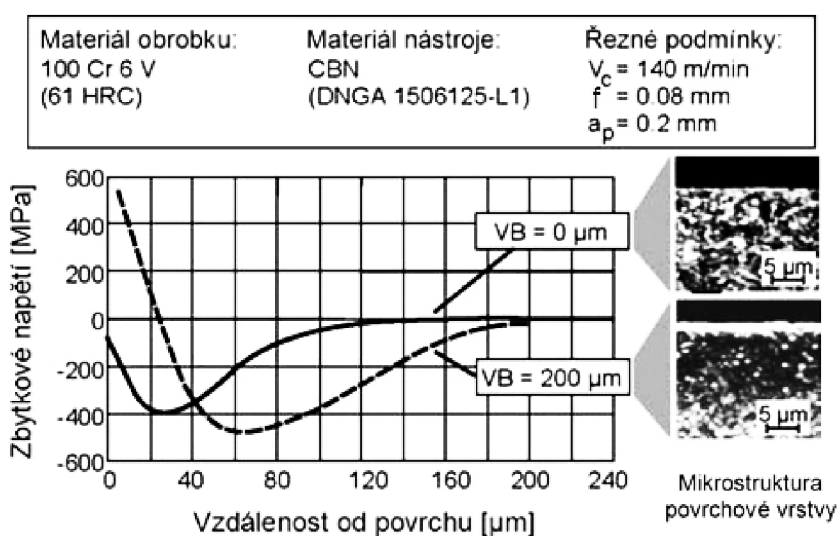
Účinek plastické deformace a teploty na směr a velikost vnitřních napětí je tedy protichůdný. Obecně platí, že při způsobech obrábění vyznačujících se velkým mechanickým zatížením povrchu a nižší teplotou bude pravděpodobně převažovat vliv plastické deformace a v povrchové vrstvě budou tlaková napětí, zatímco při převažujícím tepelném účinku vnikne v povrchové vrstvě napětí tahové<sup>23,26</sup>.

Obě předchozí příčiny zbytkových napětí mohou být dále kombinovány se změnami struktury povrchové vrstvy. Strukturní a chemické změny způsobují buď zvětšení objemu materiálu, kterému brání okolní nezměněný materiál (v ovlivněném materiálu bude tlak), nebo dochází ke zmenšení objemu (pak bude v ovlivněném materiálu tah). Například při obrábění austenitických ocelí může nastat případ transformace austenitu na martenzit doprovázená zvětšením



objemu. Při obrábění kalených ocelí může nastat popouštění martenzitu, nebo při vyšších teplotách až přeměna na austenit a opětovné zakalení doprovázené rovněž objemovými změnami<sup>23,26,12</sup>.

Příklad vlivu opotřebení nástroje na průběh zbytkových napětí a mikrostrukturu povrchu obrobku při soustružení kalené oceli lze vidět na obr. 2.12. Hodnoty zbytkových napětí pod povrchem obrobku jsou ovlivněny kromě jiného také třením mezi obrobenou plochou a hřbetem nástroje. S růstem opotřebení nástroje roste i tření a tepelné zatížení povrchové vrstvy obrobku, což vede k tahovému napětí (+) na povrchu a v daném případě rovněž k tvorbě tzv. bílé vrstvy na povrchu obrobku. Naproti tomu při použití nového nepotřebovaného nástroje vzniklo v povrchové vrstvě obrobku tlakové napětí (-) bez bílé vrstvy<sup>24</sup>.



Obr. 2.12 Vliv opotřebení nástroje na zbytková napětí<sup>24</sup>

Obecně shrnout, že zbytková napětí po technologické operaci jsou ovlivněna:<sup>1</sup>

- vlastnostmi obráběného materiálu a změnami, které v materiálu nastávají během procesu řezání
- silovými účinky vyvolanými řeznými silami, které působí v povrchové vrstvě obrobku
- teplotním polem, které vzniká při řezání v důsledku plastické deformace a tření

Z hlediska velikosti a rozsahu oblastí při posuzování zbytkových napětí je možno je rozdělit do následujících skupin:<sup>13,6</sup>

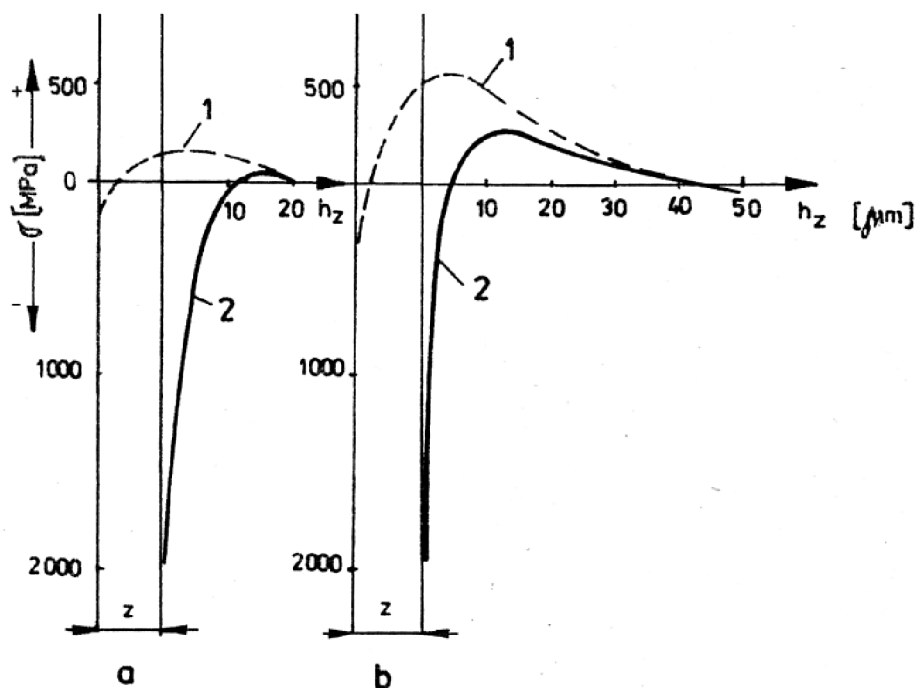
- **zbytková napětí I. druhu** (makroskopická) zasahují celý objem součásti, nebo její podstatnou část. Porušením kompaktnosti součásti (např. jejím rozdělením) dojde k uvolnění napětí a změně makrogeometrie součásti.
- **zbytková napětí II. druhu** (mikroskopická) zasahují objem několika krystalových zrn. Porušením kompaktnosti součásti (např. jejím rozdělením) nemusí dojít ke změně makrogeometrie součásti.

- **zbytková napětí III. druhu** (submikroskopická) se projevují v objemu několika atomových vzdáleností a dosahují rovnováhy jen v dostatečně velké části zrna. Porušením kompaktnosti součásti (např. jejím rozdělením) nikdy nedojde ke změně její makrogeometrie.

V technické praxi se pod pojmem zbytkové napětí rozumí vždy zbytkové napětí I. druhu<sup>6</sup>.

### 2.2.2 Zbytková napětí po sérii operací

Přesto, že má na stav povrchové vrstvy nejvýznamnější vliv poslední technologická operace, může při nevhodně zvoleném sledu operací ve výrobním postupu součásti zůstat částečně zachováno ovlivnění povrchové vrstvy z předchozích operací. Příkladem může být stav zbytkových napětí u kroužků valivých ložisek po jemném (obr. 2.13a) nebo hrubém broušení (obr. 2.13b), po němž následoval superfiniš<sup>11</sup>.

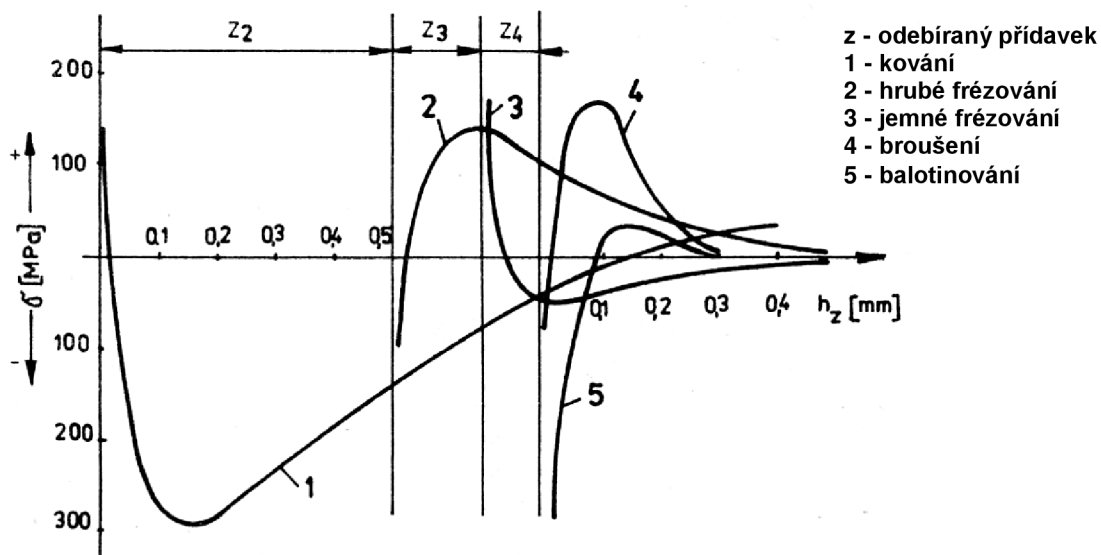


Obr. 2.13 Vliv předchozí operace na stav zbytkových napětí<sup>13</sup>

Účinek superfiniše (vyvolání tlakových napětí) se projevil maximálně do hloubky 10  $\mu\text{m}$  pod povrchem. Po jemném broušení (obr. 2.13a1) byl superfiniš (obr. 2.13a2) schopen s přídavkem (z) tahová napětí téměř zcela odstranit. Po hrubém broušení (obr. 2.13b1) se superfinišem snížilo napětí jen těsně pod povrchem (obr. 2.13b2), zatímco v hlubších vrstvách dosáhlo napětí hodnot až 300MPa<sup>13</sup>.

Každá technologická operace ovlivňuje vznik a přestavbu zbytkových napětí v takovém rozsahu a hloubce, v jaké je schopna vyvolat plastickou deformaci a tepelně ji ovlivnit. Ve větší hloubce nastanou pouze pružné deformace a dojde k superpozici těchto napětí se zbytkovými napětími z předchozích operací<sup>1</sup>.

Pokud je povrch produkován sérií po sobě následujících obráběcích operací, konečný stav zbytkových napětí může být odlišný od napětí generovaných jednotlivými operacemi samostatně. Dochází k superpozici individuálních zbytkových napětí<sup>4</sup>. Příkladem může být postup výroby lopatky turbokompresoru na obr. 2.14.



Obr. 2.14 Zbytková napětí v průběhu výrobního procesu lopatky turbokompresoru<sup>13</sup>

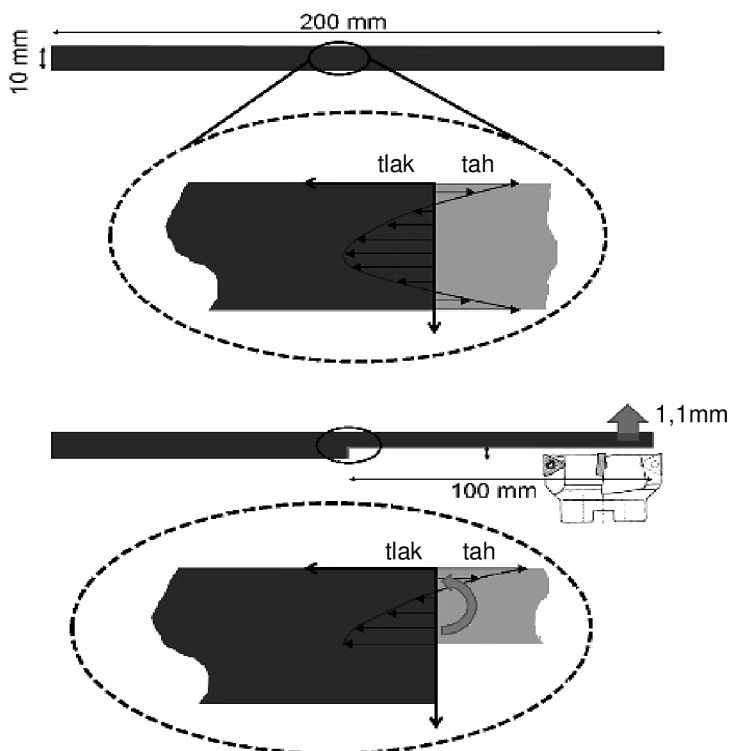
### 2.2.3 Vliv zbytkových napětí na funkční vlastnosti součástí

#### *Vliv na geometrickou přesnost*

Příčinou geometrické nepřesnosti obrobku vlivem zbytkových napětí je jeho deformace. Z definice zbytkových napětí vyplývá, že zbytková napětí působí v součásti bez zatížení vnějšími silami a momenty. Z toho také vyplývá, že musí být v této součásti v rovnováze. K deformaci součásti dochází při porušení této rovnováhy. To může nastat např. při obrábění odlitků, svařenců, výkovků i tepelně zpracovaných obrobků, které obsahují zbytková napětí. Pro snížení vlivu zbytkových napětí na geometrickou přesnost lze použít žíhání ke snížení zbytkových napětí, zařazované v technologickém postupu před obráběcími operacemi, nebo v průběhu obráběcích operací mezi operacemi hrubovacími a dokončovacími<sup>7</sup>.

Sled obráběcích operací v technologickém postupu vyvolává, jak již bylo zmíněno, modifikaci napětového stavu v obrobku. Při každé obráběcí operaci se při úběru materiálu uvolní zbytkové napětí v obrobku z předchozí operace a přidá další zbytkové napětí ze současné operace. Mezi obráběcími operacemi jsou zbytková napětí na povrchu obrobku vyrovnána napětími opačného smyslu v základním materiálu pod povrchem. Někdy, pokud probíhá obrábění s velkým úběrem materiálu pouze z jedné strany obrobku, zbytkové napětí může vyvolat značnou deformaci<sup>12</sup>.

Na obr. 2.15 je uveden příklad obrobení polotovaru – tažené ploché tyče, která obsahovala na povrchu vysoké zbytkové tlakové napětí. Odfrézování poloviny tloušťky tyče uvolnilo zbytkové napětí a způsobilo deformaci na konci tyče o  $1,1 \text{ mm}^{1,2}$ .



Obr. 2.15 Deformace obrobku při uvolnění zbytkových napětí<sup>12</sup>

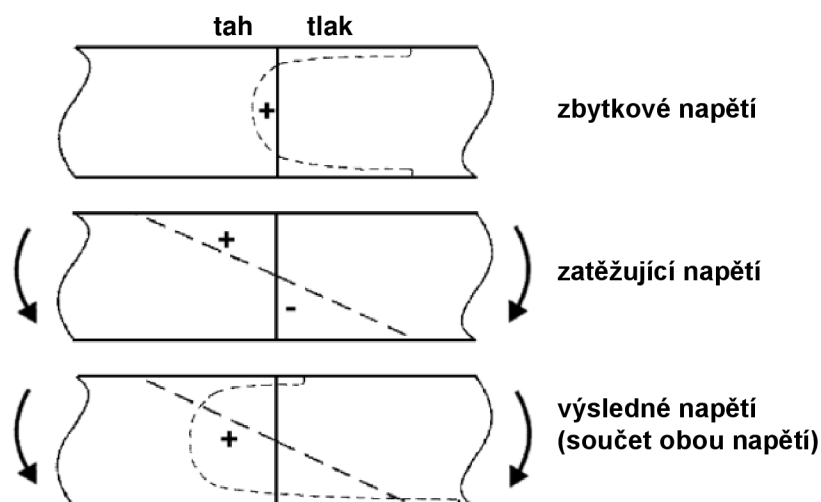
### ***Vliv na mez únavy materiálu***

Je statisticky doloženo, že většina poruch strojních součástí je způsobena únavou materiálu, vyvolanou jeho cyklickým namáháním. Rozbor poruch a namáhání ukazuje, že mezní stav v těchto případech závisí úzce na lokálních vlastnostech materiálu v nejnamáhavějším místě a ne na průměrných vlastnostech v celém průřezu. Tento vliv se při identifikaci příčin únavových lomů přisuzoval nejprve účinku drsnosti povrchu (vrubům). Tato hypotéza se ve většině případů zdánlivě dobře shodovala s pozorováním, a to proto, že povrchy obráběné hrubováním (s velkou drsností) mají většinou povrchovou vrstvu s vysokými hodnotami tahových zbytkových napětí. Z pozdějších analýz ale vyplynulo, že dominantní vliv na mez únavy materiálu nemá drsnost povrchu, ale smysl, velikost a průběh zbytkových napětí<sup>7</sup>.

Pokud jsou v povrchové vrstvě tlaková napětí, zárodky vznikajících trhlin jsou v průběhu zatěžování součásti v provozu tlakem uzavírány. Tahová napětí naopak trhliny rozevírají a usnadňují rovněž rozrušování povrchových vrstev při kontaktní únavě (pitting)<sup>23,13</sup>.

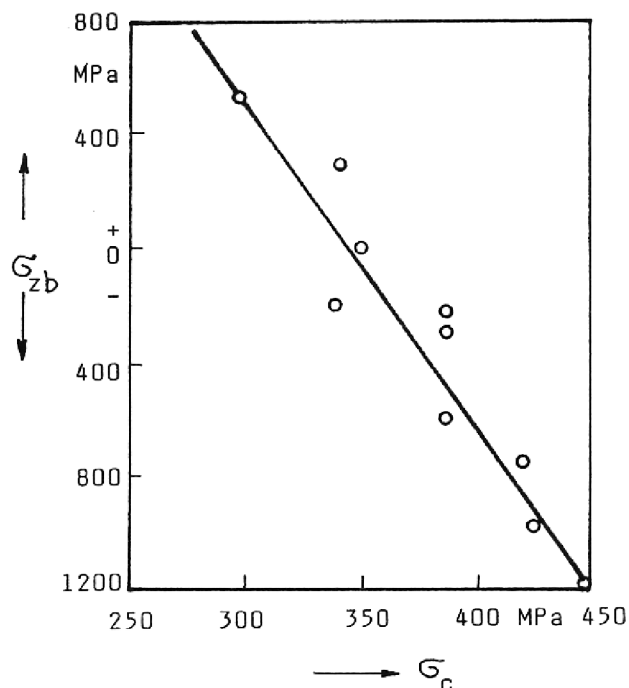
Příznivý vliv tlakového zbytkového napětí v povrchové vrstvě lze prezentovat na průběhu napětí v průřezu součásti na obr. 2.16. Superpozicí zbytkového tlakového napětí a provozního ohybového napětí od vnějšího zatížení se špička

výsledného tahového napětí přesune z povrchu součásti do podpovrchových méně narušených vrstev. Nárůst tlakového napětí na spodní straně součásti není problémem, protože nemůže vézt k lomu součásti<sup>24,30</sup>.



Obr. 2.16 Superpozice tlakového zbytkového napětí a provozního napětí v součásti<sup>24</sup>

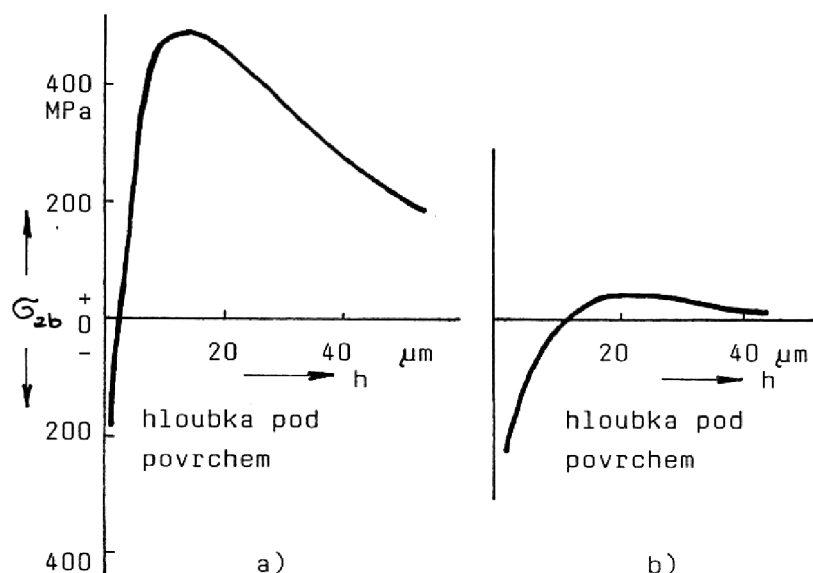
Na obr. 2.17 lze dokumentovat vliv různého smyslu a velikosti zbytkových napětí  $\sigma_{zb}$  v povrchové vrstvě na mez únavy v ohybu  $\sigma_c$  po obrábění titanové slitiny VT3.



Obr. 2.17 Závislost meze únavy v ohybu na úrovni zbytkových napětí slitiny VT3<sup>11</sup>

Z grafu na obr. 2.17 je evidentní, že tlaková napětí (-) zvyšují mez únavy a tahová (+) naopak snižují mez únavy.

Vliv zbytkových napětí na kontaktní únavu byl prokázán u kalené ložiskové oceli 14 109, kdy byly vytvořeny vzorky lišící se pouze velikostí a průběhem zbytkových napětí v povrchové vrstvě viz obr. 2.18, drsnost a vlnitost povrchu byla u obou vzorků totožná<sup>11</sup>.



Obr. 2.18 Průběh zbytkových napětí dvou skupin vzorků oceli 14 109<sup>11</sup>

Z výsledků experimentu vyplynulo, že vzorky na obr. 2.18a vykazovali dvojnásobnou mez kontaktní únavy než vzorky na obr. 2.18b. Opět se tedy ukazuje nevýhodnost výrazných tahových napětí v povrchové vrstvě součásti z pohledu funkce součásti<sup>11</sup>.

Závěrem lze shrnout, že druh a velikost zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobku výrazně ovlivňuje jeho funkční vlastnosti. Platí, že tlaková napětí vedou k uzavírání povrchových defektů a tedy vedou ke zvýšení užitečných vlastností. I v případě tlakových napětí přímo na povrchu, je přesto zapotřebí sledovat průběh zbytkových napětí směrem do hloubky, protože v podpovrchových oblastech jsou iniciována napětí tahová a ta mohou vyvolat celou řadu problémů, nejčastěji přesun únavového iniciačního centra pod povrch, do místa maximálního tahového zbytkového napětí. Vyšší hladina zbytkových napětí obecně má také za následek vyšší nebezpečí korozního napadení (vyšší aktivační energie a tedy i reaktivita povrchu). Při tahovém zbytkovém napětí se může iniciovat i koroze pod napětím. Z uvedených důvodů je zapotřebí sledovat zbytková napětí nejen na povrchu součástí, ale i pod povrchem a dávat tyto výsledky do souvislostí s praktickými poznatky<sup>6,28,29</sup>.

### 2.2.4 Měření zbytkových napětí

Dle principu lze měřicí metody rozdělit na:<sup>1</sup>

- mechanické (měření deformace)
- fyzikální (měření změn fyzikálních vlastností)
- chemické (změny vyvolané chemickými procesy)

Podrobnější členění metod měření zbytkových napětí je uvedeno v tab. 2.1.

Tab. 2.1 Metody zjišťování zbytkových napětí<sup>1</sup>

Metody	Tvar součásti	Způsob měření	
Mechanické	plochý tvar	deformace pásků	změna délky
			změna zakřivení
		vrtání děr	válcová díra
			mezikruží
	rotační tvar	změna rozměru válce	odstranění povrchové vrstvy
		trubka	rozříznutí trubky
			odstranění povrchové vrstvy
			odstranění vnitřní vrstvy
		kroužek	rozříznutí
			změna křivosti
	podélné pásy z kroužků		
	obecný tvar	metoda sítí	deformace sítě
křehké laky		vznik trhlin	
křehké modely		vznik trhlin	
Fyzikální RTG	obecný tvar	difrakce	vzdálenost meziatomových rovin
Fyzikální ultrazvuk	obecný tvar	šíření vln	změna rychlosti
			odraz vln
			vnitřní tlumení
Elektrické	obecný tvar	změna proudu	změna potenciálu procházejícího proudu
			změna velikosti vířivých proudů
			změna indukčního toku
Magnetické	obecný tvar	změny magnetismu	magnetická indukce
			zbytkový magnetismus
Akustické	obecný tvar	prozvučitelnost	četnost akustických emisí
Chemické	obecný tvar	dífuze vodíku	trhliny na povrchu
		změna chemické aktivity	změna struktury

### ***Mechanické metody***

Tyto metody jsou založeny na měření deformace způsobené porušením vnitřní rovnováhy napětí při odstranění části objemu (vrstvy) součásti, tj. porušením její celistvosti. Ze změřené deformace se pak stanovuje, pomocí vztahů mezi napětím a deformací, napjatost ve sledovaném místě. Nevýhodou těchto metod je destrukce součásti a určení napětí pouze 1. druhu. Některé metody oddělování vrstev měřeného vzorku mohou navíc vyvolat přidavná napětí a tím zkreslit výsledek měření. Jednotlivé metody se od sebe liší tvarem zkušebních vzorků, metodou výpočtu a možnostmi stanovení jednoosé či víceosé napjatosti<sup>1</sup>.

V odborné literatuře je z mechanických metod měření zbytkových napětí nejčastěji zmiňována odvrťovací metoda. Podstatou této metody je uvolnění zbytkových napětí v povrchu materiálu vyvrtáním díry o průměru 1 až 4 mm do hloubky 1 až 1,5 násobku průměru vrtané díry. Narušením vnitřní rovnováhy napětí dojde k deformaci materiálu v okolí díry. Tato deformace je zachycena nalepeným tenzometrickým snímačem (růžicí) na povrchu materiálu kolem vrtané díry a následně je deformace přepočítána na napětí<sup>1</sup>.

### ***Fyzikální metody***

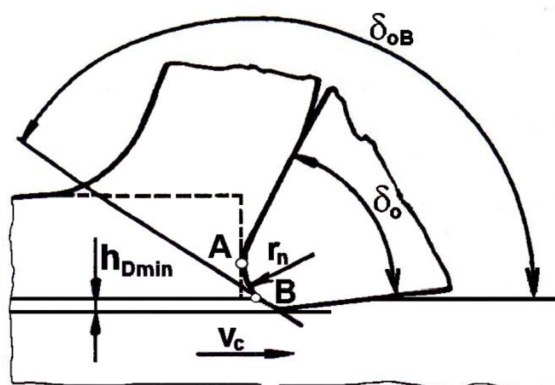
Nejrozšířenější nedestruktivní fyzikální metodou měření zbytkových napětí je rentgenová difrakce. Podstatou této metody je měření mřížkové konstanty v krystalické struktuře zkoušeného materiálu a z toho následné určení zbytkového napětí. Tato metoda tedy umožňuje zjištění zbytkových napětí ze změn vzdáleností atomových rovin krystalů, které nastávají jako důsledek plastické deformace. Změny vzdálenosti atomových rovin jsou ovlivněny všemi druhy napjatosti, a tudíž se touto metodou zjistí celkové napětí včetně napětí 2. a 3. druhu, zatímco mechanické metody zjistí jen napětí 1. druhu. Difrakcí lze měřit změny mřížkové vzdálenosti jen do hloubky několika mikrometrů, tj. jen ve velmi tenké povrchové vrstvě materiálu<sup>1</sup>.

## **2.3 Deformační zpevnění**

Deformační zpevnění je vnějším projevem plastické deformace. Při procesu řezání způsobuje interakce nástroje a obrobku plastickou deformaci nejen v oddělované vrstvě materiálu ve formě třísky, ale také v obrobené ploše. Deformace obrobeného povrchu a tedy i deformační zpevnění je zapříčiněno tím, že oblast plastických deformací v zóně řezání často zasahuje i pod úroveň budoucího povrchu a také tím, že řezná hrana nástroje nemá charakter přímky, ale je tvarově upravena (pro zjednodušení lze uvažovat zaoblení) viz obr. 1.4<sup>27</sup>.

Schematicky je vliv zaoblení břitu řezného nástroje na obráběcí proces naznačen na obr. 2.19, kde v bezprostřední interakci břitu nástroje a materiálu obrobku vzniká negativní úhel čela a budoucí povrch obrobené plochy nevzniká pouze řezáním, ale částečně i tvářením<sup>27,10</sup>.





Obr. 2.19 Vliv zaoblení ostří na deformační zpevnění obrobenej plochy<sup>10</sup>

Na začátku záběru břitu s obráběným materiálem je místem prvního kontaktu bod A. V důsledku plastických deformací obráběného materiálu při vnikání břitu do materiálu se bod maximálního napětí posouvá směrem dolů po zaoblení břitu do obráběného materiálu. Při ustálení řezného procesu se dostane do bodu B, který odpovídá minimální hodnotě jmenovité tloušťky řezu  $h_{Dmin}$ . Tečnou přímkou v bodě B je dána hranice, kdy část odřezávaného materiálu nad přímkou odchází z řezného procesu ve formě třísky, zatímco část materiálu pod přímkou odchází pod břit, kde se elasticky a plasticky deformuje a zpevňuje. V důsledku této deformace, příp. vysoké teploty a strukturních změn vznikají v povrchu obrobenej plochy rovněž zbytková napětí (viz předchozí podkapitola 2.2)<sup>31,7</sup>.

Podstatu vlastního deformačního zpevnění je třeba hledat v krystalické stavbě kovů. Krystalická stavba kovů obsahuje poruchy – dislokace. Plastická deformace kovů se uskutečňuje právě pohybem těchto dislokací. Při plastické deformaci roste počet dislokací a jejich pohyb je brzděn jinými dislokacemi a hranicemi zrn. Projevem zbrzdění dislokací je právě deformační zpevnění<sup>13</sup>.

Důsledkem deformačního zpevnění je změna mikrostruktury a změny fyzikálně-mechanických vlastností, hlavně nárůst tvrdosti a pokles houževnatosti obrobenej povrchu<sup>9,7</sup>.

Zpevnění obrobenej povrchu je obvykle charakterizováno stupněm zpevnění a hloubkou zpevnění, které se určí měřením mikrotvrdosti na metalografickém výbrusu<sup>7</sup>. Hloubka zpevnění  $h_z$  je dána vzdáleností od povrchu, ve které již nedochází ke změně mikrotvrdosti<sup>1</sup>. Stupeň zpevnění  $\varphi$  je dán vztahem (1)<sup>7</sup>.

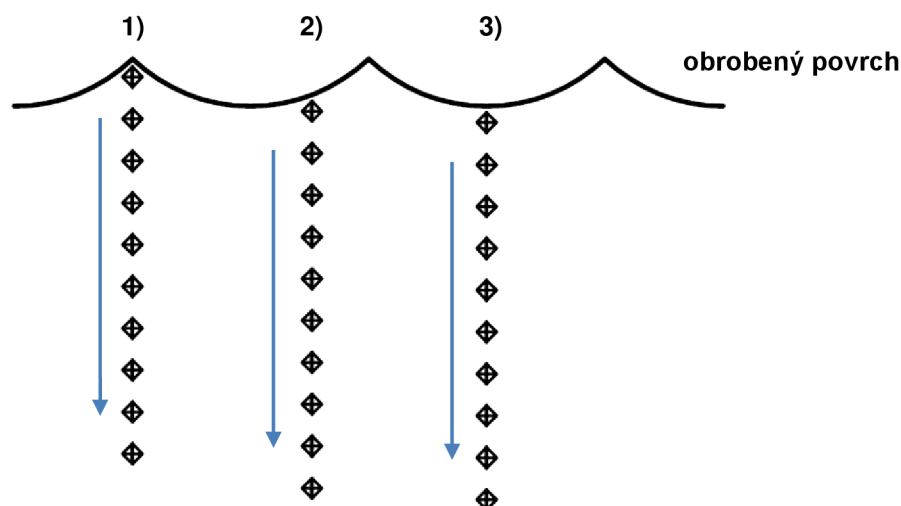
$$\varphi = \frac{HV_{Ms} - HV_{Mz}}{HV_{Mz}} \cdot 100 \quad (1)$$

kde:  $HV_{Ms}$  - mikrotvrdost na povrchu

$HV_{Mz}$  - mikrotvrdost základního materiálu

### 2.3.1 Měření mikrotvrdomosti

Určování deformačního zpevnění povrchových vrstev obrobené součásti se provádí měřením mikrotvrdomosti. Toto měření je realizováno na metalografickém výbrusu vtlačováním diamantového tělesa tvaru jehlanu dle Vickerse nebo Knoopa do povrchu výbrusu. Postupuje se od obrobeného povrchu směrem do materiálu ve stanovených vzdálenostech v počtu tolika vtisků, až se mikrotvrdomost ustálí na hodnotě základního materiálu viz obr. 2.20. Při hodnocení je třeba respektovat možný rozptyl hodnot mikrotvrdomosti s ohledem na strukturní stav obráběného materiálu. Vpichy se provádí ve více rovinách vedle sebe a v každé hloubce se hodnotí průměrná hodnota mikrotvrdomosti. Rovněž je třeba respektovat profil mikrogeometrie povrchu a vpichy provádět ve všech rovinách ve stejné vzdálenosti od reálného povrchu<sup>7,33</sup>.



Obr. 2.20 Měření mikrotvrdomosti zpevněné vrstvy na metalografickém výbrusu<sup>7</sup>

#### **Mikrotvrdomost dle Vickerse**

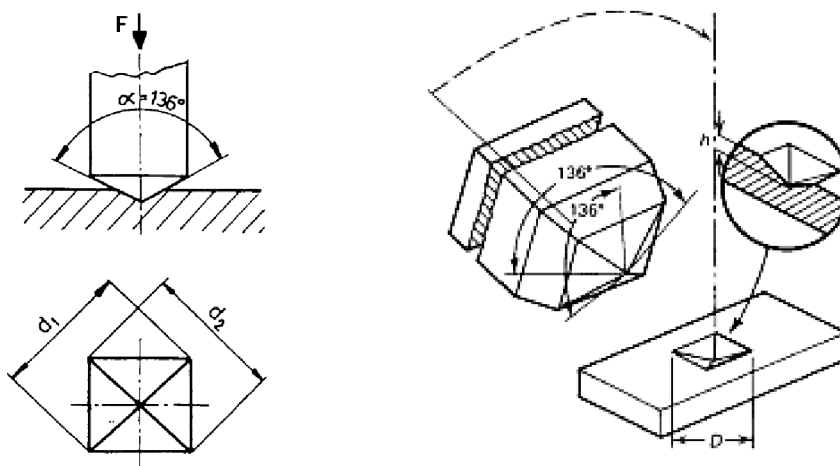
Měření tvrdosti dle Vickerse je obecně rozděleno podle zkušebního zatížení do tří oblastí viz tab. 3.

Tab. 2.2 Rozdělení zkoušek tvrdosti dle Vickerse<sup>33</sup>

Oblast zkušebního zatížení, F [N]	Symbol tvrdosti	Předchozí označení (ISO 6507-1:1982)
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Zkouška tvrdosti dle Vickerse
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 až < HV 5	Zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení
$0,09807 \leq F < 1,961$	HV 0,01 až < HV 0,2	Zkouška mikrotvrdomosti dle Vickerse

Podstata zkoušky spočívá ve vtlačování diamantového vnikajícího tělesa ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a daným vrcholovým úhlem  $136^\circ$  mezi protilehlými stěnami do povrchu zkušební vzorku<sup>33</sup>.

Následně je měřena úhlopříčka vtisku, která zůstane po odlehčení zkušebního tělesa viz obr. 2.21<sup>33</sup>.



Obr. 2.21 Vyhodnocení zkoušky dle Vickerse<sup>33,34</sup>

Mikrotvrdotost podle Vickerse je vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše vtisku dle vztahu (2)<sup>33</sup>.

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (2)$$

kde:  $d$  - aritmetický průměr dvou délek úhlopříček  $d_1, d_2$  [mm]  
 $F$  - zkušební zatížení [N]

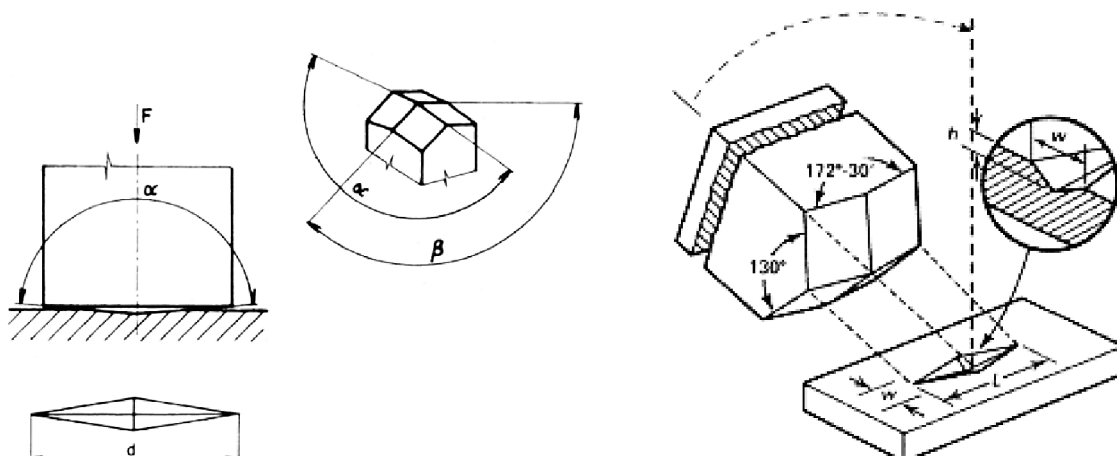
### **Mikrotvrdotost dle Knoop**

Podstata metody je stejná jako u metody dle Vickerse s rozdílným tvarem vnikacího tělesa, které je tvořeno diamantovým jehlanem s kosočtverečnou základnou s předepsanými úhly protilehlých stran viz obr. 2.22. Následně je měřena delší úhlopříčka vtisku, která zůstane po odlehčení zkušebního zatížení<sup>33</sup>.

Mikrotvrdotost podle Knoop je vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše vtisku dle vztahu (3)<sup>33</sup>.

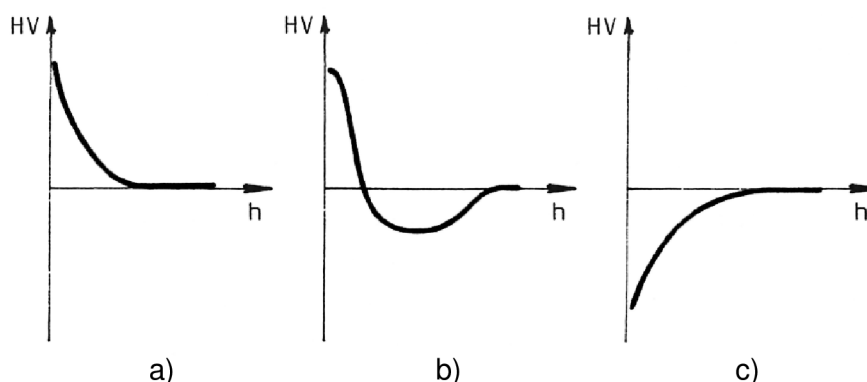
$$HK = 1,451 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (3)$$

kde:  $d$  - délka delší úhlopříčky [mm]  
 $F$  - zkušební zatížení [N]

Obr. 2.22 Vyhodnocení zkoušky dle Knoop<sup>33,34</sup>

### 2.3.2 Základní průběhy tvrdosti v povrchové vrstvě po obrábění

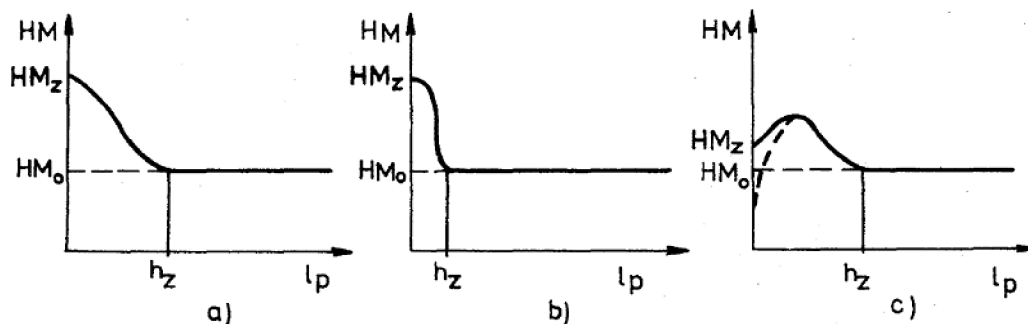
Změna tvrdosti v povrchové vrstvě je dána jak mechanickým, tak tepelným zatížením povrchu obrobku při obrábění. V praxi se mohou po obrábění vyskytnout tři základní průběhy tvrdosti v povrchové vrstvě, znázorněné na obr. 2.23<sup>5</sup>.

Obr. 2.23 Základní průběhy mikrotvrdosti v povrchové vrstvě<sup>11</sup>

- Tvrdost (obr. 2.23a) vysoká na povrchu s poklesem na tvrdost jádra (zakalení povrchové vrstvy, plastická deformace, vznik oxidů)<sup>5</sup>
- Tvrdost (obr. 2.23b) vysoká na povrchu s poklesem pod tvrdost jádra a následným růstem na tvrdost jádra (sekundární zakalení na povrchu + popuštění spodní vrstvy, příp. zpevnění povrchu obdobou termomechanického zpracování + popuštění spodní vrstvy)<sup>5</sup>
- Tvrdost (obr. 2.23c) nízká na povrchu, postupně roste na tvrdost jádra (popuštění povrchu)<sup>5</sup>

Změny tvrdosti mohou být v uvedených případech doprovázeny změnou struktury, případně dalšími způsoby tepelného zpracování povrchu během procesu obrábění (žihání, popouštění za nízkých teplot apod.)<sup>5</sup>.

Na obr. 2.24 lze podrobněji rozebrat případ z obr. 2.23a z pohledu možného dopadu na funkci povrchu součásti.



Obr. 2.24 Vliv průběhu tvrdosti na funkční vlastnosti<sup>31</sup>

- Tvrdost (obr. 2.24a) je největší na povrchu a směrem do materiálu plynule klesá až na úroveň původní tvrdosti obráběného materiálu (jádra). S ohledem na pozvolný pokles tvrdosti lze očekávat relativně pevné spojení zpevněného a nezpevněného materiálu a tedy i dosažení povrchu s lepšími vlastnostmi obrobenej plochy z hlediska její životnosti, než jaká by byla u nezpevněného povrchu<sup>31</sup>.
- Tvrdost (obr. 2.24b) se do malé hloubky prakticky nemění, dále však prudce klesá až na úroveň původní tvrdosti obráběného materiálu. Takovýto průběh tvrdosti znamená vytvoření zpevněné vrstvičky, která však není tak pevně spojena s nezpevněným materiálem a při provozu takto vyrobené součásti lze očekávat možné odlupování této vrstvičky<sup>31</sup>.
- Průběh tvrdosti (obr. 2.24c) svědčí o mechanickém porušení vrchní části zpevněné vrstvy, kde byla při plastické deformaci překročena pevnost materiálu. V této porušené vrstvě jsou většinou patrné trhlinky a od takto vyrobené součásti nelze očekávat dlouhou životnost<sup>31</sup>.

### 2.3.2 Faktory ovlivňující deformační zpevnění obrobenej plochy

Velikost a průběh zpevnění povrchové vrstvy obrobku závisí na vlastnostech obráběného materiálu a na rezných podmínkách při obrábění (podmínkách deformace<sup>1</sup>). Vlastnosti obráběného materiálu a jejich schopnost se zpevňovat jsou určující charakteristikou zpevnění povrchu. Z hlediska rezných podmínek deformační zpevnění nejvíce ovlivňuje rezná rychlost, posuv, méně pak hloubka řezu. Z hlediska geometrie břitu ovlivňuje zpevnění úhel řezu, úhel hřbetu, poloměr ostří, otupení nástroje a poloměr špičky<sup>22,31, 23</sup>.

Různé kovy se při obrábění zpevňují s různým stupněm zpevnění. Zpevnění závisí na schopnosti kovu se plasticky deformovat. Základní podíl na plastických deformacích různých kovů má druh jejich krystalické mřížky. Kovy s hexagonální mřížkou HCP (např. titan a jeho slitiny) se působením nástroje před jejich

porušením plasticky deformují jen málo, protože mají málo skluzových rovin, na kterých může docházet ke skluzu dislokací a tedy plastické deformaci. Kovy s kubickou plošně středěnou mřížkou FCC (Fe  $\gamma$ , Sn, Co, Cu, Ag, Pb a další) jsou vzhledem k velkému počtu skluzových rovin velmi dobře plasticky deformovatelné. Kovy s kubickou prostorově středěnou mřížkou BCC (Fe  $\alpha$  a  $\delta$ , Cr, Mo, W, V a další) jsou přechodem mezi předcházejícími dvěma typy mřížek. U ocelí a slitin je kromě typu mřížky dobrým informačním ukazatelem náchylnosti ke zpevnění poměr meze kluzu ( $R_e$ ) a meze pevnosti v tahu ( $R_m$ ), tj.  $R_e/R_m$ . Oceli a slitiny s kubickou plošně středěnou mřížkou (např. austenitické chromniklové oceli) mají velký počet skluzových rovin a zároveň mají malý poměr meze kluzu a meze pevnosti v tahu ( $R_e/R_m = 0,45$ ), proto jsou snadno plasticky deformovatelné a tedy i obráběním snadno zpevnitelné. Oceli s kubickou prostorově středěnou mřížkou (např. vysocepevné oceli) mají méně skluzových rovin a větší poměr meze kluzu a pevnosti v tahu ( $R_e/R_m = 0,8-0,9$ ), proto jsou méně plasticky deformovatelné a tedy i obráběním méně zpevnitelné<sup>7</sup>.

Při rozboru vlivů řezných podmínek a geometrie břitu ovlivňujících zpevnění povrchové vrstvy obrobku lze vycházet z jejich vlivu na oblast primární plastické deformace, která pokud zasahuje pod bod B na obr. 2.19, směrem do obrobku, ovlivňuje významně zpevnění obrobené plochy<sup>31</sup>.

Zvyšuje-li se řezná rychlost, oblast primární plastické deformace viz obr. 1.4 se zmenšuje, natáčí se směrem doprava a klesá tedy vliv plastické deformace na velikost zpevnění povrchu. Proto s rostoucí řeznou rychlostí stupeň zpevnění i hloubka zpevnění klesají<sup>31,9</sup>.

Zpevňovací schopnost běžných materiálů závisí také na teplotě. Při obrábění vysokými řeznými rychlostmi může docházet k vyššímu ohřevu povrchové vrstvy i nad rekrytalizační teplotu a tedy může docházet k zotavení a rekrytalizaci a tím snížení deformačního zpevnění<sup>31,13,5</sup>.

Zvětšuje-li se úhel řezu, rozšiřuje se oblast primární plastické deformace a natáčí se směrem do materiálu obrobku. Tím se zvětšuje stupeň zpevnění a hloubka zpevněné vrstvy<sup>31,23</sup>.

Zmenšuje-li se úhel hřbetu, zvětšuje se pasívní složka řezné síly a rozšiřuje se oblast primární plastické deformace a zasahuje hlouběji do materiálu obrobku. Zvětšuje se stupeň zpevnění i hloubka<sup>31,21</sup>.

Poloměr ostří ovlivňuje střední hodnotu úhlu řezu viz obr. 2.19. Se zvětšováním poloměru ostří se zvětšuje střední hodnota úhlu řezu, což vede k rozšíření oblasti primární plastické deformace a její natáčení do obráběného materiálu. Hloubka i stupeň zpevnění se s rostoucím poloměrem ostří zvětšují<sup>31</sup>.

Obdobný vliv má i opotřebení břitu. Se zvětšováním opotřebení břitu dochází především ke zvětšování šířky VB opotřeбенé plochy hřbetu, dále k růstu poloměru ostří a opotřebení čela. S růstem opotřebení se rozšiřuje i oblast primární plastické deformace a zasahuje hlouběji do obráběného materiálu. Rostou tudíž i stupeň zpevnění a hloubka<sup>31,13</sup>.

Spolu se zvětšováním poloměru špičky a zmenšováním úhlu nastavení hlavního ostří roste stupeň zpevnění i hloubka zpevnění. Je to dáno růstem pasívní složky

řezné síly a rozšiřováním oblasti primární plastické deformace ve směru pasivní síly<sup>31,13</sup>.

### 2.3.4 Vliv deformačního zpevnění na funkční vlastnosti součástí

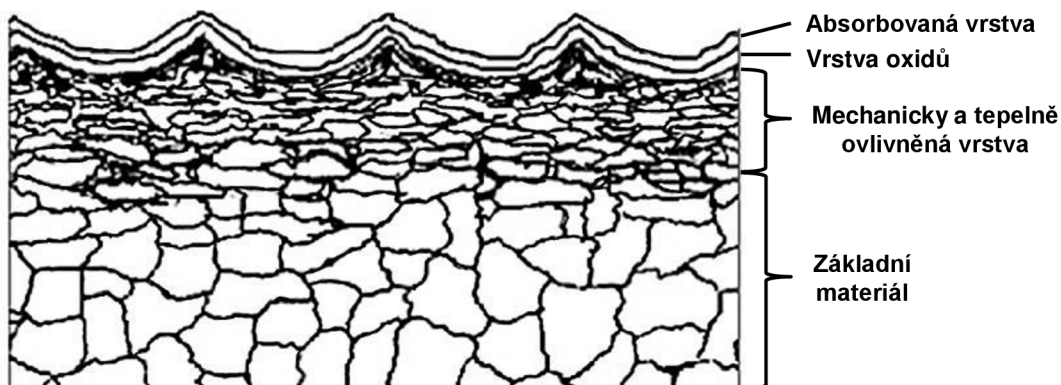
Zpevněná vrstva obrobeného povrchu, která je dobře soudržná se základním materiálem a není mechanicky porušena, vytváří předpoklady pro zlepšení jeho funkčnosti. Především zvýšená tvrdost této vrstvy zvětšuje odolnost povrchu proti opotřebení, z čeho se dá odvodit delší životnost strojních součástí. V tribologii platí všeobecně pravidlo, že čím je tvrdší povrch, tím se pomaleji opotřebovává<sup>7,31</sup>.

Nárůst tvrdosti (až několikanásobný dle obráběného materiálu<sup>9,1</sup>) se na první pohled zdá s ohledem na zvýšení otěruvzdornosti a stálosti rozměru výhodný, ale je třeba rovněž dbát na dostatečnou houževnatost povrchu<sup>6</sup>.

Zpevnění povrchových vrstev rovněž mění poměry při tvorbě zbytkových napětí, hlavně při speciálních technologiích mechanického zpevňování povrchů (válečkování, balotínování), kdy se nevýhodná tahová napětí z předchozích operací mění na výhodná tlaková, čímž se zlepšuje funkčnost dynamicky namáhaných součástí (únava)<sup>7,31</sup>.

### 2.4 Strukturní, fázové a chemické změny v povrchové vrstvě

Obrobený povrch je obvykle složen z několika vrstev, které se liší od základního materiálu složením a strukturou. Schématický řez obrobeným povrchem po soustružení je naznačen na obr. 2.25.



Obr. 2.25 Schématický řez obrobeným povrchem<sup>12</sup>

Ihned poté, co je odebráním přídavku při obrábění odkryt nový povrch, je tento povrch vystaven oxidaci a absorpci z okolního prostředí. Absorbovaná vrstva se skládá z vodní páry a uhlovodíků z okolního prostředí (vzduch, procesní kapalina apod.). Pod touto vrstvou se nachází vrstva oxidů. Její tloušťka může být stabilní (v případě korozivzdorných ocelí, hliníkových slitin), nebo může s rostoucím časem stále narůstat. Pod vrstvou oxidů se nachází obráběcím procesem deformovaná a metalurgicky pozměněná oblast s tloušťkou v řádu desetin milimetrů (dle intenzity řezného procesu)<sup>12</sup>.

V mechanicky a tepelně ovlivněné oblasti může za určitých podmínek docházet k fázovým přeměnám. To je umožněno interakcí řezného nástroje a materiálu obrobku, kdy se prostřednictvím nástroje vnáší do povrchové vrstvy určité množství energie. Tato energie se spotřebovává zejména na plastickou deformaci a překování třecích sil. V obou případech se energie mění převážně v teplo, teplota v povrchové vrstvě tedy roste a mohou se vytvářet vhodné podmínky pro difuzní procesy a tedy i pro fázové a strukturní změny<sup>13</sup>.

Dle literatury<sup>5,7</sup> však při obvyklých podmínkách obrábění (kromě broušení) k fázovým přeměnám nedochází, zejména při nízkých a středních řezných rychlostech. Například u soustružení a frézování se uvádí pouze usměrnění struktury povrchové vrstvy vyvolané plastickou deformací. Toto se zejména projevuje u materiálů s vyšší plasticitou, jako jsou austenitické, feritické oceli, hliníkové slitiny. K fázovým přeměnám dochází dle literatury<sup>5</sup> až při vysokých řezných rychlostech – při HSC obrábění.

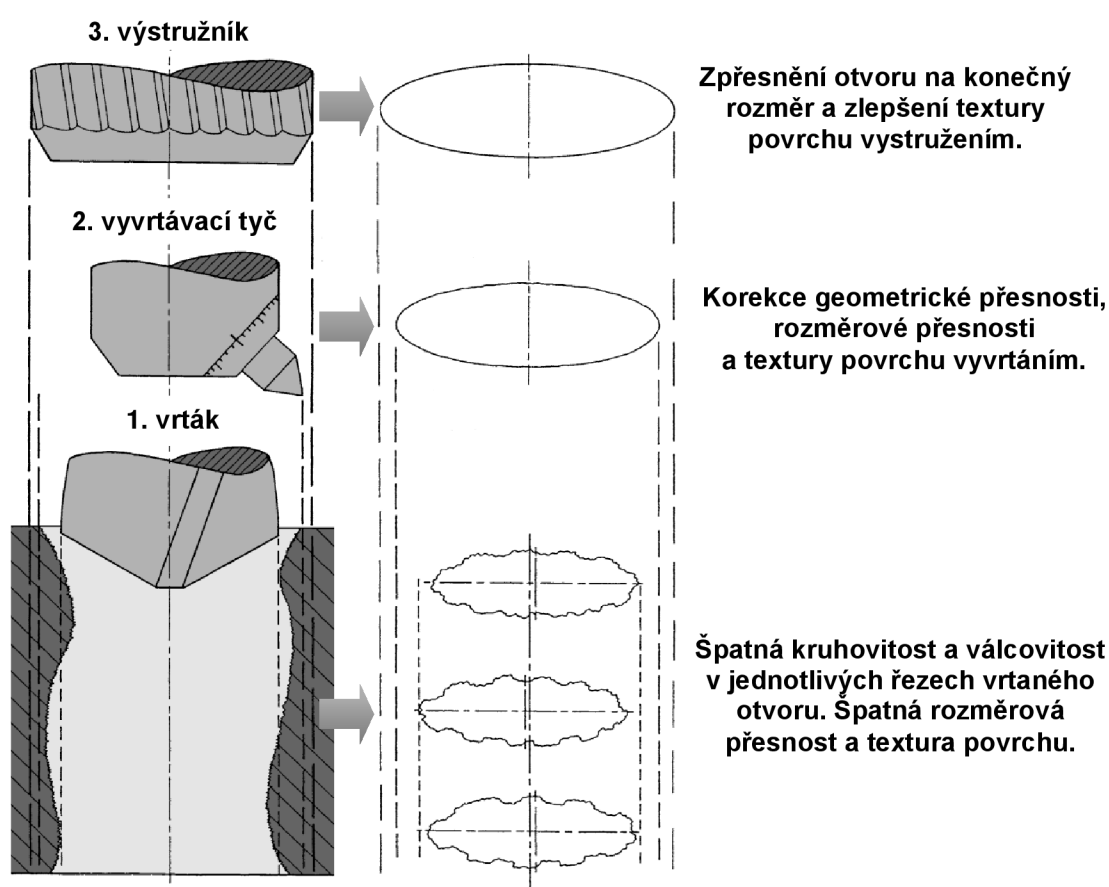
Fázové a strukturní změny jsou charakteristické pro broušení, kdy dosahované teploty převyšují teploty fázových přeměn. Ohřev je při technologii broušení velmi rychlý ( $10^5 - 10^6$  °C/s) a působí krátce ( $10^{-1} - 10^{-3}$  s)<sup>5</sup>.



### 3 VYSTRUŽOVÁNÍ A VYSTRUŽOVACÍ NÁSTROJE

Při volbě technologie a výběru obráběcího nástroje se proces obrábění mnohdy dělí na hrubovací a dokončovací operace. Vystružování patří bezesporu k dokončovacím operacím. Ve většině případů, kde se vystružování používá, se jedná o poslední operaci při obrábění otvoru. Pouze v malém počtu případů, při zvláště vysokých požadavcích na kvalitu vyráběného otvoru, následuje po vystružování ještě další operace - broušení, válečkování, honování apod.<sup>35</sup>

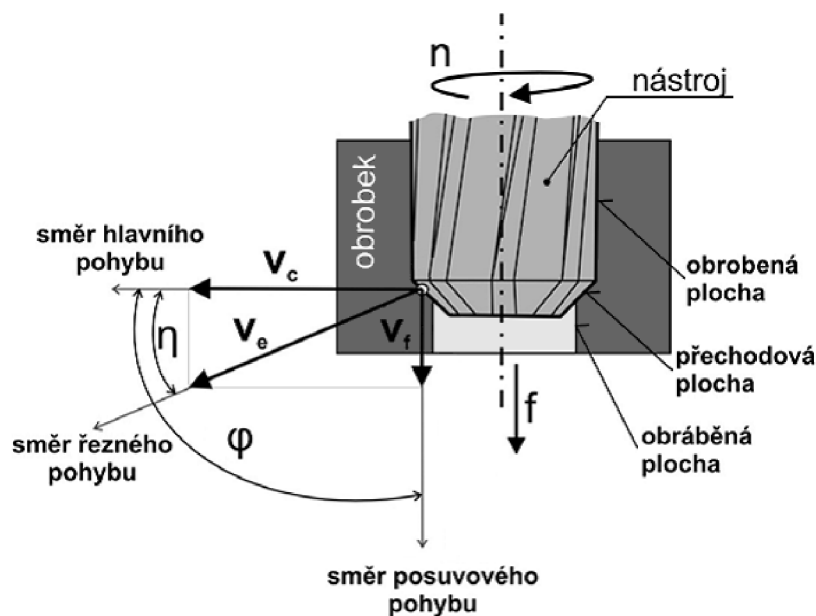
Vystružování zpravidla navazuje na předchozí operace, kterými jsou vrtání vrtákem, následované vyvrtáním. U technologie vystružování je třeba brát v úvahu, že tyto předchozí operace a při nich realizované plochy mají často rozhodující vliv na výsledné parametry přesnosti vystruženého otvoru. Při obecném postupu - vrtání, vyvrtání a vystružení dochází k postupnému zpřesňování příslušných ploch obráběné součásti. Pokud nejsou předchozí operace správně provedeny, pak často právě z těchto důvodů nejsou výsledky po vystružování vyhovující. Vystružovací nástroj neodstraní takové nepřesnosti, jako jsou nesouosost, nepřímota a nekrouhlost otvoru a jeho špatná poloha vůči výchozím základnám. Tyto nepřesnosti musí být odstraněny už v předchozí operaci. Výstružníkem lze zabezpečit pouze rozměrovou přesnost a předepsanou texturu povrchu otvoru viz obr. 3.1<sup>29,36,37,38</sup>.



Obr. 3.1 Sled operací zlepšující kvalitativní parametry otvoru<sup>29</sup>

### 3.1 Kinematika vystružovacího procesu

Hlavní pohyb při vystružování je rotační, vykonává ho nástroj – výstružník. (Při vystružování na soustruhu koná hlavní rotační pohyb obrobek.) Posuvový pohyb je přímočarý a vykonává ho rovněž výstružník viz obr. 3.2<sup>36</sup>.



Obr. 3.2 Kinematické souvislosti nástroje a obrobku při vystružování<sup>42</sup>

Hodnoty řezné rychlosti  $v_c$ , posuvové rychlosti  $v_f$  a rychlosti řezného pohybu  $v_e$  lze vyjádřit na základě následujících vztahů:<sup>36</sup>

$$v_c = \pi \cdot D \cdot n \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

$$v_f = 10^{-3} \cdot f_{ot} \cdot n \quad (5)$$

$$f_{ot} = f_z \cdot z \quad (6)$$

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{v_f}{v_c} = \frac{f_{ot}}{\pi \cdot D} \quad (8)$$

kde:

$v_c$  - řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]

$D$  - jmenovitý průměr vystružovaného otvoru [mm]

$n$  - otáčky nástroje [ $\text{min}^{-1}$ ]

$v_f$  - posuvová rychlost [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]

$f_{ot}$  - posuv na otáčku nástroje [mm]

$f_z$  - posuv na zub nástroje [mm]

$z$  - počet zubů nástroje

$v_e$  - rychlosti řezného pohybu [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]

$\eta$  - úhel výslednice řezné rychlosti [ $^\circ$ ]

### 3.2 Stanovení velikosti přídavku pro vystružování

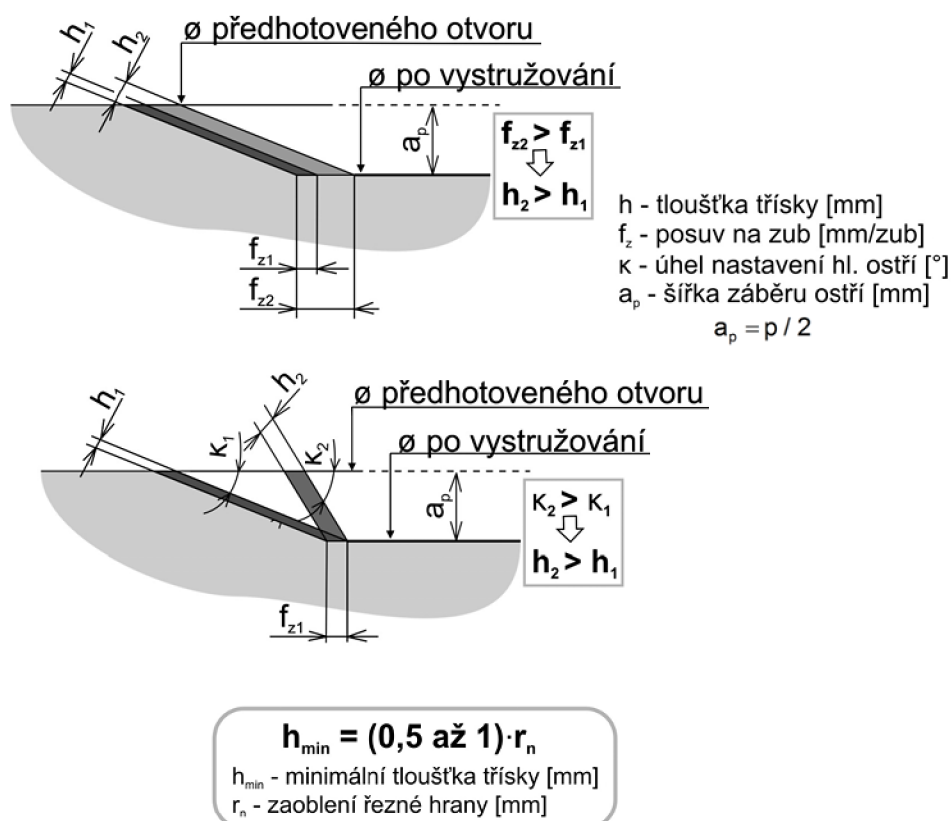
Optimálně stanovený přídavek pro vystružování patří k významným faktorům ovlivňujícím výslednou kvalitu vystružovaného otvoru. Přídavek nesmí být příliš malý, protože by nástroj v tomto případě obráběný materiál neodřezával, ale pouze elasticky a plasticky deformoval a vytvořený otvor by neměl požadovaný kruhový průřez (vznikal by mnohohran), ani požadovanou drsnost povrchu. Navíc by docházelo v důsledku vysokého tlaku a tření na ostří nástroje ke zvýšenému otěru, což se projeví snížením trvanlivosti nástroje<sup>39,43</sup>.

V praxi se obvykle určuje přídavek na průměr vystruženého otvoru dle vztahu (9)<sup>43</sup>

$$p = 0,1 + 0,005 \cdot D \quad (9)$$

kde:  $p$  - přídavek na průměr otvoru [mm]  
 $D$  - jmenovitý průměr vystružovaného otvoru [mm]

Vliv velikosti přídavku se do řezného procesu promítá prostřednictvím tloušťky třísky viz. obr 3.3. Pro dosažení požadovaných parametrů otvoru je zapotřebí dodržet určitou minimální tloušťku třísky  $h_{min}$  (viz. podkap. 2.3). Tloušťku třísky je možno ovlivňovat velikostí pracovního posuvu a úhlu nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$  viz obr. 3.3<sup>39</sup>.



Obr. 3.3 Vliv velikosti posuvu a úhlu záběru hlavního ostří na tloušťku třísky<sup>42</sup>

### 3.3 Trvanlivost vystružovacího nástroje

Trvanlivost nástroje je určena intervalem mezi jeho nasazením do řezného procesu a vznikem poruchy (postupná – např. opotřebení, náhlá – např. vylomení břitu), kterou končí provozuschopný stav nástroje. Jako kritérium vzniku poruchy je možno sledovat: opotřebení břitu, drsnost povrchu vystruženého otvoru, úchylku průměru vystruženého otvoru, změnu velikosti řezné síly apod<sup>36</sup>.

Při vystružování se trvanlivost vyjadřuje jako čas řezného procesu  $T$  [min], dráha řezu  $l_T$  [m] nebo jako délka vystruženého otvoru  $L_T$  [m]. V hromadné automatizované výrobě se s ohledem na seřizování výrobních strojů uvádí v počtech kusů vystružených součástí určitého typu  $n_T$ . Hodnoty  $l_T$  a  $L_T$  lze určit ze známé hodnoty trvanlivosti  $T$  [min], otáček nástroje  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ], jmenovitého průměru otvoru  $D$  [mm], posuvu na otáčku  $f_{ot}$  [mm] ze vztahů (10) a (11)<sup>36</sup>.

$$l_T = \pi \cdot D \cdot n \cdot 10^{-3} \cdot T \quad [\text{m}] \quad (10)$$

$$L_T = \pi \cdot f_{ot} \cdot 10^{-3} \cdot T \quad [\text{m}] \quad (11)$$

### 3.4 Výpočet strojního času vystružování

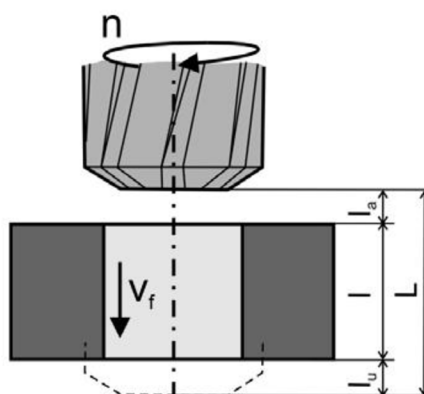
Jednotkový strojní čas vystružovacího procesu lze obdobně jako u vrtání určit z obr. 3.4 dle vztahu (12)<sup>39</sup>.

$$t_{AS} = \frac{L}{f_{ot} \cdot n} \quad (12)$$

$$L = l + l_a + l_u \cong l + D \quad (13)$$

kde:

- $t_{AS}$  - jednotkový strojní čas [min]
- $f_{ot}$  - posuv na otáčku nástroje [mm]
- $n$  - otáčky nástroje [ $\text{min}^{-1}$ ]
- $L$  - celková dráha pro průchozí otvor [mm]
- $l$  - tloušťka obráběného dílce [mm]
- $l_a$  - dráha náběhu [mm]
- $l_b$  - dráha přeběhu [mm]



Obr. 3.4 Dráha nástroje<sup>42</sup>

### 3.5 Druhy vystružovacích nástrojů

Tab. 3.1 Vystružovací nástroje dle různých hledisek dělení<sup>43,40,51,57</sup>

VYSTRUŽOVACÍ NÁSTROJE		
Dle tvaru řezné části		
	válcové	
	kuželové	
Dle konstrukce		
pevné	monolitní	
	s pájenými břity	
	s mechanicky upnutými břity	
	stavitelné	
	rozpínací	
Dle způsobu upnutí		
stopkové	s válcovou stopkou	
	s kuželovou stopkou	
	nástrčné	
Dle způsobu práce		
	strojní	
	ruční	

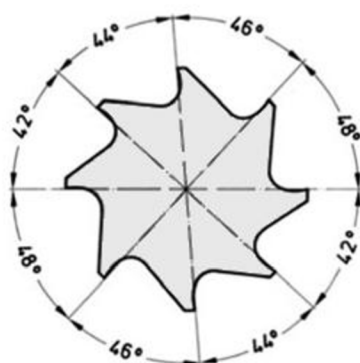
Vystružovací nástroje lze dělit podle různých hledisek viz. tab. 3.1 Pro bližší přiblížení konstrukčního řešení jednotlivých druhů nástrojů, které není z obrázků v tab. 3.1 dostatečně patrné jsou krátce rozebrány následující druhy.

Kuželové výstružníky jsou určeny k výrobě kuželových otvorů z předpracovaných válcových děr. Např. otvory pro kuželové kolíky se po vrtání válcového otvoru vystružují jedním výstružníkem, otvory pro Morse kužely se po vrtání vystružují sadou výstružníků. Kuželové výstružníky mají řezný kužel (hlavní břity) po celé délce řezné části a vodící část (vedlejší břity) v původním smyslu zde není<sup>39,52</sup>.

Stavitelné výstružníky mají zuby posuvné v drážkách na kuželové ploše tělesa výstružníku. Posunutím zubů ve směru osy nástroje se průměr obalové kružnice zubů zvětšuje nebo zmenšuje. Prostřednictvím kroužkového kalibru lze tedy nastavit v určitém rozsahu potřebný průměr nástroje<sup>27,53</sup>.

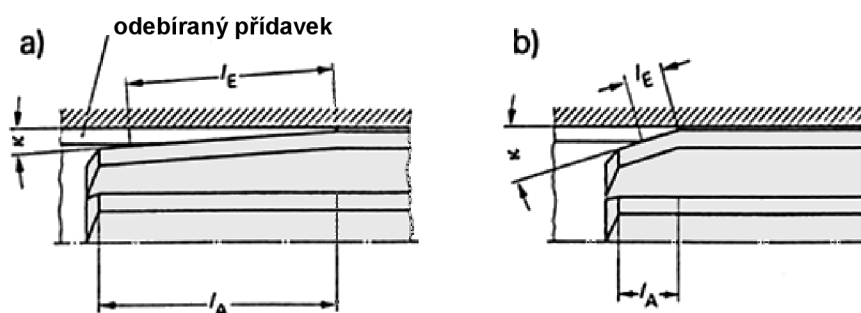
Rozpínací výstružníky mají duté těleso rozříznuté mezi jednotlivými zuby v podélném směru. Vtlačováním kuličky, nebo kuželového trnu do kuželové díry v tělese se výstružník rozpíná a zvětšuje se tak průměr obalové kružnice zubů<sup>27</sup>.

Strojní výstružníky se vyznačují kratším řezným kuželem a válcovou nebo kuželovou stopkou, větší průměry nástrojů jsou konstruovány jako nástrčné. Mají přímé zuby s nerovnoměrnou roztečí viz obr. 3.5 nebo zuby ve šroubovici. Nerovnoměrná rozteč zabraňuje vzniku hranatosti otvoru. Aby bylo možno měřit průměr výstružníku, jsou vždy protilehlé zuby pootočený o 180°<sup>55</sup>.



Obr. 3.5 Nerovnoměrná rozteč zubů výstružníku<sup>25</sup>

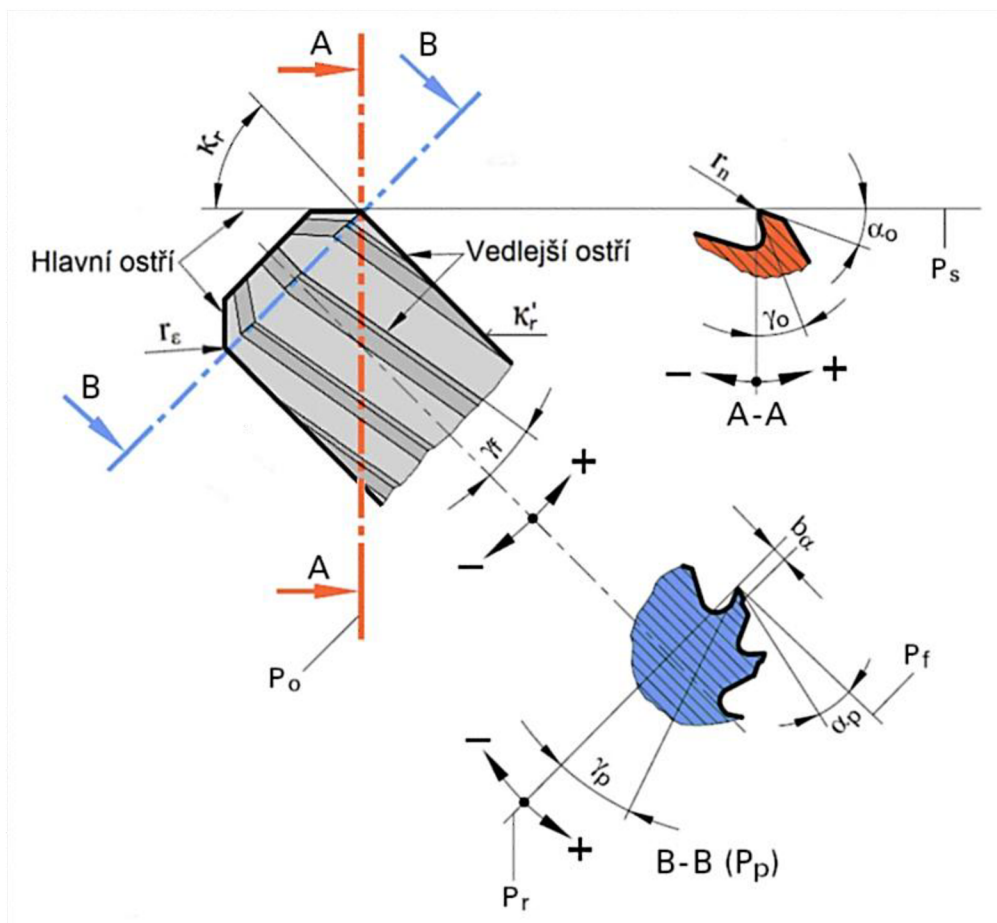
Ruční výstružníky (obr. 3.6a) se vyznačují proti strojním (obr. 3.6b) delším řezným kuželem a jsou zakončeny stopkou se čtyřhranem, který se upíná do vratidla<sup>55</sup>.



Obr. 3.6 Řezná část strojního a ručního výstružníku<sup>25</sup>

### 3.6 Geometrie a tolerance vystružovacího nástroje

Geometrie řezné části vystružovacího nástroje je výrobním tajemstvím každého výrobce. Na obr. 3.7 je schematicky naznačena obecná geometrie vystružovacího nástroje spolu s jednotlivými nástrojovými úhly v daných nástrojových rovinách.



Obr. 3.7 Geometrie vystružovacího nástroje<sup>41</sup>

**Úhel čela**  $\gamma_o$  ( $\gamma_f$ ,  $\gamma_p$ ) nejvíce ovlivňuje řezný proces. Zmenšuje-li se, nebo dosahuje záporných hodnot, zvětšuje se intenzita plastické deformace a velikost tření mezi čelem nástroje a odcházející třískou. Zvětšuje-li se, zvětšuje se mechanické namáhání břitu, což může vézt v kritickém případě až k jeho mechanickému poškození<sup>40</sup>.

**Úhel hřbetu**  $\alpha_o$  ( $\alpha_p$ ) ovlivňuje polohu hřbetu břitu vzhledem k ploše řezu a tím i tření mezi hřbetem a plochou řezu. Zmenšuje-li se úhel hřbetu, zvětšuje se styková plocha hřbetu a plochy řezu, roste tření a tedy i nepříznivé ovlivnění obrobenej plochy<sup>40</sup>.

**Úhel nastavení hlavního ostří**  $\kappa_r$  ovlivňuje polohu hlavního ostří vzhledem k obrobku a obrobenej ploše v základní rovině. Velikost úhlu  $\kappa_r$  určuje tvar jmenovitého průřezu třísky (viz obr. 3.3) a poměr mezi posuvovou a pasivní silou<sup>40</sup>.

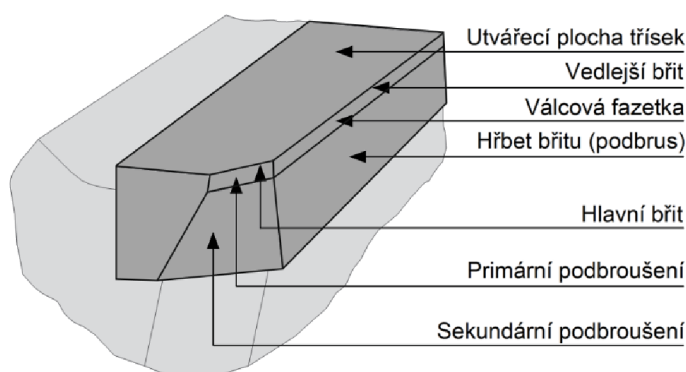
**Úhel nastavení vedlejšího ostří**  $\kappa_r$  ovlivňuje drsnost obrobené plochy. Zmenšuje-li se, snižuje se drsnost obrobené plochy<sup>40</sup>.

**Poloměr špičky nástroje**  $r_\epsilon$  ovlivňuje drsnost obrobené plochy, velikost pasivní síly a velikost opotřebení břitu. Zvětšuje-li se poloměr špičky, zmenšuje se drsnost obrobené plochy a opotřebení břitu, roste pasivní síla<sup>40</sup>.

**Poloměr zaoblení ostří**  $r_n$  ovlivňuje minimální tloušťku odebírané třísky  $h_{\min}$ . Při zmenšení  $r_n$  lze zmenšit i tloušťku třísky (viz obr. 3.3).

**Fazetka**  $b_\alpha$  je válcová plocha, která slouží pro vedení nástroje v otvoru. Její šířka se pohybuje v řádu desetin milimetru<sup>27</sup>.

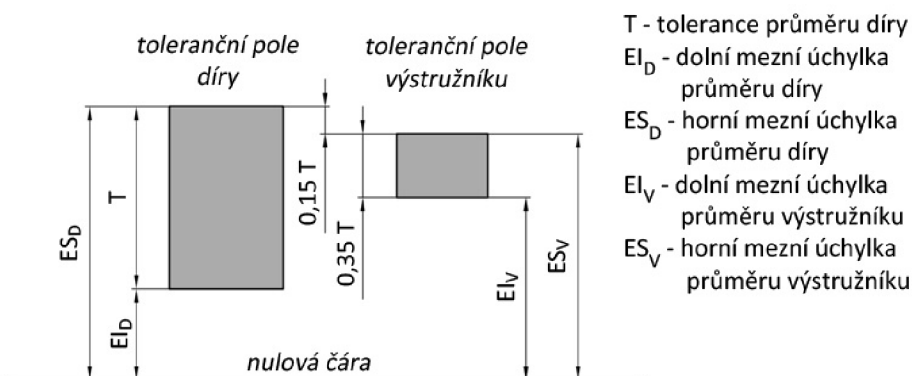
Názornější přiblížení tvaru řezné části vystružovacího nástroje je uvedeno na obr. 3.8 s vyznačenými charakteristickými plochami geometrie nástroje.



Obr. 3.8 Funkční plochy řezné části výstružovacího nástroje<sup>43</sup>

### **Tolerance vystružovacího nástroje**

Kromě nástrojových úhlů je při řešení konstrukce vystružovacího nástroje rovněž důležité stanovení jeho tolerance. Obvykle se poloha a velikost tolerančního pole vystružovacího nástroje vzhledem k velikosti a poloze požadovaného tolerančního pole otvoru stanovuje dle obr. 3.9.



Obr. 3.9 Toleranční pole vystružovacího nástroje<sup>62</sup>



### 3.7 Řezné materiály vystružovacích nástrojů

Spolu s vývojem stále novějších řezných materiálů a povlaků jsou tyto materiály uplatňovány i v konstrukci vystružovacích nástrojů. Přesto lze ještě stále v současném sortimentu vystružovacích nástrojů předních světových výrobců nalézt nástroje z rychlořezných ocelí, které jsou však díky svým výkonostním parametrům uváděny v katalogích čím dál méně. Standardní materiály aplikované na řezné části vystružovacích nástrojů jsou slinuté karbidy a cermety, v povlakovaném či nepovlakovaném provedení. V současné době se i do oblasti vystružovacích nástrojů čím dál více prosazují tzv. supertvrdé materiály polykrystalický diamant (PKD) a polykrystalický kubický nitrid bóru (PKNB). Možné aplikace vystružovacích nástrojů z různých řezných materiálů jsou uvedeny v tab. 3.2.

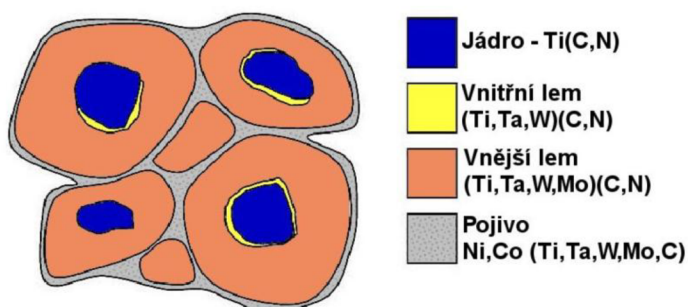
Tab. 3.2 Přehled řezných materiálů a jejich aplikace pro vystružování<sup>42</sup>

Řezný materiál	Obráběný materiál
Slinutý karbid	univerzální použití
Cermet	ocel, tvárná litina
PKNB	šedá litina, kalené materiály
PKD	hliník, neželezné kovy

Významný podíl ze zmíněných řezných materiálů zauímají při konstrukci vysoce produktivních vystružovacích nástrojů cermety. Nepovlakovaný cermet je rovněž aplikován na břity vystružovacího nástroje MT3 testovaného v experimentální části práce, a proto je dále věnována pozornost cermetům podrobněji.

#### Cermety

Název CERMET vznikl složením prvních tří hlásek slov "CERamics (keramika)" a "METal (kov)" a měl tak vyjadřovat nástrojový materiál, jehož mechanické vlastnosti vykazují kombinaci vysoké tvrdosti keramiky a vysoké houževnatosti kovu. Základní složení cermetů tvoří tvrdé částice  $TiC$ ,  $TiN$ ,  $Ti(C,N)$ ,  $Mo_2C$  + pojivo  $Ni$ ,  $Mo$ <sup>61</sup>. Tvrdé částice cermetu vytvářejí zrna, která obsahují jádro  $Ti(C,N)$ , obalené lemy z komplexních karbonitridů jak je schématicky naznačeno na obr. 3.10<sup>10</sup>.



Obr. 3.10 Schéma struktury cermetu<sup>10</sup>

Z hlediska vlastností je největší výhodou cermetů jejich vysoká tvrdost, která zůstává zachována i při použití za zvýšených teplot. Dále mají vyšší chemickou stabilitu, odolnost proti oxidaci a tvorbě nárůstku. Jejich hlavní nevýhodou je nižší houževnatost, která je sice s postupujícím vývojem neustále zvyšována, ale přesto nedosahuje hodnot jako u slinutých karbidů. Díky vynikající odolnosti proti adhezi a nízké náchylnosti TiC a TiN k reakci s obráběným ocelovým materiálem (v porovnání s karbidem wolframu WC) jsou cermety velmi rozšířenými řeznými materiály pro vystružování a obecně dokončovací obrábění ocelí, kde jsou schopny vytvářet plochy s velmi nízkou drsností povrchu<sup>10</sup>.

Z hlediska řezných podmínek lze u nástrojů z cermetu v porovnání s nástroji z běžných slinutých karbidů uplatnit až několikanásobně vyšší řezné rychlosti při delší trvanlivosti ostří řezných břitů a tím roste i produktivita obrábění. Určitým problémem je, že se při obrábění vysokou řeznou rychlostí značně zahřívá pracovní část výstružníku, což negativně ovlivňuje řezný materiál - cermet. Nedostatečně intenzivní chlazení potom vede k předčasnému opotřebení nástroje, v některých případech i k jeho destrukci. Proto je nezbytné zajištění centrálního přívodu chladicího a mazacího média a jeho rozdělení do každé zubové mezery nástroje<sup>59</sup>.

Značný rozdíl v aplikovatelných řezných podmínkách u vystružovacích nástrojů z cermetu oproti slinutým karbidům je možno dokladovat v tab. 3.3.

Tab. 3.3 Doporučené řezné podmínky pro výstružníky VRV firmy HAM-FINAL<sup>59</sup>

Posuv na otáčku: pro $\varnothing d < 8$ mm => $f = 0,2 - 0,4$ mm pro $\varnothing d > 8$ mm => $f = 0,3 - 0,6$ mm	Řezný materiál			
	Slinutý karbid	Slinutý karbid povlakovaný	Cermet	Cermet povlakovaný
Obráběný materiál	$v_c$ [ $m \cdot min^{-1}$ ]	$v_c$ [ $m \cdot min^{-1}$ ]	$v_c$ [ $m \cdot min^{-1}$ ]	$v_c$ [ $m \cdot min^{-1}$ ]
<b>Ocel k zušlechtnění</b> např. 42CrMo4	12 až 20	18 - 24	90 – 170	110 - 190
<b>Cementační ocel</b> např. 16MnCr5	15 - 25	18 - 26	100 – 150	150 - 190
<b>Automatová ocel</b> např. 9SMn28k	22 – 30	28 - 40	110 - 150	150 - 240
<b>Konstrukční ocel</b> např. St37	22 - 30	30 - 45	120 - 200	140 - 240
<b>Šedá litina GG</b> např. GG25	28 - 48	110 - 170	nevhodné	160 - 250
<b>Feritické tv. litiny GGG</b> např. GGG40	20 - 38	38 - 80	110 - 190	140 - 240
<b>CrNi-ocel</b> např. X5CrNi 18 10	nevhodné	25 - 35	nevhodné	nevhodné
<b>Hliník (Si &lt; 9 %)</b> např. AlSi7	40 - 110	nevhodné	nevhodné	nevhodné

### 3.8 Procesní kapaliny při vystružování

Fyzikální a chemické vlastnosti prostředí, ve kterém probíhá řezný proces, významně ovlivňují primární a sekundární plastickou deformaci třísky, teplotu řezání, řezný odpor, trvanlivost nástroje, přesnost a kvalitu obrobenej plochy. Volbou vhodného řezného prostředí lze obvykle při obrábění zvýšit hospodárny úběr o 50 až 200% v porovnání s obráběním za sucha, prodloužit trvanlivost a životnost řezných nástrojů a zvýšit kvalitu obrobenej plochy<sup>58</sup>.

Při procesu vystružování, dokončovací operaci obrábění otvorů, nabývá největšího významu vliv procesních kapalin na kvalitu povrchu a skutečný rozměr otvoru. Z tohoto hlediska je třeba procesní kapaliny využívané při vystružování rozlišovat na řezné oleje a emulgační oleje.

#### **Řezné oleje**<sup>49</sup>

- Zvětšují průměr vystruženého otvoru oproti skutečnému průměru výstružníku až o 0,01mm
- Zhoršují kvalitu povrchu
- Zvyšují trvanlivost břitů

#### **Emulgační oleje** (ředitelné vodou, koncentrace 3-10%)<sup>49</sup>

- Zmenšují průměr vystruženého otvoru oproti skutečnému průměru výstružníku až o 0,01mm
- Zlepšují kvalitu povrchu (menší koncentrace – kvalitnější povrch)
- Snižují trvanlivost břitů (menší koncentrace – menší trvanlivost)

Z uvedených důvodů dnes zajišťují renomovaní výrobci vystružovacích nástrojů odladění nástrojů u zákazníka včetně doporučení procesní kapaliny pro dosažení požadovaných parametrů obrobenej otvorů.

Další důležitou věcí, kromě volby vhodné procesní kapaliny, je volba dostatečného tlaku kapaliny, protože při vystružování sehrává procesní kapalina důležitou roli rovněž z hlediska rychlého odvodu třísek z obráběného otvoru.

Z hlediska způsobu přívodu procesní kapaliny do místa řezu se lze u moderních vystružovacích nástrojů setkat převážně s vnitřním přívodem kapaliny, který je realizován rozváděcími kanálky uvnitř nástroje. Tomuto konstrukčnímu řešení přívodu kapaliny, realizovaném na nástroji, musí samozřejmě odpovídat i možnosti přívodu procesní kapaliny vřetenem obráběcího stroje.

## 4 VYSTRUŽOVACÍ HLAVICE MT3 FIRMY HAM-FINAL

### 4.1 Představení firmy HAM-FINAL

HAM-FINAL, s.r.o. je německo-česká strojírenská firma, zabývající se vývojem, výrobou a prodejem moderních nástrojů pro vystružování, vyvrtávání a obrábění velmi přesných děr. Firma HAM-FINAL, s.r.o. vznikla v roce 1997 z původní firmy FINAL, která byla založena v roce 1991. Firma FINAL se zabývala vývojem a výrobou nástrojů pro třískové obrábění přesných děr. Firma HAM-FINAL tvoří součást koncernu HAM, GmbH<sup>49</sup>.

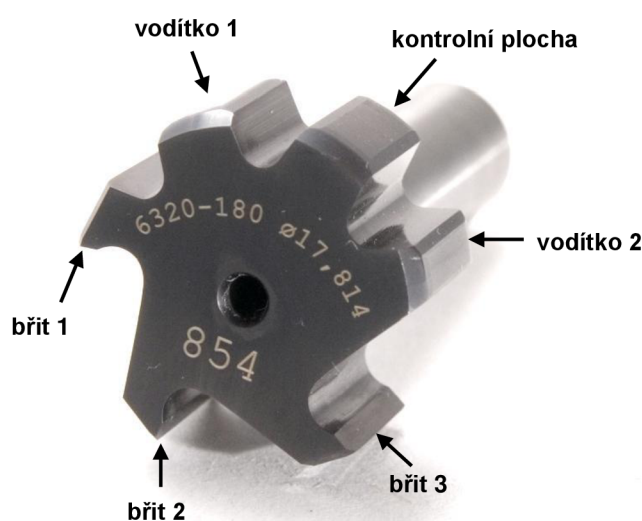
Mezi odběratele nástrojů patří ŠKODA auto, VW, OPEL, BOSCH, Aero, Letov, TRW, Embraco, ROTAX, RIETER, ale i další firmy v Německu, Rakousku, Itálii, Španělsku, Francii, Polsku, Švédsku<sup>49</sup>.

V současnosti se firma zabývá především vývojem a výrobou nástrojů využívaných v automobilovém průmyslu a při výrobě hydraulických komponentů. Hlavním výrobní program tvoří nástroje pro dokončovací třískové obrábění velmi přesných děr s břity ze slinutého karbidu, cermetu, polykrystalického kubického nitridu boru a polykrystalického diamantu. Jmenovitě do sortimentu produktů patří výstružníky, výhrubníky, vyvrtávací nástroje, kombinované a tvarové nástroje, speciální nástroje na zakázku a další. Pouhých 10% produkce nástrojů je tvořeno katalogovými nástroji a celých 90% tvoří speciální vystružovací nástroje vyvíjené v úzké spolupráci se zákazníky<sup>49,50</sup>.

Jeden zástupce speciálních vystružovacích nástrojů, nástroj MT3, bude testován v experimentální části této práce.

### 4.2 Konstrukční provedení vystružovací hlavičky MT3

Geometrie hlavičky MT3 je nové, původní řešení vystružovacího nástroje, které je chráněno evropským patentem. Hlavička má 3 břity na jedné polovině obvodu a 2 vodítka na druhé polovině viz obr. 4.1. Mezi vodítky se nachází válcová plocha, která slouží jako technologická základna a pro kontrolu rozměrů<sup>45</sup>.

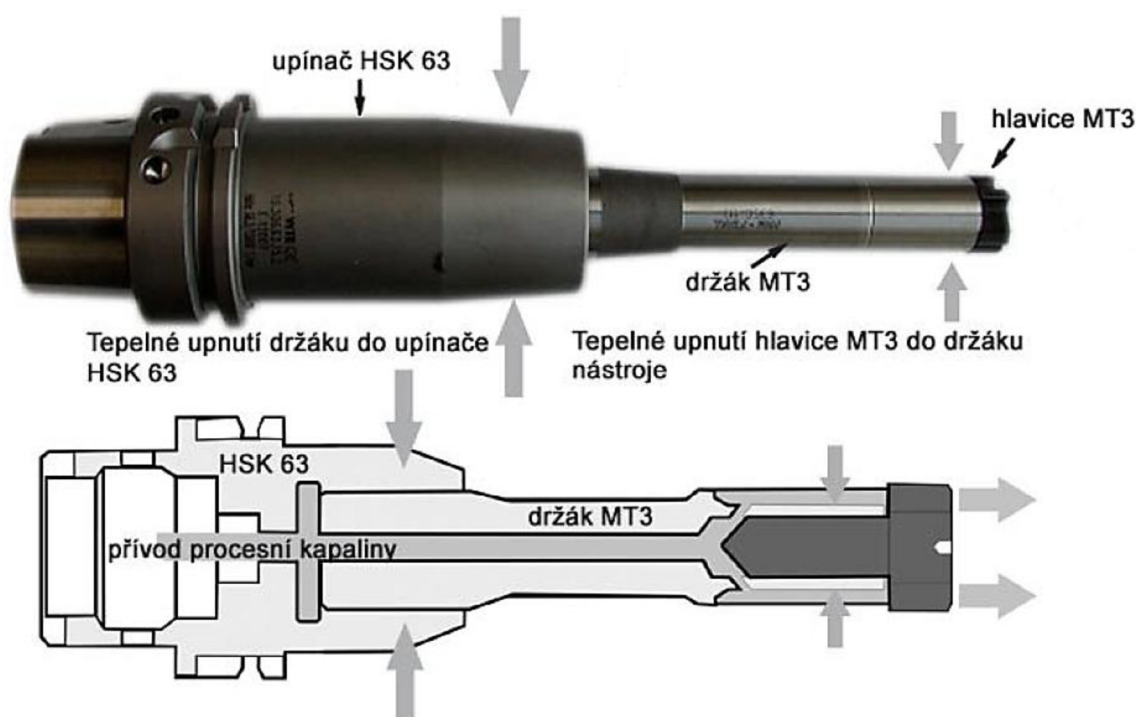


Obr. 4.1 Vystružovací hlavička MT3

Optimální rozmístění břitů a vodítek po obvodu hlavice zajišťuje podporu břitů v řezu a zamezuje vibracím. Klidný chod nástroje má příznivý vliv na dosahované výsledky obrábění, tzn. kruhovitost, válcovitost a drsnost obrobeného povrchu. Toto řešení se zároveň odráží ve zvýšení životnosti, a to i v porovnání s vícebřitými nástroji<sup>45</sup>.

Vystružovací hlavice je tepelně upnuta v tělese nástroje viz obr. 4.2. Tento způsob upnutí zajišťuje její spolehlivé a přesné ustavení bez nutnosti seřizování. Výměna hlavice v tělese nástroje je srovnatelná s výměnou VBD (vyměnitelné břitové destičky) v držáku. To přináší rovněž stejné výhody: rychlost, snadnost a přesnost výměny rezné části nástroje<sup>45</sup>.

Prívod pracovní kapaliny je řešen tělesem nástroje nejen k jednotlivým břitům, ale po celém obvodu hlavice i k vodítkům. Při vystružování neprůchozích děr je kapalina přiváděna středem vystružovací hlavice<sup>45</sup>.



Obr. 4.2 Kompletní konstrukční řešení nástroje MT3 s upínačem<sup>45</sup>

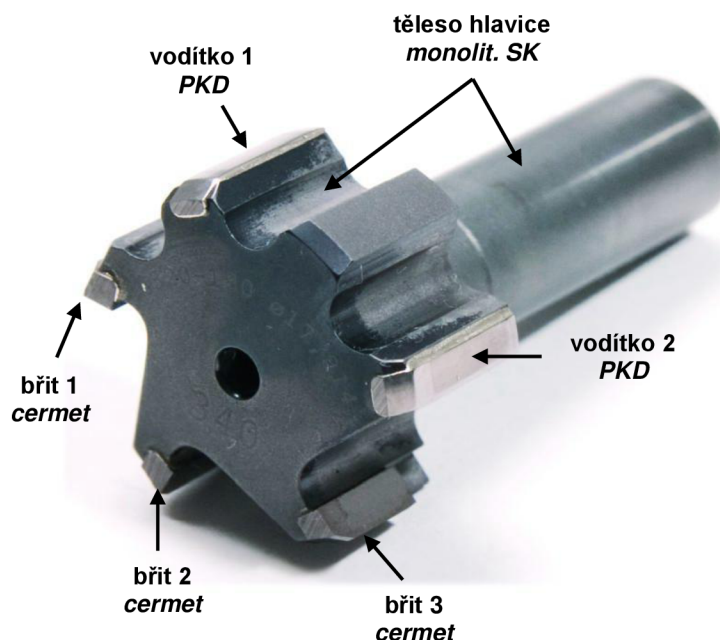
### **Historický vývoj konstrukce hlavice MT3**

Vývoj vystružovací hlavice MT3 začal v roce 2005.

První konstrukční varianta se skládala ze stopky ze slinutého karbidu (SK), ke které byla připájená monolitní rezná část z cermetu, která byla následně povlakována.

Další vývojová varianta se skládala z monolitního tělesa hlavice celého z SK, ke kterému byly v rezné části připájeny cermetové břity a cermetová vodítka, rezná část byla opět celá povlakována.

Aktuální poslední varianta hlavice MT3 se skládá z monolitního tělesa hlavice z SK (jako v předchozím případě), ke kterému jsou v řezné části připájeny břity z nepovlakovaného cermetu a vodítka z polykrystalického diamantu (PKD) viz obr. 4.3.



Obr. 4.3 Hlavice MT3 s břity z cermetu a vodítky z PKD

Kromě varianty hlavice MT3 s břity z cermetu je také aktuálně vyvinuta i varianta s břity z polykrystalického kubického nitridu boru (PKBN).

### **Řezné podmínky pro hlavice MT3**

Řezné podmínky se odvíjí od zvoleného řezného materiálu a materiálu obrobku vždy v daném konkrétním případě u zákazníka. Jako příklad lze uvést vystružování válce hydromotoru (viz. dále) z materiálu 42CrMo4 (ČSN 15 142) hlavicí MT3 s břity z cermetu, kde je aplikována řezná rychlost  $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a posuv na otáčku  $f_{ot} = 0,42 \text{ mm}^{45}$ .

### **Výhody konstrukčního řešení MT3<sup>47</sup>**

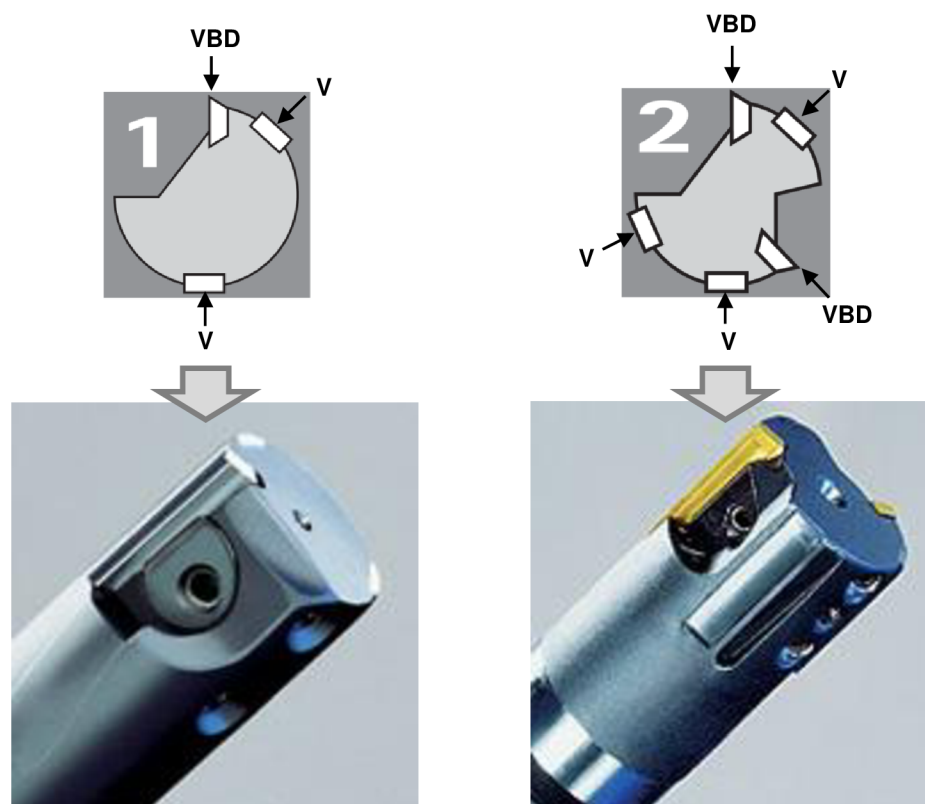
- možnost obrábění děr v přesnostech IT5 - IT6,
- drsnost obrobeného povrchu až  $R_a = 0,4 \text{ } \mu\text{m}$ , což umožňuje odstranění nákladné operace broušení,
- monolitní nebo pájené provedení vystružovací hlavice, tzn. není nutné seřizovat řezné segmenty nástroje,
- tepelné upnutí MT3 do tělesa nástroje, tzn. vysoká tuhost a přesnost, není nutné seřizování házivosti nástroje,
- správný odvod třísek a vyprazdňování vystružovaného otvoru,
- vysoká provozní spolehlivost.

#### 4.2 Konstrukční provedení nástrojů podobných MT3 u jiných firem

Po prostudování sortimentu předních světových výrobců vystružovacích nástrojů lze konstatovat, že konstrukční řešení vystružovacího nástroje s břity a vodítky v provedení bez výměnných břitových destiček nenabízí žádný jiný výrobce než firma HAM-FINAL.

Jako jistou podobnost s hlavici MT3 lze uvést vystružovací nástroje firmy MAPAL. Tento německý výrobce má již řadu desítek let patentovanou konstrukci jednobřitého vystružovacího nástroje s vodítky.

Z aktuálního sortimentu výrobce MAPAL lze uvést nástroje s označením WP viz obr 4.4. U těchto nástrojů je výměnná břitová destička (VBD) upnuta mechanicky a vodítka (V) jsou připájená. Přívod kapaliny je realizován vnitřkem nástroje. Výrobce nabízí pro obě konstrukční varianty (s jednou i se dvěma VBD) řezné materiály různých typů: SK nebo cermet (povlakované, nepovlakované), rovněž i PKD a PKBN. Vodítka mohou být z SK nebo cermetu, pro nejlepší parametry obrobeného povrchu jsou doporučena vodítka z PKD<sup>51</sup>.



Obr. 4.4 Konstrukční provedení nástrojů MAPAL WP<sup>51</sup>

Z podrobnějšího rozboru konstrukce nástroje se dvěma břitovými destičkami a třemi vodítky vyplývá, že tyto dvě břitové destičky jsou vzájemně axiálně a radiálně přesazeny, což není z obr. 4.4 patrné. Toto přesazení má za následek to, že nejdříve je část přídávku otvoru odebrána první břitovou destičkou a zbývající malá část přídávku je následně odebrána druhou břitovou destičkou<sup>51</sup>.

Je zde tedy jistý náznak hrubování první destičkou a dokončení druhou destičkou, což má za následek vysokou kvalitu povrchu otvoru a zvýšení životnosti nástroje<sup>51</sup>.

Firma MAPAL nabízí na podobném principu i speciální vystružovací nástroje s více břity a vodítky. Příklad takových nástrojů je uveden na obr. 4.5.



Obr. 4.5 Vystružování bloků motorů<sup>51</sup>

Na obr. 4.5 je zobrazen vystružovací nástroj pro obrábění válců v blocích motorů, který má po obvodu 6 výměnných břitových destiček z povlakovaného SK a 6 vodítek. Výměnné břitové destičky jsou zde aplikovány v provedení 4+2, kdy 4 břitové destičky jsou hrubovací a 2 dokončovací.

### 4.3 Praktická aplikace vystružovací hlavice MT3 ve firmě Sauer Danfoss

Firma Sauer Danfoss se řadí mezi přední světové výrobce a dodavatele hydraulických systémů pro mobilní pracovní stroje. Jedná se o axiální pístové hydrogenerátory, hydromotory, rozvaděče, hydrostatické pohony, servořízení a mnoho dalších příbuzných produktů. Do výrobního závodu v Považskej Bystrici na Slovensku byla průběžně od roku 1995 soustředěna výroba dílů hydromotorů<sup>48</sup>.

Mezi klíčové oblasti, které zajišťují úspěšné zvládnutí procesu výroby bloků válců hydromotorů, patří obrábění velmi přesných pístových děr viz obr. 4.6. Na rozměr, tvar i drsnost povrchu obrobených děr jsou zde kladeny velmi vysoké požadavky nejen z důvodů správné funkce, ale i z pohledu stoprocentně zaručené smontovatelnosti. To vyžaduje vyrábět díry o průměrech 16,1 až 25,9 mm a hloubkách 3÷4x D ve stupni přesnosti IT5-IT6 s drsností povrchu  $R_a = 0,25 \mu\text{m}$ <sup>48</sup>.

Pro původní technologii dokončování děr byly využívány dvoubřité vystružovací nástroje firmy MAPAL se seřiditelnými vyměnitelnými břitovými destičkami z cermetu s PVD povlakem mechanicky upevněnými v ocelovém tělese se třemi napájenými vodítky z PKD (viz obr. 4.4). Nastavení polohy řezných destiček se u těchto nástrojů provádělo v toleranci 0,002 mm na speciálním zařízení. Výsledky přesnosti vystružených děr a trvanlivosti břitů výstružníku byly velmi ovlivněny lidským faktorem<sup>48</sup>.



Průměrná trvanlivost břitů výstružníku dosahovala 24 obrobků (tj. přibližně 10 m vystružené díry). Při výrobě 88 000 obrobků to znamenalo přibližně 3 600x vyměnit výstružník a nastavit polohu řezných destiček v tělese výstružníků. Seřizování výstružníků, prostoje stroje, výměna nástrojů a odladění prvního obrobku, to vše výrazně ovlivňovalo produktivitu práce<sup>48</sup>.



Obr. 4.6 Příklad válce hydromotoru<sup>48</sup>

Se žádostí o spolupráci na inovaci vystružování děr v tělese hydromotorů byli osloveni přední světoví výrobci nástrojů se specializací na vystružování, např. Sandvik Coromant, Mapal, Dihart a další. Nejlepší výsledky včetně splnění požadovaných parametrů nakonec přinesla spolupráce s firmou HAM-FINAL a aplikace jejich nově vyvinutých vystružovacích nástrojů řady MT<sup>48</sup>.

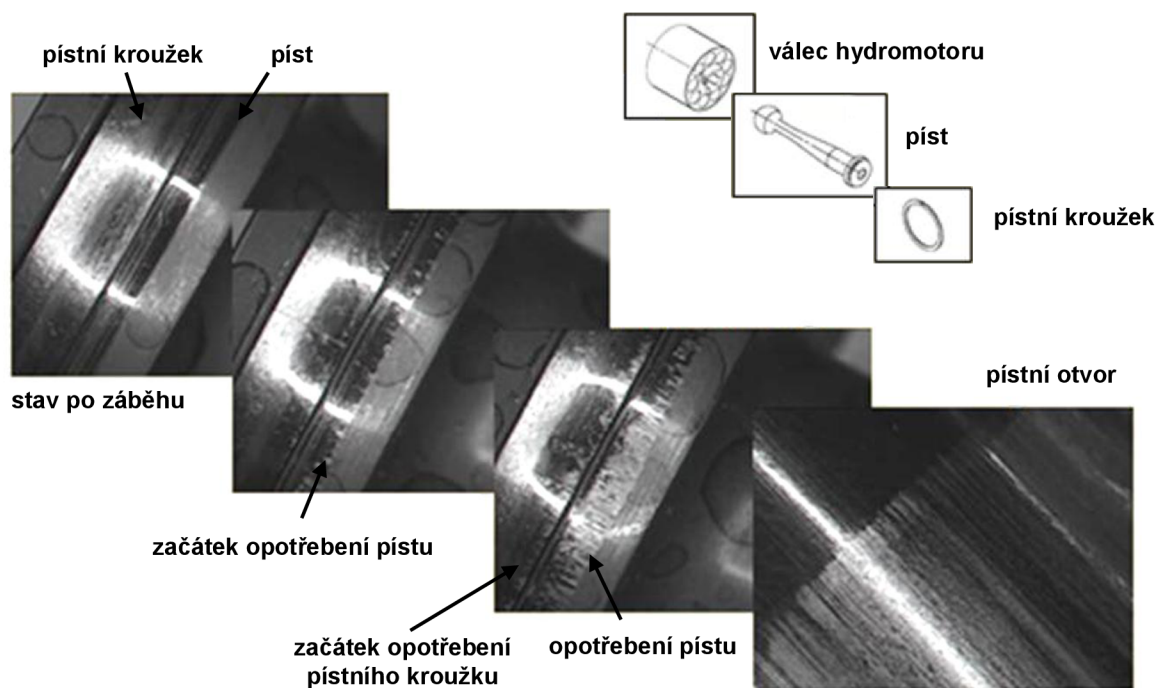
Dlouhodobé testování a vyhodnocování v podmínkách firmy Sauer Danfoss prokázalo, že výsledky dosahované s nástroji HAM-FINAL řady MT převyšují 8,3x výsledky původních nástrojů. Nasazením vystružovacích hlavic MT3, úpravou technologie přípravy otvoru a optimalizací pracovních podmínek obrábění bylo dosaženo:<sup>48</sup>

- vyšší spolehlivosti výrobního procesu (snížení zmetkovitosti),
- vyšší trvanlivosti břitů výstružníku – z původních 24 ks na 200 ks,
- snížení neproduktivních časů výroby (odstranění seřizování VBD, zvýšení posuvu výjezdu z řezu). Nasazení vystružovacích hlavic MT3 spolu s ostatními novými nástroji a optimalizace procesu přispěly ke zvýšení využití obráběcích center ze 75,3 % v roce 2007 na 85,5 % v roce 2011,
- zvýšení provozní spolehlivosti a životnosti hydromotorů prostřednictvím sledování parametrů integrity povrchu obrobených otvorů.

### **Hodnocení integrity povrchu ve firmě Sauer Danfoss**

Ve firmě Sauer Danfoss je u každého kusu vyrobeného válce hydromotoru měřen rozměr a tvar otvorů hned u obráběcího stroje vzduchovým měřidlem. Konkrétně je ve válci hydromotoru měřen každý 1., 3. a 9. otvor. Dále je 2x za směnu a po výměně výstružníku měřena na 3D měřicím přístroji v měřicím středisku kruhovitost a válcovitost. Rovněž 2x za směnu je měřena na kontrolním pracovišti drsnost povrchu Ra spolu s dalšími parametry drsnosti.

Kromě měření výše uvedených parametrů jsou pro komplexnější hodnocení integrity povrchu u válců hydromotorů hodnoceny i funkční vlastnosti – opotřebení. Tyto funkční vlastnosti jsou ověřovány funkčními zkouškami na reálném smontovaném hydromotoru, umístěném na testovací stoličce, kde je hydromotor po určitou dobu podroben zkušebnímu zatížení. Následně je rozmontován a je vizuálně hodnoceno opotřebení pístních otvorů ve válcích, pístů a pístních kroužků viz obr. 4.7.



Obr. 4.7. Opotřebení součástí hydromotoru

Při funkčních zkouškách existují ale i další indikátory, např. náhlé zvýšení množství a teploty unikajícího oleje, které během testovacího provozu také naznačují opotřebovávání součástí. Dle poznatků firmy se z hlediska opotřebení u zmíněných částí hydromotoru vyskytuje abrazivní a adhezní otěr. Tyto abrazivní a adhezní podmínky jsou také hlavními omezujícími podmínkami pro maximální otáčky hydromotorů. Popsané funkční zkoušky se provádí pouze při vývoji hydromotorů nebo při změně technologie výroby (změně dodavatele nástrojů).

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 5.1 Návrh experimentu

Prvním impulsem pro návrh experimentální části, byla snaha vývojových pracovníků firmy HAM-FINAL, výrobce vystružovacích nástrojů, dozvědět se detailněji, jak jejich nové konstrukční řešení vystružovacího nástroje MT3 ovlivňuje obrobený povrch otvorů.

Obecně, pokud má technolog vyrobit součást, v případě vystružování zhotovit otvor, s danými funkčními vlastnostmi dle požadavků konstruktéra, měl by k tomu mít informace o tom, jaké vlastnosti (parametry) povrchu jím vybraný nástroj při obrábění dosáhne. V dnešní době se ukazuje, že s rostoucími požadavky na životnost a spolehlivost u vybrané úzké skupiny součástí s vysokými funkčními požadavky nestačí pouze parametry povrchu jako, v případě vystružování, rozměrová přesnost, kruhovitost, válcovitost a drsnost povrchu, ale i další parametry, které nejsou v současné době běžně u výrobců nástrojů obvyklé. Pokud tedy bude zákazník (technolog) vyžadovat podrobnější informace o vlivu kupovaného nástroje na obrobený povrch, je tímto rovněž naznačena jistá konkurenční výhoda výrobce nástrojů, který se zajímá nejen o to, jakou, v případě vystružování, rozměrovou přesnost, kruhovitost, válcovitost a drsnost povrchu vytvoří jeho nástroj, ale vzhledem k rostoucím požadavkům na obráběné součásti i o to, jaké další vlivy má vybraný nástroj na zmíněné požadavky. Technolog by rovněž měl mít informace nejen o tom, jak ovlivňuje obrobený povrch nový neopotřeбенý nástroj, ale i opotřeбенý nástroj těsně před vyřazením z výrobního procesu. Jinými slovy, aby byly požadované vlastnosti povrchu obráběné součásti zachovány v průběhu celé trvanlivosti nástroje.

Na základě uvedených skutečností byl experiment stanoven následujícím způsobem. Pro experiment byl vybrán vystružovací nástroj MT3 firmy HAM-FINAL aktuální nejnovější konstrukce s cermetovými nepovlakovanými břity a vodítky z polykrystalického diamantu (PKD). Pro zachycení vlivu tohoto nástroje na obrobený povrch po dobu trvanlivosti byly použity tři nástroje MT3. Jeden na počátku jeho trvanlivosti, jeden uprostřed jeho trvanlivosti a jeden na konci jeho trvanlivosti. Byl tedy vybrán jeden úplně nový neopotřeбенý nástroj. Dále jeden, který měl za sebou výrobu 100 ks hydromotorů ve firmě Sauer Danfoss (SD), to odpovídá trvanlivosti z pohledu délky vystruženého otvoru  $L_T = 58,932$  m. A nakonec jeden, který měl za sebou výrobu 200 ks hydromotorů, to odpovídá trvanlivosti z pohledu délky vystruženého otvoru  $L_T = 117,864$  m. Hodnota 200 ks hydromotorů je ve firmě SD pro použití jednoho nástroje MT3 limitní z důvodu zachování bezpečnosti proti výrobě zmetkových součástí, poté je nástroj automaticky vyřazen a jde k výrobcovi na renovaci. (Nástroj MT3 může být ale také vyřazen dříve z důvodu nedodržení požadované drsnosti povrchu.) Každým ze třech uvedených nástrojů MT3 byly při totožných pracovních podmínkách obrobeny dva zkušební otvory (vzorky) do totožného materiálu, jaký je u válců hydromotorů v SD. Následně byla u těchto vzorků hodnocena integrita povrchu z těchto hledisek: kruhovitost, válcovitost, drsnost povrchu, změny mikrotvrlosti, metalografická analýza příčného výbrusu a hodnocení povrchových defektů pod elektronovým mikroskopem. Pro kompletnost byl také měřen průměr vystružených otvorů.

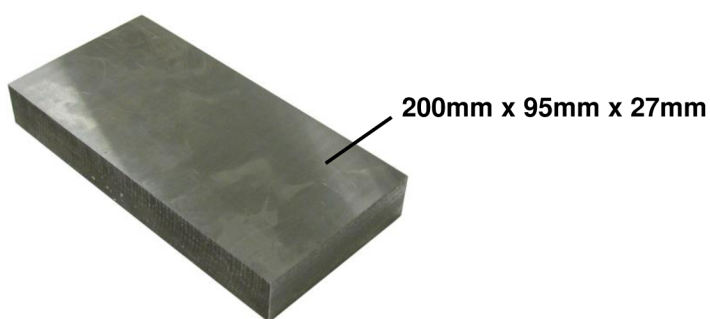
## 5.2 Zhotovení otvorů

### 5.2.1 Polotovar

Pro experiment byl vybrán materiál polotovaru totožný jako je při výrobě hydromotorů, tedy ocel 42CrMo4 (ekv. ČSN 15 142) zušlechtěna na 1000 MPa s chemickým složením dle tab. 5.1 a rozměry polotovaru dle obr. 5.1.

Tab. 5.1 Chemické složení materiálu polotovaru<sup>54</sup>

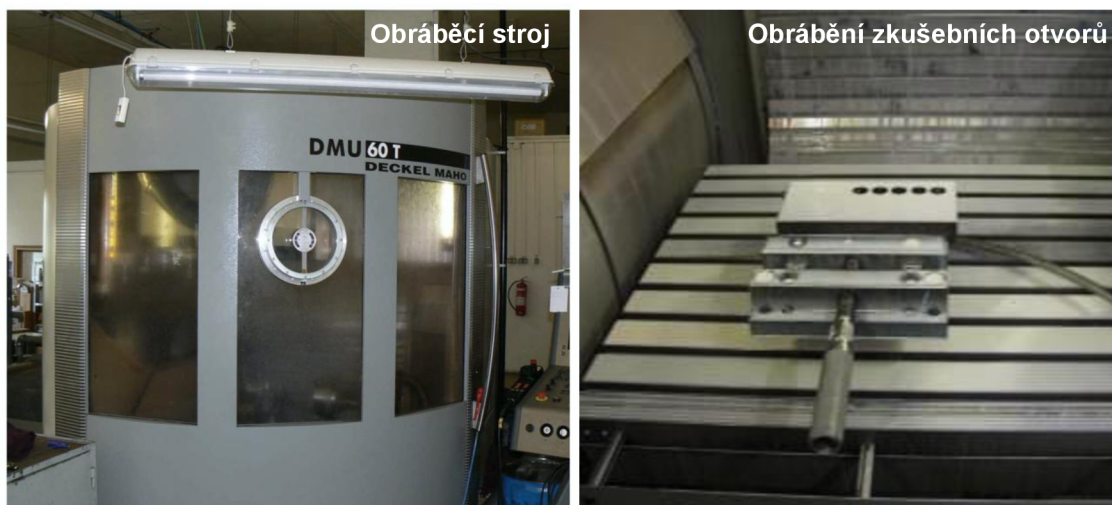
Prvek	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S
Obsah [%]	0,38-0,45	0,50-0,80	0,17-0,37	0,90-1,2	max 0,50	0,15-0,30	max 0,035	max 0,035



Obr. 5.1 Rozměry polotovaru

### 5.2.2 Obráběcí stroj

Obrábění otvorů bylo realizováno na 5-osém CNC obráběcím centru DECKEL MAHO DMU 60T viz obr. 5.2.



Obr. 5.2 Obráběcí centrum DECKEL MAHO DMU 60T<sup>56</sup>

### 5.2.3 Postup obrábění a použité nástroje

Sled obráběcích operací při zhotovení otvorů byl totožný, jako je při výrobě hydromotoru. Nejdříve operace vrtání, následuje vyvrtání a nakonec vystružení. Pro tyto operace byly zvoleny rovněž stejné nástroje (kromě vrtáku) jako při obrábění hydromotoru viz tab. 5.2. Operace vystružování byla realizována vystružovací hlavici MT3 s břity z nepovlakovaného cermetu a vodičky z PKD. Procesní kapalina byla použita emulze RHENUS R-COOL-S s koncentrací 10% a tlakem 40 bar.

Tab. 5.2 Technologický postup obrábění otvorů

Operace a použité nástroje		
Číslo operace	Název operace	Nástroj
1.	Vrtání	Vrták SK monolitní
2.	Vyvrtání	Vyvrtávací tyč jednobřítá s VBD geometrie WIPER
3.	Vystružení	Vystružovací hlavice MT3
Řezné podmínky		
Číslo operace	Řezná rychlost $v_c$ [ $m \cdot min^{-1}$ ]	Posuv $f_{ot}$ [mm]
1.	95	0,15
2.	150	0,35
3.	200	0,42

### 5.2.4 Obrobené otvory

Technologickým postupem dle tab. 5.2 bylo v polotovaru viz obr. 5.1 zhotoveno celkem 6 zkušebních otvorů. Pro dva otvory byla ve vystružovací operaci aplikována vystružovací hlavice MT3 nová (neopotřebovaná). Pro další dva otvory byla použita vystružovací hlavice MT3, která měla za sebou  $L_T = 58,932$  m vystruženého otvoru v SD. Pro poslední dva otvory byla použita vystružovací hlavice MT3, která měla za sebou  $L_T = 117,864$  m vystruženého otvoru v SD. Snímky stavu opotřebování obou nástrojů jsou uvedeny v příloze č. 1. Zkušební otvory byly označeny viz tab. 5.3.

Tab. 5.3 Seznam zhotovených otvorů

Hlavice MT3	Označení otvoru
nová	MD50
	MD51
$L_T = 58,932$ m	W1a
	W1b
$L_T = 117,864$ m	W2a
	W2b

## 5.3 Vyhodnocení otvorů

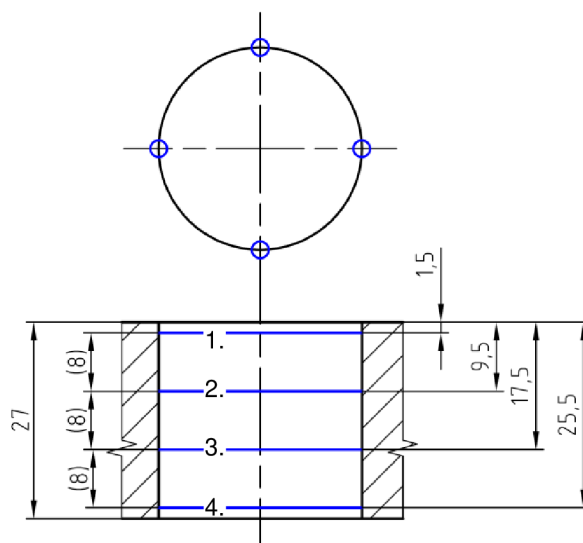
### 5.3.1 Měření průměru, kruhovitosti a válcovitosti

Měření třech sad vzorků, každá po dvou vystružených otvorech, bylo provedeno na 3-souřadnicovém měřicím přístroji Carl Zeiss PRISMO 7 viz obr. 5.3, který umožňuje měření kruhovitosti a válcovitosti v nespojitém i spojitým režimu.



Obr. 5.3 3D měřicí přístroj Carl Zeiss PRISMO 7

Měření otvorů bylo provedeno spojitým režimem (skenovací metodou) s počtem 18 bodů na 1 mm. Kruhovitost byla měřena ve 4 úrovních otvoru, pro měření válcovitosti byly ještě přidány 4 podélné úsečky ve směru osy otvoru po 90° obvodu otvoru viz obr. 5.4. Z naměřených hodnot přístroj určil průměr a válcovitost otvoru.



Obr. 5.4 Schéma měření kruhovitosti a válcovitosti otvoru

V tab. 5.4 jsou uvedeny naměřené hodnoty rozměru otvoru, kruhovitostí ve 4 úrovních délky otvoru viz obr. 5.4, průměrná hodnota těchto 4 kruhovitostí a válcovitost otvoru. Příklad záznamu z měření je uveden v příloze č. 2.

Tab. 5.4 Naměřené hodnoty rozměru, kruhovitosti a válcovitosti otvorů

otvor	rozměr [mm]	kruh. 1. [mm]	kruh. 2. [mm]	kruh. 3. [mm]	kruh. 4. [mm]	kruh. prům. [mm]	válc. [mm]
MD50	17,8203	0,0043	0,003	0,0028	0,0029	0,0033	0,0060
MD51	17,8209	0,0044	0,0027	0,0031	0,0026	0,0032	0,0061
W1a	17,8118	0,0067	0,0045	0,0028	0,0031	0,0043	0,0089
W1b	17,8104	0,0062	0,0042	0,0034	0,0037	0,0044	0,0083
W2a	17,8100	0,0057	0,0039	0,0020	0,0032	0,0037	0,0081
W2b	17,8114	0,0051	0,0038	0,0024	0,0025	0,0035	0,0066

Z uvedených naměřených hodnot v tab. 5.4 vyplývá, že se rozměr zkušebních otvorů pohyboval v rozsahu 17,8100 - 17,8209 mm, průměrná kruhovitost otvorů v rozsahu 0,0032 - 0,0044 mm a válcovitost v rozsahu 0,0060 - 0,0089 mm. Nejnižší hodnoty kruhovitosti a válcovitosti vykazují otvory (MD50 a MD51) zhotovené novým neopotřeбенým nástrojem MT3. Při porovnání hodnot kruhovitosti v jednotlivých úrovních otvoru vykazují všechny otvory největší hodnoty kruhovitosti na začátku otvoru. Tato skutečnost může být způsobena kmitáním nástroje při jeho zavádění do řezu.

### 5.3.2 Měření drsnosti povrchu

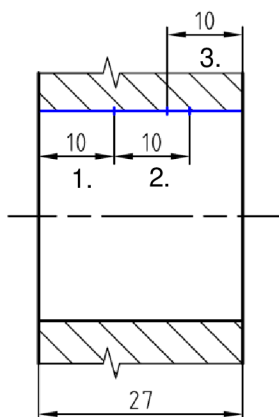
Měření drsnosti povrchu zkušebních otvorů bylo provedeno na měřicím přístroji Form Talysurf Intra 5.0 firmy Taylor Hobson viz obr. 5.5.



Obr. 5.5 Drsnoměr Form Talysurf Intra 5.0

Pro měření drsnosti povrchu byla stanovena vyhodnocovaná délka 10 mm. Délka otvoru 27 mm byla rozdělena na 3 úseky po 10 mm dle obr. 5.6. Měření drsnosti bylo provedeno v jedné přímce přes celou délku otvoru.

Nejdříve bylo měření provedeno v 1. úseku na délce od začátku otvoru do hloubky 10 mm, dále ve 2. úseku na délce dalších 10 mm. Pro zachování stejné vyhodnocované délky 10 mm pro všechny úseky se 3. úsek měřil na délce 10 mm od konce otvoru. Měřené úseky 2. a 3. se tedy částečně překrývaly.



Obr. 5.6 Schéma měření drsnosti povrchu otvoru

V tab. 5.5 jsou uvedeny naměřené hodnoty parametrů drsnosti Ra a Rz ve 3 úsecích délky měřeného otvoru viz. obr. 5.6 a průměrné hodnoty těchto 3 hodnot parametrů Ra a Rz. Příklad záznamu z měření je uveden v příloze č. 3.

Tab. 5.5 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu otvorů Ra a Rz

otvor	Ra [ $\mu\text{m}$ ]				Rz [ $\mu\text{m}$ ]			
	1.	2.	3.	prům.	1.	2.	3.	prům.
<b>MD50</b>	0,1823	0,1701	0,1682	0,1735	1,0092	0,9699	0,9750	0,9847
<b>MD51</b>	0,1630	0,1704	0,1757	0,1697	0,9228	0,9671	1,0069	0,9656
<b>W1a</b>	0,1183	0,1172	0,1183	0,1179	0,7072	0,7749	0,7432	0,7418
<b>W1b</b>	0,1288	0,1192	0,1207	0,1229	0,7576	0,7382	0,7674	0,7544
<b>W2a</b>	0,1335	0,1418	0,1457	0,1403	0,8188	0,8733	0,9290	0,8737
<b>W2b</b>	0,1384	0,1637	0,1669	0,1563	0,8184	1,0493	1,0098	0,9592

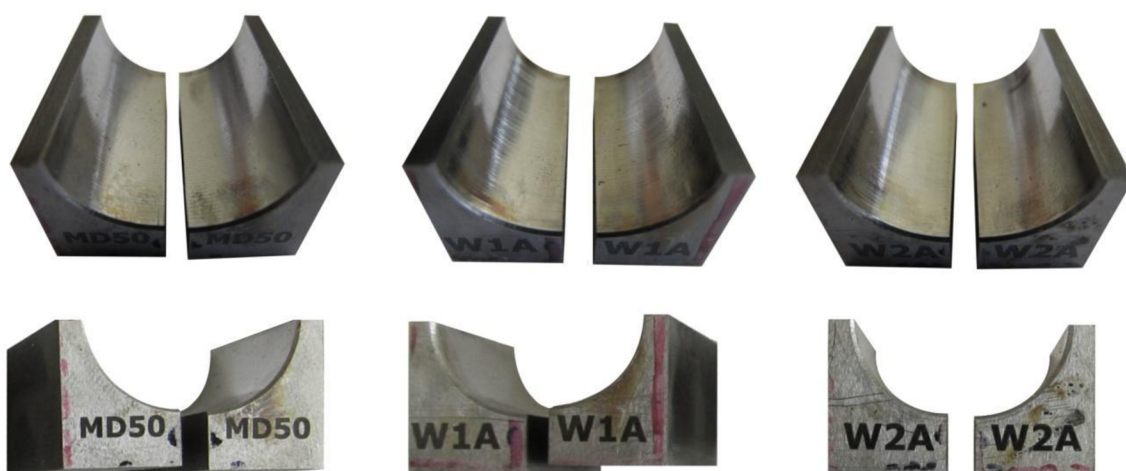
Z uvedených naměřených hodnot v tab. 5.5 vyplývá, že se průměrné hodnoty parametrů drsnosti povrchu Ra pohybovaly v rozsahu 0,1179 - 0,1735  $\mu\text{m}$ , průměrné hodnoty parametrů drsnosti povrchu Rz v rozsahu 0,7544 - 0,9847  $\mu\text{m}$ . Porovnání naměřených hodnot parametrů Ra a Rz v jednotlivých úsecích neukazuje u všech otvorů na možné zvýšení drsnosti povrchu v 1. úseku zkušebních otvorů jako v případě předchozího hodnocení kruhovitosti. Tento trend



vykazuje pouze otvor MD50, kdy je na začátku otvoru největší drsnost povrchu a dále se snižuje. U ostatních otvorů se maximální a minimální naměřené hodnoty drsností střídají postupně ve všech měřených úsecích otvorů. Pro přesnější konstatování by bylo třeba více otvorů a statisticky je vyhodnotit.

### 5.3.3 Příprava vzorků

Pro následující hodnocení mikrotvrdosti, metalografické hodnocení a hodnocení obrobeného povrchu pod rastrovacím elektronovým mikroskopem byly z polotovaru se zhotovenými zkušebními otvory odebrány zkušební vzorky viz obr. 5.7 elektroerozivní drátovou řezačkou.



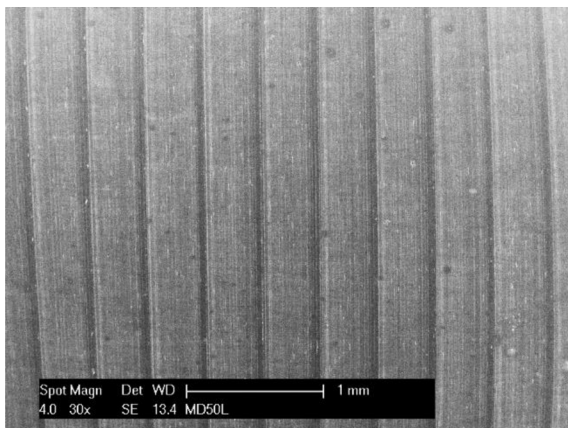
Obr. 5.7 Zkušební vzorky odebrané z polotovaru

Tento soubor vzorků byl ještě doplněn o vzorek, který byl odebrán z válce hydromotoru (viz obr. 4.6) vyrobeného ve firmě Sauer Danfoss. Tento vzorek s označením MD1h byl zhotoven totožným technologickým postupem jako vzorky obrobené v experimentu (vrtání, vyvrtání, vystružování), po kterém však ještě následovala dokončovací operace válečkování. Tento vzorek byl do hodnocení mikrotvrdosti, metalografického hodnocení a hodnocení obrobeného povrchu pod rastrovacím elektronovým mikroskopem zařazen pro porovnání stavu obrobeného povrchu na reálném hydromotoru v praxi, kdy po vystružování ještě následuje válečkování.

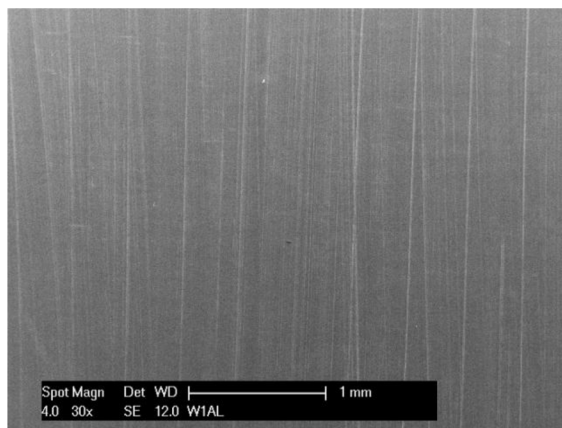
### 5.3.4 Hodnocení povrchových defektů pod elektronovým mikroskopem

Pro hodnocení povrchových defektů na obrobeném povrchu vzorků byl použit rastrovací elektronový mikroskop Philips XL 30 ESEM.

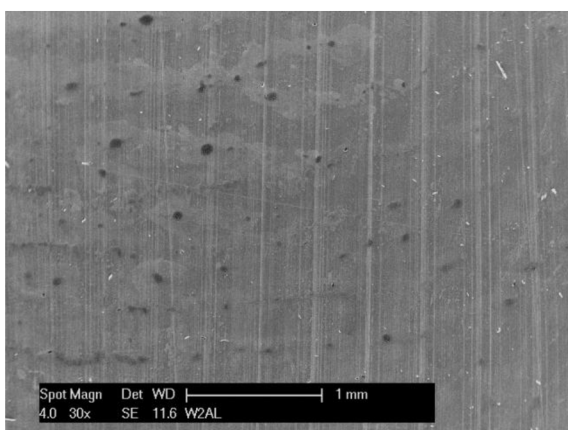
#### *Přehled stavu povrchu u obrobených vzorků*



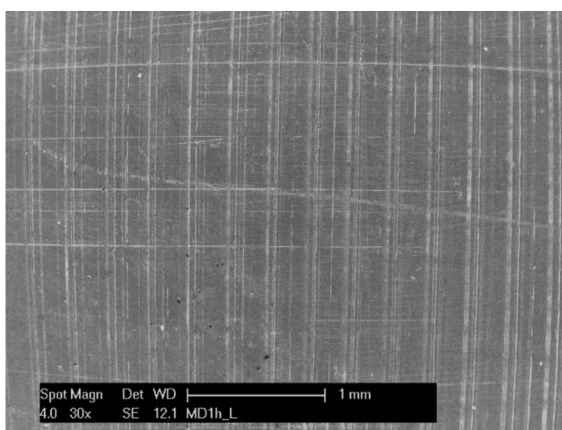
Obr. 5.8 Vzorek MD50



Obr. 5.9 Vzorek W1A



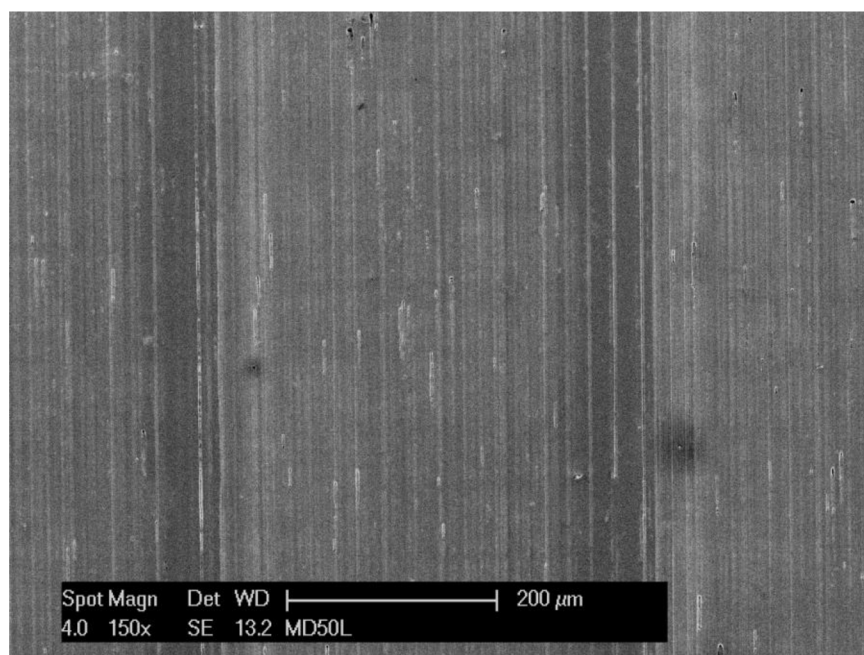
Obr. 5.10 Vzorek W2A



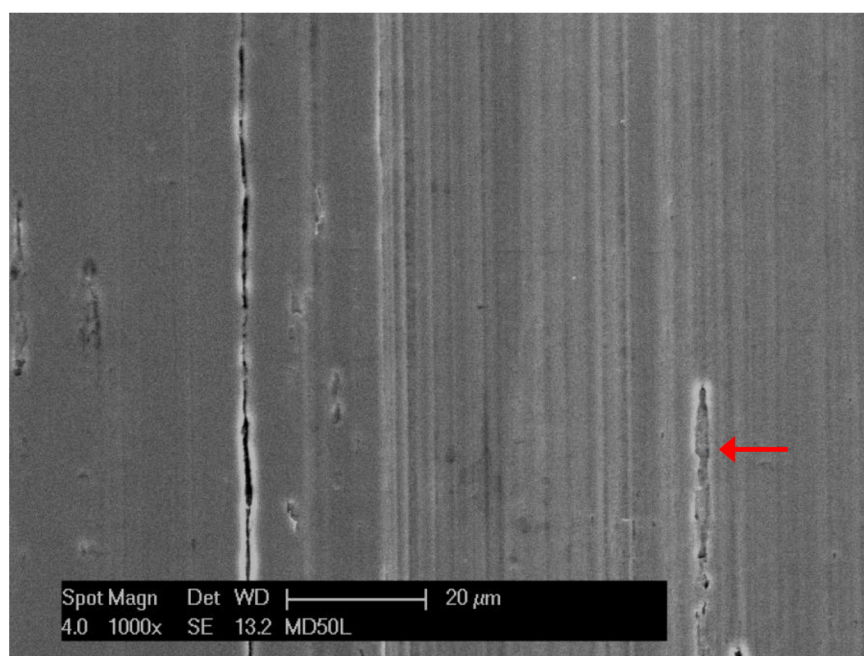
Obr. 5.11 Vzorek MD1h

Již při zvětšení 30x jsou na snímcích patrné rozdíly. Na obr. 5.8 jsou viditelné pravidelné hluboké stopy po obrábění, které odpovídají i nejvyšším naměřeným hodnotám drsnosti povrchu u vzorků MD50 a MD51, zhotovených nástrojem na začátku jeho trvanlivosti. Na obr. 5.10 jsou u vzorku W2A patrné stopy korozního poškození. Na obr. 5.11 jsou patrné hustě rozložené stopy po obrábění, po kterém následovalo válečkování.

Detailnější rozdíly ve stavu obrobených povrchů jsou zachyceny na dalších snímcích při větším zvětšení. (Osa otvoru je u všech snímků ve vodorovném směru)

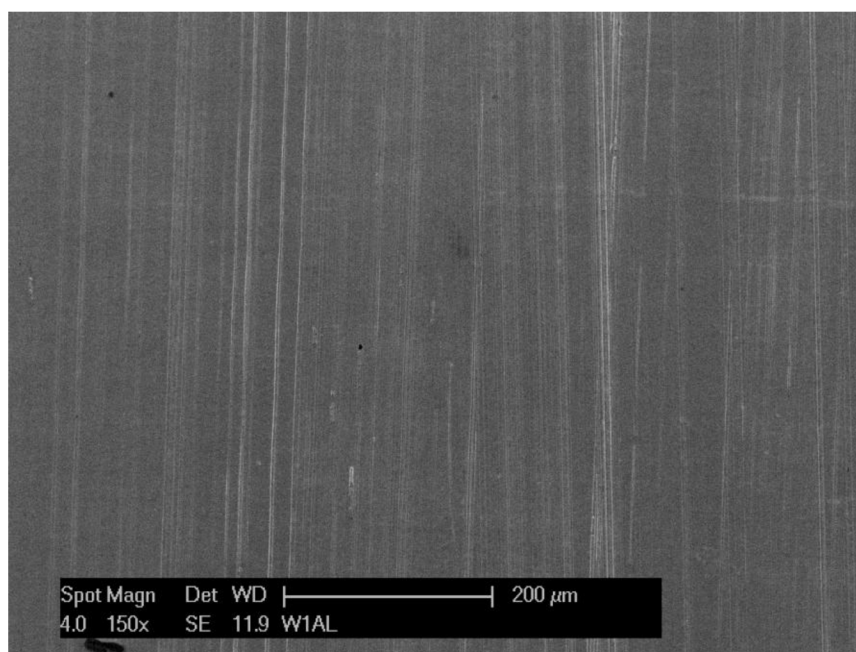
**Vzorek MD50**

Obr. 5.12 Vzorek MD50 (zvětšení 150x)

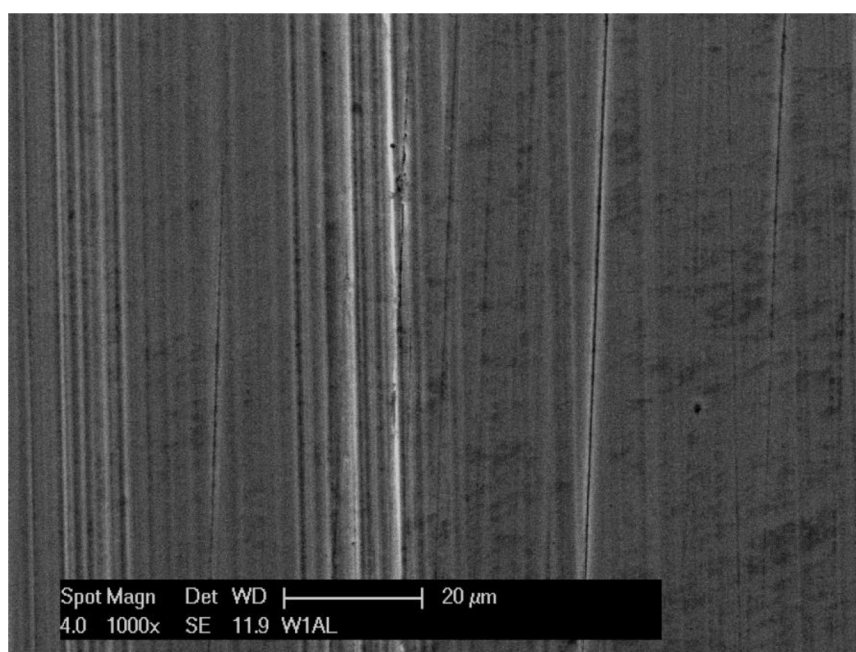


Obr. 5.13 Vzorek MD50 (zvětšení 1000x)

Na obr. 5.13 jsou patrné nepotvrzené náznaky tzv. přeloženin, které byly později na metalografickém výbrusu identifikovány jako lokální zpevněná vrstva. Viditelné stopy po novém nástroji MT3 na začátku jeho trvanlivosti pak měly větší hloubku, což se projevilo vyšší drsností povrchu.

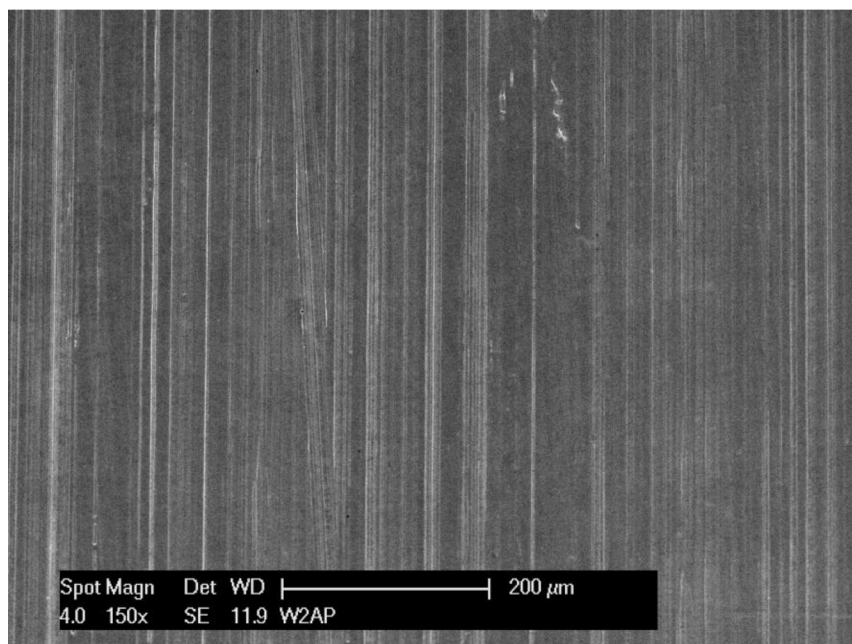
**Vzorek W1A**

Obr. 5.14 Vzorek W1A (zvětšení 150x)

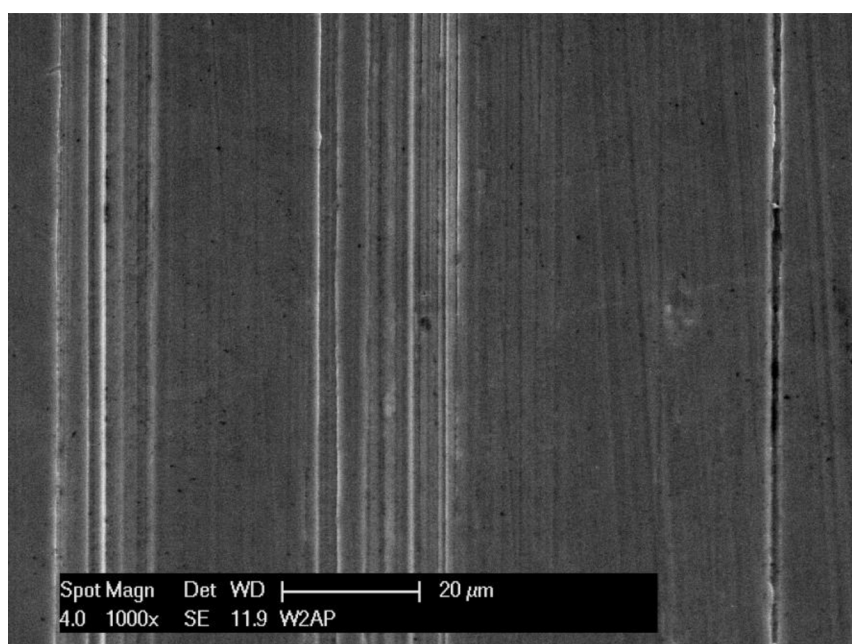


Obr. 5.15 Vzorek W1A (zvětšení 1000x)

Na obr. 5.14 a 5.15 je zachycen nástrojem viditelně vyhlazenější povrch s místy hlubšími stopami, které mohly být způsobeny hůře odcházející třískou. Tento stav povrchu po obrábění nástrojem MT3 uprostřed jeho trvanlivosti rovněž koresponduje s naměřenými nižšími hodnotami drsnosti oproti vzorkům, zhotovených novým nástrojem MT3 na začátku jeho trvanlivosti.

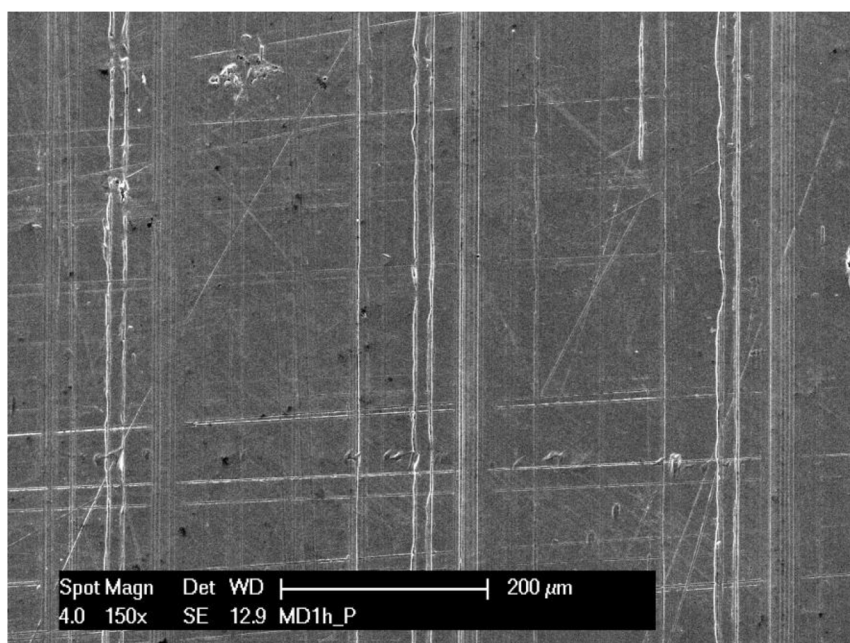
**Vzorek W2A**

Obr. 5.16 Vzorek W2A (zvětšení 150x)

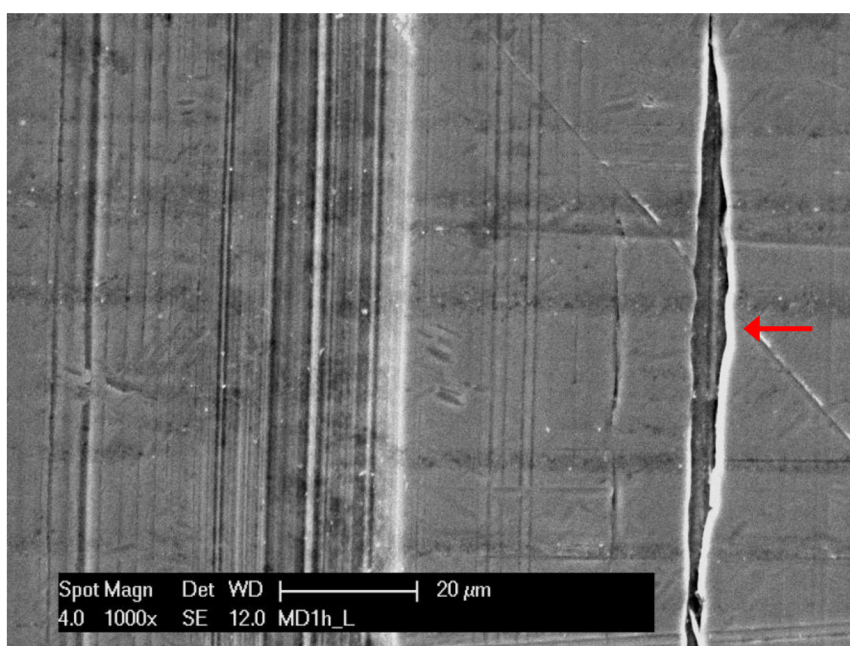


Obr. 5.17 Vzorek W2A (zvětšení 1000x)

Na obr. 5.16 a 5.17 je zachycen podobný stav povrchu po obrábění nástrojem MT3 na konci jeho trvanlivosti se stavem povrchu v předchozím případě, tedy obrobený nástrojem MT3 uprostřed jeho trvanlivosti. Na obou obrobených površích jsou viditelná jak vyhlazená místa, tak místy hlubší stopy. Podobnost těchto dvou povrchů se ukázala i při vyhodnocování dalších parametrů (viz. dále).

**Vzorek MD1h**

Obr. 5.18 Vzorek MD1h (zvětšení 150x)



Obr. 5.19 Vzorek MD1h (zvětšení 1000x)

Na obr. 5.19 je zachycena tzv. přeloženina, která byla následně identifikována i metalografickou analýzou příčného výbrusu. Dále jsou na obr. 5.18 rovněž zachyceny podélné stopy ve směru osy otvoru, tedy ve směru posuvu válečkovací hlavy.

### 5.3.5 Měření mikrotvrdomosti

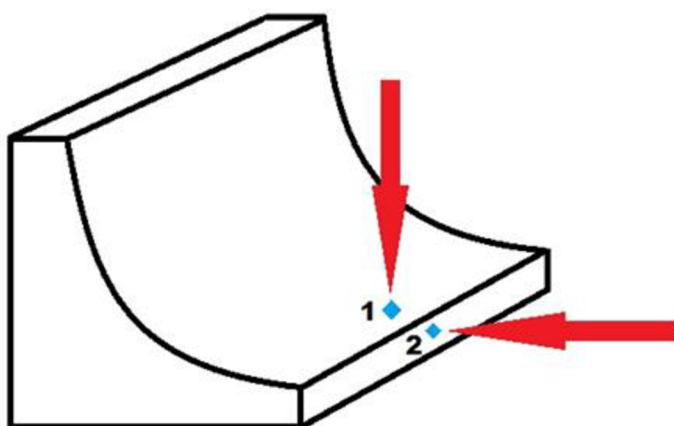
Pro hodnocení deformačního zpevnění povrchu obrobených otvorů byla měřena mikrotvrdomost povrchu (měřena kolmo na povrch), mikrotvrdomost základního materiálu a mikrotvrdomost ve dvou hloubkách pod obrobeným povrchem.

Měření probíhalo na mikrotvrdomoměru Walter Uhl VMHT pro měření tvrdosti dle Vickerse viz obr. 5.20.



Obr. 5.20 Mikrotvrdoměr Walter Uhl VMHT<sup>63</sup>

Měření mikrotvrdomosti povrchu vzorku je schematicky naznačeno na obr. 5.21 vtiskem č. 1. Měření mikrotvrdomosti základního materiálu a mikrotvrdomosti ve dvou hloubkách pod povrchem v příčném řezu je schematicky naznačeno vtiskem č. 2.



Obr. 5.21 Schematické vyznačení míst měření mikrotvrdomosti vzorku

### ***Mikrotvrđost povrchu a základního materiálu***

Měření mikrotvrđosti povrchu a základního materiálu probíhalo při zatížení  $F = 0,3 \text{ N}$ .

Při měření mikrotvrđosti povrchu byly na obrobeném povrchu provedeny tři vtisky (v tabulce uvedeny I, II a III), které byly rovnoměrně rozmístěny po celé délce měřeného vzorku. Naměřené hodnoty mikrotvrđostí a jejich průměrné hodnoty jsou uvedeny v tab. 5.6.

Tab. 5.6 Naměřené hodnoty mikrotvrđosti povrchu

Vzorek	Mikrotvrđost HV 0,3			
	I	II	III	průměr
<b>MD50</b>	451	472	448	457
<b>W1A</b>	465	458	402	442
<b>W2A</b>	571	656	544	590
<b>MD1h</b>	330	347	342	340

Z naměřených hodnot v tab. 5.6 vyplývá, že byla zjištěna vyšší hodnota mikrotvrđosti HV 0,3 u vzorku W2A. Toto zvýšení mohlo nastat v důsledku výraznějšího tváření a zpevnění povrchu při obrábění. Rovněž byla zjištěna nižší hodnota mikrotvrđosti u vzorku MD1h. Objasnění této nižší hodnoty mikrotvrđosti u vzorku MDh1 je provedeno dále.

Při měření mikrotvrđosti základního materiálu v příčném řezu byly provedeny rovněž tři vtisky rozmístěné po celé délce vzorku. Naměřené hodnoty mikrotvrđosti jsou uvedeny v tab. 5.7.

Tab. 5.7 Naměřené hodnoty mikrotvrđosti základního materiálu

Vzorek	Mikrotvrđost HV 0,3			
	I	II	III	průměr
<b>MD50</b>	426	426	420	424
<b>W1A</b>	432	458	432	441
<b>W2A</b>	426	420	432	426
<b>MD1h</b>	351	347	334	344

Z naměřených hodnot mikrotvrđosti základního materiálu v tab. 5.7 opět vyplývá zjištění výrazně nižší hodnoty u vzorku MDh1 v porovnání s ostatními vzorky. Tato odlišnost mohla být vyvolána místními heterogenitami vzniklými při tepelném zpracování polotovaru (viz. dále metalografická analýza).



Z porovnání výsledků měření mikrotvrlosti HV 0,3 uvedených v tab. 5.6 a 5.7 je patrné, že vystružování mělo na povrch zpevňující účinek. U vzorků W1A, MD50 a MD1h je zpevnění zanedbatelné. U vzorku W2A je zpevnění výrazné, a to o více jak 160 HV 0,3. Toto zpevnění je dokonce větší než v případě válečkovaného povrchu, kdy je do povrchu záměrně vnášena plastická deformace.

### ***Mikrotvrdot pod obrobeným povrchem měřená v příčném řezu***

V příčném směru dovozoval povrch (metalografický výbrus) použít nižší hodnoty zatížení. Proto byla volena hodnota zatížení  $F = 0,005$  N. Mikrotvrdot byla měřena v hloubkách 7  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$  pod obrobeným povrchem. Naměřené hodnoty mikrotvrdoti v těchto dvou hloubkách i s rozdílem hodnot jsou uvedeny v tab. 5.8.

Tab. 5.8 Naměřené hodnoty mikrotvrdoti pod povrchem

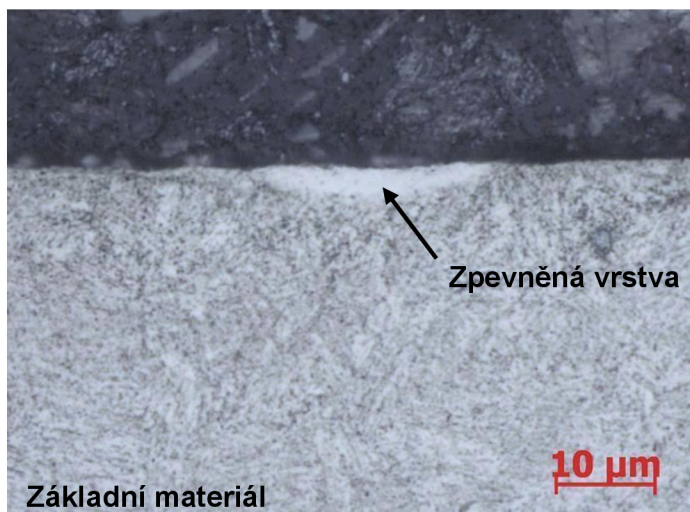
Vzorek	Mikrotvrdot HV 0,005 v hloubce 7 $\mu\text{m}$				Mikrotvrdot HV 0,005 v hloubce 50 $\mu\text{m}$				Rozdíl mikrotvr. HV 0,005
	I	II	III	průměr	I	II	III	průměr	
<b>MD50</b>	523	580	565	556	582	551	523	552	4
<b>W1A</b>	628	684	550	621	498	498	498	498	123
<b>W2A</b>	769	746	769	761	629	612	683	641	120
<b>MD1h</b>	405	475	513	464	387	396	413	399	66

Z naměřených hodnot mikrotvrdoti uvedených v tab. 5.8 vyplývá, že k největšímu rozdílu v mikrotvrdoti (největšímu zpevnění) mezi bezprostřední blízkostí povrchu (7  $\mu\text{m}$ ) a měřením v hloubce 50  $\mu\text{m}$  pod povrchem došlo u vzorků W2A a W1A. V obou případech shodně přibližně o 120 HV 0,005. K přibližně polovičnímu zpevnění obrobeného povrchu došlo u vzorku MD1h, který byl po vystružování ještě válečkován. Z tab. 5.8 je rovněž patrné, že k výraznému zvýšení deformačního zpevnění v povrchu obrobeného otvoru došlo již u vzorku W1A, tedy při použití opotřebovaného nástroje MT3 uprostřed jeho trvanlivosti.

### 5.3.6 Metalografická analýza příčného výbrusu

Ze vzorků byly vytvořeny metalografické výbrusy, které byly následně sledovány pod světelným mikroskopem ZEISS A1Z. Na metalografických výbrusech byly zaznamenány následující změny struktury v podobě zpevněné vrstvy a tzv. přeloženin.

#### Vzorek MD50



Obr. 5.22 Metalografický výbrus vzorku MD50

Zpevněná vrstva u vzorku MD50 na obr. 5.22 má lokální výskyt. Její tloušťka je výrazně proměnná. Tloušťka je až 5 μm a má charakteristický lehce „banánovitý“ tvar. Stopy po obrábění v příčném výbrusu mají ostrý průběh a hloubku okolo 0,5 μm.

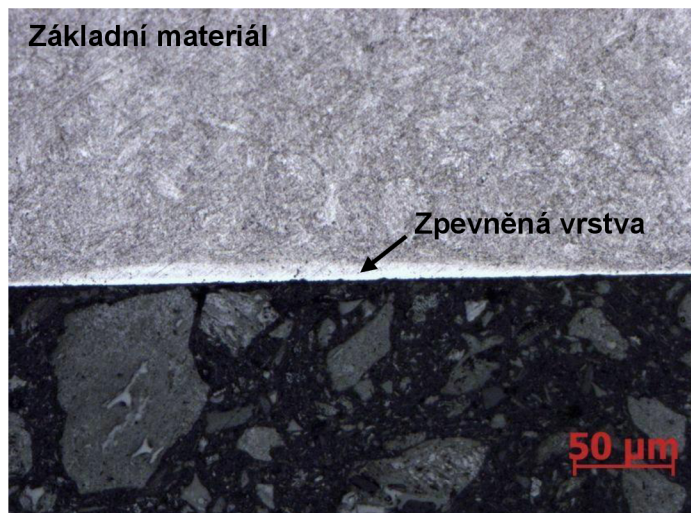
#### Vzorek W1A



Obr. 5.23 Metalografický výbrus vzorku W1A

Zpevněná vrstva u vzorku W1A na obr. 5.23 má spojitý charakter a téměř konstantní tloušťku mezi 1 – 1,8  $\mu\text{m}$ . Drážky v povrchu po obrábění mají hladký průběh a jsou mělké o hloubce 1  $\mu\text{m}$ .

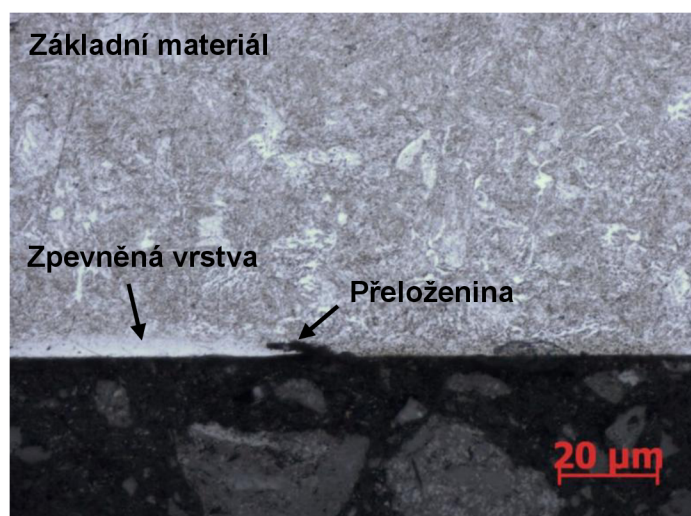
#### **Vzorek W2A**



Obr. 5.24 Metalografický výbrus vzorku W2A

Zpevněná vrstva u vzorku W2A na obr. 5.24 má spojitý charakter. Její tloušťka je nejčastěji mezi 1 – 1,8  $\mu\text{m}$ , na několika místech je výrazně zesílená až na více jak 10  $\mu\text{m}$ . Drážky po obrábění mají hladký i ostrý průběh a hloubku do 1  $\mu\text{m}$ .

#### **Vzorek MD1h**



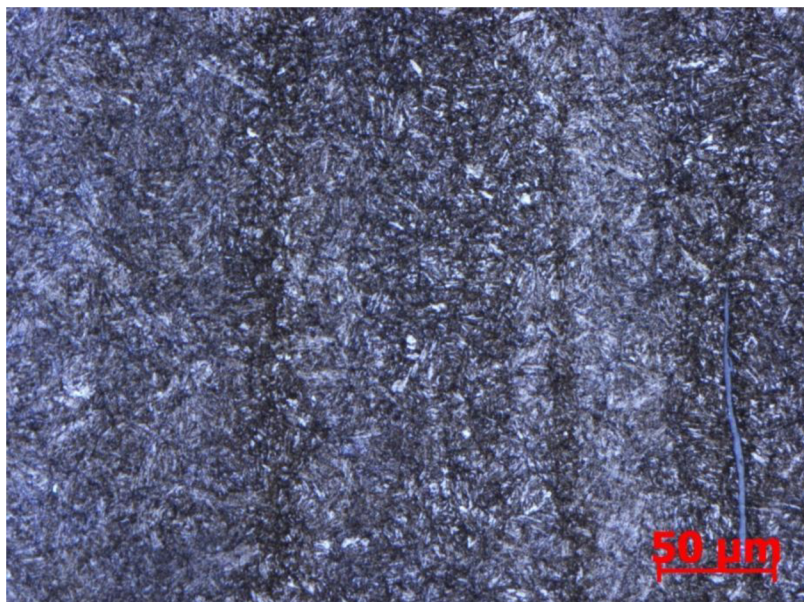
Obr. 5.25 Metalografický výbrus vzorku MD1h

Zpevněná vrstva u vzorku MD1h na obr. 5.25 má lokální charakter s proměnnou tloušťkou až 3,5  $\mu\text{m}$ . Drážky po obrábění mají hladký i ostrý průběh a hloubku v rozmezí 1 – 1,8  $\mu\text{m}$ . Na výbrusu byly nalezeny dobře patrné tzv. přeloženiny zasahující do hloubky až 3,5  $\mu\text{m}$ . Přítomnost těchto přeloženin byla potvrzena i z pozorování povrchu pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu. Přeloženiny vznikly zřejmě hnutím plasticky deformovaného materiálu při válcování, kdy v místě nerovnosti – rýhy došlo k lokálnímu přehnutí. Tyto přeloženiny jsou nebezpečné kvůli možné iniciaci únavového poškození, případně i změně rozměru otvoru při provozu.

### **Rozdílná struktura základního materiálu vzorků**

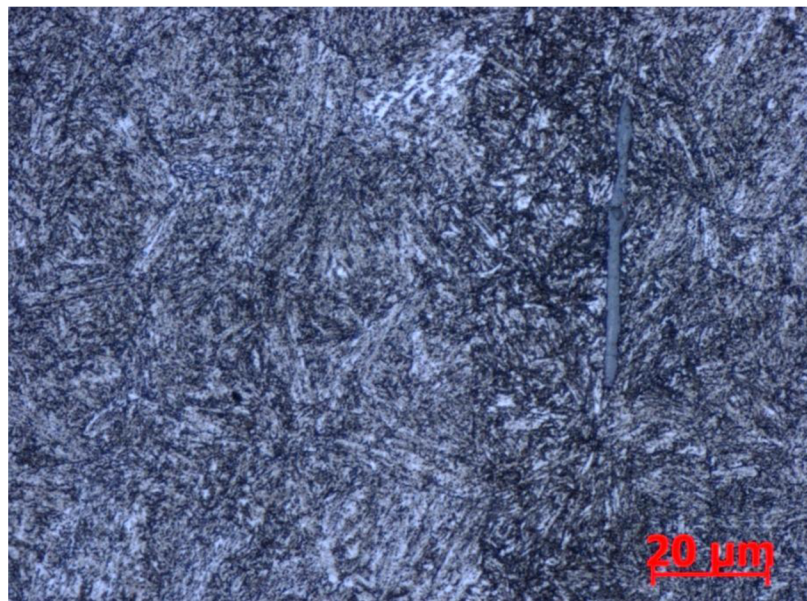
Z metalografické analýzy vyplynula také důležitá informace ohledně orientace sulfidických vměstků. V jednotlivých vzorcích nebyl zachován jejich souhlasný směr, což napovídá o tom, že vzorky byly jednou obráběny (vystružovány) kolmo a jednou v podélném směru hlavních deformačních toků v polotovaru. U vzorků W2A, W1A a MD50 (vzorky zhotovené při experimentu) vedou sulfidy kolmo k povrchu, zatímco u vzorku MD1h (dodaného ze Sauer Danfoss) jsou rovnoběžně s obráběným povrchem. Proto bylo dodatečně znovu provedeno stanovení tvrdosti HV0,3 a rovněž byla provedena širší metalografická studie základního materiálu polotovaru.

Při měření mikrotvrdosti měly ostatní vzorky zhotovené při experimentu shodnou tvrdost v oblasti základního materiálu, proto byl pro porovnání použit vzorek MD 50.



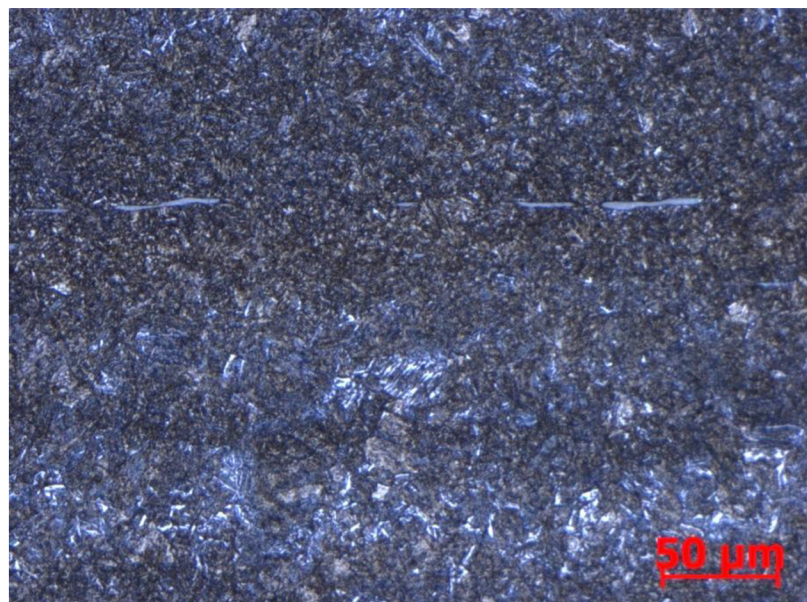
Obr. 5.26 Struktura základního materiálu vzorku MD50

Na obr. 5.26 je patrný směr tváření ve směru příčném proti ose vystruženého otvoru (na všech snímcích osa otvoru vodorovně). Vpravo dole je zachycen sulfidický vměstek, který charakterizuje hlavní deformační tok materiálu. Stejně byla orientována i struktura u vzorků W1A a W2A.



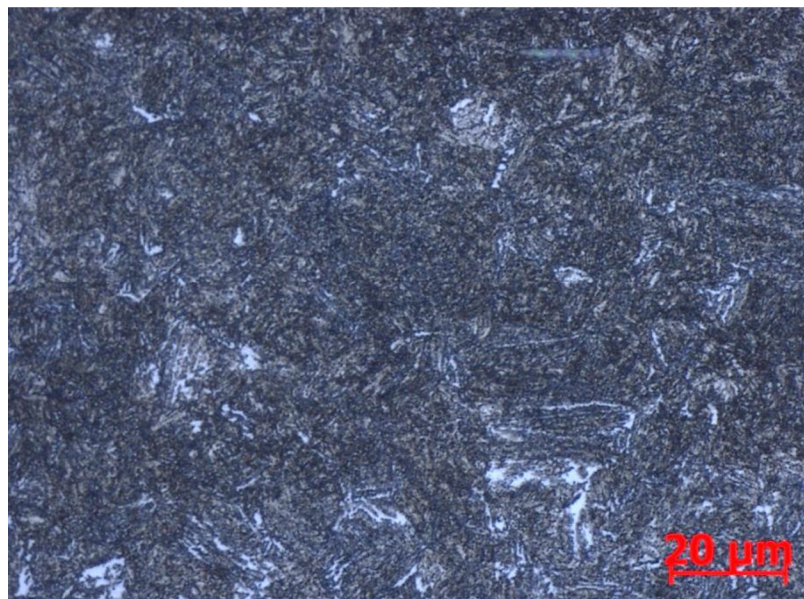
Obr. 5.27 Struktura základního materiálu vzorku MD50 při větším zvětšení

Detailnější obr. 5.27 zachycuje nejen deformaci sulfidického vměstku, ale také bainitický stav zušlechtěné struktury.



Obr. 5.28 Struktura základního materiálu vzorku MD1h

Již na první pohled je z obr. 5.28 zřejmé, že vzorek MD1h má odlišnou strukturu. Struktura je místy tvořena perlitem, který odpovídá základnímu stavu polotovaru oceli 42CrMo4. Další odlišností je směr osy vystruženého otvoru, který je u tohoto vzorku ve směru hlavního toku tvářeného polotovaru.



Obr. 5.29 Struktura základního materiálu vzorku MD1h při větším zvětšení

Detailnější obr. 5.29 potvrzuje strukturní odlišnost, která spočívá v nedokonalém prokalení materiálu. Vzorek byl příliš krátkou dobu na austenitizační teplotě, popř. nebyl zakalen požadovanou rychlostí. Tento odlišný strukturní stav potvrdily i opětovně zjištěné hodnoty tvrdosti HV0,3.

Při návrhu experimentu byl předpoklad, že použitý materiál polotovaru pro obrábění otvorů, ocel 42CrMo4 zušlechtěna na pevnost 1000 MPa, bude totožný jako materiál polotovaru využívaný pro výrobu válců hydromotorů ve firmě Sauer Danfoss. Výše uvedené zjištění ale prokázaly, že materiál vzorku MD1h, který byl odebrán z válce hydromotoru, nebyl správně zakalen a proto i zkoušky obrábění ostatních vzorků v experimentu (MD50, W1A a W2A) probíhaly za odlišných podmínek. Toto ovšem nemá vliv na vzájemné porovnání vzorků MD50, W1A a W2A, u kterých byly podmínky stejné. Další odlišností, která může mít vliv na dosažené výsledky, je nedodržený směr obrábění ke směru hlavní deformace polotovaru opět při vzájemném porovnání skupiny vzorků MD50, W1A, W2A se vzorkem MD1h. Z uvedených důvodů nelze relevantně srovnávat výsledky hodnocení skupiny vzorků MD50, W1A, W2A s výsledkem hodnocení vzorku MD1h.

## ZÁVĚR

V experimentální části této práce byl řešen vliv speciálního vystružovacího nástroje MT3 firmy HAM-FINAL na integritu povrchu obrobených otvorů. Firma HAM-FINAL se zabývá převážně výrobou speciálních nástrojů, které jsou vyvíjeny podle konkrétních požadavků zákazníka. V případě velice úzkého okruhu zákazníků s obzvláště vysokými požadavky na kvalitu otvorů se v současné době objevuje snaha o propracovanější a detailnější hodnocení kvality povrchu formou hodnocení integrity povrchu. Tyto skutečnosti vedly k návrhu experimentu a jeho vyhodnocení v podobě hodnocení integrity povrchu zkušebních otvorů, obrobených nástrojem MT3 v průběhu jeho trvanlivosti. Integrita povrchu byla hodnocena z hlediska kruhovitosti, válcovitosti, drsnosti povrchu, kontroly defektů povrchu pod elektronovým mikroskopem, mikrotvrdosti a metalografické analýzy příčného výbrusu. Pro kompletnost byl také měřen průměr vystružených otvorů.

Výsledky měření rozměru otvorů ukázaly očekávané zmenšení rozměru u zkušebních otvorů, zhotovených opotřebeným nástrojem MT3 uprostřed jeho trvanlivosti (délka vystruženého otvoru  $L_T = 58,932$  m) a zkušebních otvorů, zhotovených opotřebeným nástrojem MT3 na konci jeho trvanlivosti (délka vystruženého otvoru  $L_T = 117,864$  m). Konkrétní hodnoty průměrů všech měřených otvorů se pohybovaly v rozsahu 17,8100 - 17,8209 mm.

Výsledky měření kruhovitosti a válcovitosti ukázaly nejnižší hodnoty u zkušebních otvorů, zhotovených neopotřebeným nástrojem MT3 na začátku jeho trvanlivosti. Zkušební otvory, zhotovené opotřebeným nástrojem MT3 uprostřed jeho trvanlivosti a na konci jeho trvanlivosti vykazovaly nárůst kruhovitosti a válcovitosti. Konkrétně se naměřené průměrné hodnoty kruhovitosti u všech otvorů pohybovaly v rozsahu 3,2  $\mu\text{m}$  - 4,4  $\mu\text{m}$  a hodnoty válcovitosti v rozsahu 6,0  $\mu\text{m}$  - 8,9  $\mu\text{m}$ .

Výsledky měření parametrů drsnosti povrchu  $R_a$  a  $R_z$  ukázaly nejvyšší hodnoty drsnosti povrchu u zkušebních otvorů, zhotovených neopotřebeným nástrojem MT3 na začátku jeho trvanlivosti. Zkušební otvory, zhotovené opotřebeným nástrojem MT3 uprostřed a na konci jeho trvanlivosti vykazovaly nižší hodnoty. Konkrétně se průměrné hodnoty parametru  $R_a$  pohybovaly v rozsahu 0,1179 - 0,1735  $\mu\text{m}$  a průměrné hodnoty parametru  $R_z$  v rozsahu 0,7544 - 0,9847  $\mu\text{m}$ . Z tohoto měření je třeba vyzdvihnout nejvyšší naměřené hodnoty parametru drsnosti povrchu  $R_a$ , které dosahovaly hodnot pod 0,2  $\mu\text{m}$ , což jsou hodnoty jinak dosahované technologií broušení. Tyto hodnoty ukazují aktuální pokroky v oblasti špičkových vystružovacích nástrojů, které v dnešní době umožňují zmíněné broušení otvorů nahradit.

Ze zkušebních otvorů byly pro další hodnocení odebrány vzorky, které byly ještě doplněny o vzorek, který byl odebrán z válce hydromotoru vyrobeného ve firmě Sauer Danfoss. Tento vzorek byl do hodnocení mikrotvrdosti, metalografického hodnocení a hodnocení obrobeného povrchu pod rastrovacím elektronovým mikroskopem zařazen pro porovnání stavu obrobeného povrchu na reálném hydromotoru v praxi, kdy po vystružování ještě následuje válečkování.

Výsledky měření mikrotvrdosti (deformačního zpevnění) prokázaly zpevňující účinek vystružování na povrch zhotovených otvorů. K největšímu zpevnění došlo u vzorků, které byly zhotoveny opotřebeným nástrojem MT3 uprostřed a na konci

jeho trvanlivosti. U těchto vzorků došlo k nárustu mikrotvrlosti v obou případech přibližně o 120 HV 0,005. Z naměřených hodnot rovněž vyplývá, že k výraznému deformačnímu zpevnění obrobených vzorků došlo již při použití opotřebeného nástroje MT3 uprostřed jeho trvanlivosti. U vzorku, který byl odebrán z hydromotoru a u kterého se vlivem plastické deformace při válečkování očekávalo rovněž značné deformační zpevnění, bylo překvapivě naměřeno deformační zpevnění pouze přibližně poloviční hodnoty.

Výsledky metalografické analýzy příčných výbrusů vzorků ukázaly změny ve struktuře povrchové vrstvy zhotovených otvorů. U vzorku z otvoru, zhotoveného neopotřebeným nástrojem MT3 na začátku jeho trvanlivosti, byla zpevněná vrstva pouze lokálního výskytu s výrazně proměnlivou tloušťkou až 5  $\mu\text{m}$ . U vzorku z otvoru, zhotoveného opotřebeným nástrojem MT3 uprostřed jeho trvanlivosti, měla zpevněná vrstva spojitý charakter a téměř konstantní tloušťku mezi 1 - 1,8  $\mu\text{m}$ . U vzorku z otvoru, zhotoveného opotřebeným nástrojem MT3 na konci jeho trvanlivosti, měla zpevněná vrstva opět spojitý charakter s tloušťkou nejčastěji mezi 1 - 1,8  $\mu\text{m}$ , na několika místech byla však výrazně zesílená až na více jak 10  $\mu\text{m}$ . U vzorku, který byl odebrán z hydromotoru, měla zpevněná vrstva lokální charakter s proměnnou tloušťkou až 3,5  $\mu\text{m}$ . Na výbrusu tohoto vzorku byly dále nalezeny dobře patrné tzv. „přeloženiny“ zasahující do hloubky až 3,5  $\mu\text{m}$ . Přítomnost těchto přeloženin byla potvrzena i pozorováním povrchu pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu.

### **Návrhy pro další výzkum**

Je třeba zmínit, že v této práci realizovaný experiment a jeho vyhodnocení byly prvním krokem firmy HAM-FINAL při řešení integrity povrchu otvorů, zhotovených jejich nástroji. Z poznatků zjištěných v průběhu experimentální části této práce lze pro další výzkum doporučit obrobení zkušebních otvorů přímo do polotovaru získaného z firmy Sauer Danfoss, kde se jak již bylo zmíněno vystružovací hlavice MT3 uplatňuje na výrobu válců hydromotorů. Ze zjištěných poznatků v průběhu práce totiž vyplynulo, že se lišil základní materiál vzorků obráběných v experimentu pouze vystružováním a vzorku válce hydromotoru, dodaného z firmy Sauer Danfoss, který byl dokončen válečkováním. I když se jednalo v obou případech o materiál polotovaru 42CrMo4 (ČSN 15 142) s pevností 1000 MPa, tak se později prokázaly odlišnosti jak při měření mikrotvrlosti vzorků, tak při metalografické analýze příčného výbrusu vzorků. Zhotovením všech zkušebních otvorů v jednom identickém polotovaru dodaného přímo z firmy Sauer Danfoss by se zmíněným odlišnostem předešlo.

Pro rozšíření hodnocených parametrů integrity povrchu zkušebních otvorů by bylo dále možno zařadit měření zbytkových napětí a pro ucelenější představu o integritě povrchu také doplnit čistě funkční zkoušky, například aplikovat tzv. metodu Fretting test, která by do jisté míry napodobovala podmínky, které jsou u reálných válců hydromotorů v provozu – abrazivní a adhezivní otěr. U těchto metod pro hodnocení integrity povrchu je ale třeba při plánování experimentu počítat s vyšší finanční náročností.

Do budoucna plánuje firma HAM-FINAL pokračovat v experimentálních pracích s cílem sledovat funkční vlastnosti povrchu otvorů, obrobených hlavicemi MT3.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BUMBÁLEK, L., BUMBÁLEK, B., MAZAL, P. a LIŠKUTÍN, P., *Vlastnosti povrchové vrstvy a jejich vliv na únavu*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-7204-373-0.
2. BUMBÁLEK, Bohumil. *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci*. [online]. [vid. 2011-10-21]. VUT v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: [http://gps.fme.vutbr.cz/STAH\\_INFO/2512\\_Bumbalek.pdf](http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf)
3. JAWAHIR, I. S., BRINKSMEIER, E., M'SAOUBI, R., ASPINWALL, D. K., OUTEIRO, J. C., MEYER, D., UMBRELLO, D. and JAYAL, *Surface integrity in material removal processes: Recent advances CIRP*. CIRP Annals – Manufacturing Technology 60, 2011.
4. GRIFFITHS, Brian. *Manufacturing Surface Technology: Surface Integrity and Functional Performance*. 1st Edition. London: Penton Press, 2001. ISBN 1-8571-8029-1.
5. MÁDL, Jan. *Jakost obráběných povrchů*. 1. vyd. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, ÚTRV, 2003. ISBN 80-7044-539-4.
6. KŘÍŽ, Antonín. *Vliv povrchu na užité vlastnosti výrobku*. [online]. [vid. 2011-10-19]. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/download/kriz\\_prispevek\\_technologie\\_2011.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/download/kriz_prispevek_technologie_2011.pdf)
7. BÁTORA, Bohumil a Vladimír VASILKO. *Obrobené povrchy: Technologická dědičnost, funkčnost*. 1. vyd. Trenčín: Trenčianská univerzita, 2000. ISBN 80-88914-19-1.
8. COTELL C. M., J. A. SPRAGUE and F. A. SMIDT. *ASM Handbook-Volume 5: Surface Engineering*. ASM International, 1994. ISBN 978-0871703842.
9. CHLADIL, Josef a Erich MOUKA. *Teorie obrábění*. 3. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1989.
10. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 1.část*. [online]. [vid. 2011-10-19]. VUT v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf)
11. NECKÁŘ, Ferdinand a Ivo KVASNIČKA. *Vybrané statě z úběru materialu*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1991.
12. DAVIM, J. Paulo. *Machining: Fundamentals and Recent Advances*. 2nd Edition. Springer, 2008. ISBN 978-1-84800-212-8
13. HRUBÝ, Jindřich. *Teorie obrábění*. 2. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1988.
14. MÁDL, Jan. *Integrita povrchu po obrábění*. [online]. [vid. 2011-10-03]. Dostupné z: <http://web.tuke.sk/fvtpo/journal/pdf08/2-str-05-07.pdf>
15. ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.

16. NOVÁK, Zdeněk. *Zvyšování kvality hodnocení struktury povrchu*. MM Průmyslové spektrum [online]. 16. 11. 2004, [vid. 2012-02-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zvysovani-kvality-hodnoceni-struktury-povrchu.html>.
17. NOVÁK, Zdeněk. *Zvyšování kvality hodnocení struktury povrchu*. MM Průmyslové spektrum [online]. 15. 12. 2004, [vid. 2012-02-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zvysovani-kvality-hodnoceni-struktury-povrchu-2.html>
18. BUMBÁLEK, B., V. ODVODY a B. OŠŤÁDAL. *Drsnost povrchu*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989.
19. HOMMEL. *Drsnost povrchu, úchyly tvaru a polohy dle DIN ISO*. [online]. [vid. 2011-10-02]. Dostupné z: <http://www.hommel-etamic.cz/sites/default/files/download/HOMMEL-CS-plakat-drsnost-uchyly-tvaru.pdf>
20. NOVÁK, Zdeněk. *Prostorová charakteristika textury povrchu*. MM Průmyslové spektrum [online]. 7. 10. 2009, [vid. 2012-02-19]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prostorova-charakteristika-textury-povrchu.html>
21. NOVÁK, Zdeněk. *Prostorové měření a hodnocení textury povrchu přístroji Taylor Hobson Ltd*. [online]. [vid. 2012-01-26]. Dostupné z: [http://gps.fme.vutbr.cz/STAH\\_INFO/2\\_Novak\\_3D\\_mereni\\_textury.pdf](http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2_Novak_3D_mereni_textury.pdf)
22. SVOBODA, Emil. *Přednosti prostorového hodnocení textury povrchu v praxi*. MM Průmyslové spektrum [online]. 7. 10. 2009, [vid. 2012-02-19]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prednosti-prostoroveho-hodnoceni-textury-povrchu-v-praxi.html>
23. PŘIKRYL, Zdeněk. *Teorie obrábění*. 3. vyd. Praha: SNTL, 1982.
24. DAVIM, J. Paulo. *Surface Integrity in Machining*. 1st Edition. Springer, 2010. ISBN 978-1-84882-873-5
25. TSCHÄTSCH, Heinz. *Aplied Machining Technology*. 1st Edition. Springer. 2009. ISBN 978-3-642-01006-426.
26. MÁDL, J., KAVKA, J., VRABEC M. a DVOŘÁK, R. *Technologie obrábění 1*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 2000. ISBN 80-01-02-091-6.
27. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.
28. NOVOVIC, D., DEWES, R. C., ASPINWALL, D. K., VOICE, W. and BOWEN, P. *The effect of machined topography and integrity on fatigue life*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 44. 2004
29. SMITH, Graham T. *Cutting tool technology*. 1st Edition. Springer, 2008. ISBN 978-1-84800-204-3.
30. PLUHAŘ, Jaroslav. *Nauka o materiálech*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989.
31. MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1990.

32. BUMBÁLEK, Bohumil. *Fyzikální podstata řezání*. [online]. [vid. 2011-11-09]. VUT v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/fyz\\_pods\\_rez/Opora05\\_Fyzikalni\\_podstata\\_rezani.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/fyz_pods_rez/Opora05_Fyzikalni_podstata_rezani.pdf)
33. DOLEŽAL, Pavel a Bohumil PACAL. Hodnocení mikrotvrdoti struktur materiálů. [online]. [vid. 2011-12-02]. VUT v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/hmsm/Mikrotvrdot.pdf>
34. MEDLIN, Dana and Howard KUHN. *ASM Handbook-Volume 08: Mechanical Testing and Evaluation*. ASM International, 2000. ISBN 0-87170-389-0.
35. KOUŘIL, Karel a Vladimír VANĚK. *Dokončovací operace vystružování*. MM Průmyslové spektrum [online]. 14. 6. 2006, [vid. 2012-01-25]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/dokoncovaci-operace-vystruzovani.html>
36. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologické parametry vystružovacích nástrojů*. Strojírenská technologie: Časopis pro vědu, výzkum a výrobu. 4. roč. č. 2. Ústí nad Labem: ÚJEP, 2001. ISSN 1211-4162.
37. VESKA, Karel. *Řezné nástroje pro obrábění dř.* 1. vyd. Praha: SNTL, 1963.
38. CHLADIL, Josef. *Přípravky a nástroje: 2. část obrábění*, 3. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1992.
39. GARANT. *Zerspanungshandbuch*. ISBN 3-00-016882-6. Dostupné také z: [http://www.hoffmann-group.com/fileadmin/catalog/de/zhb\\_kat39/web\\_pdf/zerspanungshandbuch\\_k39\\_de.pdf](http://www.hoffmann-group.com/fileadmin/catalog/de/zhb_kat39/web_pdf/zerspanungshandbuch_k39_de.pdf)
40. SOVA, František. *Technologie obrábění a montáže*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1998. ISBN 80-7082-449-2.
41. GÜHRING, *Reibahlen und Senker*. [online]. [vid. 2011-10-02]. Dostupné z: [http://www.guehring.de/service/werbemittel/data/Reibahlen%20und%20Senker\\_2007.pdf](http://www.guehring.de/service/werbemittel/data/Reibahlen%20und%20Senker_2007.pdf)
42. TECHNIK, Radim. *Vystružovací nástroje s břity z cermetu a PVD povlakem*. Brno 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 99 s., příloh 11. Ing. Karel Kouřil, Ph.D.
43. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 2. část*. [online]. [vid. 2012-01-19]. VUT v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-2cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf)
44. KOMET GROUP. *KOMGUIDE – Technická příručka: Vrtání, Řezání závitů, Vystružování*. [online]. [vid. 2011-12-13]. Dostupné z: [http://www.kometgroup.com/pdf/KomGuide\\_CZ.pdf](http://www.kometgroup.com/pdf/KomGuide_CZ.pdf)
45. FIALA, Stanislav a Karel KOUŘIL. *Moderní nástroje pro vystružování*. In *Moderní výrobní technologie pro 21. století*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN: 978-80-214-3914- 6.

46. KOUŘIL, Karel a Vladimír VANĚK. *Obrábění přesných děr v litinách*. MM Průmyslové spektrum [online]. 15. 4. 2009, [vid. 2012-01-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-presnych-der-v-litinach.html>
47. FIALA, Stanislav a Karel KOUŘIL. *Moderní nástroje pro dokončování děr*. MM Průmyslové spektrum [online]. 25. 4. 2007, [vid. 2012-02-16]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-nastroje-pro-dokoncovani-der.html>
48. KOUŘIL, Karel. *Unikátní vystružovací nástroje*. MM Průmyslové spektrum [online]. 20. 9. 2011, [vid. 2012-01-10]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/unikatni-vystruzovaci-nastroje.html>
49. HAM-FINAL. Katalog produktů: Výstružníky.
50. HAM-FINAL. *O firmě*. ham-final.cz. [online]. [vid. 2011-11-08]. Dostupné z: [http://www.ham-final.cz/?page=o\\_firme](http://www.ham-final.cz/?page=o_firme)
51. MAPAL. *MAPAL Competence – Reaming and Fine Boring*. [online]. [vid. 2011-12-06]. Dostupné z: [http://www.mapal.com/fileadmin/00\\_PDF-Dateien/Kataloge/en/MAPAL\\_Competence\\_Reaming\\_Fine\\_Boring\\_en.pdf](http://www.mapal.com/fileadmin/00_PDF-Dateien/Kataloge/en/MAPAL_Competence_Reaming_Fine_Boring_en.pdf)
52. ZEMČÍK, Oskar. *Nástroje a přípravky pro obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-214-2336-6.
53. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Výrobní technologie 2: Obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-214-2189-4.
54. ČSN 41 5142. *Ocel 15 142 Cr – Mo*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
55. ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3: Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-7183-337-1.
56. ČMIEL, Milan. *Vývoj nástrojů s PKD, CVD vrstvou a CVD povlakem pro dokončování děr*. Brno 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 80 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Kouřil, Ph.D.
57. BECK. *Gesamtkatalog: Mehrschneidenreibahlen und Senker*. [online]. [vid. 2012-02-19]. Dostupné z: [http://www.august-beck.de/files/veroeff/BECK\\_Gesamtkatalog\\_2011.pdf](http://www.august-beck.de/files/veroeff/BECK_Gesamtkatalog_2011.pdf)
58. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
59. FIALA, Stanislav a Petr HLADÍK. *Cermetové výstružníky*. MM Průmyslové spektrum [online]. 14. 4. 2004, [vid. 2011-11-25]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/cermetove-vystruzniki.html>
60. Sandvik Coromant. *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. 1. vyd. Praha: Scientia, s.r.o, 1997. ISBN 91-972299-4-6.
61. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. 1. vyd. Praha: MM Publishing, s.r.o., 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.

- 62.** LUČANÍK, Aleš. *Aplikace vystružovacích nástrojů s břity z cermetu a PVD povlakem*. Brno 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 72 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Kouřil, Ph.D.
- 63.** WALTER UHL. *UHL VMHT Microhardness Tester*. [online]. [vid. 2012-03-11]. Dostupné z:  
<http://www.walteruhl.com/rokdownloads/Downloads/Brochures/Microhardness%20Testers/UHL%20Microhardness%20Testers%20VMHT.pdf>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

<b>Symbol/Zkratka</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
BCC	[-]	krychlová prostorově středěná krystalická mřížka
D	[mm]	jmenovitý průměr vystružovaného otvoru
El <sub>D</sub>	[mm]	dolní mezní úchylka průměru otvoru
El <sub>V</sub>	[mm]	dolní mezní úchylka průměru výstružníku
ES <sub>D</sub>	[mm]	horní mezní úchylka průměru otvoru
ES <sub>V</sub>	[mm]	horní mezní úchylka průměru výstružníku
F	[N]	zkušební zatížení
FCC	[-]	krychlová plošně středěná krystalická mřížka
HCP	[-]	šesterečná krystalická mřížka
HK	[-]	mikrotvrdost podle Knoopa
HMo	[-]	mikrotvrdost základního materiálu
HMz	[-]	mikrotvrdost povrchu
HSC	[-]	vysokorychlostní obrábění
HV	[-]	mikrotvrdost podle Vickerse
HV <sub>Ms</sub>	[-]	mikrotvrdost na povrchu
HV <sub>Mz</sub>	[-]	mikrotvrdost základního materiálu
L	[mm]	celková dráha pro průchozí otvor
L <sub>T</sub>	[m]	délka vystruženého otvoru
Mo <sub>2</sub> C	[-]	karbid molybdenu
PKD	[-]	polykrystalický diamant
PKNB	[-]	polykrystalický kubický nitrid bóru
Ra	[μm]	průměrná aritmetická úchylka profilu
Re	[MPa]	mez kluzu
Rk	[μm]	základní hloubka
Rku	[-]	špičatost profilu
Rm	[MPa]	mez pevnosti
Rmr	[%]	nosný podíl
Rp	[μm]	výška největšího výstupku
Rpk	[μm]	redukovaná výška špiček
Rsk	[-]	šikmost profilu
Rt	[μm]	celková výška profilu
Rv	[μm]	hloubka nejnižší prohlubně
Rvk	[μm]	redukovaná hloubka rýh
Rz	[μm]	největší výška profilu
SK	[-]	slinutý karbid
T	[mm]	tolerance průměru otvoru
T	[min]	trvanlivost nástroje
TiC	[-]	karbid titanu
TiN	[-]	nitrid titanu

<b>Symbol/Zkratka</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
Ti(C,N)	[-]	karbonitrid titanu
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička
WC	[-]	karbid wolframu
$a_p$	[mm]	šířka záběru ostří
$b_\alpha$	[mm]	šířka fazetky
$d$	[mm]	aritmetický průměr dvou délek úhlopříček $d_1, d_2$
$d_1, d_2$	[mm]	úhlopříčky vtisku
$f_{ot}$	[mm]	posuv na otáčku nástroje
$f_z$	[mm]	posuv na zub
$h$	[mm]	tloušťka třísky
$h_{Dmin}$	[mm]	minimální hodnota jmenovité tloušťky řezu
$l$	[mm]	tloušťka obráběného dílce
$l_a$	[mm]	dráha náběhu
$l_b$	[mm]	dráha přeběhu
$l_n$	[mm]	vyhodnocovaná délka
$l_r$	[mm]	základní délka
$l_T$	[m]	dráha řezu
$n$	[ $\text{min}^{-1}$ ]	otáčky nástroje
$p$	[mm]	přídavek na průměr otvoru
$r_\epsilon$	[mm]	Poloměr špičky nástroje
$r_n$	[mm]	zaoblení řezné hrany
$t_{AS}$	[min]	jednotkový strojní čas
$v_c$	[ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	řezná rychlost
$v_e$	[ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	rychlost řezného pohybu
$v_f$	[ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	posuvová rychlost
$z$	[-]	počet zubů nástroje
$\alpha_o$	[°]	nástrojový ortogonální úhel hřbetu
$\alpha_p$	[°]	nástrojový zadní úhel čela
$\gamma_o$	[°]	nástrojový ortogonální úhel čela
$\gamma_p$	[°]	nástrojový zadní úhel čela
$\eta$	[°]	úhel výslednice řezné rychlosti
$\kappa$	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
$\kappa_r$	[°]	nástr. ortogonální úhel nastavení vedlejšího ostří
$\sigma_{zb}$	[MPa]	zbytkové napětí
$\sigma_c$	[MPa]	mez únavy
$\varphi$	[%]	stupeň zpevnění

**SEZNAM PŘÍLOH**

**Příloha 1 – Snímky opotřebení vystružovacích hlavic MT3**

**Příloha 2 – Záznam z měření průměru, kruhovitosti a válcovitosti vzorku MD50**

**Příloha 3 – Záznam z měření drsnosti povrchu vzorku MD50**